



# REVISTA MILITAR de CIÊNCIA e TECNOLOGIA

Versão impressa: ISSN 0102-3543

Volume XXXIX - 3º Trimestre de 2022

## ENGENHARIA MILITAR

**Combatentes da Tecnologia,  
Conjugando Saber e Valéria**

Desenvolvimento de um sistema de pulverização catódica com fonte de radiofrequência assistido por campos magnéticos para produção de filmes finos – Pág 5

Análise de Características Topológicas Impactantes para a Alocação de Controladores em uma Rede SD-WAN: caso RNP – Pág 14

Tabuleiro em material compósito de fibra de vidro e resina para pontes temporárias – Pág 27

Uso de blockchain no controle e rastreabilidade de acesso a dados armazenados em nuvem – Pág 39

Aplicação da distribuição de Gumbel para valores extremos de precipitação em municípios com dados de chuva em todo Brasil – Pág 50

Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: Abordagem com Recurso à Aprendizagem Automática e Dados de Observação da Terra – Pág 111

Estudo da densificação e formação de fases de cerâmicas de alumina dopadas com nióbia e fluoreto de lítio. – Pág 119

Produção e caracterização de filmes de MoO<sub>3</sub> para aplicação photocatalítica na região visível do espectro solar – Pág 126

Algoritmo de alinhamento em movimento para um sistema de navegação inercial do tipo strapdown – Pág 134

Ensaio da estimativa da topografia do nível médio do mar local em marégrafos da costa brasileira – Pág 153





## REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

COMANDANTE DO EXÉRCITO:

Gen Ex Paulo Sérgio Nogueira de Oliveira

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA:

Gen Ex Guido Amin Naves

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO E CULTURA DO EXÉRCITO:

Gen Ex André Luis Novaes Miranda

DIRETOR DA BIBLIOTECA DO EXÉRCITO:

Cel Art Eduardo Biserra Rocha

COMANDANTE DO INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA:

Gen Bda Juraci Ferreira Galdino

DIREÇÃO, IMPRESSÃO E DISTRIBUIÇÃO:

- Diretor: Cel Art Eduardo Biserra Rocha – BIBLIEEx • Editor executivo: Cel R1 Leocir Dal Pai – BIBLIEEx

### CORPO REDATORIAL:

- Editor geral: Marcelo de Miranda Reis – IME (SE/2) • Editor adjunto: Paulo Henrique Coelho Maranhão – IME (SE/4) • Engenharia Civil, Transportes e Ciências Ambientais: Filipe Almeida Corrêa do Nascimento – IME (SE/2) • Engenharia Nuclear: Sérgio de Oliveira Vellozo – IME (SE/7) • Engenharia Elétrica: Antônio Eduardo Carrilho da Cunha – IME (SE/3) • Engenharia Mecânica: André Luiz Tenório Rezende – IME (SE/4) • Ciência dos Materiais: André Ben-Hur da Silva Figueiredo – IME (SE/8) • Ciência da Computação: Paulo Cesar Salgado Vidal – IME (SE/9) • Engenharia de Defesa: Giuseppe Miceli Junior – IME (SE/10) • Engenharia Química e Química: Kátia Regina de Souza – IME (SE/5) • Engenharia Cartográfica: Matheus Pinheiro Ferreira – IME (SE/6) • Outras áreas: Aderson Campos Passos – IME (SE/9).

### EDITORES ASSOCIADOS EXTERNOS:

- Dr. André Fenili – Universidade Federal do ABC, Santo André, SP • Dr. Artur Ziviani – Lab. Nacional de Computação Científica (LNCC), Petrópolis, RJ • Dr. Fernando Fachini Filho – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, SP • Dr. José Carlos Costa da Silva Pinto – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. José Carlos Maldonado – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP • Dr.ª Júlia Célia Mercedes Strauch – Escola Nacional de Ciências Estatísticas, RJ • Dr. Luiz Pereira Calôba – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Otto Corrêa Rotunno Filho – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Richard Magdalena Stephan – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Webe João Mansur – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Carlos Alberto Nunes Consenza – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ

### ADMINISTRAÇÃO, REVISÃO, PROGRAMAÇÃO E DIAGRAMAÇÃO:

- Coordenador: Rubenildo Pithon de Barros • Administração e OJS: Vanessa Ferreira Belchior, Lucas Sebastião de Paula, José Welton Moreira • Revisores: Giana Elvira de Oliveira Marquês; Juniellen de Oliveira Seipel; Diego Ribeiro Ferreira Serpa • Diagramador: Luiz Tadeu Carqueja Mota

### PROJETO GRÁFICO, IMPRESSÃO E DISTRIBUIÇÃO:

BIBLIEEx



Desde 1949

"A Gráfica do Exército" - Compromisso com a Qualidade

Impresso na Gráfica do Exército

Al. Mal. Rondon - Setor de Garagens - QGEx - SMU - CEP:70630-901 - Brasília - DF

Tel: 3415-4367 - Site: <http://www.graficadoexercito.eb.mil.br>

E-mail: [divcmcl@graficadoexercito.eb.mil.br](mailto:divcmcl@graficadoexercito.eb.mil.br)



REVISTA MILITAR de  
CIÊNCIA e TECNOLOGIA

## REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E

## TECNOLOGIA - Volume XXIX

3º Trimestre de 2022

### BIBLIOTECA DO EXÉRCITO

#### EDITORIA (BIBLIEEx)

Palácio Duque de Caxias - Praça D. de Caxias, 25

3º andar - Ala Marcílio Dias

Centro - Rio de Janeiro-RJ

CEP 20.221-260

Tel.: (21) 2519-5707

### INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA - IME

Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha -

Rio de Janeiro-RJ - CEP 22.290-270 -

Tel.: (21) 2546-7115

Website: <http://rmct.ime.eb.br> - Email: [rmct@ime.eb.br](mailto:rmct@ime.eb.br)

### ACESSE NOSSAS REVISTAS DIGITAIS



Nossa capa:

Homenagem ao Corpo de Engenheiros



# EDITORIAL



Rezados leitores da Revista Militar de Ciência e Tecnologia, é com grande prazer que damos publicidade à terceira edição de 2022. Nesta edição, trazemos aos nossos leitores dez interessantes artigos com temas em cinco grandes áreas do conhecimento.

Dentre os vários estudos abordados nessa edição, destacam-se os da Ciências de Materiais, que nos brinda com três artigos, o primeiro descrevendo a concepção, a construção e a caracterização de um sistema de pulverização catódica com fonte de radiofrequência assistida por campos magnéticos para deposição de filmes finos, o segundo propondo a adoção de aditivos, como a nióbia ( $Nb_2O_5$ ) e o fluoreto de lítio (LiF) na proteção balística, resultando em melhorias na sinterização e densificação do material final e o terceiro artigo tem como propósito obter filmes de  $MoO_3$  com capacidade de realizar a fotólise da água sob luz visível, uma vez que a produção de hidrogênio por fotólise da água é uma boa alternativa para substituir o uso de combustível fóssil e atender a demanda energética global. A Ciência da Computação nos traz dois trabalhos, um com o objetivo de expor as características reais de uma rede, que possam impactar na escolha do posicionamento de um controlador de Redes Definida por Software (SDN) e o outro apresenta uma arquitetura baseada no uso da tecnologia blockchain como repositório seguro e auditável de registro dos acessos e permissões concedidas aos usuários. A Engenharia Civil também nos presenteia com dois artigos, onde o primeiro avalia experimentalmente um tabuleiro em fibra de vidro e resina (GFRP) para aplicação na ponte Bailey. Sendo que os painéis avaliados do tabuleiro foram fabricados por pultrusão e laminação manual, e o segundo teve como objetivo reunir os dados de chuvas máximas diárias registradas em cada um dos estados do país, assim como, obter os tempos de recorrência de cada evento utilizando a distribuição de probabilidade de Gumbel.

Além das áreas já citadas, dois outros campos da engenharia contribuíram sobremaneira para o engrandecimento de nossa leitura. Assim, trazemos dois estudos referentes à Engenharia Cartográfica, um que trata de avaliar, compreender e alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) através de dados de Observação da Terra (OT) e técnicas de Machine Learning (ML) e outro que indica um procedimento para determinação da estimativa da Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) como insumo à definição moderna de um sistema vertical. Nesse último trabalho a modelagem empregada foi baseada nas abordagens geométrica e oceanográfica, na qual são utilizadas observações do Nível Médio do Mar (NMM) provenientes de marégrafos. Por fim, no âmbito da Engenharia Elétrica, um novo algoritmo é proposto para o alinhamento em movimento de um Sistema de Navegação Inercial do tipo Strapdown (SNIS), com base em um método clássico da literatura.

Desde já, esperamos que a leitura seja proveitosa e que estimule a curiosidade científica em nossos leitores. Tratar bem a ciência e a tecnologia é a chave para o desenvolvimento sustentável de uma nação. Aproveitem esta edição!

*Paulo Henrique Coelho Maranhão*

---

# SUMÁRIO

---

5

- Desenvolvimento de um sistema de pulverização catódica com fonte de radiofrequência assistido por campos magnéticos para produção de filmes finos

**Austim Mota Gomide, Carlos Ferreira**

14

- Análise de Características Topológicas Impactantes para a Alocação de Controladores em uma Rede SD-WAN: caso RNP

**Vicente Padrenosso, Marcelo Vasconcelos, Andre Chaves**

27

- Tabuleiro em material compósito de fibra de vidro e resina para pontes temporárias

**Igor Berta Pitz, Ana Maria Abreu Jorge Teixeira, Luiz Antônio Vieira Carneiro**

39

- Uso de blockchain no controle e rastreabilidade de acesso a dados armazenados em nuvem

**Jonatan Souza, Raquel Pinto, Bruno Schulze**

50

- Aplicação da distribuição de Gumbel para valores extremos de precipitação em municípios com dados de chuva em todo Brasil

**Thaís Fernandes Juste, Marcelo de Miranda Reis, Igor da Silva Rocha Paz**

111

- Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: Abordagem com Recurso à Aprendizagem Automática e Dados de Observação da Terra

**Bruno Ferreira, Muriel Iten, Rui Silva**

119

- Estudo da densificação e formação de fases de cerâmicas de alumina dopadas com nióbio e fluoreto de lítio.

**Pedro Craveiro Rodrigues dos Santos Credmann, Pedro Henrique Poubel Mendonça da Silveira, Matheus Pereira Ribeiro, Thuane Teixeira da Silva, Alaelson Vieira Gomes**

126

- Produção e caracterização de filmes de  $M_oO_3$  para aplicação fotocatalítica na região visível do espectro solar

**Paulo Victor Nogueira Costa, Carlos Luiz Ferreira, Roberto Ribeiro de Avillez, Leila Rosa de Oliveira Cruz**

134

- Algoritmo de alinhamento em movimento para um sistema de navegação inercial do tipo strapdown

**Ana Cristina Vieira Gonçalves, Marcos Ferreira Duarte Pinto, Paulo Cesar Pellanda**

153

- Ensaio da estimativa da topografia do nível médio do mar local em marégrafos da costa brasileira

**Everton Gomes dos Santos, Leonardo Castro de Oliveira**

# Desenvolvimento de um sistema de pulverização catódica com fonte de radiofrequência assistido por campos magnéticos para produção de filmes finos

A M G Pimenta<sup>a</sup> e C L Ferreira<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>Seção de Ensino de Engenharia dos Materiais – SE/8, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil,

<sup>a</sup>austimpimenta@gmail.com, <sup>b</sup>cferreira@ime.eb.br

**RESUMO:** Este trabalho descreve a concepção, a construção e a caracterização de um sistema de pulverização catódica com fonte de radiofrequência assistida por campos magnéticos para deposição de filmes finos. Materiais para alvo com propriedades elétricas distintas, foram usados para caracterizar o sistema: cobre, óxido de índio e dióxido de silício. Os filmes foram depositados em substratos de vidro e silício, à temperatura ambiente, com uma pressão de deposição da ordem de  $8 \times 10^{-4}$  Torr. A microestrutura dos filmes finos obtidos foi caracterizada por difração de raios X e microscopia de força atômica. As propriedades elétricas e ópticas foram obtidas pelas medidas de efeito Hall e de transmittância, respectivamente. Os resultados mostraram que o sistema construído possibilita a deposição de filmes de alta qualidade e boa uniformidade de espessura. Para todos os materiais investigados, a taxa de deposição aumentou linearmente com a potência e as propriedades obtidas estavam de acordo com os valores reportados na literatura, mostrando o controle dos parâmetros de deposição no sistema construído.

**PALAVRAS-CHAVE:** Instrumentação. Pulverização Catódica. Filmes Finos. Propriedades Estruturais. Propriedades Elétricas. Propriedades Ópticas.

**ABSTRACT:** This work describes the design, construction and characterization of a radio frequency magnetron sputtering system for thin film deposition. Target-materials with different electrical properties were used for system characterization: copper, indium oxide and silicon dioxide. The films were deposited on glass and silicon substrates, at room temperature, under a pressure of  $8 \times 10^{-4}$  Torr. The microstructure of the obtained thin films was investigated by X-ray diffraction and atomic force microscopy. Electrical and optical properties were obtained by Hall effect and transmittance measurements, respectively. The results showed that the assembled sputtering system allows the deposition of high quality films with high thickness uniformity. Linear dependence of the deposition rate on the work power was achieved for the deposited films, whose properties were well consistent with those reported in the literature. These results show the control of deposition parameters in the assembled system.

**KEYWORDS:** Instrumentation. RF Magnetron Sputtering. Thin Films. Structural Properties. Electrical Properties. Optical Properties.

## 1. Introdução

Os avanços teóricos nos diversos campos da ciência, impõem a necessidade de se estabelecer o domínio das técnicas e o aprimoramento das habilidades de construção de equipamentos, de tal forma que o ramo da instrumentação científica constitui um elemento essencial para o desenvolvimento das diversas áreas da ciência. Nas últimas décadas, as técnicas de deposição de filmes finos vêm se destacando devido às suas aplicações, tanto na indústria como nos diversos campos da ciência [1]. A produção de materiais, na forma de filmes finos por pulverização catódica, se sobressai pela capacidade de fabricação de filmes finos de materiais com composições complexas, à

temperatura ambiente, independentemente de suas propriedades elétricas, ópticas e mecânicas [2, 3, 4].

O objetivo deste trabalho, é apresentar o projeto e a construção de um sistema de deposição de filmes finos por pulverização catódica com fonte de radiofrequência assistida por campos magnéticos (RF Magnetron Sputtering), para fabricação de filmes finos. Para comprovar o sucesso do sistema construído, foram depositados filmes finos de materiais com propriedades elétricas distintas: o cobre, como material condutor elétrico, o dióxido de silício, como material isolante elétrico, e o óxido de índio, com propriedades semicondutoras. Finalmente, os filmes finos produzidos foram caracterizados para comprovar a sua qualidade e a viabilidade técnica do equipamento construído.

## 2. Materiais e método

### 2.1 Desenvolvimento do projeto do sistema de pulverização catódica

Para a construção do projeto, foi utilizada para a câmara de deposição uma campânula cilíndrica de aço inoxidável de 30 cm de diâmetro e 30 cm de altura, evacuada por um sistema de constituído por uma bomba de difusão com armadilha criogênica para a obtenção do alto vácuo, uma bomba mecânica seca do tipo scroll para obtenção de vácuo primário, uma válvula com abertura controlada para possibilitar o controle da condutância do bombeamento durante a deposição e um conjunto de medidores de pressão. A construção do sistema de deposição projetado foi dividida em etapas:

(i) Dimensionamento e construção de um gabinete para suporte da campânula e medidores, utilizando cantoneiras de aço carbono, e placas de alumínio para apoio dos equipamentos e seu fechamento. Uma chapa de alumínio foi colocada na parte superior do gabinete para apoio da câmara de deposição, e outra placa de alumínio foi colocada na parte inferior para apoio do sistema de bombeamento. A **figura 1** ilustra o projeto estrutural do equipamento;

(ii) Utilização de um disco cilíndrico de aço inoxidável 306L para apoio dos componentes internos do sistema de deposição (*base plate*);

(iii) Projeto do sistema elétrico de potência, de tal forma a possibilitar a alimentação independente dos equipamentos eletrônicos integrantes do sistema de deposição, e a realização de testes individuais em cada parte do sistema elétrico, tanto no sistema de bombeamento de vácuo, como nos equipamentos de rádio frequência e instrumentação;

(iv) Redimensionamento e adaptação do sistema de vácuo pré-existente no Laboratório de Filmes Finos (LFF), do Instituto Militar de Engenharia (IME) (**figura 2**);

(v) Dimensionamento e instalação do sistema forçado de refrigeração com água fria para a bomba de difusão, e para o material alvo de deposição;

(vi) Construção e instalação de um obturador (shutter), para proteção dos substratos durante a etapa

de remoção de impurezas afixadas na superfície do alvo, e na etapa de controle da taxa de deposição e espessura dos filmes;

(vii) Instalação de um porta-substrato quadrado de aço inoxidável com 10 cm de aresta, com altura regulável, para acomodar quatro substratos quadrados de 2,5 cm;

(viii) Instalação de uma fonte de geração de radiofrequência modelo RFX 600, e de um módulo de casamento automático de impedância do conjunto substrato-catodo, modelo ATX, ambos fabricados pela Advanced Energy;

(ix) Instalação de um catodo tipo magnetron, modelo MAK3, fabricado pela MEIVAC, que comporta alvos de 3 polegadas de diâmetro;

(x) Instalação de um medidor de pressão de membrana capacitiva fabricado pela EDWARDS (Barocel® modelo 600A-100T-R12-N12X-4), para avaliar a pressão base do sistema, e um medidor de ionização de catodo frio fabricado pela EDWARDS (Penning®, modelo 6 D145-08-00) para avaliação do alto vácuo;

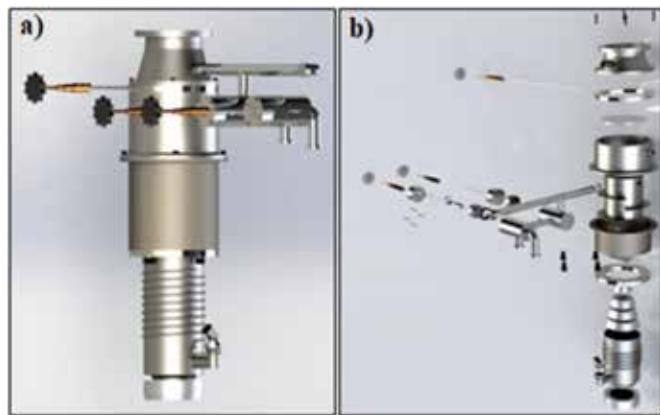
(xi) Instalação de um medidor de pressão de membrana capacitiva fabricado pela MKS, modelo 626a01TDE, para medida de pressão durante a deposição;

(xii) Instalação de uma válvula tipo agulha, fabricada pela Swagelok®, modelo SS-4-BK, para controle do fluxo de argônio na câmara durante as etapas de purgas e de deposição.

O sistema projetado e construído é apresentado na **figura 3**.



**Fig. 1:** Representação esquemática do gabinete de suporte em vista explodida.



**Fig. 2:** a) Sistema de alto vácuo; b) Esquema do sistema de vácuo em vista explodida.



**Fig. 3:** a) Sistema de alto vácuo; b) Esquema do sistema de vácuo em vista explodida.

## 2.2 Caracterização do sistema de deposição

Para caracterização do sistema de deposição construído inicialmente, foram produzidos filmes finos depositados sobre lâminas de vidro e em pastilhas de silício monocristalino.

Antes da produção das amostras, o sistema foi bombeado até a pressão-base de  $8 \times 10^{-6}$  Torr, e posteriormente, passou-se à etapa de obtenção de uma atmosfera residual de argônio. Essa etapa foi realizada com o seguinte procedimento experimental: uma primeira purga foi realizada injetando argônio na câmara de deposição elevando-se a pressão até 3 mTorr por meio da válvula agulha; a pressão foi mantida por cerca de 60s; posteriormente a pressão foi reduzida até a pressão-

base fechando-se a válvula agulha; este procedimento foi realizado pelo menos três vezes para garantir a obtenção da atmosfera residual de argônio; finalmente foi mantida a pressão em 3 mTorr para realização da deposição.

Para a produção da série completa de amostras, foram utilizados alvos de cobre, dióxido de silício e óxido de índio. Os filmes foram depositados em lâminas de vidro e com diferentes potências para caracterização do sistema de deposição. A **tabela 1** apresenta os parâmetros de deposição utilizados, mantidos constantes durante a produção dos filmes, independentemente do tipo do material alvo utilizado.

**Tab. 1:** Parâmetros mantidos constantes durante as deposições.

| Parâmetros                    | Valores                      |
|-------------------------------|------------------------------|
| Pressão base do sistema       | $\sim 8 \times 10^{-6}$ Torr |
| Pressão de abertura de plasma | 30 mTorr                     |
| Pressão de deposição          | 1 mTorr                      |
| Distância alvo-substrato      | 75 mm                        |
| Temperatura de deposição      | Ambiente                     |

Após produção dos filmes finos, foram realizadas medidas de espessura utilizando o perfilômetro marca Veeco, modelo Dektak 150, pertencente ao LFF, e o Dektak 8, da Divisão de Materiais (Dimat) do INMETRO. Para obtenção da resistividade elétrica, foi utilizado o equipamento da BioRad, modelo HL 5500, do LFF. Para caracterização estrutural dos filmes depositados, foi utilizado o difratômetro X'Pert Powder, marca PANalytical, do Laboratório de Difração de Raios X do IME. Para análise morfológica foi utilizado um microscópio de força atômica (MFA) marca Witec, modelo Alpha 300, da Dimat/INMETRO, e o microscópio eletrônico de varredura de alta resolução, modelo HELIOS NANOLAB, marca FEI, instalado no Núcleo de Microscopia do INMETRO.

## 3. Metodologias

O alvo de cobre, foi o primeiro material utilizado para fabricação dos filmes, seguido do alvo de dióxido

de silício por possuir propriedade elétrica oposta ao cobre. O outro material utilizado para a caracterização do sistema de deposição, foi óxido de índio, por possuir característica semicondutora. As **tabelas 2 a 4** apresentam os parâmetros de deposição utilizados, com os valores obtidos de espessura, taxa de deposição e resistividade dos filmes (os filmes de  $\text{SiO}_2$  não tiveram a resistividade medida por serem isolantes). O tempo de deposição foi mantido em 10 min, para as deposições de cobre, e 60 min, para as deposições de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{In}_2\text{O}_3$ . A pressão de deposição foi mantida em 1 mTorr para todas as deposições. Em função da característica isolante do dióxido de silício, foi necessário aplicar maiores potências para que fosse possível produzir os filmes com taxas de deposição na mesma faixa das utilizadas nos alvos de cobre e de  $\text{In}_2\text{O}_3$ .

**Tab. 2:** Espessura e resistividade dos filmes finos de cobre em função dos parâmetros de deposição.

| Filme | Potência (W) | Espessura (Å) | Taxa (Å/s) | Resistividade ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) |
|-------|--------------|---------------|------------|---|
| 1     | 20           | 393           | 0,7        | 0,1   |
| 2     | 50           | 1366          | 2,3        | 1,6   |
| 3     | 80           | 2445          | 4,1        | 0,6   |
| 4     | 110          | 3850          | 6,4        | 3,6   |

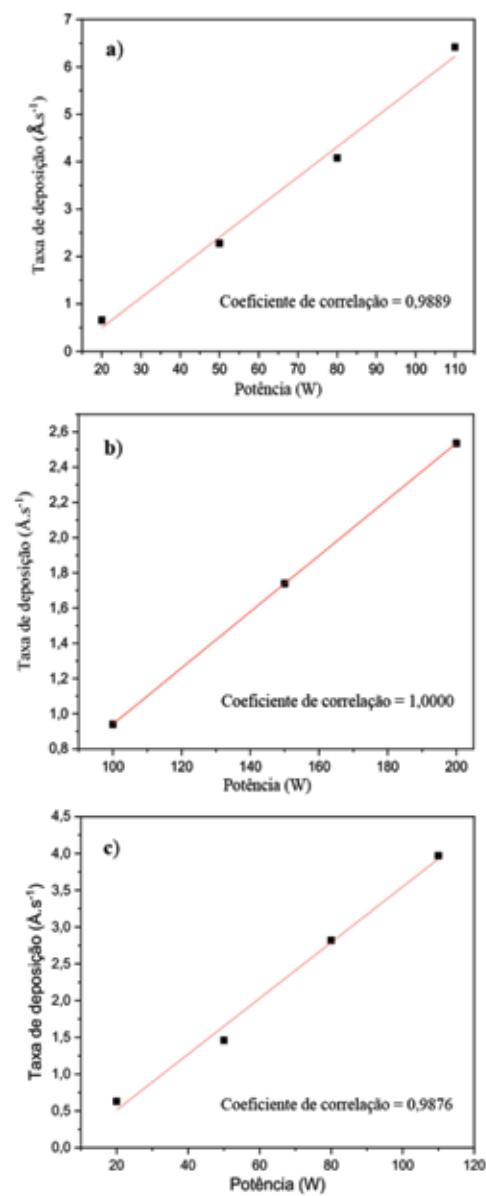
**Tab. 3:** Espessura dos filmes finos de  $\text{SiO}_2$  em função dos parâmetros de deposição

| Filme | Potência (W) | Espessura (Å) | Taxa (Å/s) |
|-------|--------------|---------------|------------|
| 1     | 100          | 3396          | 0,9        |
| 2     | 150          | 6266          | 1,7        |
| 3     | 200          | 9125          | 2,5        |

**Tab. 4:** Espessura e resistividade dos filmes finos de  $\text{IN}_2\text{O}_3$  em função dos parâmetros de deposição

| Filme | Potência (W) | Espessura (Å) | Taxa (Å/s) | Resistividade ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) |
|-------|--------------|---------------|------------|---|
| 1     | 20           | 2265          | 0,6        | 131   |
| 2     | 50           | 5272          | 1,4        | 138   |
| 3     | 80           | 10152         | 2,8        | 195   |
| 4     | 110          | 14282         | 3,9        | 120   |

A **figura 4** mostra o comportamento da taxa de deposição em função da potência utilizada para a produção dos filmes. É possível observar a existência de uma fortíssima correlação linear entre a taxa de deposição dos três materiais utilizados e a potência de trabalho. Esse resultado é bem conhecido na literatura [5-7] e atesta o controle deste importante parâmetro de deposição no sistema construído.



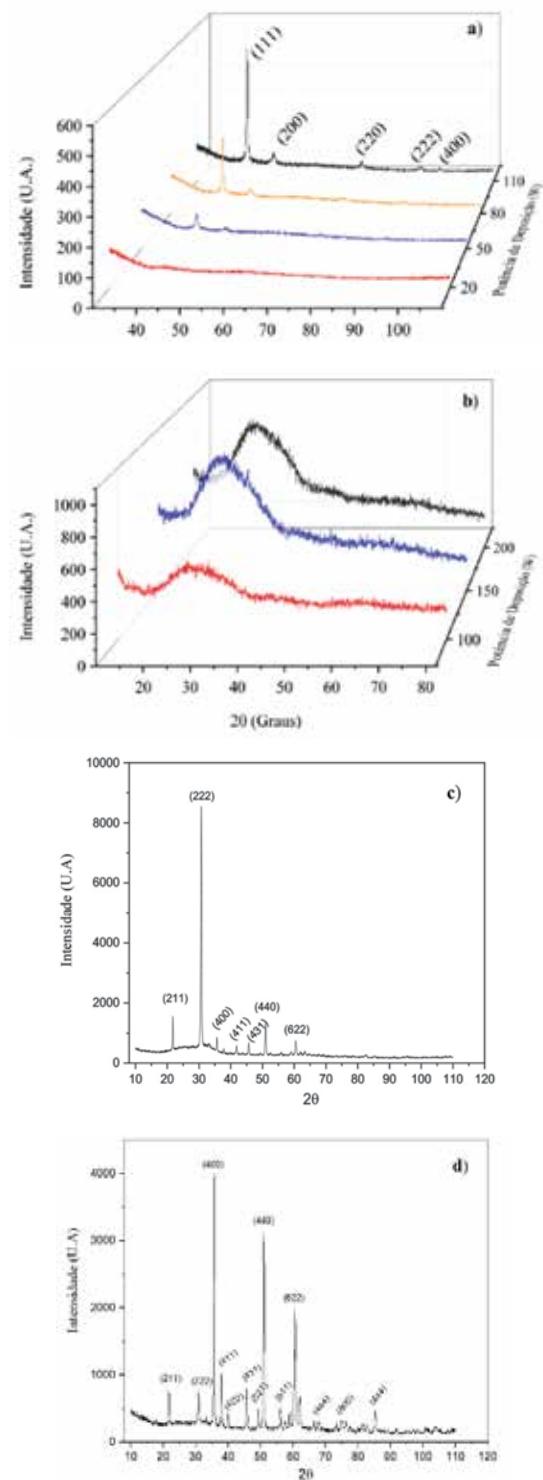
**Fig. 4:** Taxa de deposição dos filmes finos fabricados no sistema de pulverização catódica em função da potência: a) cobre; b)  $\text{SiO}_2$  e c)  $\text{In}_2\text{O}_3$ .

A figura 5 apresenta os difratogramas dos filmes depositados nas diferentes potências. Um ponto importante a ser destacado, é a ausência de fases contaminantes nos filmes depositados, fato que contribui para atestar a capacidade do sistema construído em depositar filmes puros e de boa qualidade.

No caso dos filmes de cobre, observa-se que os filmes depositados com as potências de 50, 80 e 110 W são cristalinos e apresentam um crescimento preferencial na direção (111), de acordo com a ficha cristalográfica JCPDS 00-004-0836 do cobre. Observa-se também, que o filme fino depositado com 110 W apresenta maior cristalinidade que os outros, enquanto o filme fino de cobre depositado com 20 W é amorfo. A cristalinidade decorrente do aumento da potência de trabalho, possivelmente está relacionada com a maior quantidade de átomos que chegam ao substrato por intervalo de tempo, favorecendo o aumento da espessura dos filmes e, consequentemente, a cristalinidade. A característica amorfia do filme depositado com 20 W deve-se à baixa taxa de deposição utilizada ( $0,7 \text{ \AA/s}$ ) dando origem a uma pequena espessura, quando comparada aos demais filmes.

Analizando os difratogramas dos filmes de  $\text{SiO}_2$ , é possível observar que todos os filmes são amorfos. Esse resultado é bem conhecido e está relacionado ao fato de os filmes terem sido crescidos à temperatura ambiente [8,9].

Os picos de difração dos filmes de  $\text{In}_2\text{O}_3$  foram identificados com a ficha cristalográfica JCPDS 00-006-0416. Analisando o difratograma do filme depositado com 50 W, observa-se que há uma fortíssima orientação cristalográfica na direção (222). Entretanto, o filme cresceu com 110 W apresentou maior cristalinidade com um crescimento preferencial na direção (400). Nota-se também que o aumento da potência favoreceu a cristalinidade, resultado que também é reportado por outros autores como sendo fruto da maior energia cinética das moléculas que se chocam com o substrato [9-11]. No entanto, neste trabalho, vale ressaltar que esse efeito é muito mais devido à maior espessura dos filmes depositados com maiores potências.

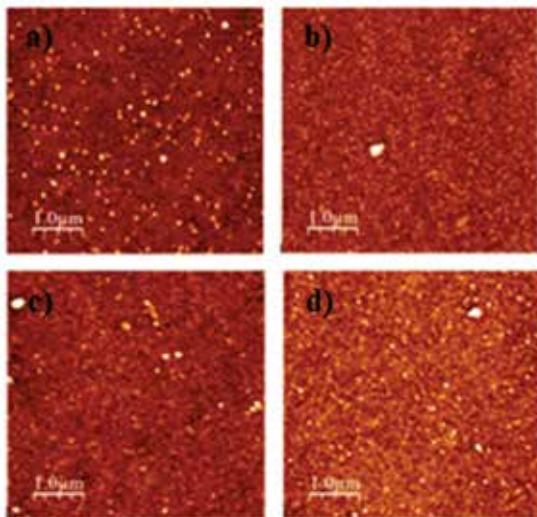


**Fig. 4:** Difratogramas dos filmes finos fabricados no sistema de pulverização catódica: a) cobre; b)  $\text{SiO}_2$ ; c)  $\text{In}_2\text{O}_3$  depositado com 50 W; d)  $\text{In}_2\text{O}_3$  depositado com 110 W.

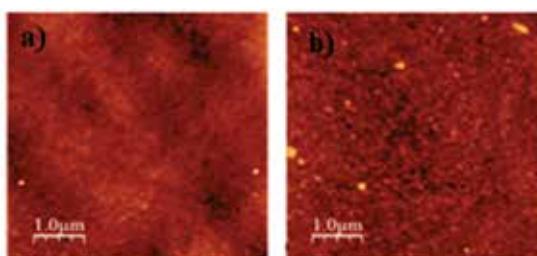
As **figuras 5 a 7** mostram imagens de microscopia de força atômica (MFA) da superfície dos filmes depositados. Os valores de rugosidade obtidos das respectivas imagens estão apresentados nas Tabelas 5 a 7.

As imagens de MFA mostram que os filmes são nanométricos, sendo que há um pequeno aumento do tamanho do grão com a potência. Esse resultado está de acordo com o aumento de cristalinidade observado na **figura 4**, para maiores potências de trabalho [12,13].

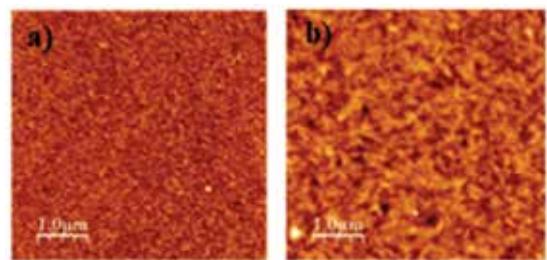
Quanto à rugosidade, observa-se um pequeno aumento em função da potência de deposição, fato que está relacionado à maior espessura dos filmes depositados em maiores potências.



**Fig. 5:** Imagens de MFA dos filmes finos de cobre depositados com: (a) 20W; (b) 50W; (c) 80W; (d) 110W.



**Fig. 6:** Imagens de MFA dos filmes finos de SiO<sub>2</sub> depositados com: (a) com 100 W; (b) 150 W.



**Fig. 7:** Imagens de MFA dos filmes finos de In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> depositados com: (a) 50 W; (b) 110 W.

**Tab. 5:** Rugosidade dos filmes finos de cobre em função da potência de deposição.

| Potência (W) | Rugosidade (Nm) |
|--------------|-----------------|
| 20           | 1,58            |
| 50           | 1,71            |
| 80           | 1,85            |
| 110          | 1,36            |

**Tab.6:** Rugosidade dos filmes finos de SiO<sub>2</sub> em função da potência de deposição.

| Potência (W) | Rugosidade (Nm) |
|--------------|-----------------|
| 100          | 0,65            |
| 150          | 0,94            |

**Tab. 7:** Rugosidade dos filmes finos de In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em função da potência de deposição.

| Potência (W) | Rugosidade (Nm) |
|--------------|-----------------|
| 100          | 0,65            |
| 110          | 0,94            |

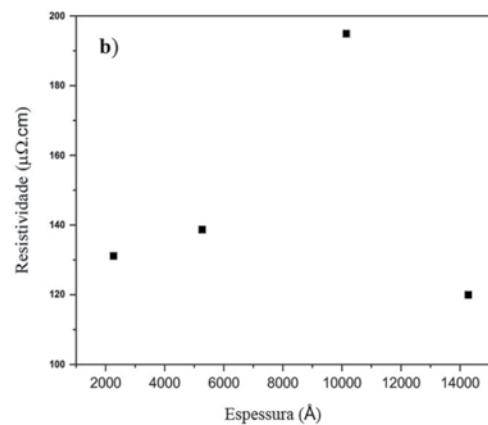
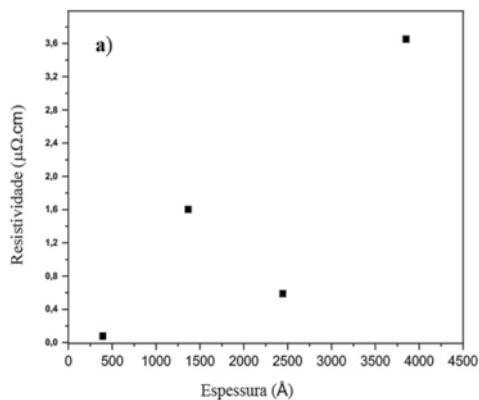
A **figura 8** apresenta a variação da resistividade dos filmes de cobre e de In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em função da potência de deposição. A resistividade dos filmes de óxido de silício não foi medida, visto que, o filme era isolante.

Os valores medidos estão na mesma ordem de grandeza da resistividade reportada dos materiais: 1,7  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$  para o cobre [14] e  $4,0 \times 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$  para filmes de  $\text{In}_2\text{O}_3$  [15, 16]. Esse resultado também contribui para atestar o bom controle dos parâmetros de deposição no sistema construído.

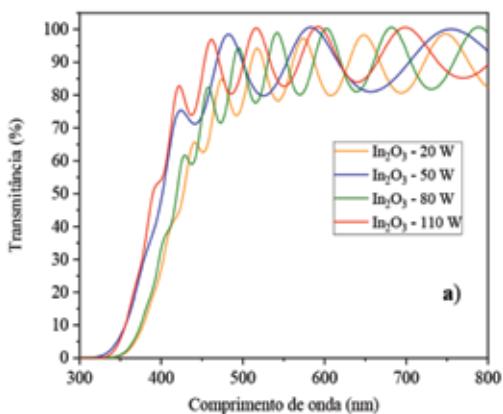
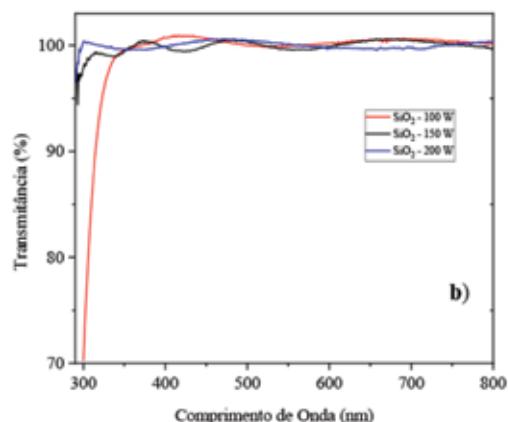
As curvas de transmitância dos filmes de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{In}_2\text{O}_3$  depositados nas diferentes potências são apresentadas na **figura 9**. Em função de o cobre ser um metal, a transmitância do filme não foi medida.

Por meio da análise dos espectros de transmitância dos filmes de  $\text{In}_2\text{O}_3$ , observa-se uma variação da posição da aresta de absorção fundamental dos filmes com a potência de trabalho. Esse resultado, é bem relatado na literatura como sendo devido à formação de vacâncias de oxigênio [17].

Analizando-se o espectro de transmitância do filme de  $\text{SiO}_2$  depositado com 100 W, nota-se que seu comportamento se assemelha ao espectro da sílica com uma aresta de absorção no final do espectro visível. Esse resultado está coerente com a característica amorfa do  $\text{SiO}_2$  depositado com essa potência. Todavia, os espectros dos filmes finos produzidos com 150 e 200 W mostram que as arestas de absorção fundamental foram estendidas para a região do ultravioleta próximo, que é uma característica do  $\text{SiO}_2$  cristalino (quartzo). Esses resultados estão coerentes com a tendência à cristalização observada nas respectivas imagens de MFA da **figura 6** dos filmes depositados com potências maiores.



**Fig. 8:** Resistividade elétrica dos filmes finos fabricados no sistema de pulverização catódica em função da potência de deposição: a) cobre; b)  $\text{In}_2\text{O}_3$ .



**Fig. 9:** Espectros de transmitância dos filmes finos fabricados no sistema de pulverização catódica em diferentes potências: a) filmes finos de  $\text{In}_2\text{O}_3$ ; b) filmes finos de  $\text{SiO}_2$ .

## 6. Conclusão

Um sistema de pulverização catódica com radiofrequência e magnetos foi projetado e construído para a fabricação de filmes finos. Esse sistema encontra-se operacional nas dependências do LFF-IME, tendo já realizado mais de 60 ciclos de deposição. As deposições feitas com três alvos de características distintas (condutor, semicondutor e isolante) forneceram filmes de boa qualidade, boa uniformidade de espessura e com propriedades semelhantes às relatadas na literatura. A taxa de deposição dos filmes variou linearmente com a potência de trabalho. Esses resultados experimentais

atestam que o sistema construído fornece um bom controle dos parâmetros de deposição.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Arsenal de Guerra do Rio de Janeiro – AGR e à Oficina Mecânica do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, pela prontidão na modelagem e usinagem de peças para a construção do sistema de deposição. Os autores também agradecem à Divisão de Materiais do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO, que colaborou para a caracterização dos filmes fabricados e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro.

## Referências

- [1] P. J. KELLY, R. D. ARNELL, Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications, Vacuum, Volume 56, Issue 3, 2000, 159-172.
- [2] S. GÜRAKAR, S., H. OT, S. HORZUM, T. Serin, Variation of structural and optical properties of TiO<sub>2</sub> films prepared by DC magnetron sputtering method with annealing temperature, Materials Science & Engineering B, 262, 2020, 114782.
- [3] D. DEPLA, K. STRIJCKMANS., R. DE GRYSE, The role of the erosion groove during reactive sputter deposition, Surface & Coatings Technology 258, 2014, 1011–1015.
- [4] L. R CRUZ, B. F. M LOPES, R. A. MEDEIR., R. M. C. LIMA, C. L FERREIRA, Propriedades de filmes finos de ZnO:Al depositados sobre substratos de poliimida à temperatura ambiente para aplicações em dispositivos optoeletrônicos flexíveis. Cerâmica, 63 (366), 2017, 162-168
- [5] H. HORKEL, J. M. NEUBAUER, E., C. Eisenmenger-Sittner, Construction and characterization of a sputter deposition system for coating granular materials, 84, 2010, 453–457.
- [6] M. MURALIDHAR SINGH, G. VIJAYA, M.S. KRUPASHANKARA, B.K. SRIDHARA, T.N. SHRIDHAR, Deposition and Characterization of Aluminium Thin film Coatings using DC Magnetron Sputtering Process, Materials Today: Proceedings, 5, Issue 1, Part 3, 2018, 2696-2704.
- [7] A. BHORDE ET AL, (400)-Oriented indium tin oxide thin films with high mobility and figure of merit prepared by radio frequency magnetron sputtering, Thin Solid Films, 704,2020, 137972
- [8] S. KARTHIKEYAN., A. E. HILL, R. D. PILKINGTON, The deposition of low temperature sputtered IN<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films using pulsed d.c. magnetron sputtering from a powder target, Thin Solid Films 550, 2014, 140-144.
- [9] P. SCHURIG, M. COUTURIER, M. BECKER, A. POLITY, P. KLAR, Optimizing the Stoichiometry of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Grown by RF-Magnetron Sputter Deposition by Correlating Optical Properties and Growth Parameters, Phys. Status Solidi A 2019, 216, 1900385.
- [10] A. MELLO, “Filmes finos cristalinos de hidroxiapatita: Uma abordagem original com magnetron sputtering de Alvos Opostos”, Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia – IME, 2007.
- [11] K.H. CHOI, H.C. KANG, Structural and optical evolution of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/glass thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering, Materials Letters 123, 2014, 160–164.
- [12] P. AMALATHAS, AMALRAJ & ALKAISI, Maan, Effects of film thickness and sputtering power on properties of ITO thin films deposited by RF magnetron sputtering without oxygen, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 27, 2016, 10.1007/s10854-016-5223-9.
- [13] G. THILIPAN AND A. RAO, Influence of power on the physical and electrical properties of magnetron sputtered gadolinium oxide thin films for MOS capacitors, Materials Science in Semiconductor Processing 121, 2021, 105408

- [14] H. B. Quadros, Avaliação das características resistivas de filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética, Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
- [15] R.W. BERRY, P.M. HALL, M.T. HARRIS, Thin films technology. 1º ed., LCCCN 68-25817, Van Nostrand Reinhold Company publication, New York, USA, 1968.
- [16] L. R. CRUZ, N. B. PADILHA, R. A. MEDEIRO, B. F. M. LOPES, R. L. M. CORREIA, C. L. FERREIRA, R. R. AVILLEZ, (2017).Análise comparativa das propriedades de óxidos transparentes condutores para aplicação em células solares de filmes finos de CdTe. Matéria, 22(1), 2017, e11793.
- [17] S. KALEEMULLA, A. SIVASANKAR REDDY,Physical properties of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films prepared at various oxygen partial pressures, Journal of Alloys and Compounds, Volume 479, Issues 1–2, 2009, 589-593.

# Análise de Características Topológicas Impactantes para a Alocação de Controladores em uma Rede SD-WAN: caso RNP

Vicente Padrenosso<sup>a</sup>, Marcelo Vasconcelos<sup>b</sup>, André Mendes<sup>c</sup>

<sup>a,b,c</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME)

<sup>a</sup>vicente@ime.eb.br, <sup>b</sup>vasconcelos@ime.eb.br, <sup>c</sup>andre.chaves@ime.eb.br

**RESUMO:** Encontrar uma solução viável e ótima para o problema de alocação de controladores SDN, é uma tarefa desafiadora. Nesse viés, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de expor as características reais de uma rede, que possam impactar na escolha do posicionamento de um controlador SDN. Ademais, são apresentados os experimentos com a ferramenta POCO (Pareto-based Optimal Controller-placement) e com os controladores ONOS e Floodlight, que serviram de comparativo para auxiliar na tomada de decisão quanto ao melhor posicionamento do controlador dentro da rede. Para isso, foi utilizada a topologia da rede Ipê, da RNP (Rede Nacional de Pesquisa), como base desta pesquisa. Em síntese, os resultados demonstraram que devem ser considerados os aspectos, não só estáticos da rede, mas também as características dinâmicas e os aspectos relacionados ao modelo e ao fim a que se destina a utilização dos controladores, fatores que podem impactar no posicionamento.

**ABSTRACT:** Finding a viable and optimal solution to the SDN controller allocation problem is a challenging task. In this bias, this work was developed with the objective of exposing the real characteristics of a network, which may impact the choice of positioning an SDN controller. Furthermore, the experiments with the POCO tool (Pareto-based Optimal Controller-placement) and with the ONOS and Floodlight controllers are presented, which served as a comparison to assist in decision making regarding the best positioning of the controller within the network. For this, the topology of the Ipê network, from RNP (National Research Network), was used as the basis for this research. In summary, the results showed that not only the static aspects of the network should be considered, but also the dynamic characteristics and aspects related to the model and the purpose for which the controllers are used, factors that can impact the positioning.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controladores. Floodlight. ONOS. POCO. SDN.

**KEYWORDS:** Controllers. Floodlight. ONOS. POCO. SDN.

## 1. Introdução

Nos últimos anos, as Redes Definidas por Software (*Software Defined Networking*, SDN), ganharam muita atenção, e vem ganhando mais força com os cenários atuais. Diante disso, flexibilidade, programabilidade e escalabilidade são alguns dos benefícios trazidos pelas redes definidas por software, em comparação à infraestrutura de rede tradicional.

No trabalho de Nunes [1], a rede SDN é definida como um paradigma de rede, em que o hardware de encaminhamento (plano de dados), é dissociado das decisões do controlador (plano de controle). Na SDN,

a inteligência da rede é logicamente centralizada em controladores baseados em software, e os dispositivos de rede tornam-se simples encaminhadores de pacotes, que podem ser programados através de interfaces abertas compatíveis, por exemplo, com o protocolo OpenFlow, [2].

O controlador em uma SDN pode ser considerado o “cérebro” da rede, conforme citado no trabalho de Kreutz [3]. Atua como um ponto de controle estratégico na rede SDN, gerenciando o controle de fluxo para os switches e roteadores. Assim, à medida que as organizações implantam mais redes SDN, os controladores são encarregados de gerenciar a interligação entre os domínios da SDN, usando interfaces de protocolos abertos, como o OpenFlow.

O penFlow, proposto inicialmente pela Universidade de Stanford, surgiu da necessidade dos pesquisadores executarem protocolos experimentais na rede acadêmica. É a arquitetura mais conhecida e aceita para redes SDN, e possui um conjunto de especificações bem definidas. Trata-se de um protocolo aberto, que permite que um controlador gerencie dispositivos de rede e determine o comportamento deles. A implementação de padrões abertos simplifica o projeto e operação da rede, permitindo que os pesquisadores realizem experimentos sem a necessidade de fabricantes para expor o funcionamento interno de seus produtos, ou desenvolvedores para escrever um software de controle específico do fornecedor.

Na arquitetura estabelecida pelo protocolo OpenFlow, além da figura do controlador, também existe o papel do switch OpenFlow. O switch OpenFlow tem a garantia da confiabilidade na troca de mensagens com o controlador por meio do protocolo SSL (*Secure Socket Layer*). Além disso, a interface do protocolo OpenFlow garante a padronização das mensagens enviadas pelo controlador ao switch, de modo a definir o comportamento do encaminhamento de pacotes, de acordo com a tabela de fluxos. A tabela de fluxos é composta por regras, e cada regra consiste em ações associadas a fluxos. As entradas desta tabela são atualizadas pelo controlador, então, por meio dessa tabela o switch executa o encaminhamento de pacotes.

Ainda, segundo Lange<sup>[4]</sup>, na arquitetura OpenFlow, um controlador logicamente centralizado gerencia os switches da rede, fornecendo-lhes regras para estabelecer o seu comportamento nas operações com pacotes. Portanto, a posição de cada controlador na rede afeta objetivos concorrentes, como latência entre controladores, latência entre switch-controlador e resiliência.

Nesse sentido, uma questão importante durante a implantação de uma SDN é o posicionamento do controlador na rede, ou seja, decidir onde posicionar uma visão geral sobre a rede, que permita gerenciar recursos de forma simples e eficaz, considerando o aproveitamento da capacidade programável para obter respostas eficientes com o mínimo de latência entre os nós e o controlador, alcançando a máxima taxa de transferência entre eles.

A primeira abordagem sobre o assunto, foi feita por Brandon Heller<sup>[5]</sup>, seguido por outros pesquisadores que adicionaram diferentes questões em suas observações. Entretanto, a maioria das pesquisas na área de SDN sobre o posicionamento do controlador concentra grande parte dos seus esforços na análise de redes sem considerar as suas características reais, por exemplo, o tráfego na rede e o tipo de controlador que será implementado. Portanto, as diferentes demandas de uma rede em produção e a carga individual causada por diferentes nós conectados a um controlador ainda é pouco considerada em detalhes.

Ante o exposto, as principais contribuições deste trabalho estão em investigar, de forma comparativa, quais características topológicas possam impactar no posicionamento de controladores em redes SD-WAN (*Software Defined – Wide Area Network*) reais, por meio de um estudo sobre a utilização do método exaustivo implementado pela ferramenta POCO (*Pareto-based Optimal Controller*) [6], que consiste em, de forma resumida, calcular as distâncias geográficas em relação a todas as posições de uma topologia contendo  $n$  nós, a fim de encontrar as melhores posições para o controlador dentro do conjunto de todas as soluções possíveis, onde  $n$  é o número de nós da rede. Ademais, nos trabalhos relacionados à ferramenta POCO, não foram encontradas informações exatas quanto ao número máximo de nós suportados.

Essa ferramenta é implementada em Matlab e disponível como software de código aberto. A abordagem POCO avalia exaustivamente todas as possibilidades para o posicionamento do controlador em uma topologia e calcula a compensação de latência e resiliência para cada posição. Dessa forma, o algoritmo não fornece nenhuma recomendação específica para um determinado posicionamento, mas retorna um conjunto de posicionamentos baseados no método *Pareto-based Optimal Placement*<sup>[7]</sup>, que permite aos administradores de rede a escolha de um posicionamento apropriado. Assim, essa estratégia dá mais flexibilidade na implantação de uma rede SD-WAN.

Então, para alcançar os objetivos propostos, os resultados definidos pela ferramenta POCO são comparados no estudo de caso da rede Ipê, da RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa), inserida em um ambiente virtualizado, considerando as suas características reais de conexão e tráfego, e também a análise dos controladores ONOS e Floodlight ativos nessa topologia, conforme será apresentado na **seção 4 - Metodologia aplicada**.

Como resultado, é demonstrado que nos estudos sobre o posicionamento dos controladores, somente as considerações sobre as distâncias geográficas e latências definidas pela ferramenta POCO não são suficientes. Logo, os testes provaram que as características de latência em conjunto com as informações de largura de banda e tráfego também são fatores importantes na definição do posicionamento, além disso, os testes também mostraram que os aspectos relacionados ao modelo e à utilização dos controladores devem ser considerados.

Após essa introdução, serão apresentadas a fundamentação teórica e a motivação na **seção 2**, na **seção 3** os trabalhos relacionados, na **seção 4** a metodologia aplicada, na **seção 5** os experimentos realizados e a análise dos resultados, por fim, a conclusão e trabalhos futuros na **seção 6**.

## 2. Motivação

De acordo com trabalhos mais recentes, como o realizado por Tamal Das [8], que apresenta um *survey* com uma profunda pesquisa sobre o problema do posicionamento do controlador SDN, e classifica extensivamente outros trabalhos em várias perspectivas, é possível verificar que ainda a maioria das pesquisas na área de SDN sobre o posicionamento dos controladores concentra grande parte dos seus esforços na análise de redes, considerando somente suas características estáticas, ou seja, dados como cálculos das distâncias geográficas e latências relacionadas a essas distâncias, conforme observado também no trabalho de Hock sobre a ferramenta POCO [6]. Além disso, as características

da rede e a carga individual causada por diferentes nós conectados a um controlador ainda é pouco considerada em detalhes.

Em primeiro lugar, um objetivo principal para o bom posicionamento do controlador, é minimizar as latências entre os nós e os controladores na rede. No entanto, olhar apenas para os atrasos e medidas de desempenho estáticas não é suficiente. Um controlador SDN é um ponto estratégico de controle na rede. Assim, decidir onde alocar os controladores SDN, quais switches serão controlados por cada controlador, quantos controladores são necessários para que não haja um ponto limitante, e quais controladores tem o melhor desempenho de acordo com o posicionamento em cada cenário são questões importantes, a fim de minimizar o custo de recobrimento da rede e garantir um bom desempenho.

## 3. Trabalhos relacionados

Vários estudos foram realizados com o objetivo de tratar o problema de posicionamento dos controladores, outros estudos trabalharam no sentido de comparar controladores SDN de forma isolada, focando apenas no desempenho do controlador. Porém, poucos estudos auxiliaram na tomada de decisão para selecionar um controlador com o melhor desempenho, levando em conta o seu posicionamento dentro de uma rede com características reais.

O problema de posicionamento do controlador na arquitetura SDN foi introduzido por Heller [5], onde foi realizada uma otimização em relação à latência dos nós até o controlador designado. Nesse artigo, o autor cita que para as WANs (*Wide Area Networks*), o melhor posicionamento depende, entre outras métricas, da latência.

No campo do problema de posicionamento, Heller [5] mostra o desempenho da rede variando a posição dos controladores na rede. Assim, encontrar a localização e o número de controladores que serão necessários é uma tarefa desafiadora em uma arquitetura de rede como a SD-WAN.

No trabalho de Stanislav Lange [4], é apresentado o POCO (*Pareto-based Optimal COnroller placement*) [6],

uma estrutura para encontrar o posicionamento ideal do controlador de forma que a conectividade entre os switches e o controlador seja maximizada levando-se em consideração a capacidade do controlador. Primeiro, os autores propõem um algoritmo de força bruta, mas é válido apenas para pequenas redes. Em seguida, os autores propõem heurísticas para resolver o problema de posicionamento de controladores em grandes redes. Para tanto, utilizam um algoritmo baseado no *Pareto Simulated Annealing* [9]. Neste trabalho, os autores se concentram em maximizar a resiliência da rede. Onde eles consideraram a colocação de controladores em uma rede SDN dinâmica, na qual existem variações de latência entre os controladores e seus switches. Porém, não consideram a posição de controladores levando em consideração a alocação dinâmica da rede.

O posicionamento precisa ser escolhido de maneira cuidadosa. O *framework* POCO, tem a capacidade de lidar com topologias de pequeno e médio porte, que fornecem a solução em segundos. Entretanto, para redes de larga escala, a avaliação exaustiva necessita de uma quantidade considerável de esforço computacional e uso de memória. É neste contexto, que se torna necessária a busca por uma solução computacional mais próxima aos ambientes reais.

O trabalho de Rastogi e Bais [10], realiza uma análise comparativa em termos da capacidade do tráfego. O objetivo central do trabalho consiste em apresentar uma análise entre dois controladores, denominados Pox e Ryu, respectivamente, em termos da capacidade de manuseio de tráfego. O emulador Mininet foi utilizado para emular o ambiente dos controladores SDN, e assim monitorar o desempenho do tráfego. Porém, o trabalho não considerou as características reais da rede, como por exemplo a capacidade e ocupação dos links.

Já sobre a comparação dos controladores, o trabalho realizado por Amin Tootoonchian [11], um dos primeiros estudos comparativos dos controladores

SDN, considerou um número limitado de controladores (NOX, NOX-MT, Beacon e Maestro) focando apenas no desempenho do controlador. Com o avanço das tecnologias tais controladores já são considerados ultrapassados.

O trabalho de Bondkovskii [12], faz uma comparação qualitativa entre dois controladores SDN de código aberto, o OpenDaylight e o Open Network Operation System (ONOS). O estudo foca na interface Northbound destes dispositivos.

Pesquisas mais recentes, como a realizada por Lusani Mamushiane<sup>[13]</sup>, estuda e avalia o desempenho de alguns controladores populares de código aberto como ONOS, Ryu, Floodlight e OpenDaylight em termos somente de latência como métrica, usando uma ferramenta de *benchmarking* OpenFlow chamada Cbench.

Também, no trabalho realizado por Tamal Das [8] é apresentado um *survey* com uma profunda pesquisa sobre o problema do posicionamento do controlador SDN, que classifica extensivamente os trabalhos existentes em várias perspectivas.

No trabalho de Ola Salman [14] é realizada uma avaliação qualitativa de controladores SDN de código aberto (MUL, Beacon, Maestro, ONOS, Ryu, OpenDaylight, Floodlight, NOX, IRIS, Libfluid-based e POX). As métricas avaliadas são latência e taxa de transferência desempenhadas sobre um número variável de switches. Os resultados obtidos sugerem que MUL e Libfluid-based têm o melhor desempenho de taxa de transferência, enquanto o Maestro mostrou melhor desempenho de latência. Outros trabalhos relacionados são comparados na **tabela 1**.

Neste trabalho serão comparados os controladores ONOS e Floodlight, que serão avaliados em dois cenários de posicionamento em uma rede SD-WAN, conforme a metodologia que será apresentada na **seção 4**.

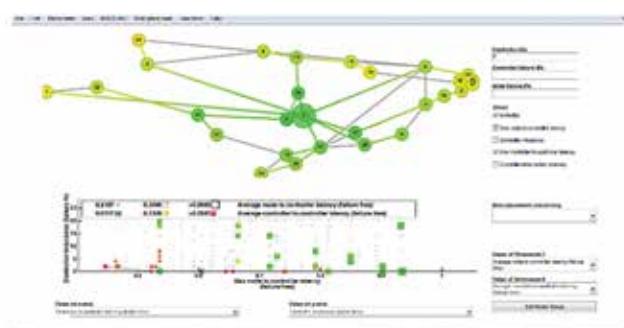
| Trabalho | Trabalhos Relacionados - Múltiplos Objetivos |                             |                             |                           |                 |                       |                           |                         | Public                    | Qualis                   |
|----------|--|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
|          | Posicionamento                               | Lógica Suíte de Controlador | Latença entre Controladores | Capacidade do Controlador | Controllability | Balancimento de Carga | Traffic Switch Controller | Número de Controladores | Análise de Topologia Real | Aplicação do Controlador |
| [6]      | ✓  | ✓                           | ✓                           | ✓                         | ✓               | ✓                     | ✓                         | ✓                       | ✓                         | IEEE A1                  |
| [14]     | ✓  | ✓                           | ✓                           | ✓                         | ✓               | ✓                     | ✓                         | ✓                       | ✓                         | IEEE A1                  |
| [15]     | ✓  | ✓                           | ✓                           | ✓                         | ✓               | ✓                     | ✓                         | ✓                       | ✓                         | IEEE A1                  |
| [16]     | ✓  | ✓                           | ✓                           | ✓                         | ✓               | ✓                     | ✓                         | ✓                       | ✓                         | IEEE A1                  |
| [17]     | ✓  | ✓                           | ✓                           | ✓                         | ✓               | ✓                     | ✓                         | ✓                       | ✓                         | IEEE A1                  |
| [18]     | ✓  | ✓                           | ✓                           | ✓                         | ✓               | ✓                     | ✓                         | ✓                       | ✓                         | IEEE A1                  |
| [19]     | ✓  | ✓                           | ✓                           | ✓                         | ✓               | ✓                     | ✓                         | ✓                       | ✓                         | IEEE A1                  |
| [20]     | ✓  | ✓                           | ✓                           | ✓                         | ✓               | ✓                     | ✓                         | ✓                       | ✓                         | Springer A1              |
| [21]     | ✓  | ✓                           | ✓                           | ✓                         | ✓               | ✓                     | ✓                         | ✓                       | ✓                         | IEEE A1                  |
| [22]     | ✓  | ✓                           | ✓                           | ✓                         | ✓               | ✓                     | ✓                         | ✓                       | ✓                         | IEEE A1                  |
| [23]     | ✓  | ✓                           | ✓                           | ✓                         | ✓               | ✓                     | ✓                         | ✓                       | ✓                         | IEEE A1                  |
| [24]     | ✓  | ✓                           | ✓                           | ✓                         | ✓               | ✓                     | ✓                         | ✓                       | ✓                         | IEEE A1                  |

**Tab. 1:** Trabalhos relacionados.

## 4. Metodologia aplicada

Este trabalho tem como base o estudo do método exaustivo utilizado na ferramenta POCO (Pareto-based Optimal Controller) para computar o posicionamento ótimo de controladores SDN na rede Ipê, da RNP.

Também foi utilizado o Mininet [25], como emulador de redes SDN empregado em um ambiente virtualizado para análise e comparação do impacto do posicionamento utilizando os controladores ONOS e Floodlight na operação de redes habilitadas com OpenFlow. A **figura 1**, mostra um exemplo da topologia da RNP na interface gráfica do POCO.

**Fig. 1 – Exemplo da interface gráfica do POCO.**

O emulador Mininet foi escolhido, principalmente, por ser possível emular redes reais e também pelos

seguintes motivos: oferece suporte a vários controladores SDN; os hosts são Linux com características “reais” que podem executar, potencialmente, qualquer programa que rode em Linux; possibilita análise de tráfego através da captura de pacotes usando, por exemplo, o Wireshark ou TCPDUMP; permite testes de conectividade com ping / fping ou de medidas de desempenho com iPerf; é possível criar links com largura de banda (*bandwidth*) e latências específicas, além de desativar e ativar os links.

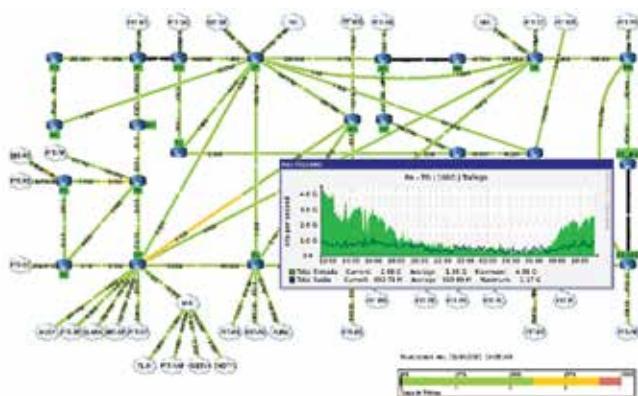
Existe uma série de controladores disponíveis na literatura. Entre os mais conhecidos estão o NOX, POX, Floodlight, OpenDaylight (ODL), *Open Network Operating System* (ONOS) e RYU. Contudo, em uma perspectiva de implementação prática, é muito difícil determinar qual controlador terá o melhor desempenho em qualquer tipo de rede. Na pesquisa realizada por Zhu [26], é possível verificar uma boa análise comparativa sobre os recursos de diversos controladores.

Nesse sentido, os critérios para a escolha dos controladores analisados nesta pesquisa incluem: interfaces (protocolos e versões suportadas), REST API, interface gráfica do usuário (GUI), modularidade, sistema operacional (SO) suportado, parcerias de desenvolvimento e suporte, documentação, linguagem de programação, virtualização, área de aplicação e arquitetura. Então, foram escolhidos os controladores ONOS e Floodlight.

Todo o ambiente de testes foi configurado em uma máquina virtual (VM), criada com o sistema operacional Ubuntu 16.04.05 LTS, contendo a versão do kernel padrão 4.4.0-87-generic, memória RAM de 8 GB, 8 processadores e o espaço de armazenamento interno de 30 GB. Essa VM foi configurada em um desktop com Windows 10 Home - 64 bits, processador Intel Core i7-9700 e 16 GB de memória RAM.

A topologia escolhida para os experimentos foi a rede Ipê, da RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa). A RNP é primeira rede de acesso à Internet no Brasil, integra mais de 800 instituições de ensino e pesquisa no país, conta com 28 nós posicionados em todos os Estados do território nacional beneficiando a mais de 3,5 milhões de usuários, evoluiu das linhas telefônicas

para conexões em fibra óptica de altíssima capacidade, de 64 Kb/s para mais de 100 Gb/s. Todas as informações utilizadas nos experimentos referentes às conexões entre os links, largura de banda e tráfego de entrada e saída entre os nós foram coletadas do panorama de tráfego da topologia real da RNP, disponíveis no próprio site da instituição, conforme exemplo mostrado na **figura 2**.



**Fig. 2 – Panorama de conexões e tráfego da RNP.**

Inicialmente, foi realizado um estudo das funcionalidades principais da ferramenta POCO para definição do posicionamento do controlador em uma rede SD-WAN. Além disso, também foram comparados os controladores ONOS e Floodlight, que foram avaliados em dois cenários de posicionamento, onde no primeiro cenário foram consideradas somente as informações de distâncias e latências, ou seja, os links foram testados livres de tráfego, utilizando a capacidade total do enlace. No segundo cenário, foram incluídos os tráfegos de ocupação dos enlaces diretamente conectados, de acordo com as informações reais do panorama de tráfego da RNP. Então, foram avaliadas todas as 28 possíveis posições para o controlador na topologia da RNP, e esses posicionamentos foram definidos como: (i) posição ótima e (ii) pior posição. Por posição ótima, entende-se o posicionamento no qual a latência entre os nós e o controlador é minimizada. Por pior posição, entende-se o posicionamento para o qual se tem maior latência entre os nós e o controlador.

Dessa forma, os resultados definidos pelos testes das posições com os controladores foram comparados com os resultados das posições definidas pelo método

exaustivo da ferramenta POÇO, que só considerou o primeiro cenário, sem tráfego. Essas comparações não consideraram apenas métricas estáticas como, por exemplo, as distâncias entre os nós da rede, mas também medidas quantitativas, como transferência de dados, *jitter* e perda de pacotes no cenário com tráfego.

## 5. Testes e análise de resultados

Com todo o ambiente de teste configurado, foram realizados os testes com as topologias criadas, integrando os controladores nos cenários sem tráfego (cenário 1) e com tráfego (cenário 2). Desse modo, para cada teste foi posicionado um host (srv) para simular o controlador em cada uma das 28 posições da topologia da RNP e foi executado o comando *fping* para obter as informações de latência a partir do controlador (srv) nessa determinada posição, com destino a todos os outros hosts nas demais posições.

Para obter melhores resultados estatísticos e alcançar maior eficácia nas comparações, foram consideradas 30 amostras dos testes com o *fping* ( $n = 30$ ) e nível de confiança de 95%. Então, neste caso, foram executados 30 testes com o *fping* para cada uma das posições da topologia, e em cada teste foram enviados 30 pacotes ICMP para cada destino.

Para a execução dos testes no cenário 2, onde foi considerado também o tráfego na rede (ocupação dos links), foi utilizado o programa *iPerf* para a simulação do tráfego, considerando as capacidades dos enlaces e os valores de tráfego real extraídos do panorama de tráfego da topologia da RNP. Após isso, também foi executado o teste com o *fping*, da mesma forma como no cenário sem tráfego.

*Iperf* é uma ferramenta para medições ativas da largura de banda máxima alcançável em redes IP, podendo realizar injecção de pacotes (tanto TCP quanto UDP) para medir o desempenho de redes de computadores. Ela suporta o ajuste de vários parâmetros relacionados a tempo, buffers e protocolos (TCP, UDP, SCTP com IPv4 e IPv6). Para cada teste, ela relata a largura de banda, perda e outros parâmetros.

Assim, os resultados dos testes com os controladores no cenário sem tráfego, considerando a melhor e a pior

posição, foram comparados com os resultados obtidos pelos cálculos da ferramenta POCO. Logo, esses resultados dos controladores puderam confirmar os posicionamentos estabelecidos pela ferramenta POCO ou mostraram novos posicionamentos, considerando outros fatores como, por exemplo, a capacidade dos links. Já os testes no cenário com tráfego mostraram a importância de se considerar métricas como as capacidades dos *links*, a capacidade de transferência de dados, o *jitter* e a perda de pacotes, além de somente considerar a distância entre os nós.

Para a execução dos testes com a ferramenta POCO, com a finalidade de comparar mais resultados, foram utilizados os posicionamentos e informações da topologia da RNP que estava operacional em três diferentes períodos (novembro de 2020, março de 2021 e julho de 2021), visto que, algumas alterações foram observadas nestas topologias, por exemplo, notou-se que alguns links deixaram de existir ou suas capacidades foram ampliadas, e outros novos links foram estabelecidos.

## 5.1 Posicionamentos poco

Os primeiros resultados, foram examinadas as posições definidas pela ferramenta POCO para as três topologias citadas. Para isso, foi considerado o cenário livre de falhas, com apenas um controlador ( $k = 1$ ). Nesses resultados é possível perceber que os valores das latências médias são idênticos ou muito próximos para as mesmas posições das topologias testadas. Portanto, nota-se que os resultados foram mantidos com o método exaustivo utilizado pela ferramenta POCO para os cálculos das latências baseados somente nas distâncias geográficas. Por isso, pode-se concluir que mesmo com as alterações nos links das topologias, mas sem alterações nas posições físicas dos nós, os resultados não demonstraram alterações significativas, ou seja, as distâncias e latências foram mantidas, conforme mostrado na **figura 3**.

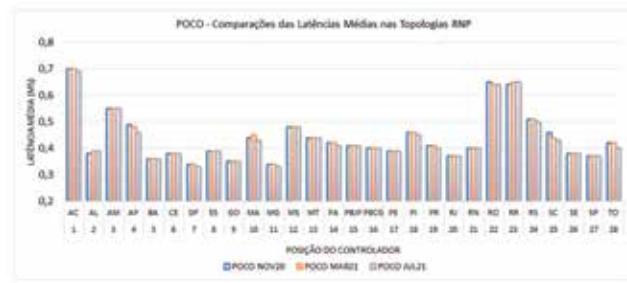


Fig. 3 – Classificação das posições POCO.

Então, para as três topologias testadas, a posição 7 (DF) foi definida como a melhor posição, com a menor latência média, e a posição 1 (AC) como a pior posição, com a maior latência. As definições das posições estão representadas por círculos maiores nas **figuras 4 e 5**.



Fig. 4 – Classificação da melhor posição POCO.

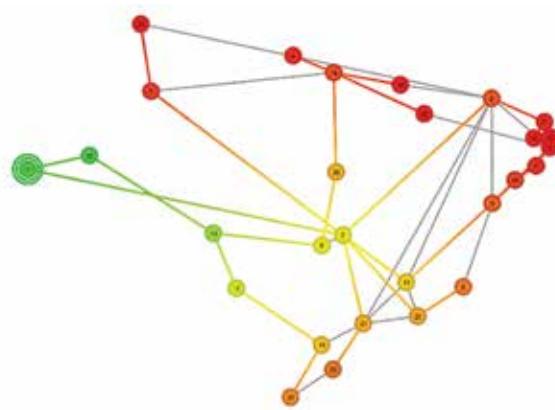


Fig. 5 – Classificação da pior posição POCO.

Na **figura 4**, também é possível perceber que o nó definido com a menor latência (7-DF), também é o nó mais centralizado na topologia, portanto, o de menor distância entre dois pontos, considerando somente as distâncias geográficas entre os nós com links estabelecidos. Também, verifica-se que o nó 7 (DF), tem uma boa quantidade de enlaces redundantes, o que facilita a ligação com os demais nós da rede. Sob outra perspectiva, o motivo do nó 1 (AC) ter sido definido como a pior posição pode ser justificado pela sua posição geográfica ser a mais distante em relação aos demais nós da topologia. Dessa forma, torna-se mais um indicativo de que a distância geográfica entre os nós têm bastante peso nas decisões por meio da ferramenta POCO, o que pode não ser suficiente para a decisão do posicionamento do controlador.

## 5.2 Classificações dos controladores

Após a classificação das posições pela ferramenta POCO, as topologias também foram testadas no Mininet utilizando os controladores ONOS e Floodlight, considerando os dois cenários propostos. Também, foram realizados testes considerando métricas críticas de desempenho, como quantidade de dados transmitida, jitter e perda de dados.

### 5.2.1 Canário 1 - Sem ocupação dos links

Nesta seção, são mostradas as comparações dos resultados dos testes de latência entre a ferramenta POCO e os controladores no primeiro cenário, sem tráfego. Para execução desses experimentos, foi utilizada a topologia que estava operacional no mês de novembro de 2020, quando foram iniciados os experimentos.

Para a realização do primeiro teste, já no Mininet com o cenário e a topologia pronta, os links foram utilizados livres de tráfego, com a capacidade total do enlace. Então, para cada teste foi posicionado um host (srv) para simular o controlador em cada uma das 28 posições e foi executado o comando *fping* para obter as informações de latência a partir do controlador (srv) nessa determinada posição com destino a todos os outros hosts nas demais posições.

Para obter melhores resultados estatísticos e alcançar maior eficácia nas comparações, foram consideradas 30 amostras dos testes com o *fping* ( $n = 30$ ) e nível de confiança de 95%. Para chegar a esse número de amostras (30 pings), foram executados testes com 10, 20, 30, 40, 50 e 100 pings com o controlador ONOS entre duas posições da topologia de estudo desta pesquisa. Assim, foi constatado o melhor caso, conforme mostrado na **figura 6**. Então, nos resultados apresentados a seguir, foram enviados 30 pacotes ICMP para cada destino.

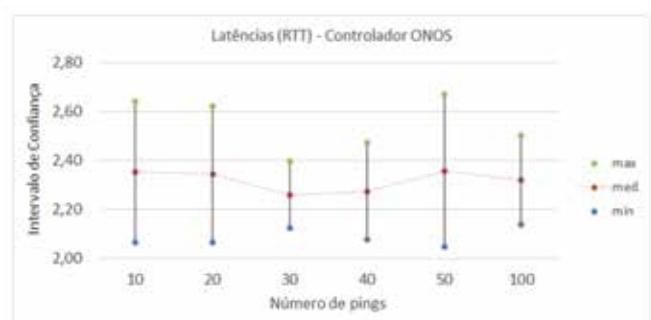


Fig. 6 – Topologia Nov 20 - sem ocupação dos links (cenário 1).

Para exemplificar o que foi descrito anteriormente, segue o comando que foi executado a partir do host controlador: *fping -s -g 10.0.0.201 10.0.0.228 -c 30*, conforme parâmetros da **tabela 2**.

Tab. 2: Parâmetros do *fping*.

|    |   |
|----|---|
| -s | Imprime as estatísticas ao final do teste   |
| -g | Gera uma lista de alvos a partir um range de IP, com os endereços IP inicial e final  |
| -c | Especifica o número de pacotes a serem enviados para cada destino. Neste teste foram enviados 30 pacotes ICMP para cada destino |

O range de IPs (-g 10.0.0.201 10.0.0.228) significa que o comando foi disparado do controlador com IP 10.0.0.200 para todos os hosts no range que varia na sequência do host 1, conectado na posição 1 (switch 1), com IP 10.0.0.201, até o host 28, na posição 28 (switch 28), com IP 10.0.0.228.

Após testadas as 28 posições, os resultados das latências médias foram comparados com os resultados calculados pela ferramenta POCO, conforme mostrado no gráfico

da **figura 7**. Neste gráfico, é possível verificar, já como resultado parcial para este cenário, que as posições definidas pela ferramenta POCO foram contrariadas pelos testes com os controladores.

Em primeiro lugar, os testes com os controladores ONOS e Floodlight realizados sem ocupação dos links (cenário 1), demonstraram que para ambos os controladores foi considerada a posição 28 (TO) como a melhor posição, contrariando a escolha calculada pela ferramenta POCO, que definiu a posição 7 (DF) como a melhor posição. Na definição da pior posição, os resultados dos testes consideraram a posição 22 (RO), já a ferramenta POCO considerou a posição 1 (AC). Essas posições também estão identificadas pelos marcadores no gráfico da **figura 7**.

Então, pode ser observado que com a inclusão dos controladores na rede foram considerados outros parâmetros, além das distâncias, como, por exemplo, o processamento dos controladores e os processos de descoberta da rede e definição dos melhores caminhos. Dessa forma, no cenário sem tráfego, as posições definidas como a de menor e maior latência contrariam as definições POCO.



Fig. 7 – Comparações da classificação das posições (cenário 1).

Outro fato observado nos testes foi que o controlador ONOS apresentou melhor desempenho comparado ao *Floodlight* em relação à latência, mostrado no gráfico da **figura 8**. Nesse gráfico é possível perceber que os resultados com o ONOS mostraram menor latência média na maioria das posições testadas, o que significa que esse controlador teve o melhor aproveitamento no processamento demandado por cada fluxo recebido no cenário sem tráfego.

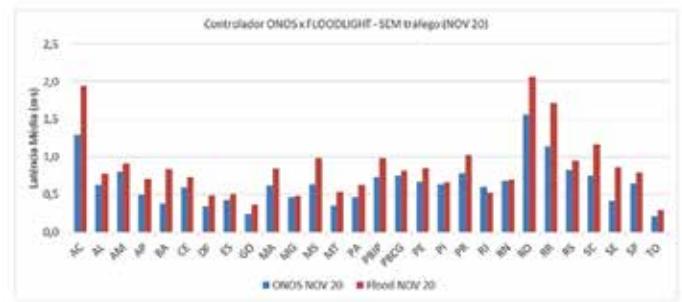


Fig. 8 – Comparação das latências (cenário 1).

## 5.2.2 Cenário 2 - Com ocupação dos links

Nesse cenário, foram desenvolvidos os experimentos considerando os parâmetros de tráfego da rede real (RNP) que podem impactar de forma significativa no posicionamento do controlador SDN. Portanto, foi considerada a ocupação dos links, ou seja, o tráfego na rede.

Então, antes de executar os testes com o *fping* para verificar as latências, foi gerado o tráfego entre cada par de nós diretamente conectados, de acordo com as informações obtidas no panorama de tráfego da rede real da RNP. Esse tráfego foi gerado pela ferramenta *iPerf*, usando o protocolo UDP para eliminar as possibilidades de erros de conexão que poderiam ser provocados pelo protocolo TCP. Também com o mesmo tráfego UDP é possível analisar outras métricas críticas, como transferência de dados, *jitter* e perda de pacotes, que serão apresentadas na próxima seção.

Inicialmente, para gerar tráfego entre dois hosts utilizando o *iPerf*, um dos hosts deve ser o servidor, que “escuta” o tráfego, e o outro o cliente, que envia o tráfego. Então, como nestes experimentos o tráfego para a simulação da ocupação dos links foi gerado simultaneamente entre todos os 28 nós, cada nó atuou como cliente e servidor ao mesmo tempo. Em seguida, durante a ocupação da rede com a transferência do tráfego no ambiente simulado pelo Mininet, mais uma vez foi executado o comando *fping*, conforme os parâmetros descritos nos testes do cenário sem tráfego.

Neste cenário, com tráfego, foi exigida uma grande capacidade computacional, principalmente de CPU e memória, o que dificultou os testes com a topologia completa da RNP. Neste caso, durante a geração do tráfego entre os hosts, o sistema virtualizado não suportou o tráfego e os controladores não conseguiram processar todo o tráfego demandado durante um período de tempo necessário para execução dos testes com o *fping*, logo, o tráfego foi interrompido, e não foi possível executar os testes de latências. Dessa forma, como tentativa de uma solução, todo o fluxo de pacotes foi escalonado com a diminuição de largura de banda e quantidade de tráfego gerado, porém, mesmo com essas alterações, ainda não foi possível executar os testes com um mínimo de eficácia, considerando o tráfego simultâneo de entrada e saída nos 28 nós da rede.

Diante disso, foram pesquisados alguns trabalhos mais recentes com possíveis soluções para o problema. Entre eles, o trabalho apresentado por Ahmadi [27] propõe um algoritmo heurístico denominado *Multi-Start Hybrid Non-Dominated Sorting Algorithm* (ou MHNSGA) para resolver o problema de posicionamento de controladores de forma eficaz. Porém, no contexto da otimização multiobjetivo, na maioria dos casos, pode não existir uma solução única que otimize todos os objetivos considerados.

O autor deste trabalho defende que os resultados de várias avaliações mostraram que o algoritmo proposto é capaz de explorar grande parte do espaço de busca e obter uma estimativa da fronteira ótima de Pareto com alto grau de precisão. Entretanto, segundo o próprio autor, em comparação com a busca exaustiva da ferramenta POCO, esse método pode ser menos preciso, mas requer menos tempo computacional e memória.

Assim, encontrar uma solução ótima para o posicionamento do controlador, considerando características de fluxos de tráfego de uma rede real aplicadas em um ambiente de pesquisa com capacidade computacional viável, ainda requer mais investigação sobre o problema.

Embora a análise do fluxo de tráfego na rede seja um fator crucial para a tomada de decisão sobre o posicionamento de controladores SDN, alguns outros fatores importantes também devem ser considerados. Esses fatores incluem as capacidades dos controladores e as cargas nos switches.

Então, ainda considerando as características de uma rede real em um cenário com tráfego, na próxima seção também serão comparadas algumas métricas críticas, como transferência de dados, *jitter* e perda de pacotes, que podem influenciar na escolha do posicionamento e no comportamento do controlador em uma SDN.

### 5.2.3 Métricas críticas de desempenho

Nesta seção, serão apresentados outros testes, considerando algumas métricas críticas que podem impactar no posicionamento e também no funcionamento do controlador. Nesse sentido, serão apresentados os testes de transferência de pacotes na **seção 5.2.4**, os testes com a métrica *jitter* na **seção 5.2.5** e o resultado dos testes de perda de pacotes em **5.2.6**. Por fim, essas três métricas serão comparadas na **seção 5.2.7**, observando o desempenho dos controladores ONOS e Floodlight inseridos nas topologias testadas.

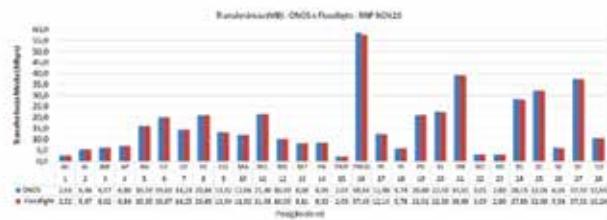
Os resultados exibidos foram obtidos por meio da geração de tráfego na rede utilizando a ferramenta *iPerf*, da mesma forma, como executado nos testes com o **cenário 2**, descrito em **5.2.2**. Porém, esse tráfego foi reduzido e gerado durante o tempo total de 60 segundos. Dessa forma, esse período de fluxo foi suficiente para a avaliação dessas métricas sem que ocorressem os problemas de esgotamento dos recursos computacionais. Então, as informações geradas foram analisadas e comparadas, conforme será apresentado nas próximas Seções.

### 5.2.4 Quantidade de dados transferidos

Cada link diretamente conectado, foi ocupado com os seus respectivos tráfegos máximos de entrada e saída, de acordo com as informações do panorama

de tráfego da RNP verificado no período analisado. Então, após a ocupação dos links e geração do tráfego durante o período de tempo total analisado (60 seg), foram coletados os dados de transferência média em cada um dos links, ou seja, a quantidade média de dados transferidos (Mbps) neste período de teste.

O gráfico na **figura 9** mostra a comparação dos controladores ONOS e Floodlight sobre as quantidades de dados transferidos (Mbps). Nesses gráficos pode-se verificar de forma geral que os controladores tiveram o mesmo tratamento no processamento do tráfego entre os nós, pois, foi transferida a mesma quantidade de tráfego, com os dois controladores e não foram evidenciadas diferenças significativas.



ligado à sua capacidade de armazenamento. Por outro lado, o Floodlight apresentou menor *jitter*, o que evidencia o baixo armazenamento dos dados na memória RAM, no *buffer* e na *cache*, porém, isso pode causar maior perda de dados e pode reduzir a capacidade de resposta do controlador.

Assim, constata-se também que, além das métricas de distâncias, de latências e de considerações do tráfego na rede, também é importante identificar as prioridades de tráfego e decidir qual será o controlador mais apropriado para tal finalidade.

## 6. Conclusão e trabalhos futuros

Neste trabalho, foi apresentado um estudo sobre o problema de posicionamento de controladores em SDN. Nesse contexto, foi descrita a implementação realizada no *framework* POCO que, de forma geral, apresentou bons resultados considerando as medidas estáticas de distância e latência, porém, com os resultados

apresentados nos testes incluindo os controladores na rede, é possível destacar que as características reais da rede podem impactar de forma expressiva na escolha do posicionamento de um controlador SDN. Também, é possível observar que a escolha de um determinado tipo de controlador deve ser pensada de acordo com a finalidade desejada, pois suas características também podem impactar no posicionamento.

Por fim, cabe enfatizar que o posicionamento eficiente do controlador tenta melhorar o desempenho de métricas, como latência, prioridades de tráfego, perda e assim por diante. Contudo, o estudo para o problema do posicionamento do controlador ainda pode compreender diversas soluções diferentes. Portanto, espera-se ampliar o estudo para o desenvolvimento e aprimoramento de ferramentas para o posicionamento dos controladores, com base em medidas de desempenho de redes reais, e que essas ferramentas possam analisar o problema de posicionamento de controladores na presença de tráfego de dados.

## Referências

- [1] B. A. A. Nunes et al. "A Survey of Software-Defined Networking: Past, Present, and Future of Programmable Networks". In: IEEE Communications Surveys Tutorials 16.3 (Third 2014), pp. 1617–1634.
- [2] NICK MCKEOWN ET AL. "OpenFlow: enabling innovation in campus networks". In: ACM SIG-COMM Computer Communication Review 38.2 (2008), pp. 69–74.
- [3] DIEGO KREUTZ ET AL. "Software-defined networking: A comprehensive survey". In: Proceedings of the IEEE 103.1 (2015), pp. 14–76.
- [4] STANISLAV LANGE ET AL. "Heuristic approaches to the controller placement problem in large scale SDN networks". In: IEEE Transactions on Network and Service Management 12.1 (2015), pp. 4–17.
- [5] BRANDON HELLER, ROB SHERWOOD, AND NICK MCKEOWN. "The controller placement problem". In: ACM SIGCOMM Computer Communication Review 42.4 (2012), pp. 473-478.
- [6] DAVID HOCK ET AL. "POCO-framework for Pareto-optimal resilient controller placement in SDN-based core networks". In: 2014 IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS). IEEE. 2014, pp. 1–2.
- [7] GUODONG WANG ET AL. "The controller placement problem in software defined networking: A survey". In: IEEE Network 31.5 (2017), pp. 21–27.
- [8] TAMAL DAS, VIGNESH SRIDHARAN, AND MOHAN GURUSAMY. "A survey on controller placement in SDN". In: IEEE communications surveys & tutorials 22.1 (2019), pp. 472-503.
- [9] PIOTR CZYZZAK AND ADREZEJ JASZKIEWICZ. "Pareto simulated annealing - a metaheuristic technique for multiple-objective combinatorial optimization". In: Journal of Multi-Criteria Decision Analysis 7.1 (1998), pp. 34–47.
- [10] ABHISHEK RASTOGI AND ABDUL BAIS. "Comparative analysis of software defined networking (SDN) controllers—In terms of traffic handling capabilities". In: 2016 19th International Multi-Topic Conference (INMIC). IEEE. 2016, pp. 1–6.
- [11] AMIN TOOTOONCHIAN ET AL. "On Controller Performance in Software-Defined Networks". In: 2nd {USENIX} Workshop on Hot Topics in Management of Internet, Cloud, and Enterprise Networks and Services (Hot-ICE 12). 2012, pp. 1–6.

- [12] ANDREI BONDKOVSII ET AL. "Qualitative comparison of open-source sdn controllers". In: NOMS 2016–2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. IEEE. 2016, pp. 889–894.
- [13] LUSANI MAMUSHIANE, ALBERT LYSKO, AND SABELO DLAMINI. "A comparative evaluation of the performance of popular SDN controllers". In: 2018 Wireless Days (WD). IEEE. 2018, pp. 54–59.
- [14] Ola Salman et al. "SDN controllers: A comparative study". In: 2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). IEEE. 2016, pp. 1–6.
- [15] Md Tanvir Ishtaique ul Huque et al. "Large-scale dynamic controller placement". In: IEEE Transactions on Network and Service Management 14.1 (2017), pp. 63–76.
- [16] Kshira Sagar Sahoo et al. "Solving multi-controller placement problem in software defined network". In: 2016 International Conference on Information Technology (ICIT). IEEE. 2016, pp. 188–192.
- [17] H SOFIA NANING, RENDY MUNADI, AND MUHAMMAD ZEN EFFENDY. "SDN controller placement design: For large scale production network". In: 2016 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob). IEEE. 2016, pp. 74–79.
- [18] PETRA VIZARRETA, CARMEN MAS MACHUCA, AND WOLFGANG KELLERER. "Controller placement strategies for a resilient SDN control plane". In: 2016 8th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM). IEEE. 2016, pp. 253–259.
- [19] DIOGO MF MATTOS, OTTO CARLOS MB DUARTE, AND GUY PUJOLLE. "A resilient distributed controller for software defined networking". In: 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE. 2016, pp. 1–6.
- [20] AHMAD JALILI, MANIJEH KESHTGARI, AND REZA AKBARI. "Optimal controller placement in large scale software defined networks based on modified NSGA-II". In: Applied Intelligence 48.9 (2018), pp. 2809–2823.
- [21] DAVID HOCH et al. "POCO-PLC: Enabling dynamic pareto-optimal resilient controller placement in SDN networks". In: 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE. 2014, pp. 115–116.
- [22] STANISLAV LANGE et al. "Specialized heuristics for the controller placement problem in large scale SDN networks". In: 2015 27th International Teletraffic Congress. IEEE. 2015, pp. 210–218.
- [23] HU BO ET AL. "The controller placement problem for software-defined networks". In: 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE. 2016, pp. 2435–2439.
- [24] PENG XIAO et al. "The SDN controller placement problem for WAN". In: 2014 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE. 2014, pp. 220–224.
- [25] BOB LANTZ, BRANDON HELLER, AND NICK MCKEOWN. "A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks". In: Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks. 2010, pp. 1–6.
- [26] LIEHUANG ZHU et al. "SDN controllers: Benchmarking & performance evaluation". In: arXiv preprint arXiv:1902.04491 (2019).
- [27] VAHID AHMADI AND MOSTAFA KHORRAMIZADEH. "An adaptive heuristic for multi-objective controller placement in software-defined networks". In: Computers & Electrical Engineering 66 (2018), pp. 204–228.

# Tabuleiro em material compósito de fibra de vidro e resina para pontes temporárias

Igor Berta Pitz<sup>a</sup>, Ana Maria Abreu Jorge Teixeira<sup>b</sup>, Luiz Antônio Vieira Carneiro<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, igor.pitz@eb.mil.br

<sup>b</sup>Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, anam@ime.eb.br

<sup>c</sup>Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, carneiro@ime.eb.br

**RESUMO:** O tabuleiro é o componente com maior desgaste em pontes temporárias. O interesse pelo uso de materiais compósitos na engenharia é crescente mundialmente, sendo o de fibra de vidro e resina (GFRP) o com melhor custo benefício. Esta pesquisa, tem por objetivo avaliar, experimentalmente, um tabuleiro em GFRP para aplicação na ponte Bailey. Os painéis avaliados do tabuleiro foram fabricados por pultrusão e laminação manual. O programa experimental consistiu em ensaios de caracterização dos materiais componentes do painel, ensaios de flexão até a ruptura e de fadiga na flexão. A carga-tipo adotada foi correspondente à roda da viatura Astros 2020. Os resultados dos ensaios, indicaram elevada resistência à flexão dos tabuleiros, porém grande deformabilidade e baixa resistência ao cisalhamento, esperados para este tipo de material. Os painéis atendem aos limites de flecha e resistência para veículos com carga de serviço de até 25 kN por roda.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tabuleiro. GFRP. Ponte Bailey.

**ABSTRACT:** Decks suffer the greatest deterioration among the various components of a bridge. The interest in using composite materials in engineering applications is increasing worldwide, and Glass Fiber Reinforced Polymers (GFRP) offers the best cost- benefit ratio. The aim of this research is to evaluate experimentally the performance of GFRP deck for application in a Bailey bridge. The tested deck panels were manufactured by pultrusion and manual lamination. The experimental program consisted in obtaining physical and mechanical properties of the panels' materials and the bending and fatigue behavior of the panels. The load applied corresponded to the wheel load of an Astros 2020 vehicle. The bending tests revealed that the decks present high bending resistance, great deformability, and low resistance to shear. The panels meet the limit deflection and resistance required for vehicles with service loads up to 25 kN per wheel.

**KEYWORDS:** Deck. GFRP. Bailey bridge.

## 1. Introdução

As pontes temporárias são úteis à sociedade no caso de enchentes e colapsos de pontes e para vencer obstáculos no terreno ou em operações militares. Estas pontes, geralmente, são fabricadas com materiais metálicos, principalmente, aço e alumínio, tendo elevado peso próprio e ficando expostas à corrosão, no caso do aço, o que provoca deterioração prematura de seus componentes. A estrutura de rolamento do tabuleiro de pontes, formada por longarinas metálicas e estrados de aço ou madeira, é o componente com maior desgaste por permanecer exposto ao tempo, ou ainda por estar em contato direto com os veículos que ali trafegam [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Nos Estados Unidos da América, por exemplo, existem mais de 600.000 pontes, nas quais em cerca de 25% delas os tabuleiros são estruturalmente deficientes ou obsoletos [7, 9].

O polímero reforçado com fibras – FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), é um material compósito formado por um reforço em fibras embebido em uma matriz polimérica. As fibras mais utilizadas são as de vidro, carbono e aramida. As resinas mais comuns são as de poliéster e éster vinílica. O polímero reforçado com fibras de carbono – CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) apresenta maior módulo de elasticidade e maior resistência, porém tem um custo mais elevado. O polímero reforçado com fibras de vidro – GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) apresenta resistência mecânica compatível com as do aço, menor custo, possuindo, portanto, uma maior tendência de uso entre os materiais compósitos para projetos de estrutura na engenharia civil [1].

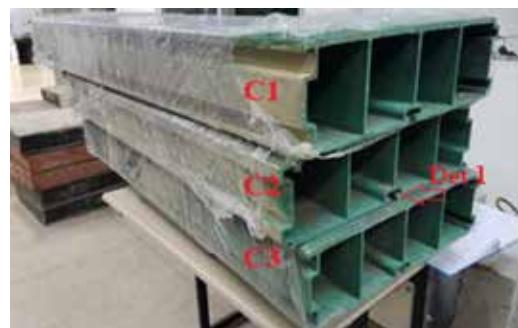
Suas principais vantagens são: imunidade à corrosão, elevada resistência mecânica em relação ao baixo peso próprio, resistência à fadiga e possibilidade de serem moldados em diferentes formatos [2, 3, 4, 5, 6]. Apesar dos custos iniciais mais elevados em

relação ao de outros materiais convencionais usados na engenharia civil, como concreto e o aço, características dos materiais compósitos como a imunidade à corrosão e menor peso próprio reduzem os custos de manutenção ao longo da vida útil da estrutura [7, 8, 9, 10]. Os materiais compósitos de fibra de vidro podem apresentar desgaste prematuro quando submetidos a raios ultravioleta de forma direta [1, 2, 3, 10].

A primeira ponte inteiramente de GFRP, que se tem notícia, foi construída em 1982 na China [6,11]. Nas últimas décadas, o uso de tabuleiros de GFRP na reabilitação ou construção de pontes aumentou consideravelmente [2, 3, 9, 10, 11]. Nos Estados Unidos da América, a pesquisa com este tipo de material iniciou-se em 1980 e, em 1995, passou-se a estudar a aplicação em pontes [9, 12]. Na Europa, desde o início dos anos 2000, houve um grande interesse pela utilização de FRP no piso de rolamento de pontes novas ou já existentes [3]. A Coréia do Sul iniciou pesquisas, financiadas pelo governo, em 2000 [4, 10]. Nestas regiões, há muitas pontes em concreto armado, que sofrem oxidação pelo uso frequente do sal para o degelo das pistas durante o inverno.

Os tabuleiros em FRP são de fácil instalação e apresentam elevada energia de absorção de impacto, garantindo uma vida útil próxima aos 50 ou 60 anos, muito superior aos 15 a 20 anos previstos para as estruturas de concreto nessas regiões [3, 10]. O transporte e manuseio dos tabuleiros é um ponto a ser observado, haja vista a possibilidade de ocorrerem danos ao material durante a realização desses procedimentos [1, 2, 10, 13, 16].

Os tabuleiros de GFRP podem ser classificados em tipo sanduíche ou pultrudado. O primeiro consiste de duas placas de aço, alumínio ou materiais compósitos, “recheadas” com um material mais leve, como espuma (policloreto de vinil, poliuretano e outros polímeros orgânicos), madeira compensada ou mesmo material compósito. O segundo compreende perfis fabricados pelo processo de pultrusão, com formatos triangulares, retangulares, trapezoidais ou hexagonais. [2, 13, 14]. O tabuleiro pode ser fabricado como uma peça única ou os perfis podem ser colados ou parafusados entre si [6, 14]. Tabuleiros híbridos, fabricados com GFRP e aço, por exemplo, já foram estudados [4, 15].



**Fig. 1 – Painéis ensaiados nesta pesquisa. Fonte: [1].**

Na literatura pesquisada, os autores realizaram ensaios de flexão estática [2, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 16, 17] e ensaios dinâmicos de flexão [2, 4, 7, 14, 17]. As falhas mais comumente observadas pelos autores nos tabuleiros de GFRP foram descolamento dos perfis e delaminação do material [1, 2, 4, 6, 7, 10, 13, 18]. Resultados experimentais confirmam que a flecha e a resistência ao cisalhamento são os parâmetros mais críticos em tabuleiros de GFRP [4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 16].

Uma das primeiras utilizações de tabuleiros em materiais compósitos para aplicações militares foi na *Composite Army Bridge* em 1999 [19, 20]. O Exército Brasileiro estabeleceu como um de seus objetivos estratégicos o desenvolvimento de uma ponte desmontável de emprego dual. As pontes fabricadas no Brasil ainda são das décadas de 1940 e 1970, sendo, principalmente, de aço e, por isso, pesadas e suscetíveis à corrosão.

As pesquisas disponíveis na literatura sobre tabuleiros de ponte em materiais compósitos apresentam informações limitadas. Não existe exploração científica acerca do uso de tabuleiros de materiais compósitos ou da fabricação de componentes para esta finalidade no Brasil. Então, esta é uma pesquisa pioneira nacionalmente sobre o assunto, que tem como objetivo principal avaliar o comportamento experimental de um tabuleiro de polímero reforçado com fibra de vidro e resina (GFRP) em substituição às longarinas metálicas e estrados de madeira de pontes Bailey.

## 2. Painel de tabuleiro proposto e ponte Bailey

Os painéis avaliados nesta pesquisa foram fabricados pela empresa italiana Top Glass, cedidos para a pesquisa pela empresa Cogumelo, localizada na cidade do Rio de Janeiro- RJ. Estes painéis são inteiramente pultrudados, formando uma única peça (**figura 1**), e foram fabricados com resina de poliéster e fibras de vidro tipo “E”.

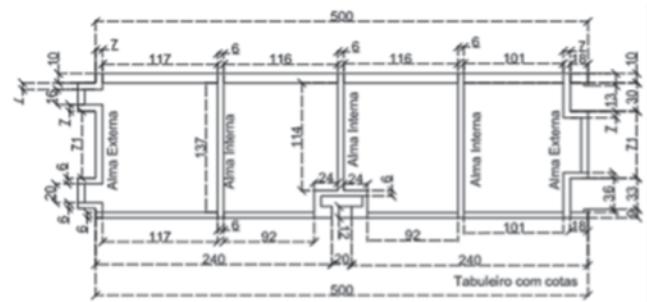
A aplicação original deste painel de tabuleiro era para o emprego como heliponto, sendo os painéis encaixados um no outro e parafusados (**v. det 1 na figura 1**) no encaixe inferior abaixo da alma interna central. Para a presente pesquisa objetivou-se a utilização dos painéis para comporem o tabuleiro de pontes temporárias, com largura variável, de acordo com a necessidade.

As medidas dos painéis são de 500 mm de largura e 153 mm de altura. Foram testados dois painéis com 1280 mm de comprimento, um com 1600 mm de comprimento e um com 960 mm de comprimento. Os três painéis mais longos foram ensaiados à flexão e o painel mais curto foi utilizado na confecção das amostras utilizadas nos ensaios de caracterização física e mecânica do material. As dimensões do painel são apresentadas na **figura 2**. A mesa superior possui uma camada de 3 mm de material antiderrapante.

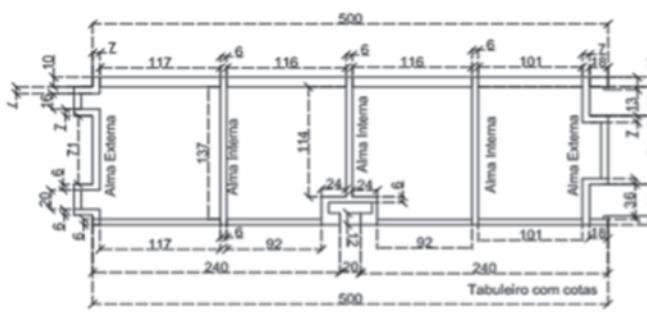
O Exército Brasileiro possui diversas equipagens de pontes, com destaque para a *Logistic Support Bridge*, M4T6 e Bailey [1]. O tabuleiro em estudo se aplica às pontes temporárias como a ponte Bailey, e tem a função de substituir as longarinas metálicas e os estrados de madeira desta ponte, conforme apresentado na **figura 3**.

A ponte Bailey teve origem ainda na Segunda Guerra Mundial, podendo ser montada de forma biapoiada ou sobre suportes flutuantes. Os painéis que compõem as vigas longitudinais são treliçados, podendo a estrutura ser montada por até três linhas linhas com até três andares de altura cada. Assim, as pontes podem ser montadas como simples-simples até tripla-tripla. A **figura 3** apresenta uma ponte dupla simples. A distância entre travessas é de 1.524 mm e a largura da sua mesa superior,

que serve de apoio para as longarinas metálicas do tabuleiro, é de 114 mm. A ponte é desmontável, projetada para uso militar e para vencer vãos de até 64 metros, com capacidade de até 333 kN de carga [21, 22, 23].



**Fig. 2** – Geometria dos painéis ensaiados (cotas em mm). Fonte: [1].



**Fig. 3 –** Principais elementos constituintes

por até três linhas linhas com até três andares de de altura cada. Assim, as pontes podem ser montadas como simples-simples até tripla-tripla. A **figura 3** apresenta uma ponte dupla simples. A distância entre travessas é de 1.524 mm e a largura da sua mesa superior, que serve de apoio para as longarinas metálicas do tabuleiro, é de 114 mm. A ponte é desmontável, projetada para uso militar e para vencer vãos de até 64 metros, com capacidade de até 333 kN de carga [21, 22, 23].

A **figura 4** mostra uma ponte Bailey apoiada em uniflotes. Sua construção não exige equipamentos

especiais ou pesados. Seu conhecimento e montagem fazem parte do currículo escolar de todos os militares de carreira (oficiais e sargentos) da arma de Engenharia. O tabuleiro da ponte sofre um desgaste elevado, devido ao apodrecimento dos pranchões de madeira e consequente corrosão dos painéis de tabuleiro metálicos [1, 21-23].

As Forças Armadas Brasileiras, possuem diversas viaturas militares, sendo a Astros 2020 a mais pesada sobre rodas, e que será adotada no presente estudo. A viatura é composta por seis rodas, sendo 48,9 kN a carga máxima por roda e 326 mm x 345 mm a área de contato de suas rodas com o solo, sendo essa a área para realização do ensaio de flexão

### 3. Programa experimental

O programa experimental constou de ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos materiais componentes dos painéis, ensaios de flexão estáticos e de fadiga na flexão dos painéis.

#### 3.1 Ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas



**Fig. 4 – Ponte Bailey (apoiaada em uniflotes).** Fonte: [23].

Foram realizados os seguintes ensaios: peso específico [24], percentual de fibras [24], tração [25, 26], cisalhamento, [27, 28] compressão longitudinal às fibras [29] e compressão transversal às fibras [29], conforme a *American Society of Testing and Materials (ASTM)* e *International Organisation for Standardization (ISO)*, pois não existem normas similares estabelecidas pela ABNT para os materiais compósitos.

As amostras foram divididas em três grupos: mesa superior, mesa inferior e alma interna. A **tabela 1** apresenta o resumo dos resultados de percentual de fibras totais, percentual de fibras longas, peso específico ( $\gamma$ ) módulo de elasticidade longitudinal na tração ( $E_t$ ), coeficiente de Poisson na tração ( $v_t$ ), resistência à tração ( $f_t$ ), resistência ao cisalhamento transversal às fibras ( $\sigma_{23}$ ), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ( $\sigma_{12}$ ), resistência à compressão longitudinal às fibras ( $f_d$ ), resistência à compressão transversal às fibras ( $f_{ct}$ ), módulo de elasticidade na compressão longitudinal às fibras ( $E_{cl}$ ) e coeficiente de Poisson na compressão longitudinal às fibras ( $v_{cl}$ ). As amostras de tabuleiro da empresa C foram fabricadas a partir de uma seção transversal do painel com 960 mm de comprimento, conforme mostrado na **figura 5**.

Da análise da **tabela 1**, temos que o percentual de fibras longas é elevado em relação ao de fibras totais nas almas e nas mesas. Os parâmetros de  $\gamma$ ,  $E_t$ ,  $v_t$ ,  $f_t$ ,  $\sigma_{23}$ ,  $\sigma_{12}$  e  $f_{cl}$  são inferiores aos encontrados em [1, 5, 13], o que evidencia uma qualidade inferior do material analisado.

#### 3.2 Metodologia dos ensaios de flexão



**Fig. 5 – Divisão dos grupos das amostras do painel ensaiado.** Fonte: [1].

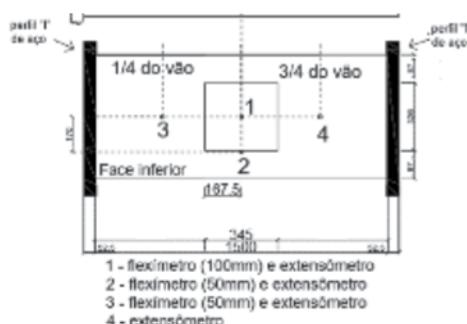
Os painéis apresentados na **figura 1** foram apoiados em perfis “I” metálicos em uma largura de 114 mm, simulando as travessas da ponte Bailey (v. **figura. 3**). As **figuras 6 e 7** apresentam o esquema do ensaio realizado. Os perfis “I” foram fixados em dois blocos de concreto armado (350 mm x 350 mm x 1000 mm) por meio de parafusos. O painel C1 foi ensaiado com vão de 1.450 mm e os painéis C2 e C3 com vão de 1.220 mm. A carga foi aplicada centralizada no painel, em uma área de 345 mm x 326 mm. Utilizou-se uma chapa de aço com espessura de 25,4 mm sobre uma placa de neoprene de 9 mm de espessura.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do IME. Foi utilizado um atuador hidráulico da marca MTS, com capacidade de 1000 kN. Para aquisição dos dados de deformação e deslocamento, foi utilizado o sistema de aquisição de dados modelo ADS 2000, da marca Lynx, conectado a um computador.

**Tab. 1 –** Propriedades físicas e mecânicas do material compósito dos tabuleiros.

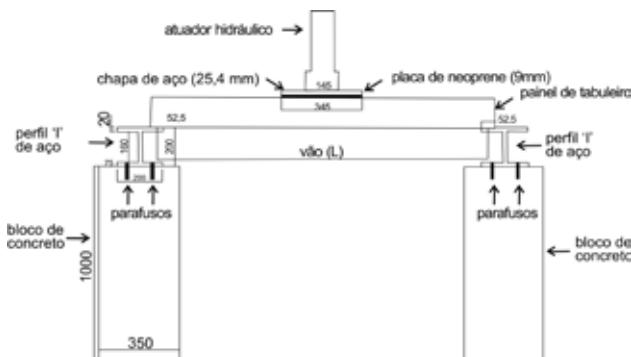
| Perfil                       | Alma         | Mesa Superior | Mesa Inferior |
|------------------------------|--------------|---------------|---------------|
| % de fibras totais           | 59,0% ± 0,9% | 49,2% ± 1,3%  | 62,1% ± 1,8%  |
| % de fibras longas           | 52,2% ± 1,2% | 45,5% ± 1,4%  | 54,8% ± 1,7%  |
| $\gamma$ (N/m <sup>2</sup> ) | 23,6         | 19,6          | 21,4          |
| $E_t$ (GPa)                  | 26,4         | 28,7          | 28,3          |
| $v_t$                        | 0,28         | 0,29          | 0,28          |
| $f_t$ (MPa)                  | 384,5        | 389,8         | 345,7         |
| $\sigma_{23}$ (MPa)          | 22,1         | 15,0          | 22,0          |
| $\sigma_{12}$ (MPa)          | 9,2          | 5,3           | 8,6           |
| $f_{ct}$ (MPa)               | 325,5        | 281,1         | 248,7         |

Os painéis foram instrumentados com quatro extensômetros elétricos de resistência, no sentido longitudinal do painel e dois LVDT, todos na parte inferior do painel. A Fig. 8 mostra a disposição dos extensômetros e LVDT na parte inferior do tabuleiro e a figura 9 mostra o painel instrumentado sobre os apoios.

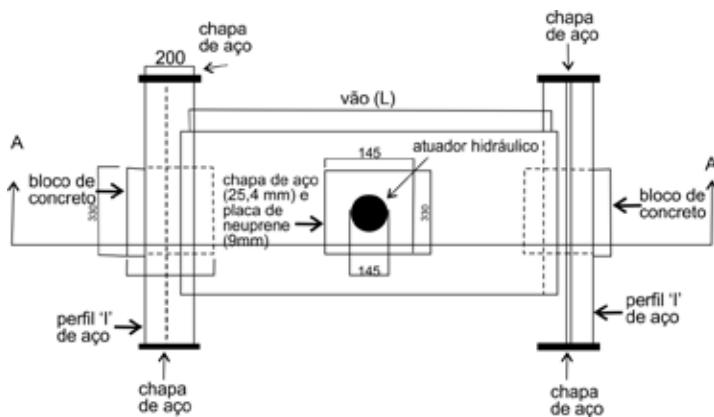


**Fig. 8 –** Instrumentação dos painéis. Fonte: [1].

Haja vista não existir uma normatização para a realização de ensaios em tabuleiros de



**Fig. 6 –** Esquema de ensaio adotado (cotas em mm). Fonte: [1].



**Fig. 7 –** Vista superior do esquema de ensaio adotado. (cotas em mm). Fonte: [1].

GFRP, procurou-se embasar o ensaio na literatura estudada [2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 30, 31], com adaptações para as condições e objetivos desta pesquisa. Desta maneira, optou-se por um carregamento a uma velocidade constante de 5 kN/min, e dividido em patamares de 15 kN, 25 kN e 35 kN. Quando o carregamento atingia um destes patamares, a carga da amostra era mantida constante e o painel era inspecionado antes da continuação do ensaio. Após o último patamar (35 kN), as amostras foram carregadas até a ruptura.

## 4. Resultados e análise dos ensaios de flexão

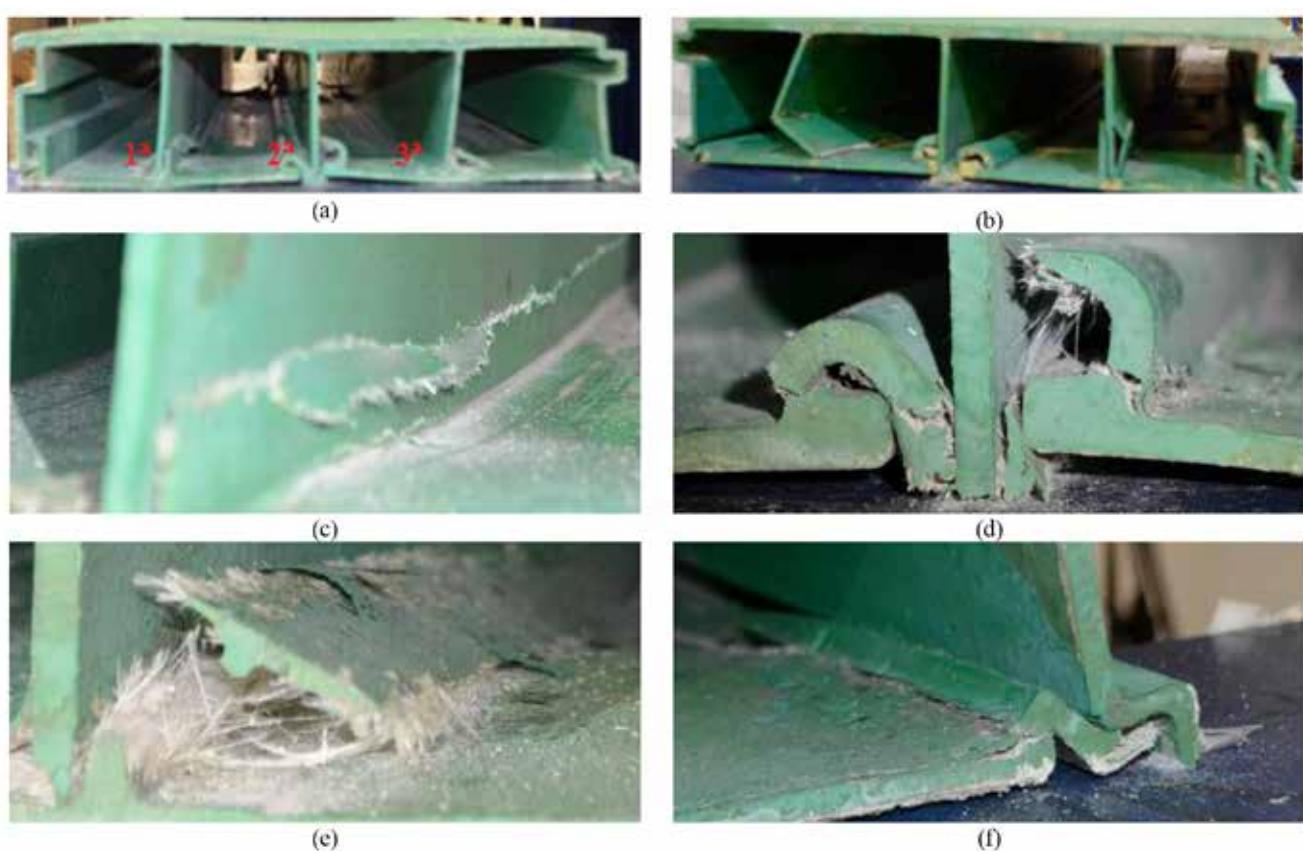
A seguir são apresentados os resultados dos ensaios estáticos e de fadiga.

### 4.1 Ensaios estáticos de flexão

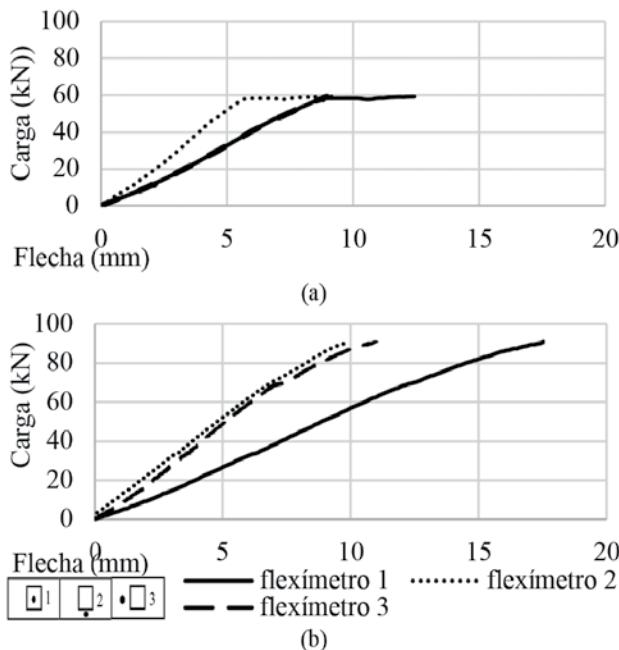


**Fig. 9 – Visão frontal do ensaio estático.** Fonte: [1].

Os painéis C1 e C2 foram submetidos a ensaios estáticos de flexão em vãos de, respectivamente, 1.450 mm e 1.220 mm. Ambos os painéis suportaram bem todos os três patamares de carga aplicados, não apresentando nenhum sinal de dano visível ou audível. Ao atingirem a carga de 48,9 kN, correspondente à carga por roda da viatura Astros 2020, a flecha na posição 1 foi de, aproximadamente, 8,86 mm (L/157) para C1 e 7,22



**Fig. 10 – Painéis após a ruptura:** (a) painel C1; (b) painel C2; (c) cisalhamento da alma interna e (d) da ligação para o parafuso na alma interna central; (e) delaminação da mesa inferior; e (f) cisalhamento da alma externa. Fonte: [1].

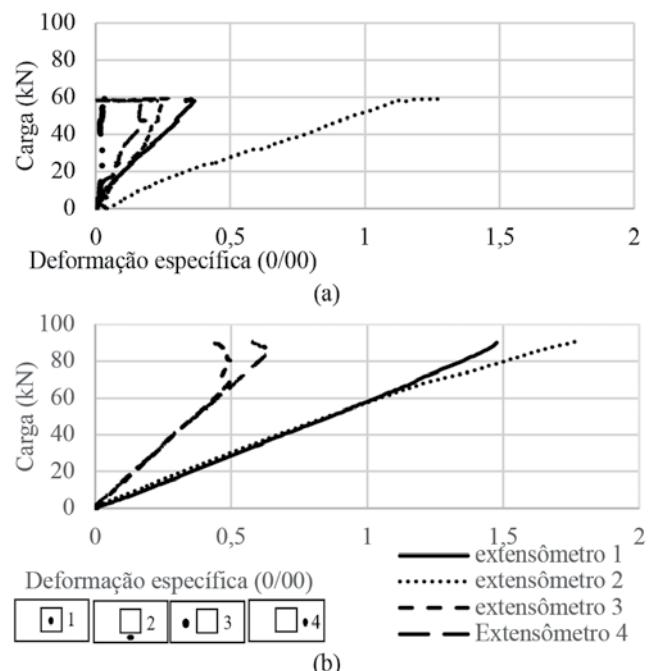


**Fig. 11** – Curvas carga x flecha dos painéis (a) C2 e (b) C1. Fonte: [1].

mm (L/169) para C2. A **figura 10** apresenta os painéis C1 e C2 após a ruptura.

A partir da carga de 60 kN começou-se a ouvir estalos com o painel C1. Primeiramente, houve o aparecimento de um corte cisalhamento na ligação para o parafuso na alma interna central. Este efeito foi aumentando até a ruptura do tabuleiro, que ocorreu ante a carga de 90,8 kN, com uma flecha de aproximadamente 17,58 mm (L/82). A ruptura caracterizou-se pelo cisalhamento da primeira alma interna próxima a mesa inferior e da ligação para o parafuso na alma interna central e pela delaminação da mesa inferior próxima a terceira alma.

Já no ensaio com o painel C2, os primeiros danos tornam-se audíveis ante a carga de 50 kN, embora não fosse observado nenhum dano aparente. A ruptura ocorreu ante a carga de 59,4 kN, com uma flecha no vão central de 12,41 mm (L/112). A ruptura caracterizou-se pelo cisalhamento das três almas internas, inclusive da ligação para o parafuso na alma interna central. Observa-se que houve distorção da seção até a ruptura, causada por falha da alma por flexão transversal.



**Fig. 12** – Curvas carga x deformação dos painéis (a) C2 e (b) C1. Fonte: [1].

A **tabela 2** apresenta as cargas, flechas e deformações de ruptura dos painéis C1 e C2. As posições 1, 2, 3 e 4 correspondem às mesmas apresentadas na **figura 9**.

A **figura 11** apresenta as curvas carga x flecha dos painéis. Verifica-se uma ligeira perda de rigidez do painel C1 a partir da carga de 68,9 kN. O painel C2, pouco antes da ruptura, ante a carga de 58,4 kN, os LVDT 1 e 2 saltaram de 8,8 mm e 5,73 mm para, respectivamente, 11,0 mm e 7,7 mm, indicando a ocorrência de dano no painel. A carga de ruptura foi de 59,4 kN. As curvas de carga x flecha dos painéis mostram que a alma central absorve mais carregamento que as demais.

A **figura 12** apresenta as curvas carga x deformação específica dos painéis C1 e C2. O painel C1 apresentou comportamento linear até a carga de 68,9 kN, quando os extensômetros 2 e 3 sofrem mudança de curso, indicando a ocorrência de danos no material e ratificando a perda de rigidez do tabuleiro já verificada nas curvas de carga x deslocamento. Ante a carga de 86,3 kN, o extensômetro 4 sofreu alteração de curso, indicando séria ocorrência de falha na estrutura.

## 4.2 Ensaio de Folga

O ensaio de fadiga na flexão foi realizado no painel C3 com vão de 1.220 mm. A frequência adotada foi de 3 Hz, até 2,11 milhões de ciclos de carregamento. A carga máxima de ensaio foi definida a partir do desempenho dos painéis C1 e C2, considerando-se a flecha limite em serviço de L/250. No painel C1, esta carga correspondeu a 30,3 kN, e no painel C2 correspondeu a 29,9 kN. Assim, a carga média dos ensaios foi majorada em 10%, resultando em 33 kN, que correspondeu a 36% da carga de ruptura do painel C1 e 55% da carga de ruptura do painel C2. A força mínima aplicada foi de 10% da força máxima (3,3 kN). O carregamento aplicado foi do tipo senoidal.

| Amostra | $P_{rup}$ (kN) | Vão (m) | Flecha <sub>rup</sub> (mm) |     |      | Deformação(%) |    |   |   |
|---------|----------------|---------|----------------------------|-----|------|---------------|----|---|---|
|         |                |         | 1                          | 2   | 3    | 1             | 2  | 3 | 4 |
| C1      | 90,8           | 1,45    | 17,6                       | 9,9 | 11,0 | 15            | 18 | 4 | 6 |
| C2      | 59,4           | 1,22    | 12,4                       | 9,2 | -    | 4             | 13 | 3 | 2 |

Tab. 2 – Cargas, flechas e deformações de ruptura.

Os LVDT foram retirados no ciclo de 113.313 por receio de danos no equipamento devido à carga cíclica e a uma possível ruptura do painel. A Fig. 13 apresenta as curvas carga x flecha do LVDT na posição 1 (v. Fig. 8). Da análise das curvas, verifica-se que não houve perda de rigidez do painel C3 devido ao ensaio de fadiga até o ciclo 113.313.

Os extensômetros não apresentaram nenhum aumento considerável de deformação ao longo do ensaio. O painel foi inspecionado durante o ensaio e nenhum sinal de dano visível foi verificado. Uma inspeção detalhada foi realizada ao final do ensaio, e também nenhum dano foi encontrado.

Após a realização do ensaio de fadiga, foi realizado o ensaio de ruptura do painel à flexão. Neste ensaio foram utilizados LVDT nas posições 1 e 2 (v. figura 8). Os patamares de carga adotados foram os mesmos dos demais painéis. O painel suportou bem todos os patamares, não mostrando nenhum sinal de dano visível e não tendo sido ouvido nenhum estalo do material. Na carga tipo de 48,9 kN, a flecha registrada

foi de, aproximadamente, 6,36 mm, correspondendo a L/192, tendo sido 11,7% menor do que a flecha obtida no ensaio do painel C2 para o mesmo vão e carga.

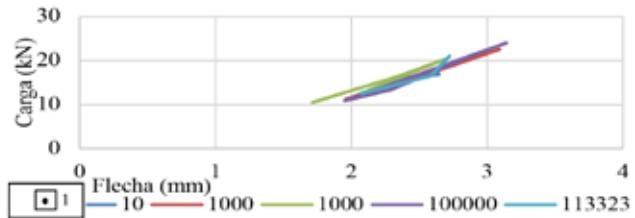


Fig. 13 – Curvas carga x flecha do painel C3 com o LVDT na posição 1. Fonte: [1].

Fig. 13 – Curvas carga x flecha do painel C3 com o LVDT na posição 1. Fonte: [1].

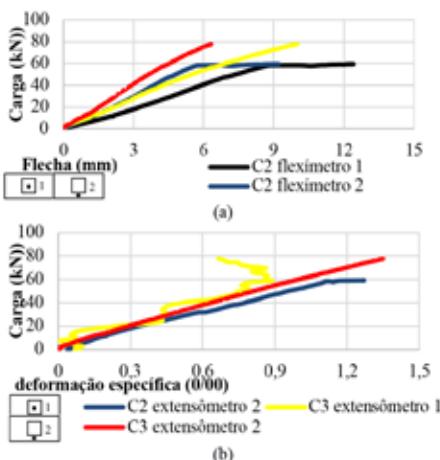
Os LVDT foram mantidos até o fim do ensaio. A partir da carga de 50 kN começaram-se a ouvir estalos do material, mas sem danos visíveis no mesmo. A carga de ruptura foi de 77,8 kN, valor superior ao obtido no ensaio do painel C2. A flecha registrada foi de, aproximadamente, 10,06 mm, valor inferior ao obtido no painel C2.

A figura 14 mostra o painel após a realização do ensaio. A segunda e quarta almas internas romperam por cisalhamento, e houve delaminação da mesa inferior próxima a elas. Também pode-se observar que as rupturas por cisalhamento das almas externas, além da ruptura do engate do parafuso, abaixo da alma interna intermediária.



Fig. 14 – Painel C3 após a ruptura: (a) vista das primeiras duas células, (b) vista das últimas duas células.

A figura 15 compara as curvas carga x flecha dos LVDT 1 e 2 e carga x deformação do extensômetro 2 obtidas nos painéis C2 e C3. Verifica-se que as curvas carga x flecha e carga x deformação do painel C3 possuem uma inclinação maior que as do painel C2, indicando comportamento mais rígido do painel C3.



**Fig. 15** – Curvas (a) carga x flecha e (b) carga x deformação, referentes a comparação entre os ensaios estáticos dos painéis C2 e C3.

Pela comparação entre os painéis C2 e C3, pode-se concluir que o desempenho do painel C3 foi superior, indicando que a carga máxima no ensaio de fadiga pode ser aumentada, haja vista que nenhum dano foi observado no painel.

### 4.3 Análise dos resultados

Os resultados experimentais obtidos, apesar da pequena quantidade de amostras, permitiram algumas análises interessantes. Os painéis suportaram a carga da roda da viatura Astros 2020 (48,9 kN), embora não se recomende a adoção destes painéis para a passagem deste veículo, haja vista que a razão entre a carga da roda e a de ruptura (59,4 kN) no painel C2 foi 1,21, menor do que o padrão de 1,39 recomendado pelo EUROCOMP [30], conforme se verifica na **tabela 3**.

A flecha recomendada pela FHWA [31] é de L/800. Este parâmetro considera aspectos como o conforto do usuário e a velocidade de tráfego, sendo, portanto, elevado para os padrões de pontes temporárias, cujas principais finalidades seriam o emprego militar ou

humanitário, situações em que o conforto do usuário e a velocidade de tráfego são secundárias.

O EUROCOMP [30] recomenda uma flecha máxima de L/300 para carga do veículo considerada como de curta duração. Desprezou-se o peso próprio do painel, pois ele corresponde a menos de 1% do peso do veículo. As flechas obtidas nos painéis C1 e C2 foram maiores que L/300 (**v. tabela 3**) indicando a grande flexibilidade do material. As cargas correspondentes a flecha de L/300 foram 25,6 e 25,5 kN, respectivamente, para os painéis C1 e C2.

O ensaio de fadiga mostrou que o tabuleiro de GFRP suportou os 2,11 milhões de ciclos de carga sem sofrer danos, corroborando resultados já destacados na literatura [2, 4, 7, 14, 17]. A curva carga x flecha do painel C3 se aproximou da carga obtida para o painel C1.

O painel C3 teve um desempenho superior, mesmo após o ensaio de fadiga, em relação à amostra C2, que foi ensaiada apenas estaticamente, indicando que o material apresenta boa resistência à fadiga.

**Tab. 3** – Resultados dos ensaios estáticos dos painéis C1 e C2.

| Painel                                   | C1    | C2    |
|--|-------|-------|
| Vão (mm)                                 | 1.450 | 1.220 |
| P <sub>tip</sub> (kN)                    | 48,9  | 48,9  |
| δ <sub>tip</sub> (mm)                    | L/164 | L/169 |
| P <sub>rup</sub> (kN)                    | 90,8  | 59,4  |
| P <sub>rup</sub> / P <sub>tip</sub>      | 1,86  | 1,21  |
| Peso próprio (kg)                        | 42,8  | 33,8  |
| σ (MPa)                                  | 29,7  | 19,4  |
| FS (P <sub>rup</sub> /P <sub>tip</sub> ) | 1,9   | 1,2   |

**Tab. 4** – Dimensão e peso do tabuleiro C

|  |           |
|--|-----------|
| Dimensões (H x L) (mm)                       | 153 x 500 |
| Peso do painel (N)                           | 388,3     |
| Peso por seção (A = 12,8m <sup>2</sup> ) (N) | 6628,6    |
| Peso por m <sup>2</sup> (N/m <sup>2</sup> )  | 517,8     |

A utilização de LVDT durante todo o ensaio é fundamental para uma análise mais detalhada do comportamento dos tabuleiros. A utilização de extensômetros elétricos de resistência em locais internos, como as almas internas, partes internas das mesas e placas, permitiria uma melhor investigação acerca das formas de ruptura. Salienta-se que isto não

foi realizado nesta pesquisa pelo fato de as amostras estarem prontas, sendo impraticável e pouco eficaz a colocação de extensómetros nestes locais. Foi verificado que o uso de extensômetros transversais ao sentido das fibras é dispensável, uma vez que estes são submetidos a esforços quase nulos. Todavia, tal afirmação carece de maior estudo para ser conclusiva.

Todas as amostras apresentaram ruptura na parte inferior. Os painéis C apresentaram ruptura por cisalhamento das almas e delaminação da mesa inferior, ocasionada pela instabilidade da estrutura, que sofreu torção devido à pequena espessura das almas.

A **tabela 4** apresenta as dimensões do painel C. O tabuleiro da ponte Bailey apresenta uma massa total de 1262 kg. Se a ponte fosse completamente preenchida por painéis C, possuiria um peso total por seção de 665,1 kg (considerando uma área de 4.200 mm de largura por 3.048 mm de comprimento), o que corresponderia a uma redução de 47,3% em relação ao peso do tabuleiro original da ponte *Bailey*.

Embora outros aspectos tenham de ser levados em consideração, como a colocação de engates metálicos ou ainda a remoção dos engates para os painéis de tabuleiros nas travessas, pode-se concluir que os tabuleiros de GFRP permitiriam uma redução substancial no peso estrutural do tabuleiro da ponte *Bailey*.

## 5. Conclusões

Este trabalho propôs o emprego de um tabuleiro de GFRP para utilização em pontes temporárias. Escolheu-se a ponte Bailey como parâmetro de dimensões, haja vista possuir a menor distância entre travessas e ter o seu tabuleiro original de aço e madeira, bem como ser a ponte de uso militar de maior emprego dentro do Exército Brasileiro.

Os painéis C possuem um peso próprio correspondente a 0,46% da carga de ruptura do painel

C1 e 0,56% do painel C2. O painel com menor vário obteve carga de ruptura menor, o que evidencia a necessidade de mais ensaios. As tensões de tensão na flexão foram baixas na ruptura, quando comparadas com os resultados dos ensaios de tração. A ruptura caracterizou-se por instabilidade da estrutura, ocasionando em corte nos apoios e cisalhamento na alma das vigas.

O ensaio dinâmico foi realizado sem qualquer dano aparente. Foi observada uma elevada carga de ruptura após o ensaio de fadiga, caracterizando um resultado superior em relação ao ensaio de flexão estática conduzido em condições similares.

Da análise dos resultados dos ensaios estáticos e dinâmicos, obteve-se que o tabuleiro C pode ser utilizado em pontes temporárias sujeitas a cargas de serviço de até 25 kN por roda. Embora todas as amostras tenham apresentado ruptura superior à carga tipo, ele não atende aos critérios de coeficiente de segurança e flecha ( $L/300$ ) estabelecidos no EUROCOMP [30].

A rigidez dos painéis é bem inferior à da maioria dos tabuleiros apresentados na revisão bibliográfica. Estes trabalhos evidenciam os anos de pesquisa e de aperfeiçoamento da geometria dos tabuleiros, visando o aumento de resistência e rigidez e a redução de peso.

Devido a elevada deformabilidade do GFRP fabricado por pultrusão, esse parâmetro acaba sendo restritivo a carga. Por fim, os tabuleiros de GFRP estudados são de 49% a 62% mais leves do que o tabuleiro original da Ponte *Bailey*, sendo a sua utilização uma grande vantagem construtiva.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à empresa Cogumelo pelo fornecimento dos painéis que permitiram a realização desta pesquisa e ao Exército Brasileiro pelo financiamento e fomento à pesquisa proporcionado.

## Referências

- [1] I. B. PITZ. Tabuleiros de material compósito de fibra de vidro e resina para pontes temporárias. 2018. 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Instituto Militar de Engenharia, 2018.
- [2] PARK, K. T. KIM, S. H., LEE, Y. H., HWANG, Y. K. Pilot test on a developed GFRP bridge deck. Composite Structures, Gyonggi-Do, KOR, n. 70, 2005. p.48-59.
- [3] TEIXEIRA, A. M. A. J. Ponte desmontável em material compósito de fibra de vidro. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007.
- [4] KIM, H. Y.; LEE, Y. H.; LEE, S. Y. Ultimate strength of a GFRP deck panel for temporary structures. Composite Structures, Gyeonggi-Do-KOR, n. 93, 2011. p. 528-537.
- [5] TOMÁS, E., SÁ, M. F., CORREIA, J. R., GOMES, A. M., SILVESTRE, N. Comportamento estrutural em flexão de painéis multicelulares pultrudidos de GFRP com aplicação em tabuleiros de pontes pedonais. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Lisboa, POR, n. 21, 2013. p. 51-62.
- [6] XIN, H., MOSALLAM, A., LIU, Y., WANG, C., ZHANG, Y. Analytical and Experimental evaluation of flexural behavior of FRP pultruded composite profiles for bridge deck structural design. Construction and Building Materials, California, USA, n. 150, 2017. p. 123-149.
- [7] BROWN, D. L.; BERMAN, J. W. Fatigue and Strength Evaluation of Two Glass Fiber-Reinforced Polymer Bridge Decks. Journal of Bridge Engineering, Seattle, USA, n. 15 (3) maio-junho, 2010. p. 290-301.
- [8] STANKIEWICZ, B. GFRP Deck for bridgind structures. Procedia Engineering, Opole-POL, n. 40, 2012. p.423-427.
- [9] ZHU, J.; LOPEZ, M. M. Performance of a lightweight GFRP composite bridge deck in positive and negative bending regions. Composite Structures, Pensylvania, USA, n. 113, 2014. p. 108-117.
- [10] PARK, S. Z.; HONG, K. J.; LEE, S. W. . Behavior of an adhesive joint under weak-axis bending in a pultruded. Composites: Part B, Seul-KOR, n. 63, 2014. p.123-140.
- [11] HE, J., LIU, Y. CHEN, A., DAI, L. Experimental investigation of movable hybrid GFRP and concrete bridge deck. Construction and Building Materials, Xangai, CHN, n. 26, 2012. p. 49-64.
- [12] BROWN, D. L.; BERMAN, J. W. Fatigue and Ultimate Testing Comparison of Two Fiber Reinforced Polymer Bridge Decks. Structures Congress, Seattle, USA, 2008. 7p.
- [13] VOVEZNÝ, R., ROTTER, T. GFRP bridge deck panel. Steel Structures and Bridges, Praga - RCH, n. 40, 2012. p. 492-497.
- [14] ARMAS, S. Y.; CASTRO, J.; KELLER, T. Energy dissipation and recovery in web-flange junctions of pultruded GFRP decks. Composite Structures, Lausanne-CHE, 2016. p.168-180.
- [15] JI, H. J., BYUN, J. K., LEE, C. S., SON, B. J., MA, Z. J. Structural performance of composite sandwich bridge decks with hybrid GFRP–steel core. Composite Structures, Seul, KOR, n. 93, 2011. p. 430-442.
- [16] ALAGUSUNDARAMOORTHY, P.; REDDY, R. V. S. Testing and evaluation of GFRP composite deck panels. Ocean Engineering, Madras, IND, n. 35, 2008. p. 287-293.
- [17] SÁ, M. F. GOMES, A. M., CORREIA, J. R., SILVESTRE, N. Flexural creep response of pultruded GFRP deck panels: Proposal for obtaining full- section viscoelastic moduli and creep coefficients. Composites Part B, Lisboa-PRT, n. 98, 2016. p. 213-224.
- [18] HING, C. L. C.; HALABE, U. B. Nondestructive Testing of GFRP Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar and Infrared Thermography. Journal of Bridging Engineering, Arlington, USA, n. 15, 2010. p. 391-398.
- [19] KOSMATKA, J. B. Structural testing of DARPA/BIR composite army bridge treadway. Composite Structures, n. 4, 1999. p. 99-115.
- [20] OSEI-ANTWI, M. CASTRO, J., VASSILOPOULOS, A. P., KELLER, T. FRP- Balsa Composite Sandwich Bridge Deck with Complex Core Assembly. Journal of Composite Construction, Lausane, CHE, 2013. 9p.
- [21] ESTADOS UNIDOS.FM 5-277 Bailey Bridge. Washington, EUA: Headquarters Department of the Army, 1986.
- [22] BRASIL. Exército Brasileiro. Ponte de Painéis tipo Bailey M2, 1ª Parte, Montada sobre Suportes Fixos. Manual Técnico T-277. Brasília: EGGCF, 1ª edição, 1979.
- [23] PAOLI, P. C. Manual do Pontoneiro. Rio de Janeiro: 2009.
- [24] ASTM D297 -13. Standard Test Methods for Rubber Products - Chemical Analysis, Philadelphia, EUA, 2013.
- [25] ASTM D3039/D3039M - 08. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Philadelphia, EUA, 2008.
- [26] DIN EN ISO 527-4. Determination of tensile properties of plastics Part 4: Test conditions for isotropic and

orthotropic fibre-reinforced plastic composites. Berlin, RFA, 1997.

- [27] ASTM D2344 - 06 Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, Philadelphia, EUA, 2006.
- [28] ASTM D5379M.-Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method, Philadelphia, EUA, 2006.
- [29] ASTM D3410/D3410M – 03.Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading, Philadelphia, EUA, 2008.
- [30] EUROCOMP DESIGN CODE AND HANDBOOK. Structural Design od Polymer Composites, John L. Clarke Ed., Londres, Rino Unido, 1996.

# Uso de blockchain no controle e rastreabilidade de acesso a dados armazenados em nuvem

Souza Jonatan<sup>a</sup>, Pinto Raquel<sup>b</sup>, Bruno Schulze<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME), jonatangd.souza@gmail.com

<sup>b</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME), raquel@ime.eb.br

<sup>c</sup>Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC), schulze@lncc.br

**RESUMO:** A computação em nuvem oferece diversos serviços, como armazenamento de dados e máquinas virtuais (VMs). Esses recursos são disponibilizados pela Internet e seu pagamento é dado pelo uso. Embora os serviços de nuvem sejam eficientes, há uma preocupação crescente na segurança e privacidade desses serviços prestados por nuvens computacionais. Entre essas preocupações, pode-se destacar o compartilhamento de dados entre usuários. Estes serviços não possuem um mecanismo de permissão que seja auditável pelo proprietário dos dados. Neste contexto, o blockchain tem se destacado principalmente por sua arquitetura de ledgers distribuídos que permite uma trilha imutável e auditável. Além disso, a arquitetura descentralizada do blockchain elimina a necessidade de confiança em terceiros. Portanto, este artigo apresenta uma arquitetura baseada no uso da tecnologia blockchain como repositório seguro e auditável de registro dos acessos e permissões concedidas aos usuários. Como resultado, este artigo apresenta um estudo de caso validando a arquitetura proposta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Computação em nuvem. Blockchain. Compartilhamento de dados. Segurança. Privacidade.

## 1. Introdução

O compartilhamento de dados entre usuários e serviços têm sido cada vez mais comum, principalmente com a crescente adoção da internet das coisas (*IoT - Internet of Things*). Em sistemas IoT, diversos dispositivos inteligentes interagem entre si gerando dados de diversos contextos. Considerando a grande quantidade de dados e a capacidade reduzida de armazenamento dos dispositivos pessoais, a utilização de serviços de armazenamento de dados tem sido cada vez mais comum tanto por usuários comuns como por empresas de grande porte.

Esta migração de armazenamento se dá à medida que as limitações de hardware e infraestrutura para comunicação vão sendo mitigadas. Desta forma, serviços de nuvem são frequentemente usados. Dentre as principais

**ABSTRACT:** Cloud computing offers a variety of services such as data storage and virtual machines (VMs). These features are made available over the Internet and your payment is per use. While cloud services are efficient, there is growing concern for the security and privacy of these services provided by cloud computing. Among these concerns, the sharing of data between users can be highlighted. These services do not have a permit system that is auditable. In this context, the blockchain has stood out mainly for its distributed ledger architecture that allows an immutable and auditable trail. In addition, the blockchain's decentralized architecture eliminates the need to rely on third parties. Therefore, this article presents an architecture based on the use of blockchain technology as a secure and auditable repository for recording access and permissions granted to users. As a result, this article presents a case study validating the proposed architecture.

**KEYWORDS:** Cloud computing. Blockchain. Data sharing. Security. Privacy. Data storage.

vantagens, podemos destacar: sua simplicidade, baixo custo financeiro e alta disponibilidade dos recursos.

A computação em nuvem pode ser definida como um tipo de sistema distribuído, constituído de um conjunto de computadores interconectados e virtualizados. Estes recursos são disponibilizados dinamicamente como recursos computacionais unificados, cujos serviços são baseados em acordos de nível de serviço [1]. O ambiente de nuvem é compartilhado entre diversos usuários onde a demanda por hardware e software pode ser contratada ou vendida a qualquer momento. Por isso, a nuvem deve ser capaz de crescer elasticamente, conforme a demanda desses recursos [2].

Considerando as vantagens mencionadas, serviços de nuvem tem adoção em larga escala, em diversos contextos, porém é necessário considerar que se trata de um serviço de terceiros para o armazenamento de

dados. Sendo assim, há uma necessidade da confiança do proprietário neste serviço para permitir ou revogar acesso a usuários terceiros, e não apenas no tocante ao armazenamento, uma vez que o controle de acesso e permissões estão do lado do serviço.

Portanto, existe uma preocupação crescente na segurança desses serviços prestados por nuvens computacionais: I) a garantia de que os dados são compartilhados apenas com os usuários autorizados pelo proprietário; II) os serviços, em geral, não possuem um mecanismo de permissão que seja auditável pelo proprietário dos dados.

Neste contexto, o *blockchain* tem ganhado atenção principalmente por sua arquitetura de ledgers (livro-razão) distribuído. O *blockchain* consiste em uma cadeia de blocos interligados através do uso de um ou mais *hashes* do bloco anterior, oferecendo uma trilha imutável e auditável.

Este trabalho apresenta uma arquitetura baseada em *blockchain* que provê um ambiente seguro e auditável de registro dos acessos e permissões concedidas, transferindo assim a necessidade de confiança de compartilhamento a dados com diferentes usuários, para um ambiente onde esses dados sejam auditáveis e imutáveis. Sendo assim, o proprietário dos dados terá as condições de auditar as permissões dadas e revogadas aos seus dados, além de verificar quando estes foram acessados.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II apresenta o cenário atual do *blockchain* e os principais conceitos. A Seção III aborda alguns dos principais trabalhos relacionados. A Seção IV apresenta a arquitetura proposta em detalhes. A Seção V aborda um estudo de caso da arquitetura em um contexto IoT. Por fim, a Seção VI conclui o artigo com algumas discussões e orientações futuras.

## 2. Conceitos básicos de blockchain

Esta seção apresenta uma breve descrição de conceitos e tecnologias importantes adotados neste estudo de pesquisa, relacionados a *blockchain*.

*Blockchain* é uma estrutura de dados descentralizada que é replicada e compartilhada entre os membros de uma rede denominados *peers*. Cada bloco contém um conjunto ordenado de transações e um hash que são marcados com um *timestamp*. Cada bloco inclui também o *timestamp* do bloco anterior em seu hash, formando uma lista encadeada de blocos, com cada *timestamp* adicional reforçando os anteriores [14].

A estrutura de dados do bloco é composta por um *header* e a lista de transações. O *header* contém metadados sobre um bloco e o *hash* do bloco anterior. Para cada bloco N, o hash do bloco N-1 é considerado. O bloco de configuração que inicializa os componentes e serve como o primeiro bloco em uma cadeia é chamado de bloco da gênese. Os blocos são criados pelo *Ordering Service* e validados pelos outros elementos da rede.

A descentralização significa que nenhum dos *peers* tem a capacidade de controlar sozinho o processamento de todas as transações na rede.

Blockchains também são arquiteturalmente descentralizados pois não existe nenhum ponto central de falha, porém todos devem concordar com um único estado através de um consenso.

O *ledger* ou livro-razão contém o estado atual de um negócio e funciona como um diário de transações. O livro-razão no *blockchain*, possui basicamente duas atribuições: I) apresentar o valor atual de um conjunto de estados; e II) manter o histórico das transações que determinaram esses estados.

Uma das principais características do *blockchain* é a imutabilidade dos dados armazenados. Isto se deve a recorrência de *hashes*, onde blocos anteriores não podem ter o seu conteúdo violado e continuam válidos. Portanto registros de transações são permanentes, tendo em vista que se alterados toda a cadeia de blocos posterior estará inválida.

Considerando a arquitetura descentralizada, alcançar o consenso neste cenário é um desafio para uma rede *blockchain*. Alcançar consenso garante que todos os nós da rede concordam com um estado global consistente da cadeia de blocos. Isto é importante no *blockchain* pois garante que os dados armazenados não podem ser violados, a menos que o atacante obtenha o controle de  $(50\% + 1)$  nós da rede, tendo em

vista que esta é a quantidade que é necessária para a validação na maioria das implementações. Além disso, blocos anteriores ao último quando modificado seu conteúdo, tornam todos os blocos à sua frente inválidos. Esta característica é dada pela recorrência de *hash*.

Uma vez que o *blockchain* tem responsabilidade com o *distributed ledger* e toda estrutura de dados imutável, o *smart contract* estende esta função incluindo uma linguagem para termos de acordo e medições garantindo que determinadas condições sejam atendidas.

De forma minimalista, *smart contracts* são scripts que atuam no *blockchain* e possuem uma transação de disparo (*triggering transaction*) que é responsável por executar ações [15]. Como eles residem na cadeia do *blockchain*, possuem um endereço único. Ao executar uma transação que tenha um *smart contract* endereçado, este executa independentemente e automaticamente de forma prescrita em todos os nós da rede, de acordo com os dados que foram incluídos na transação de disparo do *smart contract* [16] [17].

Existem diversas plataformas *blockchain* disponíveis para implementação de soluções. Essas plataformas se dividem basicamente em dois grandes grupos: *blockchains* públicos e *blockchains* privados ou permissionados [18].

Os *blockchains* públicos, por serem abertos, possuem algoritmos de consenso mais robustos e computacionalmente mais caros. Normalmente, é necessário a inserção da figura do minerador. *Blockchains* privados, são o oposto pois são compostos de nós conhecidos. Desta forma, possuem algoritmos de consenso mais simples, tornando as transações mais rápidas e permitindo mudanças na arquitetura em um tempo menor.

### 3. Trabajhos relacionados

Serviços de nuvem, em geral, oferecem praticidade, escalabilidade do uso dos serviços, alta disponibilidade e gerenciamento de recursos. Embora todos esses benefícios oferecidos sejam relevantes para a decisão da migração de uma solução local para um

serviço de nuvem, algumas questões relacionadas à segurança e integridade, requerem o monitoramento permanente dessas informações. Em [3] os autores propõem uma arquitetura de software que permite o armazenamento de arquivos em serviços na nuvem, com garantia de privacidade das informações, além de um monitoramento permanente da integridade dos arquivos, com base em tecnologias como *blockchain*. Neste trabalho, os autores destacam dois obstáculos principais para a adoção de plataformas de *blockchain*, que são, alto consumo de energia e baixa velocidade de processamento de transações, tendo em vista o demasiado uso de criptografia e algoritmos de consenso entre os *peers*. Assim justificam o uso do *Hyper Ledger Fabric* como solução mais eficiente para o cenário proposto.

Em [4] é apresentado uma arquitetura baseada em *blockchain*, *smart contracts* e tecnologias de confiança computacional que seja capaz de realizar o monitoramento periódico da integridade dos arquivos armazenados na nuvem. Dentre as possíveis aplicações para a arquitetura proposta, os autores destacam o armazenamento de backups da base de dados dos sistemas de gestão eletrônica de documentos. Em geral, são arquivos grandes e, devido a questões legais, precisam ser armazenados por longos períodos de tempo.

Para a implementação do *blockchain*, os autores optaram pela plataforma *Ethereum*, tendo em vista a disponibilidade de documentação, a facilidade de criar uma rede para realizar testes em um ambiente local, e também pelo número de ferramentas disponíveis para apoiar o uso e a execução do teste. O trabalho também apresenta uma análise da segurança da arquitetura.

O compartilhamento de informações armazenadas nos serviços de nuvem, também tem levantado preocupações. Geralmente, serviços de nuvem não oferecem uma solução auditável, necessitando assim a confiança do contratante no serviço de terceiros. Em [5], os autores destacam que o compartilhamento de dados de grupo dinâmico, onde usuários anonimamente compartilham seus dados com outros membros do grupo, utilizando o serviço de nuvem,

pode comprometer a segurança. Portanto, evidenciam a necessidade de projetar um sistema eficiente e seguro de compartilhamento de dados em grupos dinâmicos. Este trabalho apresenta uma revisão dos desafios encontrados em projetar, de forma eficiente, um compartilhamento de dados em grupo dinâmico. Entre os desafios encontrados, incluem, autenticação de usuário, privacidade e segurança, confidencialidade de dados, integridade e custo de consulta. Também mencionam problemas baseados no provedor de serviços que incluem a identidade do usuário e sua rastreabilidade, e revogação do usuário.

Segurança, privacidade e a integridade de dados em serviços de nuvem, tem motivado diversos pesquisadores. Em [6], é destacado que as técnicas de verificação pública podem permitir que um usuário empregue um auditor terceirizado para verificar a integridade dos dados em seu nome. No entanto, os esquemas de verificação pública existentes são vulneráveis, pois permitem que os auditores não realizem verificações a tempo. Neste contexto, os autores propõem um mecanismo para verificação pública da integridade do armazenamento em nuvem de arquivos resistentes à procrastinação de auditores, sem o uso de certificados, tendo em vista que este tipo de mecanismo utiliza, em sua maioria, infraestrutura de chave pública (PKI) e, portanto, sofrem de problemas de gerenciamento de certificados. O mecanismo denominado esquema de verificação pública sem certificado contra auditores *procrastinates* ou *Certificateless Public Verification scheme against Procrastinating Auditors* (CPVPA), utiliza tecnologia *blockchain*, e tem como objetivo exigir que os auditores registrem cada verificação executada em uma transação no *blockchain*. Tendo em vista que as transações no *blockchain* são sensíveis ao tempo, estrategicamente, a verificação pode receber um carimbo de data/hora após a transação ser registrada no *blockchain*, o que permite que os usuários verifiquem se os auditores realizaram suas verificações no tempo prescrito.

Devido à capacidade limitada de processamento dos dispositivos que normalmente compõem uma rede IoT, os dispositivos geralmente utilizam serviços

de terceiros controlados externamente para executar processamento adicional requerido, como uma nuvem computacional por exemplo. IOT SMART CONTRACT [7], é uma solução proposta para o gerenciamento descentralizado de acesso a dados usando *blockchain* e a proteção de privacidade de dados oferecida pelo Intel SGX. Esta solução tem como objetivo estabelecer confiança entre os provedores de serviços de IoT e os usuários desses serviços. Através dos *smart contracts*, a plataforma proposta provê um gerenciamento de acesso a dados onde os usuários têm privilégio em controlar como seus dados são compartilhados ou usados. Além disso, é possível atribuir regras de acesso a dados que são aplicadas de forma autônoma por serviços de terceiros não confiáveis na rede *blockchain*.

A segurança e a privacidade da Internet das Coisas (IoT) é um desafio iminente, devido à enorme escala e a natureza distribuída das redes IoT. As abordagens baseadas em *blockchain* oferecem segurança descentralizada e privacidade, mas envolvem consumo excessivo de energia e aumento de latência, o que pode ser um problema para a maioria dos dispositivos IoT com recursos limitados.

Em [8], é proposta uma solução utilizando o *blockchain* no contexto de proveniência de dados na nuvem computacional. Em [9], é introduzido o uso de *blockchain* para segurança e privacidade em um cenário de cidades inteligentes (*smart cities*).

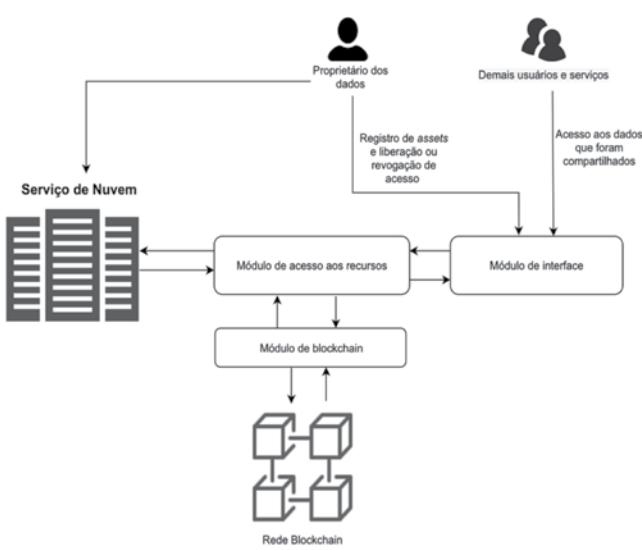
Dispositivos IoT podem sofrer diferentes tipos de ataques, principalmente ecossistemas de acesso público, como por exemplo medidores inteligentes. Os medidores inteligentes ajudam as concessionárias de energia a otimizar sua lucratividade por meio da redução de despesas associadas a roubo de energia e perdas técnicas. Os consumidores, por outro lado, passam a ter acesso a dados de consumo de energia em tempo real, que poderão usar para aumentar sua eficiência energética, reduzir suas contas mensais e ajudar a concessionária a estabilizar a rede durante os períodos de pico. Evitar ameaças à segurança assim como falsificação dos dados é um desafio. Em [13] é apresentada uma solução utilizando o *blockchain* para evitar ameaças à segurança nestes ecossistemas. Neste

trabalho ainda é utilizada a abordagem de *Zero-Knowledge proof*, uma tecnologia de melhoria de anonimato do *blockchain* que mitiga as ameaças à segurança, como violação de informações pessoais. O trabalho ainda propõe o uso de *smart contracts* para evitar adulteração de dados e aumentar a confiabilidade dos medidores.

Observando os trabalhos relacionados nesta seção, conclui-se que embora todos os trabalhos utilizem *blockchain*, a maioria utiliza *blockchain* público. Neste artigo propomos o uso de *blockchain* privado implementado através do *Hyper Ledger Fabric*. Esta solução acrescenta flexibilidade e simplicidade, tendo em vista que soluções de *blockchain* públicas demandam uma infraestrutura robusta com a adição de mineradores.

## 4. Arquitetura para controle e rastreabilidade de acesso a dados

Tendo em vista as limitações dos serviços de nuvem para prover uma trilha auditável de acesso aos dados, bem como transparência nas permissões e revogação das permissões de acesso aos dados, a arquitetura ilustrada pela **figura 1**, apresenta uma solução que atende esses requisitos.



**Fig. 1 – Arquitetura proposta**

Nesta arquitetura, os proprietários criam contas, cadastram seus *assets* armazenados na nuvem e cadastram o compartilhamento com terceiros através do **Módulo de interface**. Os usuários utilizam esse módulo para se cadastrar e acessar os *assets* compartilhados.

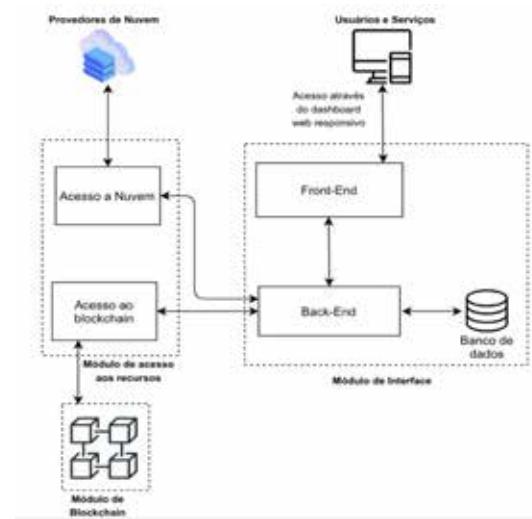
O **Módulo de acesso aos recursos** oferece APIs utilizadas pelo Módulo de interface para acessar os *assets* na nuvem e cadastrar e validar as operações realizadas no *blockchain*.

O **Módulo do blockchain**, por sua vez, possui uma API específica ao *blockchain* e todos os *smart contracts* necessários para validar e criar transações.

Nas próximas subseções, esses módulos são descritos de forma mais detalhada.

### 4.1 Módulo de interface

Através do Módulo de interface, o proprietário cria uma conta e cadastrá as credenciais necessárias, para que seja possível acesso posterior aos *assets* no local onde os mesmos estão armazenados. Com a conta criada, e com o e-mail e credenciais verificados, o proprietário dos dados pode realizar o login, e assim cadastrar os *assets* que deseja compartilhar com terceiros. Ao cadastrar um *asset* deve ser validado no Módulo de *blockchain*, a fim de verificar se o *asset* já existe. Além disso, deve ser validado pelo Módulo de acesso aos recursos, para verificação da existência dos dados associados ao *asset* na nuvem.



**Fig. 2 – Módulo de interface e Módulo de acesso aos recursos**

Todos os dados cadastrados precisam ser persistidos no *blockchain*, porém existem dados que não necessitam de uma trilha auditável. Por esta razão, o módulo de interface, conta com um banco de dados, que é usado para cadastro de metadados, informações adicionais, entre outros.

Após o cadastro dos *assets*, o proprietário pode visualizar a lista de *assets* cadastrados, onde é possível visualizar o histórico das operações sobre o *asset*, bem como garantir ou revogar acesso a terceiros. Usuários terceiros recebem um convite para acessar os *assets*. Após seu login, é apresentada uma lista dos *assets* compartilhados. Assim, o usuário pode solicitar acesso aos *assets* compartilhados com ele. Todas as operações nos *assets* são validadas pelo módulo de *blockchain*, o que garante o registro das transações, gerando uma trilha auditável de acesso.

Desta forma, este módulo tem a responsabilidade de ser a porta de entrada dos usuários. A **figura 2** ilustra seus principais componentes.

O *Front-End* é um portal *web* responsivo a diferentes tamanhos de tela, comum a interface intuitiva, onde os usuários realizam as operações propostas pela arquitetura.

O *Front-End* é um SPA (*Single Page Application*). Essa abordagem permite o desenvolvimento de uma aplicação mais robusta e desacoplada do servidor.

O *Back-End* é uma API REST capaz de atender às demandas do *Front-End* e, por sua vez, ter acesso ao módulo de acesso aos recursos e conexão com um banco de dados. Este banco de dados, idealmente, é não estruturado, orientado a documentos. A escolha desta abordagem se dá pela flexibilidade da estruturação que além de tornar a escalabilidade mais simples, facilita a inserção e acesso aos dados.

O acesso ao *Back-End* é permitido apenas a usuários autorizados via login, onde estes só podem visualizar dados ou ações executadas pelos mesmos. Como exemplo, um usuário autorizado através de login não seria autorizado a acessar detalhes de um *asset* que não lhe pertence, mesmo conhecendo o identificador deste *asset*. O único momento que se é permitido este tipo de acesso, é quando o usuário está na lista de autorizados. Neste contexto, as informações

concedidas sobre este *asset* são limitadas, preservando as informações sensíveis, como o *bucket* ou o serviço de nuvem utilizado, por exemplo.

O *Back-End* deve ser capaz de armazenar informações sobre o usuário, bem como nome, e-mail, metadados dos *assets*, hash da senha e informações sobre o provedor de nuvem. Além disso, ele deve ser capaz de acessar o Módulo de acesso aos recursos através de uma chave secreta. Portanto, apenas o *Back-End* do módulo de interface é capaz de acessar o módulo de acesso aos recursos.

Através da disponibilização das credenciais cadastradas, é possível mapear os recursos e disponibilizá-los como *assets*. Quando os *assets* são cadastrados, o *Back-End* envia uma transação para o *blockchain* informando o novo recurso que deve ser persistido. Uma vez cadastrado, este *asset* fica disponível para ser compartilhado com outros usuários. Todas as requisições no tocante ao acesso aos *assets*, são persistidas também no *blockchain*, através de uma solicitação do *Back-End*.

## 4.2 Módulo de acesso aos recursos

O **Módulo de acesso aos recursos**, tem dois objetivos principais: I) Acessar recursos externos, pois o módulo deve ser capaz de acessar os recursos na nuvem para disponibilização; e II) Submeter transações ao módulo de *blockchain*. A **figura 2** ilustra os detalhes do módulo de acesso aos recursos.

Por razões de segurança, o módulo de acesso aos recursos, deve ser acessado unicamente pelo *Back-End* do módulo de interface, estando em uma rede privada.

O **Acesso à nuvem** é responsável por integrar provedores de nuvem e abstrair as diferenças em uma interface comum. O módulo possibilita o acesso aos dados em um *bucket*, bem como disponibiliza-os para acesso a terceiros autorizados.

Os recursos da nuvem estão desacoplados do restante da solução estrategicamente, tendo em vista que uma futura mudança de provedor de nuvem ou mesmo, uma solução de armazenamento local, teria um impacto pequeno e pontual para adaptação da solução.

O **Acesso ao blockchain**, é responsável por despachar todas as requisições que devem ser validadas pelo *blockchain*, e funcionar como um segundo autenticador, onde os recursos são disponibilizados apenas quando o Acesso ao *blockchain* recebe um *feedback* positivo da transação. Caso contrário, a requisição inicial, receberá o status de não autorizado.

Portanto, o Acesso ao *blockchain* realiza um encapsulamento onde é preparada a requisição HTTP no formato esperado pelo Módulo de *blockchain*, sendo também capaz de interpretar o retorno do Módulo de *blockchain*, e reportar as respostas dos *peers* para ciência do usuário solicitante.

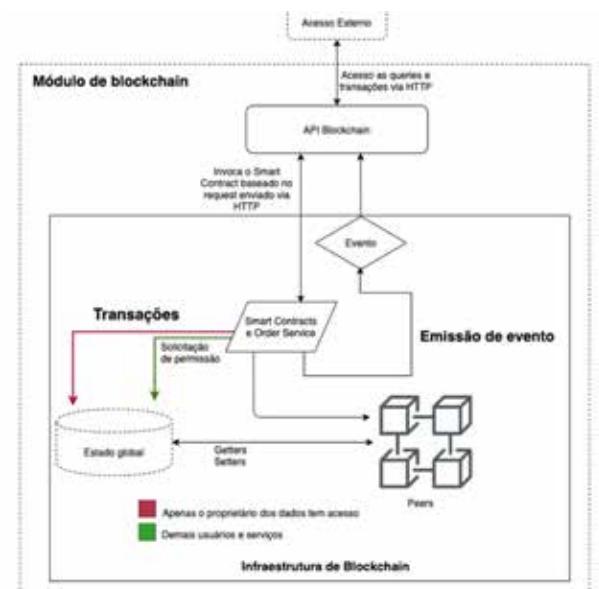
### 4.3 Módulo de Blockchain

Na arquitetura proposta, utiliza-se uma rede *blockchain* privada para armazenar todas as transações realizadas com os dados armazenados na nuvem. A escolha do uso do *blockchain* ao invés de um banco de dados distribuído, tem duas principais motivações: I) Dada sua natureza de construção em blocos subsequentes, onde seu conteúdo criptográfico possui um hash que aponta para o bloco seguinte, os dados se tornam imutáveis, invalidando a cadeia caso uma registro anterior seja alterado; e II) *Blockchains* são descentralizados, esta característica somada ao mecanismos de consenso, garantem um nível elevado de segurança para solução, uma vez que o invasor precisaria ter em seu controle a maioria ( $50\% + 1$ ) dos nós da rede em seu controle.

A decisão do uso de uma rede *blockchain* privada, se dá, tendo em vista a natureza da solução. Ambas as redes *blockchain*, privada e pública, são soluções descentralizadas, possuem mecanismo de consenso e conferem a alta segurança das informações e transações [18]. Porém no *blockchain* público, qualquer entidade pode participar da rede, enquanto no privado, existem mecanismos que controlam a entrada de novos nós na rede. Além disso, na rede *blockchain* pública, existe um incentivo aos usuários que contribuem com as validações, denominado criptomoeda. Esses usuários são chamados de mineradores, pois o processo de trabalho para

criptografar dados em troca de pequenas frações de criptomoedas é denominado processo de mineração. Em *blockchains* privadas não existe esse incentivo, uma vez que a rede normalmente é criada para um propósito específico. Por fim, como o número de nós na cadeia de blocos privada é menor, as transações demandam menos tempo para serem registradas, pois o algoritmo de consenso converge mais rapidamente. Diferentemente das cadeias públicas, com milhares de participantes.

Tendo em vista que uma rede *blockchain* privada não permite acesso direto aos seus *peers*, faz-se necessária a criação de um módulo que encapsule as funcionalidades do *blockchain* e as tornem disponíveis para os aplicativos utilizarem. O **Módulo de blockchain** tem a responsabilidade de tornar disponível essas funcionalidades de forma segura, para que outros serviços possam acessar os recursos providos pelo *blockchain*, a **figura 3** ilustra seu funcionamento.



**Fig. 3 – Módulo de blockchain**

A fim de ter uma trilha auditável, toda a interação do mundo externo com o *blockchain* é considerada uma transação. Portanto, o módulo recebe todas as transações via HTTP, valida a integridade da informação e em seguida, a proposta de transação é construída.

Cada *peer* possui uma cópia dos *smart contracts* responsáveis por garantir a correta validação de cada transação. No contexto da arquitetura proposta, os seguintes *smart contracts* devem ser implementados:

- **Consultar asset:** esta transação realiza a leitura de um *asset* baseado em seu identificador;
- **Cadastrar asset:** esta transação cria um *asset* no *ledger*, com os dados necessários para a permissão e revogação de acesso;
- **Garantir acesso a asset:** transação na qual o proprietário garante acesso a um terceiro;
- **Revogar acesso a asset:** transação na qual o proprietário revoga acesso a um terceiro;
- **Consulta por proprietário:** esta transação retorna todos os *assets* do proprietário solicitante;
- **Solicitar permissão de acesso a asset:** esta transação é responsável por garantir ou revogar acesso a um *asset*, tendo como solicitante um terceiro; e
- **Consultar histórico do asset:** esta transação retorna a trilha auditável de todas as operações realizadas em um *asset*;

Todas as transações mencionadas, realizam as seguintes validações: I) se o identificador do *asset* solicitado existe no *ledger*; e II) se o requisitante pode realizar a operação solicitada. Para a solicitação de permissão é gerada uma nova atualização no *asset*, registrando os detalhes do acesso solicitado.

No momento de cadastro do usuário no sistema, o Módulo de *Back-End*, aciona o Módulo de *blockchain*, que por sua vez, é responsável por criar o usuário e gerar todo material criptográfico necessário para que este usuário tenha a permissão de acesso aos dados. Neste momento, todos os usuários são criados com o mesmo perfil, sendo capazes de submeter novas transações ao *blockchain*. No entanto, o usuário pode apenas submeter transações referentes aos assets que são proprietários. Sendo assim, qualquer usuário tem permissão para cadastrar novos *assets*, bem como submeter transações para alterá-los. Através da validação dos *smart contracts*, um usuário ao tentar submeter uma transação relacionada a um *asset* de um terceiro, essa transação terá o status de falha, e

um registro dessa tentativa estará disponível na trilha auditável fornecida pelo *blockchain*.

Os *peers* endossantes recebem as entradas da proposta de transação como argumentos para invocar o *smart contract*. Cada *peer* anexa um bloco à cadeia do canal e, para cada transação válida, os conjuntos de gravação são confirmados no banco de dados de estado atual. Um evento é emitido por cada *peer* para notificar o aplicativo cliente de que a transação foi imutavelmente anexada à cadeia, bem como uma notificação se a transação foi validada ou invalidada.

Tendo as devidas respostas, o Módulo de *blockchain* devolve a resposta para o aplicativo solicitante. Este fluxo permite que todos os acessos sejam transformados em transações, formando a trilha imutável para futuras auditorias.

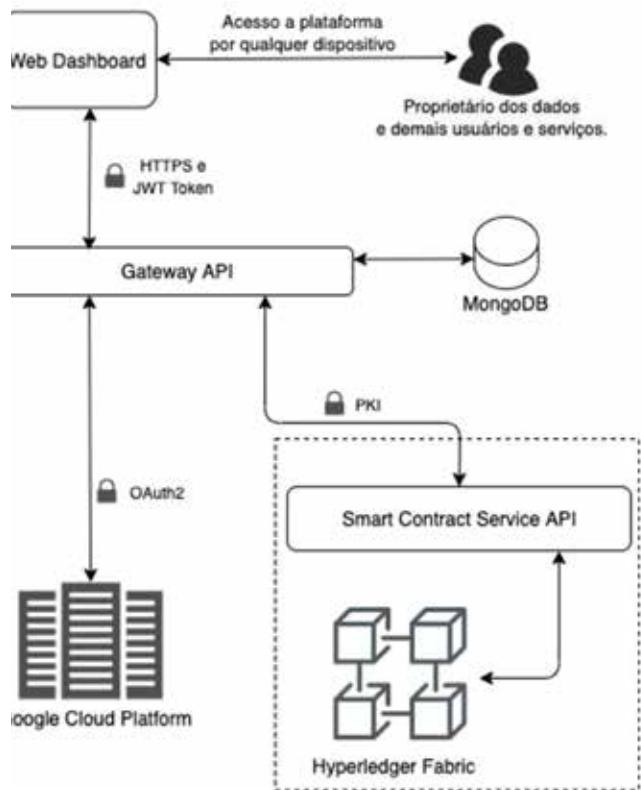
## 4. Estudo de caso

Para aplicação da solução, foi desenvolvido um estudo de caso em um contexto IoT, onde o proprietário dos dados gerados pelo dispositivos, tem o interesse em compartilhar os mesmos com outros usuários e serviços. Porém o acesso a esses dados deve ser controlado e o sistema em questão deve prover uma trilha auditável dos usuários que acessaram os dados.

Para implementação foi criada uma aplicação *web* responsiva, fornecendo uma solução intuitiva para os usuários. Esta aplicação *web*, acessa uma API denominada *Gateway Service API*, responsável por acessar a infraestrutura de *blockchain* e a infraestrutura de nuvem. Também foi disponibilizado um ambiente configurado com o *Hyper Ledger Fabric*, onde foram implementados os *smart contracts*. Para tornar as funcionalidades dos *smart contracts* disponíveis fora do contexto do *Hyper Ledger*, foi criado o *smart contract service API*. Esta API é acessada unicamente pelo *Gateway Service API*, a figura 4 ilustra como está organizada a implementação.

O *Gateway Service API* foi integrado com o provedor de nuvem *Google Cloud*, através da disponibilização de credenciais. Os diretórios com os dados que deseja-se

compartilhar são cadastrados como *assets* na API do *blockchain*. Uma vez realizado esse procedimento de cadastro, o proprietário pode compartilhar seus *assets* com outros usuários.



**Fig. 4 - Implementação estudo de caso**

O usuário que vai receber autorização para acessar os dados compartilhados, recebe um convite via e-mail para cadastro na plataforma. Uma vez feito o cadastro através do *web dashboard*, o usuário visualiza a lista de *assets* que foram compartilhados com ele. Ainda através do *web dashboard*, o usuário solicita acesso ao *asset* desejado. Nesse momento, o *Gateway Service API* submete uma transação para a API do *blockchain*. A transação é validada pelos *peers* e inserida no *ledger*. Uma vez que o retorno da transação é validado, o *Gateway Service API* acessa o provedor de nuvem *Google Cloud*, obtém os dados referentes ao *asset* e disponibiliza uma página para *download*. Nas próximas subseções os componentes da implementação são descritos com mais detalhes.

## 5.1 Web Dashboard

O *Web Dashboard* implementa o Módulo de Interface da arquitetura. Ele é responsivo, permitindo sua usabilidade em qualquer dispositivo que possua um navegador, independente do tamanho de tela. O *dashboard* foi desenvolvido utilizando o *Angular Framework*, que permite a criação de *Single Page Applications* (SPA). Para estilização e usabilidade, foi utilizado o *Ionic Framework* que é um *framework* formado por uma série de componentes *mobile-first*, que permitem a criação de páginas com uma abordagem semelhante à utilizada em aplicativos mobile nativos.

O *Web Dashboard* oferece funcionalidades para os usuários, e possui dois perfis: proprietários dos dados e usuários convidados.

Para proprietários, é possível realizar o cadastro dos dispositivos em forma de *assets*. Os *assets* ficam disponíveis em uma lista, onde é possível acessar os detalhes do *asset* selecionado. Na página de detalhe, o proprietário dos dados é capaz de conceder ou revogar acesso a um terceiro, editar informações e acessar o histórico de operações realizadas. Essas operações incluem: qualquer tentativa de acesso do proprietário ou de um terceiro, edições nas informações ou permissões. Esta trilha auditável fica disponível em forma de linha do tempo contendo a data e hora em que a operação ocorreu.

Os usuários que receberam o compartilhamento, visualizam apenas os *assets* que foram compartilhados, não podendo realizar nenhuma operação de edição. Ao selecionar um *asset*, o usuário recebe o OTP (*One Time Password*), e assim, consegue fazer o *download* do conteúdo. É importante ressaltar que cada acesso é único, e ao ser realizado, gera uma nova transação no *blockchain*, criando assim a trilha auditável dos acessos concedidos.

## 5.2 Gateway Service API

O Módulo de acesso a recursos foi implementado através do *Gateway Service API*. Esta API fornece acesso através da internet ao serviço de nuvem, onde os dados do Sistema IoT estão armazenados, e ao *blockchain*.

A API tem três responsabilidades principais: I) Estabelecer a conexão com o *smart contract service API*; II) Disponibilizar os dados armazenados no provedor de nuvem; e III) Exportar *end-points* protegidos por login para aceitar requisições HTTP e executar as operações correspondentes.

Tendo em vista que as operações do *blockchain* são mais lentas, especialmente quando se aumenta o número de *peers*, não é boa prática utilizar essa estrutura, para armazenamento de todos os dados que tangencia o funcionamento de aplicações. Por esta razão é comum as soluções utilizarem bancos de dados convencionais como apoio ao *blockchain* para operações menos críticas ou que não necessitam das características disponibilizadas pelo *blockchain*.

Portanto, o API gateway, além da estrutura de *blockchain* para armazenamento, conta também com o *MongoDB*, que é um banco de dados não relacional, no *SQL* e orientado a documento. A decisão de utilizar um banco orientado a documento, se dá pela versatilidade que esta estrutura permite, considerando que a solução pode demandar a adição de novas propriedades não apenas nos metadados, mas também na adição de novas coleções de documentos. O objetivo deste banco de dados é armazenar dados que não se tem interesse em serem auditáveis ou criar uma trilha imutável. Portanto, são armazenados no *MongoDB* os dados de login de cada usuário, além dos metadados dos usuários ou *assets*.

### 5.3 Smart Contract Service API

Entre as plataformas privadas de *blockchain*, o *Hyper Ledger Fabric* [19] apresenta uma arquitetura de *blockchain* que fornece flexibilidade, escalabilidade e confidencialidade. Outra característica do *Fabric* é que sua arquitetura segregada o fluxo de transações em três estágios, cujas execuções podem ser realizadas por diferentes entidades: execução da transação e verificação de sua exatidão, ordenação das transações usando um algoritmo de consenso e validação de transações a partir do consenso da rede [20]. Desta forma, foi utilizado o *Hyper Ledger Fabric* como implementação do *blockchain*.

O *Smart Contract Service API* implementa o Módulo de *blockchain*. A infraestrutura do *blockchain* criada no contexto deste trabalho é privada, e além disso, não é capaz de se comunicar através do protocolo HTTP. Portanto, faz-se necessário a criação de uma API REST responsável por disponibilizar as funcionalidades dos *smart contracts*. O *Smart Contract Service API* é uma API REST responsável por disponibilizar as transações do *blockchain* via protocolo HTTP.

Através do SDK do *Hyper Ledger Fabric*, utiliza-se uma das APIs disponíveis para gerar uma proposta de transação. A proposta é uma solicitação que irá acionar um *smart contract* com os parâmetros de entrada, com a intenção de ler e/ou atualizar o *ledger*.

O SDK do *Hyper Ledger*, neste contexto, funciona como um invólucro para empacotar a proposta de transação no formato e arquitetura corretos (protocolo buffer sobre gRPC) e entregar também as credenciais criptográficas do usuário para produzir uma assinatura exclusiva para esta proposta de transação.

Embora a API disponibilize as funcionalidades do *blockchain*, por questões de segurança a mesma deve ficar em uma rede privada, não permitindo assim acesso externo, permitindo apenas que o API gateway tenha autorização para consumir os recursos.

A API foi desenvolvida com *NodeJS*, utilizando o Framework de roteamento *ExpressJS*, e utiliza os verbos HTTP para realizar as operações no *blockchain*. Esta integração é realizada através do SDK disponibilizado pelo framework *Hyper Ledger Fabric*.

### 5.3 Experimentos Realizados

Após popular o sistema com usuários e *assets*, foram realizados alguns experimentos para demonstrar o correto funcionamento da implementação.

No primeiro experimento, um usuário deu permissão de acesso aos seus *assets* para usuários terceiros. Em seguida, estes usuários verificaram a adição desses *assets* na lista de *assets* compartilhados com eles e conseguiram acessar os dados correspondentes no *Google Cloud*. Posteriormente, o usuário proprietário revogou o acesso a um *asset* a um usuário terceiro. Este terceiro não consegue mais acessar o recurso, tendo em vista que nenhum

dos *peers* valida esta transação de solicitação de acesso. A API retorna à requisição como 403 *Forbidden*, antes mesmo de estabelecer uma conexão com o provedor de nuvem. Este código de resposta de status de erro HTTP 403 *Forbidden* indica que o servidor entendeu o pedido, porém se recusa a autorizá-lo.

O usuário proprietário de um *asset* consegue visualizar todas as operações realizadas no *asset* através de um trilha auditável armazenada no *blockchain*.

O segundo experimento teve como objetivo demonstrar a resiliência da implementação. O banco MongoDB, responsável pela autenticação da aplicação utilizada pelos usuários, foi corrompido, e nenhum dado no contexto do *blockchain* foi alterado. Sendo assim, após a restauração do serviço de autenticação e do MongoDB, cada usuário deve se cadastrar novamente no sistema com o mesmo login e senha. Em seguida, a aplicação volta a seu estado anterior, apresentando os dados dos *assets*, bem como seus respectivos históricos que são restaurados a partir do *blockchain*. Isto demonstra que a solução é robusta, tendo em vista que os dados persistidos no *blockchain* são resilientes por se tratar de um ambiente distribuído e não centralizado.

## 6. Conclusão

Neste artigo, foi proposta uma arquitetura que controla o acesso a dados armazenados através de serviços de terceiros oferecendo rastreabilidade desses acessos aos proprietários dos dados. A arquitetura propõe o uso de *blockchain* para registrar as informações sobre os acessos realizados, tendo em vista sua característica de imutabilidade.

O estudo de caso permitiu colocar em prática a arquitetura proposta em um cenário com integração

real com um provedor de Nuvem e uma estrutura *blockchain*. A implementação permitiu demonstrar, de forma simplificada, como os usuários são capazes de cadastrar seus *assets*, permitir ou revogar acesso. Além disso, o usuário tem permissão de acessar o histórico das operações realizadas nos *assets* que é proprietário, demonstrando a auditabilidade proposta.

Além disso, a implementação também demonstrou a tolerância a falhas da arquitetura e sua capacidade de recuperação.

Finalmente, a revisão bibliográfica revelou que a maioria dos trabalhos disponíveis utiliza *Ethereum* como implementação de redes *blockchains* públicas. Esta escolha se dá pela quantidade de material disponível para desenvolvimento, quando comparado com o *Hyper Ledger Fabric*, cuja versão 2.0 é recente. Entretanto, o uso de *blockchain* público envolve custos adicionais, devido à inserção da figura do minerador, resultando em vários desafios e limitações. Por outro lado o *Hyper Ledger Fabric*, permite a criação de *blockchains* conforme a disponibilização de *hardware*, pois quem controla os *peers* que compõem a rede *blockchain* é o administrador da rede.

Como resultado adicional, este trabalho demonstra que o uso do *Hyper Ledger Fabric*, é uma alternativa interessante, pois além de permitir a utilização de uma rede completamente conhecida, também fornece segurança dos dados e resiliência da rede. Com isto, o uso deste tipo de abordagem pode ser incentivado para auxiliar ainda mais os pesquisadores e desenvolvedores no campo da computação distribuída e nuvem, com o objetivo de mitigar o acesso de invasores a sistemas através da rede, tendo em vista a dificuldade inserida pelo *blockchain* para se realizar invasões.

## Referências

- [1] BUYYA, R., YEO, C. S., VENUGOPAL, S., BROBERG, J., & BRANDIC, I. (2009). Cloud computing and emerging IT platforms: Vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility. Future Generation computer systems, 25(6), 599-616.
- [2] BACHIEGA, N. G. (2014). Algoritmo de escalonamento de instância de máquina virtual na computação em nuvem.

- [3] PINHEIRO, A., CANEDO, E. D., ALBUQUERQUE, R. D. O., & DE SOUSA JÚNIOR, R. T. (2021). Validation of Architecture Effectiveness for the Continuous Monitoring of File Integrity Stored in the Cloud Using Blockchain and Smart Contracts. *Sensors*, 21(13), 4440.
- [4] PINHEIRO, A., CANEDO, E. D., DE SOUSA, R. T., & ALBUQUERQUE, R. D. O. (2020). Monitoring File Integrity Using Blockchain and Smart Contracts. *IEEE Access*, 8, 198548-198579.
- [5] KOTHA, S. K., RANI, M. S., SUBEDI, B., CHUNDURU, A., KARROTHU, A., NEUPANE, B., & SATHISHKUMAR, V. E. (2021) A comprehensive review on secure data sharing in cloud environment. *Wireless Personal Communications*, 1-28.
- [6] ZHANG, Y., XU, C., LIN, X., & SHEN, X. S. (2019).Blockchain-based public integrity verification for cloud storage against procrastinating auditors. *IEEE Transactions on Cloud Computing*.
- [7] AYOADE, G., KARANDE, V., KHAN, L., & HAMLEN, K. (2018, JULY). Decentralized IoT data management using blockchain and trusted execution environment. In 2018 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration (IRI) (pp. 15-22). IEEE.
- [8] LIANG, X., SHETTY, S., TOSH, D., KAMHOUA, C., KWIAT, K., & NJILLA, L. (2017, May). Provchain: A blockchain-based data provenance architecture in cloud environment with enhanced privacy and availability. In 2017 17th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID) (pp. 468-477). IEEE.
- [9] BISWAS, K., & MUTHUKUMARASAMY, V. (2016, December).Securing smart cities using blockchain technology. In 2016 IEEE 18th international conference on high performance computing and communications; IEEE 14th international conference on smart city; IEEE 2nd international conference on data science and systems (HPCC/SmartCity/DSS) (pp. 1392-1393). IEEE.
- [10] DORRI, A., KANHERE, S. S., & JURDAK, R. (2016). Blockchain in internet of things: challenges and solutions. *arXiv preprint arXiv:1608.05187*.
- [11] DORRI, A., KANHERE, S. S., JURDAK, R., & GAURAVARAM, P. (2017, March). Blockchain for IoT security and privacy: The case study of a smart home. In 2017 IEEE international conference on pervasive computing and communications workshops (PerCom workshops) (pp. 618-623). IEEE.
- [12] HUH, S., CHO, S., & KIM, S. (2017, February).Managing IoT devices using blockchain platform. In 2017 19th international conference on advanced communication technology (ICACT) (pp. 464-467). IEEE.
- [13] LEE, C. H., & KIM, K. H. (2018, January). Implementation of IoT system using block chain with authentication and data protection. In 2018 International Conference on Information Networking (ICOIN) (pp. 936-940).
- [14] IEEE.NAKAMOTO, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized Business Review*, 21260.
- [15] CONG, L. W., & HE, Z. (2019). Blockchain disruption and smart contracts. *The Review of Financial Studies*, 32(5), 1754-1797.
- [16] CHRISTIDIS, K., & DEVETSIKIOTIS, M. (2016).Blockchains and smart contracts for the internet of things. *Ieee Access*, 4, 2292-2303.
- [17] ALHARBY, M., & VAN MOORSEL, A. (2017). Blockchain-based smart contracts: A systematic mapping study. *arXiv preprint arXiv:1710.06372*.
- [18] WÜST, K., & GERVAIS, A. (2018, June). Do you need a blockchain?. In 2018 Crypto Valley Conference on Blockchain Technology (CVCBT) (pp. 45-54). IEEE.
- [19] SAJANA, P., SINDHU, M., & SETHUMADHAVAN, M. (2018). On blockchain applications: HyperLedger fabric and ethereum. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 118(18), 2965-2970.
- [20] ANDROULAKI, E., BARGER, A., BORTNIKOV, V., CACHIN, C., CHRISTIDIS, K., DE CARO, A., ... & YELLICK, J.(2018, April). HyperLedger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains. In Proceedings of the thirteenth EuroSys conference (pp. 1-15).

# Aplicação da distribuição de Gumbel para valores extremos de precipitação em municípios com dados de chuva em todo Brasil

Thaís Fernandes Juste<sup>a</sup>, Marcelo de Miranda Reis<sup>b</sup>, Igor da Silva Rocha Paz<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Exército Brasileiro. Instituto Militar de Engenharia.

<sup>a</sup>thaisqueste@ime.eb.br

<sup>b</sup>marceloreis@ime.eb.br

<sup>c</sup>igorpaz@ime.eb.br

**RESUMO:** Estudar os eventos pluviométricos extremos de uma região é de suma importância para o dimensionamento de estruturas de drenagem. Para o dimensionamento dessas estruturas são utilizadas vazões de projeto, estimadas com o auxílio de dados pluviométricos. Este artigo tem como objetivo reunir os dados de chuvas máximas diárias registradas em cada um dos Estados do país, assim como, obter os tempos de recorrência de cada evento. Os dados pluviométricos foram obtidos através do Portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico e foi utilizada a distribuição de probabilidade de Gumbel, recomendada por diversos autores, no cálculo do tempo de recorrência. O Estado com a maior precipitação máxima registrada é Minas Gerais e a menor precipitação máxima foi registrada no Rio Grande do Norte, sendo o maior e o menor tempo de recorrência calculados, respectivamente, nos Estados de São Paulo e Goiás.

**PALAVRAS-CHAVE:** Precipitação; Extremos; Gumbel; Tempo de Recorrência; Hidroweb.

**ABSTRACT:** Studying the extreme rainfall events in a region is of paramount importance for the design of drainage structures. For the design of these structures, design flows are used, estimated with the aid of pluviometric data. This article aims to gather the data of maximum daily rainfall recorded in each of the states of the country, as well as to obtain the recurrence times of each event. The rainfall data were obtained through the Hidroweb Portal of the National Agency for Water and Basic Sanitation and the Gumbel probability distribution, recommended by several authors, was used to calculate the recurrence time. The State with the highest maximum precipitation recorded is Minas Gerais and the lowest maximum precipitation was recorded in Rio Grande do Norte, with the highest and lowest recurrence time calculated, respectively, in the States of São Paulo and Goiás.

**KEYWORDS:** Precipitation; Extremes; Gumbel; Recurrence Time; Hidroweb.

## 1. Introdução

**A**s chuvas intensas, também denominadas de chuvas extremas ou chuvas máximas, são aquelas responsáveis por promover grande volume de água em pequenos intervalos de tempo [0]-[5]. Esse tipo de evento, devido a grandes volumes de escoamentos superficiais, pode causar riscos à vida humana, além de prejuízos socioeconômicos e ambientais, tais como: erosão do solo, inundação, problemas em reservatórios, entre outros [6]. Conhecer e compreender as chuvas intensas de uma região contribui para uma previsão hidrológica mais realista em projetos de engenharia, possibilitando quantificar com maior precisão o escoamento superficial, assim como, determinar o tempo de recorrência.

Em áreas urbanas, pesquisas relacionadas às chuvas intensas são amplamente usadas na previsão de alagamentos, dimensionamento de captores de águas pluviais (como bueiros e canais de drenagem), entre outros, auxiliando na diminuição de danos socioeconômicos associados a efeitos erosivos, inundações e na defesa civil [2]. Já em áreas agrícolas, a drenagem superficial é indispensável para a conservação do solo, logo, o entendimento da distribuição das precipitações no tempo é relevante na escolha de medidas que minimizem os impactos por elas causados e auxiliem no dimensionamento de canais e terraços [6][7][8].

As obras hidráulicas devem ser dimensionadas com objetivo de evitar e/ou diminuir os prejuízos gerados pelas inundações, para isso usa-se como base os valores de vazão máxima [9]-[11]. Para a determinação da vazão

de projeto, são necessários métodos seguros e confiáveis, pois são imprescindíveis no dimensionamento em obras de engenharia de estruturas hidráulicas, além do seu uso na determinação das cotas de alerta de inundação [3][12][13].

Quando se fala em chuvas intensas, três aspectos as caracterizam e são importantes de determinação: intensidade, duração e frequência de ocorrência. A relação entre essas grandes contribuiu na determinação da vazão de projeto, usada no dimensionamento de obras de engenharia, principalmente em projetos de drenagem urbana. No Brasil, alguns estudos foram elaborados com o objetivo de se obter valores de precipitação com menores durações utilizando registros pluviométricos diários, devido ao grande número dessa rede no território nacional e à escassez de estações pluviográficas e de séries longas de dados de precipitação [14]-[17].

Para se determinar o tempo de recorrência, podem ser utilizados métodos de distribuições de probabilidades, que objetivam modelar a frequência de ocorrência. Para estudos ligados à precipitação máxima, as distribuições estatísticas mais utilizadas são Gumbel, Gama, Log-Normal 2 e 3 parâmetros [15][18][19].

Considerando a carência de dados de chuvas intensas no território nacional, este trabalho tem como objetivo apresentar a precipitação máxima anual de postos pluviométricos com mais de 15 anos de dados consistidos, bem como, seu tempo de recorrência através da distribuição de Gumbel para valores máximos, para diversas localidades do Brasil, permitindo seu uso no dimensionamento de estruturas hidráulicas.

## 2. Metodologia

Inicialmente, foram analisadas as séries históricas de 4.449 estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) distribuídas em todo o território nacional. Os dados pluviométricos foram organizados em bacias, sub-bacias e Unidades Federativas. A partir da organização dos dados, foram

escolhidas as estações com no mínimo 15 anos de dados consistentes e as maiores precipitações registradas por Unidade Federativa em diversos municípios, totalizando 1255 postos pluviométricos. Para cada posto foram selecionadas as séries históricas dos valores máximos anuais de precipitações diárias.

Para a modelagem de eventos extremos e raros é utilizada a teoria dos valores extremos, desenvolvida por Fisher-Tippett (1928), cujas equações de distribuição estatística são conhecidas como Gumbel (tipo I), Fréchet (tipo II) e Weibull (tipo III). Essas três distribuições são casos especiais da Distribuição Generalizada de Valores Extremos elaborada por Jenkinson (1955) [20].

Os três casos particulares de distribuição de valores extremos são apresentados nessa distribuição, e tem função de distribuição acumulada de probabilidade conhecida por:

$$F(x) = \left\{ - \left[ 1 + \varepsilon \left( \frac{(x-\alpha)}{\beta} \right) \right]^{-\frac{1}{\varepsilon}} \right\} \quad (1)$$

onde,  $-\infty < x < \alpha - \beta/\varepsilon$  para  $\varepsilon < 0$ ,  $-\infty < x < +\infty$  para  $\varepsilon$  tendendo a zero,  $(\alpha - \beta)/(\varepsilon < x < +\infty)$  para  $\varepsilon > 0$ , sendo  $\alpha, \beta$  e  $\varepsilon$  os parâmetros de locação, escala e de forma, respectivamente, com  $\beta > 0$ .

Os casos particulares da Eq. (1) correspondem às distribuições de valores extremos de Fréchet e de Weibull, onde  $\varepsilon > 0$  e  $\varepsilon < 0$ , respectivamente. Com limite de  $F(x)$  e  $\varepsilon$  tendendo a zero, tem-se a função de distribuição acumulada de Gumbel com parâmetros de escala ( $\beta$ ) e locação ( $\alpha$ ), sendo  $\beta > 0$ :

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{(x-\alpha)}{\beta}}} \quad (2)$$

onde o cálculo dos parâmetros  $\beta$  e  $\alpha$  (método dos momentos) é realizado por:

$$\beta = (S\sqrt{6})/\pi \quad \text{e} \quad \alpha = \bar{X} - \gamma\beta \quad (3)$$

em que  $\gamma = 0,5772$  (constante de Euler);  $\bar{X}$  é a média da precipitação máxima diária (mm) e  $S$  é o desvio-padrão dos dados de precipitação máxima diária (mm).

Para o cálculo de tempo de recorrência, foram utilizadas as equações da distribuição estatística de Gumbel (1958). Diversos autores realizaram estudos, no Brasil e em diversos países, com diferentes modelos de distribuição e concluíram que o modelo de Gumbel é o que melhor se ajusta a valores de precipitação máxima [2][4][16][17][21]-[32].

Para o presente estudo, foram feitos os cálculos na ordem inversa para encontrar o tempo de recorrência (TR) de cada estação, utilizando as equações de Gumbel. Os resultados são apresentados e discutidos a seguir.

### 3. Resultado e discussões

Conhecer o comportamento dos extremos de chuva é fundamental para o dimensionamento da drenagem e planejamento da infraestrutura das cidades, pois os impactos mais comuns ocorrem devido às chuvas intensas. O tempo de recorrência é escolhido levando em consideração os prejuízos econômicos e sociais que podem ocorrer em períodos de cheia, a estimativa de custos na restauração (caso ocorra a destruição), e a segurança da população ribeirinha [6][33].

A **tabela A1** (Apêndice A1) apresenta as Unidades Federativas, o código da estação, nome da estação, os municípios com dados consistentes de no mínimo 15 anos, com suas precipitações máximas registradas e respectivos tempos de recorrência calculados utilizando Gumbel. A seguir, serão descritos os passos dos cálculos no presente estudo, adotando como exemplo a Estação 8051012, localizada no município Porto Grande, no Estado do Amapá. Essa estação possui 16 anos de dados de precipitações consistentes.

- Passo 1: Organização dos dados em ordem decrescente (**tabela 1**):

**Tab. 1:** Dados de precipitação da Estação 8051012, município Porto Grande - AP.

| Ano de Ocorrência | Precipitação (x) | Número de Ordem (n) | (x) Ordem Decrescente |
|-------------------|------------------|---------------------|-----------------------|
| 2006              | 100,7            | 1                   | 325,9                 |
| 2005              | 71,0             | 2                   | 152,0                 |

|      |       |    |       |
|------|-------|----|-------|
| 2004 | 85,0  | 3  | 100,7 |
| 2003 | 78,1  | 4  | 98,6  |
| 2002 | 98,6  | 5  | 85,0  |
| 2001 | 43,2  | 6  | 84,1  |
| 2000 | 52,9  | 7  | 78,1  |
| 1999 | 56,5  | 8  | 71,3  |
| 1998 | 71,3  | 9  | 71,0  |
| 1997 | 60,5  | 10 | 60,5  |
| 1996 | 325,9 | 11 | 56,7  |
| 1994 | 152,0 | 12 | 52,9  |
| 1993 | 48,3  | 13 | 48,3  |
| 1992 | 56,7  | 14 | 47,1  |
| 1990 | 38,5  | 15 | 43,2  |
| 1989 | 47,1  | 16 | 38,5  |

- Passo 2: Cálculo da média da precipitação máxima diária ( $\bar{X}$ ):

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n} = \frac{1386,30}{16} = 86,64 \text{ mm} \quad (4)$$

- Passo 3: Cálculo do desvio padrão ( $\sigma$ ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x-\bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{72375,74}{16-1}} = 69,46 \text{ mm} \quad (5)$$

- Passo 4: Cálculo dos parâmetros  $\beta$  e  $\mu$ :

$$\beta = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * \sigma = \frac{2,4495}{\pi} * 69,46 = 54,16 \text{ mm} \quad (6)$$

$$\mu = \bar{X} - 0,5772 * \beta = 55,38 \text{ mm} \quad (7)$$

- Passo 5: Identificação da precipitação máxima e cálculo da distribuição acumulada de Gumbel:

$$X_{máx} = 325,9 \text{ mm}$$

$$F(x) = \frac{(X_{máx} - \mu)}{\beta} = 4,995$$

- Passo 6: Cálculo do tempo de recorrência (TR):

$$E_1 = (e^{-F(x)}) = 0,0067731$$

$$E_2 = (e^{-E_1}) = 0,9932498$$

$$E_3 = (e^{-2}) = 0,0067502$$

$$TR = 1 - e^{-E_3} = 148,14 \text{ anos}$$

Como pode ser observado, a estação com a maior precipitação máxima registrada está localizada no Estado de Minas Gerais (estação 2244065, no município de Alagoa) com 751,9 mm. Entretanto, esta não é a estação que apresenta o maior tempo de recorrência (TR calculado de 334,92 anos). O maior tempo de recorrência calculado foi de 46009,79 anos, para a estação 2447042, localizada no Estado de São Paulo (município de Juquiá), com uma precipitação máxima de 206,1 mm (**ver tabela A1**).

Notícias recentes corroboram registros elevados de precipitações no território brasileiro. Em reportagem do G1 [34], segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a cidade de Petrópolis, no Rio de Janeiro, registrou recorde de precipitação no local de 534 mm em apenas um dia, em fevereiro de 2022. Porém, as maiores precipitações máximas registradas podem conter erros de leitura. Nos Estados de Minas Gerais e Tocantins, por exemplo, os valores precipitados em apenas um dia são muito elevados, sendo considerados eventos extremos até mesmo se o volume precipitado fosse registrado em um mês.

A estação com a menor precipitação máxima registrada está localizada no Estado do Rio Grande do Norte (estação 636019, no município de Santa Cruz)

**Tab. 2:** Resumo das maiores e menores precipitações máximas e dos maiores e menores tempos de recorrência por unidade federativa, com os respectivos códigos das estações e as datas de ocorrência das maiores precipitações.

| UF | Maior P (mm)            | Data de ocorrência (Maior P) | Maior TR (anos)           | Menor P (mm)            | Menor TR (anos)        |
|----|-------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|
| AC | 285,30<br>Cód.: 972000  | 18/01/1989                   | 320,50<br>Cód.: 972000    | 111,90<br>Cód.: 1067003 | 13,32<br>Cód.: 1067003 |
| AL | 231,50<br>Cód.: 936112  | 24/07/1992                   | 161,16<br>Cód.: 936112    | 96,90<br>Cód.: 937018   | 18,00<br>Cód.: 935057  |
| AM | 422,80<br>Cód.: 967001  | 22/02/2000                   | 273,95<br>Cód.: 664001    | 115,10<br>Cód.: 357001  | 13,50<br>Cód.: 357001  |
| AP | 325,90<br>Cód.: 8051012 | 01/07/1996                   | 166,86<br>Cód.: 8051012   | 100,00<br>Cód.: 8052000 | 14,58<br>Cód.: 8151000 |
| BA | 314,00<br>Cód.: 1142017 | 24/02/1985                   | 1653,14<br>Cód.: 1142017  | 105,70<br>Cód.: 1242016 | 22,10<br>Cód.: 1343019 |
| CE | 182,80<br>Cód.: 538044  | 25/06/1995                   | 206,35<br>Cód.: 640003    | 81,30<br>Cód.: 339045   | 8,92<br>Cód.: 339045   |
| ES | 414,60<br>Cód.: 2141014 | 03/04/1977                   | 25373,84<br>Cód.: 2141014 | 127,00<br>Cód.: 2041002 | 16,53<br>Cód.: 1840012 |

|    |                         |            |                           |                         |                        |
|----|-------------------------|------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|
| GO | 384,00<br>Cód.: 1851000 | 16/12/1997 | 1116,11<br>Cód.: 1752002  | 107,10<br>Cód.: 1649001 | 2,91<br>Cód.: 1649006  |
| MA | 197,50<br>Cód.: 244012  | 31/03/1990 | 157,55<br>Cód.: 845003    | 97,00<br>Cód.: 245008   | 9,00<br>Cód.: 245008   |
| MG | 751,90<br>Cód.: 2244065 | 25/04/1961 | 18233,23<br>Cód.: 2244065 | 99,90<br>Cód.: 1946011  | 14,02<br>Cód.: 1542016 |
| MS | 469,00<br>Cód.: 1857001 | 09/05/1977 | 510,88<br>Cód.: 1754004   | 98,70<br>Cód.: 1853004  | 13,80<br>Cód.: 1853005 |
| MT | 293,0<br>Cód.: 1455004  | 28/02/1973 | 1767,95<br>Cód.: 1756001  | 119,10<br>Cód.: 1653005 | 11,90<br>Cód.: 1454002 |
| PA | 410,00<br>Cód.: 148003  | 02/01/1978 | 1015,76<br>Cód.: 148003   | 98,70<br>Cód.: 151003   | 7,90<br>Cód.: 151003   |
| PB | 183,60<br>Cód.: 735009  | 22/01/2004 | 1157,60<br>Cód.: 735009   | 125,00<br>Cód.: 638032  | 22,22<br>Cód.: 638032  |
| PE | 208,00<br>Cód.: 735050  | 22/04/1973 | 198,72<br>Cód.: 937031    | 86,70<br>Cód.: 735159   | 13,15<br>Cód.: 835135  |
| PI | 181,40<br>Cód.: 745003  | 22/01/1970 | 141,42<br>Cód.: 745003    | 110,20<br>Cód.: 742012  | 13,33<br>Cód.: 743009  |
| PR | 259,70<br>Cód.: 2551024 | 29/05/1992 | 391,87<br>Cód.: 2548001   | 111,50<br>Cód.: 2549081 | 10,32<br>Cód.: 2449063 |
| RJ | 375,20<br>Cód.: 2344016 | 02/02/1988 | 1507,20<br>Cód.: 2241002  | 100,40<br>Cód.: 2243003 | 14,94<br>Cód.: 2244148 |
| RN | 205,70<br>Cód.: 535038  | 03/04/1997 | 311,84<br>Cód.: 535038    | 76,00<br>Cód.: 636019   | 15,98<br>Cód.: 637039  |
| RO | 212,80<br>Cód.: 1062001 | 10/03/1983 | 191,70<br>Cód.: 1062001   | 115,40<br>Cód.: 1062003 | 14,83<br>Cód.: 1264000 |
| RR | 232,70<br>Cód.: 8160003 | 05/08/1983 | 119,49<br>Cód.: 8361001   | 99,30<br>Cód.: 8059001  | 12,28<br>Cód.: 8059001 |
| RS | 358,00<br>Cód.: 3055004 | 13/04/1992 | 2377,38<br>Cód.: 2851003  | 81,00<br>Cód.: 3050008  | 9,85<br>Cód.: 3050008  |
| SC | 260,00<br>Cód.: 2648034 | 15/01/1996 | 2128,71<br>Cód.: 2649005  | 112,60<br>Cód.: 2650019 | 13,32<br>Cód.: 2849019 |
| SE | 185,00<br>Cód.: 1137001 | 13/05/1989 | 107,02<br>Cód.: 1137001   | 123,5<br>Cód.: 1037049  | 38,37<br>Cód.: 1036063 |
| SP | 353,70<br>Cód.: 2345067 | 05/04/2005 | 46009,79<br>Cód.: 2447042 | 99,90<br>Cód.: 2146013  | 14,23<br>Cód.: 2146001 |
| TO | 605,30<br>Cód.: 1047002 | 06/02/1986 | 3301,15<br>Cód.: 1047002  | 102,00<br>Cód.: 1149002 | 16,39<br>Cód.: 747009  |

### Apêndice A1

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF   | Cód. Estação | Nome Estação  | Municípios   | Chuva máx. | TR Gumbel |
|------|--------------|---------------|--------------|------------|-----------|
| Acre | 1069000      | Assis Brasil  | Assis Brasil | 120,3      | 20,82     |
| Acre | 1067003      | Vila Capixaba | Capixaba     | 111,9      | 13,32     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF      | Cód. Estação | Nome Estação        | Municípios           | Chuva máx. | TR Gumbel |
|---------|--------------|---------------------|----------------------|------------|-----------|
| Acre    | 773000       | Serra do Moa        | Cruzeiro do Sul      | 175        | 79,54     |
| Acre    | 870002       | Feijó               | Feijó                | 161,7      | 54,9      |
| Acre    | 972000       | Foz do Breu         | Marechal Thaumaturgo | 285,3      | 320,5     |
| Acre    | 872001       | Porto Walter        | Porto Walter         | 140,1      | 57,29     |
| Acre    | 968003       | Seringal São José   | Sena Madureira       | 225,5      | 25,37     |
| Acre    | 771001       | Fazenda Paranacre   | Tarauacá             | 134,8      | 21,32     |
| Acre    | 1068000      | Xapuri              | Xapuri               | 139,4      | 25,68     |
| Alagoas | 1036062      | Camaçari            | Coruripe             | 194        | 49,28     |
| Alagoas | 937013       | Delmiro Gouveia     | Delmiro Gouveia      | 148        | 118,01    |
| Alagoas | 835139       | Jacuípe             | Jacuípe              | 158,2      | 84,48     |
| Alagoas | 935057       | Marechal Deodoro    | Marechal Deodoro     | 156,8      | 18        |
| Alagoas | 935012       | Murici – Ponte      | Murici               | 143,6      | 36,44     |
| Alagoas | 937018       | Pão de Açúcar       | Pão de Açúcar        | 96,9       | 45,81     |
| Alagoas | 1036005      | Penedo              | Penedo               | 164,5      | 121,39    |
| Alagoas | 1036007      | Piaçabuçu           | Piaçabuçu            | 176,6      | 135,58    |
| Alagoas | 937023       | Piranhas            | Piranhas             | 120        | 47,88     |
| Alagoas | 935056       | Fazenda Boa Fortuna | Rio Largo            | 199        | 59,23     |
| Alagoas | 937032       | Santana do Ipanema  | Santana do Ipanema   | 105        | 59,71     |
| Alagoas | 936114       | Santana do Mundaú   | Santana do Mundaú    | 142        | 38,03     |
| Alagoas | 936112       | São José da Laje    | São José da Laje     | 231,5      | 161,16    |
| Alagoas | 936113       | União dos Palmares  | União dos Palmares   | 137,4      | 26,9      |
| Alagoas | 936111       | Viçosa              | Viçosa               | 137,7      | 44,25     |
| Amapá   | 8250003      | Amapá               | Amapá                | 204,1      | 28,75     |
| Amapá   | 8250002      | Calçoene            | Calçoene             | 220,4      | 31,58     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF       | Cód. Estação | Nome Estação                       | Municípios         | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------|--------------|------------------------------------|--------------------|------------|-----------|
| Amapá    | 8051010      | Porto Ariri                        | Macapá             | 160,3      | 62,69     |
| Amapá    | 51002        | Navio                              | Mazagão            | 223        | 144,26    |
| Amapá    | 8351002      | Oiapoque                           | Oiapoque           | 157,5      | 31,7      |
| Amapá    | 8051012      | Cupixi                             | Porto Grande       | 325,9      | 166,86    |
| Amapá    | 8052000      | Serra do Navio                     | Serra do Navio     | 100        | 19,93     |
| Amapá    | 8151000      | Itaubal do Amapá                   | Tartarugalzinho    | 146,9      | 14,58     |
| Amazonas | 658000       | Santarém Sucunduri                 | Apuí               | 164        | 29,48     |
| Amazonas | 470002       | Estirão do Repouso                 | Atalaia do Norte   | 152,9      | 24,5      |
| Amazonas | 162002       | Umanapana                          | Barcelos           | 202,6      | 77,1      |
| Amazonas | 257001       | Barreirinha                        | Barreirinha        | 209        | 241,33    |
| Amazonas | 462001       | Arumã                              | Beruri             | 230,4      | 60,58     |
| Amazonas | 257002       | Boa Vista do Ramos                 | Boa Vista do Ramos | 128,1      | 55,93     |
| Amazonas | 967001       | Floriano Peixoto                   | Boca do Acre       | 422,8      | 185,65    |
| Amazonas | 458001       | Caramuri                           | Borba              | 150,7      | 33,51     |
| Amazonas | 664001       | Canutama                           | Canutama           | 249,4      | 273,95    |
| Amazonas | 668000       | Santos Dumont                      | Carauari           | 151,8      | 22,68     |
| Amazonas | 363000       | Barro Alto-São Raimundo do Ipixuna | Coari              | 146,6      | 29,54     |
| Amazonas | 362002       | Badajós                            | Codajás            | 139,1      | 27,89     |
| Amazonas | 669001       | Soledade                           | Eirunepé           | 140        | 27,54     |
| Amazonas | 770000       | Envira                             | Envira             | 194,1      | 73,12     |
| Amazonas | 662001       | Juma                               | Humaitá            | 214,3      | 21,71     |
| Amazonas | 772002       | Seringal Boa Fé                    | Ipixuna            | 200        | 67,42     |
| Amazonas | 358002       | Bolsa do Rio Urubu                 | Itacoatiara        | 150        | 20,09     |
| Amazonas | 166000       | Acanauí                            | Japurá             | 185,6      | 62,9      |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF       | Cód. Estação | Nome Estação                  | Municípios                | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------|--------------|-------------------------------|---------------------------|------------|-----------|
| Amazonas | 366000       | Forte das Graças              | Juruá                     | 145,2      | 51,43     |
| Amazonas | 865000       | Fazenda Scheffer              | Lábrea                    | 192        | 44,41     |
| Amazonas | 360001       | Manacapuru                    | Manacapuru                | 228,7      | 80,16     |
| Amazonas | 360000       | Manaus                        | Manaus                    | 180,8      | 27,26     |
| Amazonas | 661001       | Nova Esperança                | Manicoré                  | 152,2      | 31,3      |
| Amazonas | 165000       | Maraã                         | Maraã                     | 144,6      | 28,37     |
| Amazonas | 357001       | Maués                         | Maués                     | 115,1      | 13,5      |
| Amazonas | 256002       | Nhamundá                      | Nhamundá                  | 143,5      | 55,11     |
| Amazonas | 359001       | Nova Olinda do Norte          | Nova Olinda do Norte      | 145,6      | 47,09     |
| Amazonas | 261000       | Baruri                        | Novo Airão                | 160,8      | 33,3      |
| Amazonas | 660000       | Seringal Jenipapo             | Novo Aripuanã             | 187,6      | 41,18     |
| Amazonas | 257003       | Movambo                       | Parintins                 | 117        | 21,19     |
| Amazonas | 766001       | Seringal Fortaleza            | Pauini                    | 199,4      | 35        |
| Amazonas | 260007       | Presidente Figueiredo         | Presidente Figueiredo     | 175,8      | 25,6      |
| Amazonas | 65001        | Tapuruquara                   | Santa Izabel do Rio Negro | 116,7      | 18,96     |
| Amazonas | 268000       | Boa União                     | Santo Antônio do Içá      | 160,6      | 32,86     |
| Amazonas | 8067002      | Maloca São Tomé (Com. Curiri) | São Gabriel da Cachoeira  | 207        | 61,43     |
| Amazonas | 369000       | Santa Rita do Weil            | São Paulo de Olivença     | 140,2      | 45,71     |
| Amazonas | 469001       | Tabatinga                     | Tabatinga                 | 203,2      | 76,29     |
| Amazonas | 664000       | Bacaba                        | Tapauá                    | 173,7      | 33,62     |
| Amazonas | 563000       | Seringal Moreira              | Tefé                      | 156        | 35,31     |
| Amazonas | 257000       | Urucará                       | Urucará                   | 172,4      | 26,02     |
| Bahia    | 1144014      | São Sebastião                 | Angical                   | 125        | 43,34     |
| Bahia    | 1244011      | Barreiras                     | Barreiras                 | 142,6      | 57,61     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF    | Cód. Estação | Nome Estação                  | Municípios             | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-------|--------------|-------------------------------|------------------------|------------|-----------|
| Bahia | 1242015      | Brotas de Macaúbas            | Brotas de Macaúbas     | 140        | 81        |
| Bahia | 1443002      | Carinhanha                    | Carinhanha             | 126,8      | 44,29     |
| Bahia | 1444017      | Fazenda Porto Alegre          | Cocos                  | 147,8      | 56,79     |
| Bahia | 1344015      | Colônia do Formoso            | Coribe                 | 163,4      | 67,04     |
| Bahia | 1345000      | Arrojo Lândia                 | Correntina             | 195,8      | 109,3     |
| Bahia | 1144005      | Fazenda Macambira             | Cotegipe               | 135        | 52,96     |
| Bahia | 1145001      | Formosa do Rio Preto          | Formosa do Rio Preto   | 120,8      | 37,72     |
| Bahia | 1142017      | Fazenda Cabeceiras            | Ibipeba                | 314        | 1.653,14  |
| Bahia | 1243011      | Ibotirama                     | Ibotirama              | 135,2      | 93,25     |
| Bahia | 1344013      | Gatos                         | Jaborandi              | 146,5      | 69,04     |
| Bahia | 1143010      | Boqueirão                     | Mansidão               | 213,8      | 942,44    |
| Bahia | 1143002      | Morpará                       | Morpará                | 175,6      | 93,41     |
| Bahia | 1242016      | Ponte BR-242                  | Oliveira dos Brejinhos | 105,7      | 44,46     |
| Bahia | 1443026      | Palmas de Monte Alto          | Palmas de Monte Alto   | 137,8      | 26,84     |
| Bahia | 1145019      | Caripare                      | Riachão das Neves      | 130        | 35,11     |
| Bahia | 1344017      | Santa Maria da Vitória        | Santa Maria da Vitória | 164,2      | 64,07     |
| Bahia | 1343008      | Porto Novo                    | Santana                | 230,1      | 513,68    |
| Bahia | 1244019      | Fazenda Coqueiro              | São Desidério          | 184        | 138,07    |
| Bahia | 1343019      | Bom Jesus da Palavra          | Serra do Ramalho       | 124        | 22,1      |
| Bahia | 1243019      | Serra Dourada (Faz. Muritiba) | Serra Dourada          | 145        | 60,81     |
| Bahia | 1243000      | Gameleira                     | Sítio do Mato          | 173,4      | 215,55    |
| Bahia | 1442031      | Urandi                        | Urandi                 | 110        | 47,34     |
| Ceará | 538008       | Castanhão                     | Alto Santo             | 142        | 107,45    |
| Ceará | 339000       | Amontada                      | Amontada               | 142,9      | 56,77     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF               | Cód. Estação | Nome Estação              | Municípios              | Chuva máx. | TR Gumbel |
|------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|------------|-----------|
| Ceará            | 339045       | Fazenda São João          | Apuiarés                | 81,3       | 8,92      |
| Ceará            | 640003       | Arneiroz                  | Arneiroz                | 153        | 206,35    |
| Ceará            | 438022       | Cristais                  | Cascavel                | 137,4      | 94,22     |
| Ceará            | 438021       | Chorozinho                | Chorozinho              | 138,9      | 81,29     |
| Ceará            | 440005       | Croatá                    | Croatá                  | 117,4      | 37,85     |
| Ceará            | 638014       | Icó                       | Icó                     | 141        | 70,6      |
| Ceará            | 639044       | Iguatu                    | Iguatu                  | 105        | 13,04     |
| Ceará            | 438061       | Caio Prado                | Itapiúna                | 96         | 16,97     |
| Ceará            | 538043       | Jaguaribe                 | Jaguaribe               | 135,7      | 24,51     |
| Ceará            | 638007       | Lavras da Mangabeira      | Lavras da Mangabeira    | 131        | 56,69     |
| Ceará            | 738049       | Podimirim                 | Milagres                | 112,3      | 15,19     |
| Ceará            | 438011       | Baú                       | Pacatuba                | 152        | 75,1      |
| Ceará            | 539053       | Quixeramobim              | Quixeramobim            | 98,5       | 12,07     |
| Ceará            | 639045       | Malhada                   | Saboeiro                | 84,2       | 14,45     |
| Ceará            | 338014       | Umarituba Nova            | São Gonçalo do Amarante | 165,6      | 55,77     |
| Ceará            | 339028       | São Luís do Curu          | São Luís do Curu        | 178,9      | 187,42    |
| Ceará            | 539037       | Senador Pompeu            | Senador Pompeu          | 144        | 196,45    |
| Ceará            | 538044       | Peixe Gordo               | Tabuleiro do Norte      | 182,8      | 52,23     |
| Distrito Federal | 1547002      | Planaltina                | Planaltina              | 145        | 175,18    |
| Espírito Santo   | 2041023      | Afonso Cláudio – Montante | Afonso Cláudio          | 134,8      | 22,31     |
| Espírito Santo   | 1840007      | Água Doce                 | Água Doce do Norte      | 146,4      | 64,07     |
| Espírito Santo   | 1840000      | Águia Branca              | Águia Branca            | 214        | 184,28    |
| Espírito Santo   | 2041016      | Ibitirama                 | Alegre                  | 157,2      | 67,28     |
| Espírito Santo   | 2040011      | Matilde (DNOS)            | Alfredo Chaves          | 135,8      | 34,74     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF             | Cód. Estação | Nome Estação                    | Municípios              | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------------|--------------|---------------------------------|-------------------------|------------|-----------|
| Espírito Santo | 2040009      | Anchieta (DNOS)                 | Anchieta                | 137        | 28,59     |
| Espírito Santo | 1940021      | Aracruz                         | Aracruz                 | 252        | 276,3     |
| Espírito Santo | 2041000      | Atílio Vivacqua                 | Atílio Vivacqua         | 160,4      | 191,64    |
| Espírito Santo | 1941003      | Baixo Guandu                    | Baixo Guandu            | 136,6      | 125,72    |
| Espírito Santo | 1841010      | Santo Agostinho                 | Barra de São Francisco  | 202,7      | 333,45    |
| Espírito Santo | 2041021      | Burarama                        | Cachoeiro do Itapemirim | 196,2      | 151,46    |
| Espírito Santo | 2040014      | Duas Bocas (DNOS)               | Cariacica               | 231,5      | 143,71    |
| Espírito Santo | 2041002      | Catelo                          | Catelo                  | 127        | 64,9      |
| Espírito Santo | 1940006      | Colatina – Corpo de Bombeiros   | Colatina                | 137,8      | 52,4      |
| Espírito Santo | 1839001      | Conceição da Barra              | Conceição da Barra      | 193,8      | 91,42     |
| Espírito Santo | 2041011      | Conceição do Castelo (DNOS)     | Conceição do Castelo    | 147,2      | 80,8      |
| Espírito Santo | 2040012      | Marechal Floriano (DNOS)        | Domingos Martins        | 150        | 89,32     |
| Espírito Santo | 2041014      | Dores do Rio Preto              | Dores do Rio Preto      | 138,5      | 60,29     |
| Espírito Santo | 1840015      | Patrimônio Santa Luzia do Norte | Ecoporanga              | 166,8      | 40,5      |
| Espírito Santo | 1940007      | Fundão                          | Fundão                  | 206,2      | 129,69    |
| Espírito Santo | 2041001      | Guaçuí                          | Guaçuí                  | 130        | 36,4      |
| Espírito Santo | 2040004      | Guarapari (DNOS)                | Guarapari               | 178        | 67,96     |
| Espírito Santo | 1940005      | Cavalinho                       | Ibiraçu                 | 197,4      | 114,36    |
| Espírito Santo | 2040017      | Duas Barras (DNOS)              | Iconha                  | 298        | 777,71    |
| Espírito Santo | 1940012      | Itaimbé                         | Itaguaçu                | 200,2      | 193       |
| Espírito Santo | 2040006      | Usina Paineiras                 | Itapemirim              | 152,4      | 71,11     |
| Espírito Santo | 1940000      | Itarana                         | Itarana                 | 150,1      | 89,36     |
| Espírito Santo | 2041017      | Santa Cruz – Ca-paraó           | Iúna                    | 143,3      | 73,5      |
| Espírito Santo | 1840008      | Ponte Nova (BR-101)             | Linhares                | 310,2      | 1.038,50  |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF             | Cód. Estação | Nome Estação                 | Municípios            | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------------|--------------|------------------------------|-----------------------|------------|-----------|
| Espírito Santo | 1841009      | Mantenópolis                 | Mantenópolis          | 168        | 167,92    |
| Espírito Santo | 2141014      | Ponte do Itabapoana          | Mimoso do Sul         | 414,6      | 25.373,84 |
| Espírito Santo | 1840012      | Fazenda Limoeiro             | Montanha              | 136,7      | 16,53     |
| Espírito Santo | 2041019      | Itaici                       | Muniz Freire          | 202,4      | 561,87    |
| Espírito Santo | 2041015      | Fazenda Monte Alegre         | Muqui                 | 132,4      | 45,5      |
| Espírito Santo | 1840010      | Cedrolândia                  | Nova Venécia          | 201,8      | 260,89    |
| Espírito Santo | 1940009      | Pancas                       | Pancas                | 158,6      | 63,14     |
| Espírito Santo | 1840017      | São João do Sobrado          | Pinheiros             | 186,4      | 144,2     |
| Espírito Santo | 2040010      | Santa Leopoldina             | Santa Leopoldina      | 209        | 257,47    |
| Espírito Santo | 2040007      | Santa Maria do Jetibá        | Santa Maria de Jetibá | 250        | 1.021,32  |
| Espírito Santo | 1940010      | Valsugana Velha – Montante   | Santa Teresa          | 158,8      | 31,67     |
| Espírito Santo | 1940016      | Barra de São Miguel          | São Gabriel da Palha  | 185,6      | 73,82     |
| Espírito Santo | 1840020      | São João da Cachoeira Grande | São Mateus            | 186,9      | 54,83     |
| Espírito Santo | 2040003      | Fazenda Fonte Limpa (DNOS)   | Serra                 | 170        | 36,51     |
| Espírito Santo | 2041010      | Jacigua (DNOS)               | Vargem Alta           | 166        | 31,05     |
| Espírito Santo | 2040001      | Fazenda Jucuruaba            | Viana                 | 156,4      | 59,97     |
| Espírito Santo | 2040022      | Ponta da Fruta               | Vila Velha            | 138        | 122,68    |
| Goiás          | 1750003      | Ponte Rio Verdão             | Acreúna               | 148        | 50,19     |
| Goiás          | 1648001      | Ponte Anápolis – Brasília    | Alexânia              | 115        | 35,1      |
| Goiás          | 1447000      | Alto Paraíso de Goiás        | Alto Paraíso de Goiás | 142,1      | 92,97     |
| Goiás          | 1649000      | Anicuns                      | Anicuns               | 160,6      | 124,88    |
| Goiás          | 1851001      | Campo Alegre                 | Aporé                 | 131,8      | 19,72     |
| Goiás          | 1551002      | Peres                        | Aragarças             | 144,7      | 27,29     |
| Goiás          | 1649001      | Aragoiânia                   | Aragoiânia            | 107,1      | 25,7      |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF    | Cód. Estação | Nome Estação            | Municípios          | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-------|--------------|-------------------------|---------------------|------------|-----------|
| Goiás | 1651003      | São Ferreira            | Arenópolis          | 151,2      | 53,04     |
| Goiás | 1451000      | Aruanã                  | Aruanã              | 155,2      | 23,77     |
| Goiás | 1652000      | Bom Jardim de Goiás     | Bom Jardim de Goiás | 169        | 229,99    |
| Goiás | 1551000      | Britânia                | Britânia            | 170,1      | 110,47    |
| Goiás | 1848007      | Corumbazul              | Buriti Alegre       | 113        | 34,77     |
| Goiás | 1546005      | Cabeceiras              | Cabeceiras          | 137        | 30,19     |
| Goiás | 1851000      | Cachoeira Alta          | Cachoeira Alta      | 384        | 1005,68   |
| Goiás | 1650000      | Cachoeira de Goiás      | Cachoeira de Goiás  | 140        | 31,41     |
| Goiás | 1651000      | Caiapônia               | Caiapônia           | 161        | 77,99     |
| Goiás | 1348000      | Campinaçu               | Campinaçu           | 159,5      | 60,69     |
| Goiás | 1346004      | Campos Belos            | Campos Belos        | 135,8      | 60,17     |
| Goiás | 1549000      | UHE Serra da Mesa Ceres | Ceres               | 148        | 84,33     |
| Goiás | 1852001      | Fazenda Formosa         | Chapadão do Céu     | 150,1      | 43,72     |
| Goiás | 1650001      | Córrego do Ouro         | Córrego do Ouro     | 164,4      | 24,2      |
| Goiás | 1647002      | UHE Batalha Cristalina  | Cristalina          | 137        | 43        |
| Goiás | 1748000      | Cristianópolis          | Cristianópolis      | 132,2      | 45,87     |
| Goiás | 1449003      | Crixás                  | Crixás              | 140        | 17,2      |
| Goiás | 1749009      | Cromínia                | Cromínia            | 318,1      | 513,48    |
| Goiás | 1652003      | Doverlândia             | Doverlândia         | 231,4      | 201,32    |
| Goiás | 1749000      | Edéia (Alegrete)        | Edéia               | 150,2      | 96,53     |
| Goiás | 1349000      | Estrela do Norte        | Estrela do Norte    | 162,2      | 42,46     |
| Goiás | 1550001      | Jeroaquara              | Faina               | 168        | 46,42     |
| Goiás | 1649004      | Goianápolis             | Goianápolis         | 130        | 34,38     |
| Goiás | 1549001      | Goianésia               | Goianésia           | 117,2      | 26,99     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF    | Cód. Estação | Nome Estação                 | Municípios             | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-------|--------------|------------------------------|------------------------|------------|-----------|
| Goiás | 1850001      | Fazenda Aliança              | Goiatuba               | 136,4      | 63,82     |
| Goiás | 1649006      | Inhumas                      | Inhumas                | 143,3      | 2,91      |
| Goiás | 1651001      | Iporá                        | Iporá                  | 144,4      | 33,02     |
| Goiás | 1650002      | Israelândia                  | Israelândia            | 153,2      | 31,86     |
| Goiás | 1649007      | Itaberaí                     | Itaberaí               | 221,6      | 303,63    |
| Goiás | 1951001      | Itajá                        | Itajá                  | 150        | 191,45    |
| Goiás | 1550000      | Itapirapuã                   | Itapirapuã             | 148,4      | 31,55     |
| Goiás | 1549002      | Itapuranga                   | Itapuranga             | 156,1      | 79,21     |
| Goiás | 1851002      | Itarumã                      | Itarumã                | 128,4      | 24,02     |
| Goiás | 1849016      | Ponte Meia Ponte             | Itumbiara              | 161,2      | 68,9      |
| Goiás | 1549003      | Jaraguá                      | Jaraguá                | 165,2      | 55,67     |
| Goiás | 1751002      | Benjamin Barros              | Jataí                  | 146,8      | 26,96     |
| Goiás | 1749002      | Joviânia                     | Joviânia               | 142,2      | 72,9      |
| Goiás | 1748004      | Marzagão                     | Marzagão               | 162        | 127,51    |
| Goiás | 1550002      | Travessão                    | Matrinchã              | 154        | 25,24     |
| Goiás | 1850003      | Maurilândia                  | Maurilândia            | 134        | 40,88     |
| Goiás | 1548001      | Mimoso                       | Mimoso de Goiás        | 123        | 57,94     |
| Goiás | 1752002      | Fazenda São Bernardo         | Mineiros               | 270,8      | 1116,11   |
| Goiás | 1551001      | Montes Claros de Goiás       | Montes Claros de Goiás | 201,2      | 92,44     |
| Goiás | 1751004      | Montividiu                   | Montividiu             | 138,2      | 33,33     |
| Goiás | 1749003      | Morrinhos                    | Morrinhos              | 153        | 79,43     |
| Goiás | 1450001      | Mozarlândia (Chac. Fogreira) | Mozarlândia            | 188,6      | 103,58    |
| Goiás | 1448004      | Moquem - Fazenda Vau da Onça | Niquelândia            | 154        | 16,03     |
| Goiás | 1549004      | Nova América                 | Nova América           | 125        | 38,35     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF    | Cód. Estação | Nome Estação                  | Municípios               | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-------|--------------|-------------------------------|--------------------------|------------|-----------|
| Goiás | 1350000      | Bandeirantes                  | Nova Crixás              | 163,7      | 28,79     |
| Goiás | 1346001      | Nova Roma (Faz. Sucuri)       | Nova Roma                | 141        | 66,19     |
| Goiás | 1349001      | Novo Planalto                 | Novo Planalto            | 180        | 40,11     |
| Goiás | 1748005      | UHE Corumbá I Rio Piracanjuba | Orizona                  | 167,5      | 63,48     |
| Goiás | 1649009      | Ouro Verde de Goiás           | Ouro Verde de Goiás      | 133        | 35,88     |
| Goiás | 1548011      | Fazenda Marajá                | Padre Bernardo           | 110,8      | 16,57     |
| Goiás | 1649010      | Palmeiras de Goiás            | Palmeiras de Goiás       | 142,5      | 44,05     |
| Goiás | 1750004      | Ponte Rodagem                 | Paraúna                  | 208,3      | 381,44    |
| Goiás | 1449000      | Pilar de Goiás                | Pilar de Goiás           | 150        | 22,76     |
| Goiás | 1749005      | Piracanjuba                   | Piracanjuba              | 139,4      | 91,08     |
| Goiás | 1651002      | Piranhas                      | Piranhas                 | 208        | 64,2      |
| Goiás | 1548003      | Pirenópolis                   | Pirenópolis              | 175        | 107,82    |
| Goiás | 1749004      | Pontalina                     | Pontalina                | 132,2      | 31,16     |
| Goiás | 1349002      | Porangatu (Descoberto)        | Porangatu                | 177,2      | 83,66     |
| Goiás | 1850002      | Quirinópolis                  | Quirinópolis             | 150        | 62,81     |
| Goiás | 1750008      | Fazenda Paraíso               | Rio Verde                | 135        | 31,69     |
| Goiás | 1551003      | Santa Fé                      | Santa Fé de Goiás        | 225,4      | 110,52    |
| Goiás | 1753002      | Fazenda Babilônia             | Santa Rita do Araguaia   | 125        | 32,71     |
| Goiás | 1449002      | Santa Terezinha de Goiás      | Santa Terezinha de Goiás | 168,4      | 31,14     |
| Goiás | 1346002      | Fazenda Ingazeiro             | São Domingos             | 131        | 37,69     |
| Goiás | 1447002      | São João D'Aliança            | São João D'Aliança       | 148,6      | 31,78     |
| Goiás | 1350001      | Rio Pintado (Faz. Pontal)     | São Miguel do Araguaia   | 210        | 289,34    |
| Goiás | 1851005      | Serranópolis                  | Serranópolis             | 148        | 33,05     |
| Goiás | 1446004      | Sítio D'Abadia                | Sítio D'Abadia           | 125,5      | 30,38     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF       | Cód. Estação | Nome Estação         | Municípios             | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------|--------------|----------------------|------------------------|------------|-----------|
| Goiás    | 1347001      | Ponte Paraná         | Teresina de Goiás      | 118,6      | 41,69     |
| Goiás    | 1847006      | Três Ranchos         | Três Ranchos           | 144,4      | 50,11     |
| Goiás    | 1649012      | Trindade             | Trindade               | 115,2      | 18,46     |
| Goiás    | 1348003      | Trombas              | Trombas                | 125        | 27,47     |
| Goiás    | 1650003      | Turvânia             | Turvânia               | 150,1      | 47,37     |
| Goiás    | 1449001      | Porto do Uruacu      | Uruaçu                 | 182,4      | 174,33    |
| Goiás    | 1549009      | Uruana               | Uruana                 | 142,5      | 83,78     |
| Goiás    | 1749001      | Fazenda Boa Vista    | Varjão                 | 216,4      | 320,25    |
| Goiás    | 1648002      | Vianópolis           | Vianópolis             | 158,7      | 66,8      |
| Maranhão | 443012       | Aldeias Altas        | Aldeias Altas          | 128        | 33,5      |
| Maranhão | 845005       | Inhumas              | Alto Parnaíba          | 176,6      | 90,24     |
| Maranhão | 445008       | Arame                | Arame                  | 155,6      | 112,87    |
| Maranhão | 746006       | Balsas               | Balsas                 | 148,8      | 24,21     |
| Maranhão | 643011       | Lages                | Barão de Grajaú        | 133,6      | 26,41     |
| Maranhão | 544006       | Flores               | Barra do Corda         | 155,6      | 60,77     |
| Maranhão | 345000       | Aratóf Grande        | Bela Vista do Maranhão | 162,2      | 64,13     |
| Maranhão | 346002       | Tucumã               | Bom Jardim             | 141        | 30,44     |
| Maranhão | 543004       | Mendes               | Buriti Bravo           | 149,1      | 33,42     |
| Maranhão | 345012       | Boa Vista do Pindaré | Cajari                 | 148        | 16,4      |
| Maranhão | 145006       | Cândido Mendes       | Cândido Mendes         | 155,6      | 32,64     |
| Maranhão | 344004       | Cantanhede           | Cantanhede             | 175        | 137,2     |
| Maranhão | 747000       | Carolina             | Carolina               | 162,8      | 42,66     |
| Maranhão | 343010       | Brejo do Meio        | Chapadinha             | 142        | 50,72     |
| Maranhão | 443006       | Codó                 | Codó                   | 158        | 61,74     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF       | Cód. Estação | Nome Estação        | Municípios              | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------|--------------|---------------------|-------------------------|------------|-----------|
| Maranhão | 644003       | Colinas             | Colinas                 | 164,3      | 87,81     |
| Maranhão | 444001       | Coroatá             | Coroatá                 | 136,5      | 22,59     |
| Maranhão | 144002       | Curupuru            | Curupuru                | 162,1      | 15,87     |
| Maranhão | 442013       | Duque Bacelar       | Duque Bacelar           | 157        | 83,37     |
| Maranhão | 645002       | Papagaio            | Fernando Falcão         | 167,8      | 42,2      |
| Maranhão | 646005       | Fazenda São Vicente | Fortaleza dos Nogueiras | 188,4      | 99,61     |
| Maranhão | 544009       | Graça Aranha        | Graça Aranha            | 119        | 19,99     |
| Maranhão | 646006       | Fazenda Sempre Viva | Grajaú                  | 168,2      | 29,37     |
| Maranhão | 447002       | Reta KM - 32        | Imperatriz              | 146,3      | 29,99     |
| Maranhão | 445007       | Angico              | Lago da Pedra           | 134,7      | 32,51     |
| Maranhão | 645003       | Mato Grosso         | Loreto                  | 99,5       | 13,38     |
| Maranhão | 343009       | Mata Roma           | Mata Roma               | 140,2      | 28,29     |
| Maranhão | 644007       | Mirador             | Mirador                 | 149,1      | 96        |
| Maranhão | 344012       | Miranda             | Miranda do Norte        | 164,4      | 22,68     |
| Maranhão | 345013       | Newton Belo         | Monção                  | 154,8      | 69,85     |
| Maranhão | 343003       | Nina Rodrigues      | Nina Rodrigues          | 173        | 76,56     |
| Maranhão | 543002       | Lagoa               | Parnarama               | 150        | 28,49     |
| Maranhão | 643012       | Passagem Franca     | Passagem Franca         | 178,2      | 55,5      |
| Maranhão | 444005       | Pedreiras II        | Pedreiras               | 150,4      | 43,53     |
| Maranhão | 444013       | Peritoró            | Peritoró                | 156,6      | 109,12    |
| Maranhão | 345006       | Pindaré-Mirim       | Pindaré-Mirim           | 157,1      | 75,51     |
| Maranhão | 245010       | Pinheiro            | Pinheiro                | 146,5      | 22,61     |
| Maranhão | 344008       | Pedras              | Pirapemas               | 144,1      | 27,11     |
| Maranhão | 644012       | Porto do Lopes      | Porto do Lopes          | 144,6      | 74,36     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF          | Cód. Estação | Nome Estação                   | Municípios                   | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-------------|--------------|--------------------------------|------------------------------|------------|-----------|
| Maranhão    | 344010       | Presidente Juscelino           | Presidente Juscelino         | 132,4      | 15,86     |
| Maranhão    | 746008       | Morro Vermelho                 | Riachão                      | 119,6      | 42,34     |
| Maranhão    | 745004       | Sambaíba                       | Sambaíba                     | 125,6      | 51,63     |
| Maranhão    | 245011       | Santa Helena                   | Santa Helena                 | 138,1      | 50,73     |
| Maranhão    | 445001       | Esperantina                    | Santa Luzia                  | 153,7      | 23,45     |
| Maranhão    | 342009       | Barra da Onça                  | Santa Quitéria do Maranhão   | 112,3      | 14,62     |
| Maranhão    | 244012       | São Bento                      | São Bento                    | 197,5      | 28,42     |
| Maranhão    | 744000       | São Félix de Balsas            | São Félix de Balsas          | 125,8      | 71,19     |
| Maranhão    | 745005       | Fazenda Tigre                  | São Raimundo das Mangabeiras | 150        | 15,76     |
| Maranhão    | 546007       | Sítio Novo                     | Sítio Novo                   | 141,8      | 33,66     |
| Maranhão    | 845003       | Babilônia                      | Tasso Fragoso                | 150,4      | 157,55    |
| Maranhão    | 245007       | BR – 316 / Rio Paruá           | Turiaçu                      | 154,5      | 26,35     |
| Maranhão    | 242002       | Barro Duro                     | Tutóia                       | 147        | 69,33     |
| Maranhão    | 343011       | São Mateus do Maranhão         | Urbano Santos                | 144,6      | 21,75     |
| Maranhão    | 343004       | Munim                          | Vargem Grande                | 147,2      | 104,61    |
| Maranhão    | 245008       | Pedro Rosário                  | Viana                        | 97         | 9         |
| Maranhão    | 344013       | Lago Açú                       | Vitória do Mearim            | 153,6      | 24,17     |
| Maranhão    | 445010       | São João do Grajaú             | Vitorino Freire              | 148,5      | 33,48     |
| Mato Grosso | 1556005      | Acorizal                       | Acorizal                     | 180,6      | 141,97    |
| Mato Grosso | 1452004      | Água Boa                       | Água Boa                     | 271,2      | 294,39    |
| Mato Grosso | 956001       | Jusante Foz Peixoto de Azevedo | Alta Floresta                | 183,3      | 45,42     |
| Mato Grosso | 1753000      | Alto Araguaia                  | Alto Araguaia                | 220        | 392,41    |
| Mato Grosso | 1653004      | Alto Garças                    | Alto Garças                  | 120,2      | 23,51     |
| Mato Grosso | 1853000      | Fazenda Taquari                | Alto Taquari                 | 168        | 75,45     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF          | Cód. Estação | Nome Estação              | Municípios            | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-------------|--------------|---------------------------|-----------------------|------------|-----------|
| Mato Grosso | 957001       | Novo Planeta              | Apiaçás               | 160,8      | 142,04    |
| Mato Grosso | 1653005      | Cafelândia do Leste       | Araguainha            | 119,1      | 33,02     |
| Mato Grosso | 1456001      | Arenápolis (Canaã)        | Arenápolis            | 166,4      | 91,62     |
| Mato Grosso | 1059000      | Humboldt                  | Aripuanã              | 155        | 37,12     |
| Mato Grosso | 1756001      | São José do Piquiri       | Barão do Melgaço      | 240        | 217,91    |
| Mato Grosso | 1457001      | Tangará da Serra          | Barra do Bugres       | 191        | 46,13     |
| Mato Grosso | 1552002      | Toricueije                | Barra do Garças       | 188,2      | 35,68     |
| Mato Grosso | 1251000      | Alô Brasil                | Bom Jesus do Ara-     | 128,7      | 14,68     |
| Mato Grosso | 1158003      | Fazenda Tombador          | Brasnorte             | 167        | 44,07     |
| Mato Grosso | 1657003      | Cáceres (DNPVN)           | Cáceres               | 256,4      | 143,47    |
| Mato Grosso | 1353001      | Estância Rodeio           | Campinápolis          | 160,8      | 72,97     |
| Mato Grosso | 1358001      | Bacaval                   | Campo Novo do Parecis | 180        | 48,91     |
| Mato Grosso | 1555005      | São José da Serra         | Campo Verde           | 168,2      | 78,73     |
| Mato Grosso | 1352001      | Garapu                    | Canarana              | 180,5      | 44,52     |
| Mato Grosso | 1055001      | Indeco                    | Carlinda              | 140        | 45,72     |
| Mato Grosso | 1058004      | Nova Tangará              | Castanheira           | 163,2      | 45,29     |
| Mato Grosso | 1455004      | UHE Manso Mont-           | Chapada dos Gui-      | 293        | 134,38    |
| Mato Grosso | 1055002      | Colíder                   | Colíder               | 167,5      | 23,82     |
| Mato Grosso | 1359000      | Padronal                  | Comodoro              | 145        | 15,62     |
| Mato Grosso | 1058002      | Núcleo Ariel              | Cotriguaçu            | 141,5      | 24,49     |
| Mato Grosso | 1556000      | Nossa Senhora da Guia     | Cuiabá                | 188        | 32,49     |
| Mato Grosso | 1456009      | Parecis (BR – 364)        | Diamantino            | 266        | 606,76    |
| Mato Grosso | 1255002      | Núcleo Colonial Rio Ferro | Feliz Natal           | 120,5      | 25,13     |
| Mato Grosso | 1552001      | General Carneiro          | General Carneiro      | 130        | 22,56     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF          | Cód. Estação | Nome Estação                 | Municípios                  | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-------------|--------------|------------------------------|-----------------------------|------------|-----------|
| Mato Grosso | 954001       | Cachimbo                     | Guarantã do Norte           | 132        | 24,62     |
| Mato Grosso | 1653002      | Guiratinga                   | Guiratinga                  | 184        | 75,53     |
| Mato Grosso | 1558004      | Alto Jauru                   | Indiavaí                    | 162        | 96,53     |
| Mato Grosso | 1754000      | Itiquira                     | Itiquira                    | 167,2      | 141,78    |
| Mato Grosso | 1157001      | Juara                        | Juara                       | 122,4      | 22,42     |
| Mato Grosso | 1158001      | Fontanilhas                  | Juína                       | 158,3      | 35,69     |
| Mato Grosso | 1058003      | Juruena                      | Juruena                     | 142,3      | 32,35     |
| Mato Grosso | 1054000      | Agropecuária Cajabi          | Marcelândia                 | 184        | 83,31     |
| Mato Grosso | 1558001      | Ponte Cabaçal MT - 125       | Mirassol D'Oeste            | 201        | 181,66    |
| Mato Grosso | 1456004      | Quebó                        | Nobres                      | 180        | 85,33     |
| Mato Grosso | 1456003      | Nortelândia                  | Nortelândia                 | 160,3      | 53,48     |
| Mato Grosso | 1556001      | N. S. Livramento – Bosque F. | Nossa Senhora do Livramento | 125        | 16,71     |
| Mato Grosso | 1454002      | Nova Brasilândia             | Nova Brasilândia            | 138,5      | 11,9      |
| Mato Grosso | 1457006      | PCH Maracanã Jusante         | Nova Marilândia             | 151,4      | 111,06    |
| Mato Grosso | 1357000      | Nova Maringá                 | Nova Maringá                | 165,3      | 76,16     |
| Mato Grosso | 1057001      | Trivelato                    | Nova Monte Verde            | 151,2      | 43,79     |
| Mato Grosso | 1356002      | Nova Mutum                   | Nova Mutum                  | 126,8      | 20,48     |
| Mato Grosso | 1452000      | Xavantina                    | Nova Xavantina              | 130,1      | 22,22     |
| Mato Grosso | 1250001      | Santo Antônio do Leverger    | Novo Santo Antônio          | 138,8      | 23,38     |
| Mato Grosso | 1354000      | Fazenda Agrochapa-pada       | Paranatinga                 | 186        | 347,78    |
| Mato Grosso | 1654004      | Santa Escolástica            | Pedra Preta                 | 141        | 19,49     |
| Mato Grosso | 1656004      | São José                     | Poconé                      | 156,2      | 58,75     |
| Mato Grosso | 1652001      | Ponte Branca                 | Ponte Branca                | 182,3      | 42,8      |
| Mato Grosso | 1559000      | Pontes e Lacerda             | Pontes e Lacerda            | 148,5      | 50,96     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF                 | Cód. Estação | Nome Estação                 | Municípios                   | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------------|--------------|------------------------------|------------------------------|------------|-----------|
| Mato Grosso        | 1157000      | Porto dos Gaúchos            | Porto dos Gaúchos            | 166,6      | 50,06     |
| Mato Grosso        | 1557003      | Barranquinho                 | Porto Estrela                | 142,7      | 62,11     |
| Mato Grosso        | 1554005      | Rio das Mortes               | Primavera do Leste           | 150        | 35,36     |
| Mato Grosso        | 1251001      | Divínea                      | Ribeirão Cascalheira         | 147,2      | 62,11     |
| Mato Grosso        | 1558000      | Colônia Rio Branco           | Rio Branco                   | 154        | 28,43     |
| Mato Grosso        | 1654000      | Rondonópolis                 | Rondonópolis                 | 205,2      | 63,85     |
| Mato Grosso        | 1455008      | Fazenda Raizama<br>(Coimbra) | Rosário Oeste                | 150,5      | 98,53     |
| Mato Grosso        | 1557005      | São José do Sepotuba         | Salto do Céu                 | 224,7      | 106,99    |
| Mato Grosso        | 1154001      | Santa Felicidade             | Santa Carmem                 | 137,2      | 53,06     |
| Mato Grosso        | 1655001      | Acima do Córrego<br>Grande   | Santo Antônio do<br>Leverger | 143,9      | 40,25     |
| Mato Grosso        | 1150001      | São Félix do Ara-<br>guaia   | São Félix do Ara-<br>guaia   | 157,3      | 35,75     |
| Mato Grosso        | 1052000      | Vila São José do<br>Xingu    | São José do Xingu            | 142,6      | 40,56     |
| Mato Grosso        | 1155000      | Cachoeirão                   | SINOP                        | 157,8      | 54,01     |
| Mato Grosso        | 1255001      | Teles Pires                  | Sorriso                      | 146,2      | 52,1      |
| Mato Grosso        | 1156000      | Fazenda Itauba               | Tabaporã                     | 138,2      | 49,55     |
| Mato Grosso        | 1457000      | Tapirapuã                    | Tangará da Serra             | 191        | 154,15    |
| Mato Grosso        | 1653000      | Tesouro                      | Tesouro                      | 173        | 36,79     |
| Mato Grosso        | 1652002      | Torixoréu                    | Torixoréu                    | 163,6      | 45,63     |
| Mato Grosso        | 1556006      | Seco (Fazenda Seco)          | Várzea Grande                | 242        | 296,15    |
| Mato Grosso        | 1254001      | Agrovensa                    | Vera                         | 132,5      | 24,59     |
| Mato Grosso        | 1559006      | Mato Grosso                  | Vila Bela da Santís-<br>sima | 136,2      | 43,74     |
| Mato Grosso do Sul | 1952001      | Pontal                       | Água Clara                   | 173,1      | 70,13     |
| Mato Grosso do Sul | 2355000      | Amambaí                      | Amambaí                      | 200,4      | 123,92    |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF                 | Cód. Estação | Nome Estação           | Municípios            | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------------|--------------|------------------------|-----------------------|------------|-----------|
| Mato Grosso do Sul | 2252000      | Anaurilândia           | Anaurilândia          | 132,2      | 35,22     |
| Mato Grosso do Sul | 2255002      | Antônio João           | Antônio João          | 160        | 16,7      |
| Mato Grosso do Sul | 2051046      | Aparecida do Taboado   | Aparecida do Taboado  | 121,5      | 46,81     |
| Mato Grosso do Sul | 1956003      | Entre Rios             | Aquidauana            | 386        | 348,12    |
| Mato Grosso do Sul | 2152001      | Porto Uerê             | Bataguassu            | 149,7      | 45,3      |
| Mato Grosso do Sul | 2253014      | Bataipora              | Batayporã             | 115,8      | 20,45     |
| Mato Grosso do Sul | 2256001      | Bela Vista             | Bela Vista            | 150        | 23,29     |
| Mato Grosso do Sul | 2056003      | Estrada MT-738         | Bonito                | 172,5      | 86,89     |
| Mato Grosso do Sul | 2152014      | Fazenda Boa Esperança  | Brasilândia           | 130        | 27,81     |
| Mato Grosso do Sul | 2254000      | Caarapó                | Caarapó               | 163        | 222,26    |
| Mato Grosso do Sul | 1954004      | Camapuã                | Camapuã               | 162,2      | 47,29     |
| Mato Grosso do Sul | 2154008      | Fazenda Ponte          | Campo Grande          | 215        | 221,85    |
| Mato Grosso do Sul | 2257000      | Caracol                | Caracol               | 160        | 52,17     |
| Mato Grosso do Sul | 1951004      | Árvore Grande          | Cassilândia           | 135        | 46,65     |
| Mato Grosso do Sul | 1852003      | Cidade Chapadão Gaúcho | Chapadão do Sul       | 125        | 24,71     |
| Mato Grosso do Sul | 2355001      | Coronel Sapucaia       | Coronel Sapucaia      | 140,9      | 37,58     |
| Mato Grosso do Sul | 1857001      | Amolar                 | Corumbá               | 469        | 476,78    |
| Mato Grosso do Sul | 1853004      | Costa Rica             | Costa Rica            | 98,7       | 16,82     |
| Mato Grosso do Sul | 1854004      | Coxim                  | Coxim                 | 396,4      | 80,18     |
| Mato Grosso do Sul | 2254004      | Porto Wilma            | Deodápolis            | 150        | 39,42     |
| Mato Grosso do Sul | 2055002      | Palmeiras              | Dois Irmãos do Buriti | 225        | 150,13    |
| Mato Grosso do Sul | 2255004      | Itaum                  | Dourados              | 160,4      | 55,38     |
| Mato Grosso do Sul | 1853005      | Colônia Figueirão      | Figueirão             | 115,2      | 13,8      |
| Mato Grosso do Sul | 2254003      | Glória de Dourados     | Glória de Dourados    | 150,1      | 39,47     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF                 | Cód. Estação | Nome Estação             | Municípios               | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------------|--------------|--------------------------|--------------------------|------------|-----------|
| Mato Grosso do Sul | 2156001      | Jardim                   | Guia Lopes da Laguna     | 124,2      | 17,93     |
| Mato Grosso do Sul | 2354001      | Iguatemi                 | Iguatemi                 | 148,7      | 54,85     |
| Mato Grosso do Sul | 1952002      | Morangas                 | Inocência                | 128        | 35,79     |
| Mato Grosso do Sul | 2254005      | Itaporã                  | Itaporã                  | 131,8      | 18,58     |
| Mato Grosso do Sul | 2253015      | Fazenda Jangada          | Jateí                    | 115,5      | 15,46     |
| Mato Grosso do Sul | 2255003      | Bocaja                   | Laguna Carapã            | 142,3      | 50,27     |
| Mato Grosso do Sul | 2155000      | Maracaju                 | Maracaju                 | 155,5      | 67,28     |
| Mato Grosso do Sul | 2056001      | Miranda                  | Miranda                  | 194,5      | 52,38     |
| Mato Grosso do Sul | 2354000      | Naviraí                  | Naviraí                  | 179        | 89,9      |
| Mato Grosso do Sul | 2155001      | Nioaque                  | Nioaque                  | 178,2      | 74,66     |
| Mato Grosso do Sul | 2153000      | Ponto Pindaíba           | Nova Andradina           | 136,6      | 38,24     |
| Mato Grosso do Sul | 1951003      | Fazenda Pindorama        | Paranaíba                | 137        | 103,42    |
| Mato Grosso do Sul | 2355002      | Porto São Domingos       | Paranhos                 | 168,7      | 56,18     |
| Mato Grosso do Sul | 1754004      | Pedro Severo             | Pedro Gomes              | 336,4      | 510,88    |
| Mato Grosso do Sul | 2157004      | Porto Murtinho           | Porto Murtinho           | 242,9      | 174,61    |
| Mato Grosso do Sul | 2054020      | Alegre                   | Ribas do Rio Pardo       | 156,2      | 43,68     |
| Mato Grosso do Sul | 2154006      | Retiro Guarujá           | Rio Brilhante            | 255        | 137,82    |
| Mato Grosso do Sul | 1954003      | Rio Negro                | Rio Negro                | 198,6      | 265,72    |
| Mato Grosso do Sul | 1854006      | Confluência do Rio Jauru | Rio Verde de Mato Grosso | 167        | 80,17     |
| Mato Grosso do Sul | 1954002      | Rochedo                  | Rochedo                  | 123,7      | 31,53     |
| Mato Grosso do Sul | 2153002      | Passagem Ribeirão Lontra | Santa Rita do Pardo      | 184,3      | 107,03    |
| Mato Grosso do Sul | 2051045      | Selvíria                 | Selvíria                 | 112,2      | 27,44     |
| Mato Grosso do Sul | 2054021      | Sidrolândia              | Sidrolândia              | 169,9      | 49,42     |
| Mato Grosso do Sul | 1754002      | Posto Correntes (MT-163) | Sonora                   | 205,6      | 77,67     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF                 | Cód. Estação | Nome Estação                  | Municípios          | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------------|--------------|-------------------------------|---------------------|------------|-----------|
| Mato Grosso do Sul | 2355003      | Tacuru                        | Tacuru              | 150        | 41,01     |
| Mato Grosso do Sul | 2054009      | Santa Elisa                   | Terenos             | 153        | 33,36     |
| Mato Grosso do Sul | 2152000      | Porto Velho                   | Três Lagoas         | 135,5      | 84,5      |
| Minas Gerais       | 1847003      | Abadia dos Dourados           | Abadia dos Dourados | 120        | 28,63     |
| Minas Gerais       | 1945038      | Porto das Andorinhas          | Abaeté              | 172,5      | 49,2      |
| Minas Gerais       | 2042010      | Abre Campo                    | Abre Campo          | 169,4      | 294,61    |
| Minas Gerais       | 2043009      | Acaiaaca – Jusante            | Acaiaaca            | 157,3      | 126,28    |
| Minas Gerais       | 1541010      | Itamarati                     | Águas Vermelhas     | 128,4      | 25,63     |
| Minas Gerais       | 1941010      | São Sebastião da Encruzilhada | Aimorés             | 260,9      | 580,63    |
| Minas Gerais       | 2144018      | Aiuruoca                      | Aiuruoca            | 152,6      | 49,56     |
| Minas Gerais       | 2244065      | Alagoa                        | Alagoa              | 751,9      | 18.233,23 |
| Minas Gerais       | 2145042      | Alfenas                       | Alfenas             | 127,8      | 26,47     |
| Minas Gerais       | 1640001      | Fazenda Cajueiro              | Almenara            | 125        | 25,78     |
| Minas Gerais       | 2144021      | Fazenda Laranjeiras           | Andrelândia         | 189,2      | 98,18     |
| Minas Gerais       | 2143005      | Campolide                     | Antônio Carlos      | 240        | 728,58    |
| Minas Gerais       | 1742020      | Fazenda Facão                 | Araçuaí             | 137,4      | 42,61     |
| Minas Gerais       | 1848010      | Araguari                      | Araguari            | 133,1      | 21,1      |
| Minas Gerais       | 2045010      | Arcos (Copasa)                | Arcos               | 146,4      | 25,93     |
| Minas Gerais       | 1546000      | Arinos – Montante             | Arinos              | 109,8      | 19,85     |
| Minas Gerais       | 2142000      | Astolfo Dutra                 | Astolfo Dutra       | 147        | 52,9      |
| Minas Gerais       | 1841008      | Ataléia                       | Ataléia             | 155,3      | 52,52     |
| Minas Gerais       | 2244054      | Usina Congonhal               | Baependi            | 162,1      | 145,14    |
| Minas Gerais       | 1943042      | Fazenda Caraibas              | Baldim              | 275        | 602,33    |
| Minas Gerais       | 2045001      | Bambuí                        | Bambuí              | 200        | 463,32    |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF           | Cód. Estação | Nome Estação                | Municípios          | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------|--------------|-----------------------------|---------------------|------------|-----------|
| Minas Gerais | 2143007      | Vargem do Engenho           | Barbacena           | 121        | 34,15     |
| Minas Gerais | 2043027      | Fazenda Ocidente            | Barra Longa         | 154        | 44,47     |
| Minas Gerais | 2143006      | Barroso                     | Barroso             | 138,6      | 78,01     |
| Minas Gerais | 2143021      | Sobragi                     | Belmiro Braga       | 170        | 174,54    |
| Minas Gerais | 1943022      | Caixa de Areia              | Belo Horizonte      | 217,5      | 101,18    |
| Minas Gerais | 1942030      | Belo Oriente                | Belo Oriente        | 193,2      | 61,23     |
| Minas Gerais | 1944055      | Betim – COPASA              | Betim               | 145        | 59,09     |
| Minas Gerais | 2244057      | Ponte do Costa              | Bocaina de Minas    | 175,8      | 163,46    |
| Minas Gerais | 1743002      | Vila Terra Branca – Jusante | Bocaiúva            | 168,3      | 122,82    |
| Minas Gerais | 1945004      | Estação Álvaro da Silveira  | Bom Despacho        | 130        | 55,84     |
| Minas Gerais | 2244064      | Pedreira (Pacau)            | Bom Jardim de Minas | 165,6      | 103,53    |
| Minas Gerais | 2144000      | Bom Sucesso                 | Bom Sucesso         | 144        | 94,44     |
| Minas Gerais | 2146028      | Cachoeira do Carmo          | Botelhos            | 141,8      | 44,68     |
| Minas Gerais | 2043026      | Brás Pires                  | Brás Pires          | 112        | 39,13     |
| Minas Gerais | 1644027      | Brasília de Minas – Jusante | Brasília de Minas   | 102        | 33,91     |
| Minas Gerais | 2245070      | Brasópolis                  | Brazópolis          | 123,1      | 53,09     |
| Minas Gerais | 2044008      | Melo Franco                 | Brumadinho          | 100        | 18,26     |
| Minas Gerais | 1744030      | Estação de Curimatai        | Buenópolis          | 261        | 320,2     |
| Minas Gerais | 1546001      | Buritis – Jusante           | Buritis             | 245        | 349,04    |
| Minas Gerais | 1645009      | Cachoeira da Manteiga       | Buritizeiro         | 168        | 64,32     |
| Minas Gerais | 1943010      | Caeté                       | Caeté               | 210,2      | 402,17    |
| Minas Gerais | 2041005      | Caiana                      | Caiana              | 148        | 172,61    |
| Minas Gerais | 2246057      | Camanducaia                 | Camanducaia         | 110,6      | 69,04     |
| Minas Gerais | 2145008      | Fazenda Jucá Casimiro       | Cambuquira          | 132        | 41,28     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF           | Cód. Estação | Nome Estação   | Municípios         | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------|--------------|--|--------------------|------------|-----------|
| Minas Gerais | 1841003      | Campanário   | Campanário         | 125,2      | 40        |
| Minas Gerais | 2145009      | Usina do Chicão  | Campanha           | 156,2      | 74,01     |
| Minas Gerais | 1949004      | Campina Verde  | Campina Verde      | 171,6      | 175,09    |
| Minas Gerais | 1948007      | Campo Florido  | Campo Florido      | 124,8      | 20,56     |
| Minas Gerais | 2145041      | Campos Gerais  | Campos Gerais      | 128        | 38,21     |
| Minas Gerais | 1849006      | Avantiguara  | Canápolis          | 110,2      | 30,53     |
| Minas Gerais | 2045020      | Candeias   | Candeias           | 132,8      | 24,07     |
| Minas Gerais | 1742014      | Capelinha  | Capelinha          | 136,6      | 80,22     |
| Minas Gerais | 2043018      | Carandaí   | Carandaí           | 125,1      | 45,88     |
| Minas Gerais | 2042000      | Carangola  | Carangola          | 205        | 1.573,01  |
| Minas Gerais | 1941011      | Santo Antônio do Manhuaçu                              | Caratinga          | 139,2      | 25,22     |
| Minas Gerais | 1742008      | Carbonita  | Carbonita          | 107,5      | 18,12     |
| Minas Gerais | 2245074      | UHE Marechal Maceió - Carenhas de Moraes - Rio Sapucaí | Careaçu            | 193        | 553,83    |
| Minas Gerais | 1741009      | Francisco Sá (EFBM)                                    | Carlos Chagas      | 210        | 379,82    |
| Minas Gerais | 2145044      | Carmo da Cachoeira                                     | Carmo da Cachoeira | 160        | 327,02    |
| Minas Gerais | 2044042      | Carmo da Mata (ETA - Copasa)                           | Carmo da Mata      | 156,5      | 52,43     |
| Minas Gerais | 2044003      | Carmo do Cajuru  | Carmo do Cajuru    | 153,8      | 175,48    |
| Minas Gerais | 1946022      | Carmo do Paranaíba                                     | Carmo do Paranaíba | 156,1      | 132,76    |
| Minas Gerais | 2144038      | Carrancas  | Carrancas          | 164,4      | 92,75     |
| Minas Gerais | 2144025      | Carvalhos  | Carvalhos          | 178        | 45,35     |
| Minas Gerais | 1847007      | Cascalho Rico  | Cascalho Rico      | 168,2      | 56,03     |
| Minas Gerais | 2142001      | Cataguases   | Cataguases         | 183,4      | 135,61    |
| Minas Gerais | 2144003      | Caxambu  | Caxambu            | 163,2      | 132,16    |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF           | Cód. Estação | Nome Estação                    | Municípios               | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------|--------------|---------------------------------|--------------------------|------------|-----------|
| Minas Gerais | 1841018      | Central de Minas                | Central de Minas         | 147        | 170,52    |
| Minas Gerais | 1746018      | Fazenda Limoeiro                | Claro dos Poções         | 110        | 33,83     |
| Minas Gerais | 1949005      | Comendador Gomes                | Comendador Gomes         | 178,3      | 118,46    |
| Minas Gerais | 1943002      | Conceição do Mato Dentro        | Conceição do Mato Dentro | 150,3      | 77,43     |
| Minas Gerais | 2145001      | Conceição do Rio Verde          | Conceição do Rio Verde   | 154,1      | 113,25    |
| Minas Gerais | 2245066      | Conceição dos Ouros             | Conceição dos Ouros      | 133,2      | 70,17     |
| Minas Gerais | 2043013      | Congonhas – Linígrado           | Congonhas                | 217,6      | 1.145,65  |
| Minas Gerais | 1947002      | Conquista                       | Conquista                | 145        | 29,68     |
| Minas Gerais | 1941005      | Barra do Cuieté – Jusante       | Conselheiro Pena         | 149,4      | 65,07     |
| Minas Gerais | 2245084      | Bairro do Analdino              | Consolação               | 137,8      | 68,17     |
| Minas Gerais | 2145032      | Coqueiral                       | Coqueiral                | 159,8      | 58,18     |
| Minas Gerais | 1844017      | Corinto                         | Corinto                  | 144,8      | 65,96     |
| Minas Gerais | 1842005      | Coroaci                         | Coroaci                  | 150,3      | 36,45     |
| Minas Gerais | 1846006      | Pantano                         | Coromandel               | 167,7      | 77,89     |
| Minas Gerais | 1942029      | Mário de Carvalho               | Coronel Fabriciano       | 200,2      | 67,45     |
| Minas Gerais | 1642002      | Coronel Murta                   | Coronel Murta            | 132,5      | 70,57     |
| Minas Gerais | 1942031      | Cachoeira dos Óculos - Montante | Córrego Novo             | 160        | 34,43     |
| Minas Gerais | 2245065      | Cristina – Montante             | Cristina                 | 152,4      | 67,6      |
| Minas Gerais | 2144037      | Cruzília                        | Cruzília                 | 130,2      | 71,36     |
| Minas Gerais | 2245087      | Bairro Santa Cruz               | Delfim Moreira           | 154        | 78,57     |
| Minas Gerais | 2046009      | Delfinópolis                    | Delfinópolis             | 110        | 29,8      |
| Minas Gerais | 2143003      | Desterro do Melo                | Desterro do Melo         | 203        | 201,34    |
| Minas Gerais | 1843003      | Mendanha – Montante             | Diamantina               | 173        | 107,64    |
| Minas Gerais | 1841019      | Divino das Laranjeiras          | Divino das Laranjeiras   | 119,2      | 16,49     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF           | Cód. Estação | Nome Estação                    | Municípios           | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------|--------------|---------------------------------|----------------------|------------|-----------|
| Minas Gerais | 2044006      | Divinópolis                     | Divinópolis          | 149,3      | 108,63    |
| Minas Gerais | 1646000      | Porto dos Poções                | Dom Bosco            | 115,4      | 37,73     |
| Minas Gerais | 1942008      | Dom Cavati                      | Dom Cavati           | 233,8      | 384,94    |
| Minas Gerais | 1945019      | Dores do Indaiá<br>(CVSF)       | Dores do Indaiá      | 129,1      | 28,94     |
| Minas Gerais | 2044007      | Entre Rios de Minas             | Entre Rios de Minas  | 249        | 2.741,85  |
| Minas Gerais | 1847001      | Estrela do Sul                  | Estrela do Sul       | 170        | 206,1     |
| Minas Gerais | 1943003      | Ferros                          | Ferros               | 501        | 9018      |
| Minas Gerais | 1944007      | Fazenda Escola Florestal        | Florestal            | 153,2      | 105,11    |
| Minas Gerais | 2045021      | Formiga                         | Formiga              | 149,6      | 55,95     |
| Minas Gerais | 1944059      | Fortuna de Minas                | Fortuna de Minas     | 127,6      | 45,03     |
| Minas Gerais | 1948001      | UHE Porto Comlômbio Rio Uberaba | Furnas               | 105,3      | 18,18     |
| Minas Gerais | 1842007      | Guanhães                        | Guanhães             | 134,2      | 34,55     |
| Minas Gerais | 1843002      | Gouveia                         | Gouveia              | 148,2      | 90,12     |
| Minas Gerais | 1841020      | Governador Valadares            | Governador Valadares | 139,3      | 32,8      |
| Minas Gerais | 1642014      | Fazenda Jambeiro – Grão Mogol   | Grão Mogol           | 135        | 30,73     |
| Minas Gerais | 2043025      | Usina da Brecha                 | Guaraciaba           | 149,2      | 77,04     |
| Minas Gerais | 2143001      | Guarani                         | Guarani              | 156,6      | 191,63    |
| Minas Gerais | 1747005      | Guarda-Mor                      | Guarda-Mor           | 137,3      | 48,77     |
| Minas Gerais | 2146026      | Guaxupé                         | Guaxupé              | 170,5      | 144,15    |
| Minas Gerais | 1846004      | Guimarânia                      | Guimarânia           | 140        | 36,71     |
| Minas Gerais | 1949003      | Gurinhatã                       | Gurinhatã            | 130,3      | 42,54     |
| Minas Gerais | 2143008      | Ibertioga                       | Ibertioga            | 130,5      | 45,12     |
| Minas Gerais | 1946004      | Ibiá                            | Ibiá                 | 182        | 141,32    |
| Minas Gerais | 2044012      | Ibirité                         | Ibirité              | 206,1      | 185,2     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF           | Cód. Estação | Nome Estação            | Municípios         | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------|--------------|-------------------------|--------------------|------------|-----------|
| Minas Gerais | 2144023      | Ibituruna               | Ibituruna          | 183        | 135,51    |
| Minas Gerais | 2045002      | Iguatama                | Iguatama           | 142        | 83,81     |
| Minas Gerais | 2045026      | Ilcinea                 | Ilcinea            | 135,4      | 40,38     |
| Minas Gerais | 1941000      | Ipanema                 | Ipanema            | 216,4      | 381,21    |
| Minas Gerais | 1849002      | Ipiaçu                  | Ipiaçu             | 147,2      | 27,63     |
| Minas Gerais | 1847010      | Iraí de Minas           | Iraí de Minas      | 110        | 33,29     |
| Minas Gerais | 2043060      | Itabirito Linígrafo     | Itabirito          | 114,1      | 30,93     |
| Minas Gerais | 1544018      | Fazenda Canadá          | Itacarambi         | 110,4      | 16,16     |
| Minas Gerais | 2245083      | São João de Itajubá     | Itajubá            | 118        | 45,48     |
| Minas Gerais | 2142006      | Usina Maurício          | Itamarati de Minas | 158,3      | 41,66     |
| Minas Gerais | 2147054      | Fazenda Carvalhas       | Itamogi            | 121,2      | 36        |
| Minas Gerais | 2244068      | Itanhandu               | Itanhandu          | 129,3      | 45,23     |
| Minas Gerais | 1941018      | Itanhomi                | Itanhomi           | 178,2      | 78,75     |
| Minas Gerais | 1641001      | Itaobim                 | Itaobim            | 126,2      | 62,53     |
| Minas Gerais | 1949007      | Itapagipe (Lageado)     | Itapagipe          | 116,1      | 34,97     |
| Minas Gerais | 2045005      | Lamounier               | Itapecerica        | 170        | 79,83     |
| Minas Gerais | 2044016      | Fazenda Benedito Chaves | Itatiaiuçu         | 115        | 31,49     |
| Minas Gerais | 2044026      | Fazenda Coqueiros       | Itaúna             | 192,5      | 230,99    |
| Minas Gerais | 1641010      | Itinga                  | Itinga             | 110        | 33,63     |
| Minas Gerais | 1949006      | Ponte do Prata          | Ituiutaba          | 150,2      | 54,01     |
| Minas Gerais | 2144005      | Itumirim                | Itumirim           | 191        | 416,22    |
| Minas Gerais | 1950000      | Iturama                 | Iturama            | 119        | 29,7      |
| Minas Gerais | 1943004      | Jaboticatubas           | Jaboticatubas      | 152,1      | 128,64    |
| Minas Gerais | 1640000      | Jacinto                 | Jacinto            | 175        | 148,72    |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF           | Cód. Estação | Nome Estação            | Municípios             | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------|--------------|-------------------------|------------------------|------------|-----------|
| Minas Gerais | 1543002      | Colônia do Jaíba        | Jaíba                  | 246        | 2.338,35  |
| Minas Gerais | 1543013      | Janaúba                 | Janaúba                | 154        | 127,33    |
| Minas Gerais | 1544017      | Pedras de Maria da Cruz | Januária               | 110,4      | 16,96     |
| Minas Gerais | 1944024      | Fazenda Vargem Bonita   | Jequitibá              | 200        | 320,84    |
| Minas Gerais | 1641002      | Jequitinhonha           | Jequitinhonha          | 135,1      | 42,58     |
| Minas Gerais | 1746001      | Porto da Extrema        | João Pinheiro          | 151,5      | 63,8      |
| Minas Gerais | 1944004      | Ponte Nova do Parapeba  | Juatuba                | 159,4      | 166,97    |
| Minas Gerais | 2143020      | Chapéu D'Uvas           | Juiz de Fora           | 138,2      | 48,08     |
| Minas Gerais | 1741006      | Ladainha (EFBM)         | Ladainha               | 119,8      | 29,15     |
| Minas Gerais | 1846023      | Lagamar                 | Lagamar                | 184,8      | 97,28     |
| Minas Gerais | 2045011      | Lagoa da Prata          | Lagoa da Prata         | 148,3      | 31,14     |
| Minas Gerais | 1943049      | Ponte Raul Soares       | Lagoa Santa            | 158,9      | 211,68    |
| Minas Gerais | 1744010      | Lassance                | Lassance               | 152,3      | 153,42    |
| Minas Gerais | 2145007      | Usina Couro do Cervo    | Lavras                 | 158        | 112,09    |
| Minas Gerais | 2143011      | Conceição do Ibitipoca  | Lima Duarte            | 155,1      | 78,47     |
| Minas Gerais | 2144006      | Luminárias              | Luminárias             | 146,4      | 92,11     |
| Minas Gerais | 2144007      | Madre de Deus de Minas  | Madre de Deus de Minas | 145,1      | 41,51     |
| Minas Gerais | 1742017      | Malacacheta             | Malacacheta            | 151        | 176,47    |
| Minas Gerais | 1444003      | Miravânia               | Manga                  | 141,2      | 61,15     |
| Minas Gerais | 2041008      | Dores do Manhumirim     | Manhuaçu               | 125        | 40,98     |
| Minas Gerais | 1841006      | Vargem Grande           | Mantena                | 123,2      | 71,89     |
| Minas Gerais | 2143013      | Estevão Pinto           | Mar de Espanha         | 125,4      | 36,31     |
| Minas Gerais | 2245088      | Maria da Fé             | Maria da Fé            | 121,8      | 37,91     |
| Minas Gerais | 2043011      | Fazenda Paraíso         | Mariana                | 162,4      | 81,07     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF           | Cód. Estação | Nome Estação               | Municípios            | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------|--------------|----------------------------|-----------------------|------------|-----------|
| Minas Gerais | 1945039      | Martinho Campos            | Martinho Campos       | 115        | 23,2      |
| Minas Gerais | 1944062      | Fazenda Santa Rita         | Mateus Leme           | 164,5      | 27,93     |
| Minas Gerais | 1841001      | Vila Matias – Montante     | Mathias Lobato        | 166,6      | 101,34    |
| Minas Gerais | 2042017      | Matipó                     | Matipó                | 137,4      | 59,97     |
| Minas Gerais | 1641011      | Medina                     | Medina                | 130        | 26,82     |
| Minas Gerais | 2142009      | Jussara                    | Miradouro             | 132,3      | 36,08     |
| Minas Gerais | 2145017      | Monsenhor Paulo            | Monsenhor Paulo       | 153,4      | 104,91    |
| Minas Gerais | 1444004      | Juvenília                  | Montalvânia           | 176,8      | 125,22    |
| Minas Gerais | 1848009      | Xapetuba                   | Monte Alegre de Minas | 146,2      | 61,16     |
| Minas Gerais | 2146027      | Juréia                     | Monte Belo            | 180,9      | 204,03    |
| Minas Gerais | 1847000      | Monte Carmelo              | Monte Carmelo         | 153,8      | 44,61     |
| Minas Gerais | 1644028      | São João da Vereda         | Montes Claros         | 186,6      | 354,78    |
| Minas Gerais | 1844019      | Morro da Garça             | Morro da Garça        | 132,1      | 21,44     |
| Minas Gerais | 1943025      | Morro do Pilar             | Morro do Pilar        | 257,4      | 608,8     |
| Minas Gerais | 2142004      | Fazenda Umbaúbas           | Muriaé                | 131,4      | 46,35     |
| Minas Gerais | 1941019      | Mutum                      | Mutum                 | 124,4      | 15,84     |
| Minas Gerais | 2146030      | Muzambinho                 | Muzambinho            | 187,8      | 222,59    |
| Minas Gerais | 1740001      | Nanuque – Montante         | Nanuque               | 156,2      | 93,09     |
| Minas Gerais | 1942032      | Naque Velho                | Naque                 | 161,5      | 25,56     |
| Minas Gerais | 2043004      | Rio do Peixe (MMV)         | Nova Lima             | 249,8      | 504,5     |
| Minas Gerais | 2044027      | Ponte Fernão Dias          | Oliveira              | 133,8      | 36,96     |
| Minas Gerais | 1944011      | Jaguaruna – Jusante        | Onça de Pitangui      | 122,3      | 36,01     |
| Minas Gerais | 2043056      | Fazenda Água Limpa Jusante | Ouro Preto            | 105,5      | 27,86     |
| Minas Gerais | 1741013      | Padre Paraíso              | Padre Paraíso         | 100,5      | 19,89     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF           | Cód. Estação | Nome Estação                   | Municípios           | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------|--------------|--------------------------------|----------------------|------------|-----------|
| Minas Gerais | 1944049      | Papagaios                      | Papagaios            | 176        | 45,81     |
| Minas Gerais | 1746017      | Fazenda Poções                 | Paracatu             | 201        | 104,41    |
| Minas Gerais | 1944010      | Horto Florestal                | Paraopeba            | 178        | 118,66    |
| Minas Gerais | 2044009      | Fazenda Campo Grande           | Passa Tempo          | 131        | 60,02     |
| Minas Gerais | 2244036      | Zelinda                        | Passa Vinte          | 187,2      | 104,75    |
| Minas Gerais | 1846007      | Santana de Patos               | Patos de Minas       | 164        | 76,96     |
| Minas Gerais | 1946005      | Salitre                        | Patrocínio           | 161,2      | 105,28    |
| Minas Gerais | 2142002      | Patrocínio do Muriaé           | Patrocínio do Muriaé | 200,8      | 455,7     |
| Minas Gerais | 1944009      | Pedro Leopoldo                 | Pedro Leopoldo       | 165        | 160,85    |
| Minas Gerais | 1947007      | Perdizes                       | Perdizes             | 130,8      | 44,11     |
| Minas Gerais | 2143022      | Piau                           | Piau                 | 150        | 160,26    |
| Minas Gerais | 2043010      | Piranga                        | Piranga              | 133,2      | 37,37     |
| Minas Gerais | 2142007      | Fazenda da Barra (Pirapetinga) | Pirapetinga          | 146        | 60,22     |
| Minas Gerais | 1944021      | Velho Taipa                    | Pitangui             | 157        | 127,37    |
| Minas Gerais | 2045012      | Piumhi                         | Piumhi               | 140        | 49,6      |
| Minas Gerais | 2146029      | Cachoeira Poço Fundo           | Poço Fundo           | 162        | 109,91    |
| Minas Gerais | 1941006      | Assarai – Montante             | Pocrane              | 145        | 105,55    |
| Minas Gerais | 2042018      | Ponte Nova Jusante             | Ponte Nova           | 127,9      | 32,15     |
| Minas Gerais | 1542016      | Serra Branca                   | Porteirinha          | 100        | 14,02     |
| Minas Gerais | 2043014      | Porto Firme                    | Porto Firme          | 145        | 58,37     |
| Minas Gerais | 2245077      | Pouso Alegre                   | Pouso Alegre         | 251        | 3.563,74  |
| Minas Gerais | 2244071      | Pouso Alto                     | Pouso Alto           | 139,2      | 55,25     |
| Minas Gerais | 1949002      | Fazenda Buriti do Prata        | Prata                | 130        | 39,41     |
| Minas Gerais | 2046011      | Usina Santana                  | Pratápolis           | 129,5      | 58,19     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF           | Cód. Estação | Nome Estação                   | Municípios              | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------|--------------|--------------------------------|-------------------------|------------|-----------|
| Minas Gerais | 1946010      | Pratinha                       | Pratinha                | 174        | 95,4      |
| Minas Gerais | 1844009      | Presidente Juscelino – Jusante | Presidente Juscelino    | 129,7      | 118,13    |
| Minas Gerais | 1846016      | Ponte Firme                    | Presidente Olegário     | 220,9      | 400,09    |
| Minas Gerais | 1942006      | Vermelho Velho                 | Raul Soares             | 190,8      | 119,01    |
| Minas Gerais | 2044038      | Resende Costa                  | Resende Costa           | 122,6      | 15,47     |
| Minas Gerais | 1941004      | Resplendor – Jusante           | Resplendor              | 134,5      | 56,07     |
| Minas Gerais | 2042011      | Rio Casca                      | Rio Casca               | 148,2      | 66,78     |
| Minas Gerais | 2143018      | Rio Novo                       | Rio Novo                | 128        | 63,46     |
| Minas Gerais | 1542015      | Rio Pardo de Minas             | Rio Pardo de Minas      | 125,5      | 40,03     |
| Minas Gerais | 1943001      | Rio Piracicaba                 | Rio Piracicaba          | 145        | 55,77     |
| Minas Gerais | 2143000      | Usina Ituerê                   | Rio Pomba               | 179,2      | 815,01    |
| Minas Gerais | 2243202      | Fazenda São Gabriel            | Rio Preto               | 143,6      | 37,82     |
| Minas Gerais | 1843012      | Rio Vermelho                   | Rio Vermelho            | 111        | 25,82     |
| Minas Gerais | 1642008      | Rubelita                       | Rubelita                | 120,9      | 42,69     |
| Minas Gerais | 1943006      | Sabará                         | Sabará                  | 158,2      | 119,86    |
| Minas Gerais | 2047037      | Desemboque                     | Sacramento              | 150        | 92,51     |
| Minas Gerais | 2043059      | Colégio Caraça                 | Santa Bárbara           | 195        | 44,91     |
| Minas Gerais | 1641024      | Água Boa                       | Santa Cruz de Salinas   | 119,3      | 24,23     |
| Minas Gerais | 1645007      | Porto Alegre                   | Santa Fé de Minas       | 140,8      | 41,06     |
| Minas Gerais | 1947001      | Santa Juliana                  | Santa Juliana           | 143,8      | 53,03     |
| Minas Gerais | 1943008      | Santa Maria do Itabira         | Santa Maria do Itabira  | 180,4      | 362,41    |
| Minas Gerais | 1842008      | Santa Maria do Suaçuí          | Santa Maria do Suaçuí   | 268,2      | 985,29    |
| Minas Gerais | 2244035      | Santa Rita do Jacutinga        | Santa Rita do Jacutinga | 157,4      | 176,63    |
| Minas Gerais | 1950011      | Ponte São Domingos             | Santa Vitória           | 137,5      | 38,78     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF           | Cód. Estação | Nome Estação             | Municípios               | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------|--------------|--------------------------|--------------------------|------------|-----------|
| Minas Gerais | 1944020      | Pirapama                 | Santana de Pirapama      | 144,5      | 122,58    |
| Minas Gerais | 2045004      | Santana do Jacaré        | Santana do Jacaré        | 121,3      | 41,27     |
| Minas Gerais | 1943035      | Vau da Lagoa             | Santana do Riacho        | 142,6      | 65,69     |
| Minas Gerais | 2044037      | Santo Antônio do Amparo  | Santo Antônio do Amparo  | 191,4      | 419,77    |
| Minas Gerais | 2045013      | Santo Antônio do Monte   | Santo Antônio do Monte   | 123        | 18,12     |
| Minas Gerais | 1844001      | Santo Hipólito           | Santo Hipólito           | 167,4      | 455,15    |
| Minas Gerais | 1645005      | Vila Urucuia             | São Francisco            | 180,5      | 234,54    |
| Minas Gerais | 1949000      | São Francisco de Sales   | São Francisco de Sales   | 146        | 89,73     |
| Minas Gerais | 2042014      | Bicuiba                  | São Francisco do Glória  | 135        | 44,4      |
| Minas Gerais | 1845013      | São Gonçalo do Abaeté    | São Gonçalo do Abaeté    | 334,8      | 657,67    |
| Minas Gerais | 1943027      | Usina Peti               | S. Gonçalo do Rio Abaixo | 140        | 30,31     |
| Minas Gerais | 1946009      | São Gotardo              | São Gotardo              | 136,3      | 51,18     |
| Minas Gerais | 1544019      | São João da Ponte        | São João da Ponte        | 137,6      | 80,97     |
| Minas Gerais | 2144024      | Vila Rio das Mortes      | São João Del Rei         | 145,1      | 57,77     |
| Minas Gerais | 1541013      | Vereda do Paraíso        | São João do Paraíso      | 129        | 24,33     |
| Minas Gerais | 1842020      | São João Evangelista     | São João Evangelista     | 132        | 60,44     |
| Minas Gerais | 2042031      | Fazenda Cachoeira DAntas | São José do Goiabal      | 146,4      | 17,71     |
| Minas Gerais | 2042016      | São Miguel do Anta       | São Miguel do Anta       | 118,6      | 32,38     |
| Minas Gerais | 1842004      | São Pedro do Suaçuí      | São Pedro do Suaçuí      | 144        | 45,35     |
| Minas Gerais | 1645000      | São Romão                | São Romão                | 140,6      | 55,36     |
| Minas Gerais | 2046025      | Fazenda Samburá          | São Roque de Minas       | 180        | 127,37    |
| Minas Gerais | 2044050      | São Tiago                | São Tiago                | 139,2      | 26,63     |
| Minas Gerais | 1945002      | Barra do Funchal         | Serra da Saudade         | 130,4      | 78,2      |
| Minas Gerais | 1946008      | Serra do Salitre         | Serra do Salitre         | 140        | 31,81     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF           | Cód. Estação | Nome Estação               | Municípios         | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------|--------------|----------------------------|--------------------|------------|-----------|
| Minas Gerais | 1843011      | Serro                      | Serro              | 116        | 27,87     |
| Minas Gerais | 2245085      | Vargem do Cervo            | Silvianópolis      | 159,2      | 82,42     |
| Minas Gerais | 2143017      | Tabuleiro                  | Tabuleiro          | 189,1      | 98,52     |
| Minas Gerais | 1946011      | Tapira                     | Tapira             | 99,9       | 23,54     |
| Minas Gerais | 1946000      | Tapiraí – Jusante          | Tapiraí            | 144        | 140,32    |
| Minas Gerais | 1943023      | Taquaraçu                  | Taquaraçu de Minas | 147,2      | 59,44     |
| Minas Gerais | 1741001      | Muruci                     | Teófilo Otoni      | 201        | 156,75    |
| Minas Gerais | 2144009      | Porto de Elvas             | Tiradentes         | 189,2      | 288,42    |
| Minas Gerais | 1845014      | Tiros                      | Tiros              | 145        | 80,49     |
| Minas Gerais | 2145003      | Três Corações              | Três Corações      | 162,5      | 90,66     |
| Minas Gerais | 1845027      | Barra do Rio de Janeiro    | Três Marias        | 212        | 91,3      |
| Minas Gerais | 2145043      | Três Pontas                | Três Pontas        | 112,4      | 38,56     |
| Minas Gerais | 1841011      | Tumiritinga                | Tumiritinga        | 178,7      | 117,55    |
| Minas Gerais | 1848006      | Tupaciguara                | Tupaciguara        | 166        | 42,8      |
| Minas Gerais | 1948006      | Fazenda Letreiro           | Uberlândia         | 125        | 21,65     |
| Minas Gerais | 1740026      | São Pedro do Pampá         | Umburatiba         | 181        | 117,96    |
| Minas Gerais | 1646003      | Santo Antônio do Boqueirão | Unaí               | 221,4      | 596,92    |
| Minas Gerais | 2046013      | Vargem Bonita              | Vargem Bonita      | 149        | 54,65     |
| Minas Gerais | 1744009      | Várzea da Palma            | Várzea da Palma    | 194        | 333,81    |
| Minas Gerais | 1544030      | Varzelândia                | Varzelândia        | 139,7      | 43,69     |
| Minas Gerais | 1846015      | Vazante                    | Vazante            | 146,3      | 49,48     |
| Minas Gerais | 1948003      | Veríssimo                  | Veríssimo          | 116,3      | 20,71     |
| Minas Gerais | 1943009      | Vespasiano                 | Vespasiano         | 210,8      | 1.343,89  |
| Minas Gerais | 1642013      | Pega                       | Virgem da Lapa     | 196        | 1.273,48  |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF           | Cód. Estação | Nome Estação          | Municípios      | Chuva máx. | TR Gumbel |
|--------------|--------------|-----------------------|-----------------|------------|-----------|
| Minas Gerais | 2245080      | Virgínia              | Virgínia        | 175,6      | 85,37     |
| Minas Gerais | 2142008      | Volta Grande          | Volta Grande    | 167        | 117,66    |
| Pará         | 148010       | Abaetetuba            | Abaetetuba      | 180,8      | 42,03     |
| Pará         | 248001       | Fazenda Urucuri       | Acará           | 163,8      | 44,56     |
| Pará         | 154003       | Alenquer              | Alenquer        | 147,8      | 26,03     |
| Pará         | 152005       | Almeirim              | Almeirim        | 147,4      | 27,47     |
| Pará         | 554000       | Cajueiro              | Altamira        | 187        | 98,88     |
| Pará         | 146010       | Emborai               | Augusto Corrêa  | 136,8      | 13,92     |
| Pará         | 247003       | Fazenda Jauará        | Aurora do Pará  | 171,2      | 34,76     |
| Pará         | 250001       | Vila São Benedito     | Bagre           | 169,8      | 95,44     |
| Pará         | 249003       | Baião                 | Baião           | 226,4      | 104,74    |
| Pará         | 148011       | Vila do Conde         | Barcarena       | 137,3      | 18,47     |
| Pará         | 148012       | Mosqueiro             | Belém           | 224,5      | 63,75     |
| Pará         | 150003       | Antônio Lemos         | Breves          | 147        | 58,04     |
| Pará         | 147002       | Capanema              | Capanema        | 170        | 82,5      |
| Pará         | 147007       | Castanhal             | Castanhal       | 228,6      | 68,07     |
| Pará         | 47003        | Curuçá                | Curuçá          | 180,1      | 22,26     |
| Pará         | 447001       | KM Zero / PA-70       | Dom Eliseu      | 207,8      | 111,31    |
| Pará         | 157002       | Português             | Faro            | 183,1      | 120,9     |
| Pará         | 151003       | Carrazedo             | Garupá          | 98,7       | 7,9       |
| Pará         | 147010       | Igarapé- Açu          | Igarapé- Açu    | 197,3      | 60,81     |
| Pará         | 247004       | Fazenda São Raimundo  | Ipixuna do Pará | 147,9      | 19,53     |
| Pará         | 147011       | Colônia Santo Antônio | Irituia         | 216,1      | 227,29    |
| Pará         | 455003       | Km 1385 BR-163        | Itaituba        | 195,2      | 90,64     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF   | Cód. Estação | Nome Estação         | Municípios            | Chuva máx. | TR Gumbel |
|------|--------------|----------------------|-----------------------|------------|-----------|
| Pará | 356002       | Guariba              | Juruti                | 173,3      | 23,83     |
| Pará | 650001       | Fazenda Caiçara      | Marabá                | 194,5      | 43,07     |
| Pará | 47005        | Maruda               | Marapanim             | 135,5      | 26,03     |
| Pará | 151002       | Areias               | Melgaço               | 120,4      | 29,56     |
| Pará | 249002       | Vila Elim            | Moju                  | 184,4      | 151,8     |
| Pará | 154000       | Arapari              | Monte Alegre          | 150        | 33,06     |
| Pará | 149003       | Oeiras do Pará       | Oeiras do Pará        | 164,8      | 39,13     |
| Pará | 155000       | Oriximiná            | Oriximiná             | 181,6      | 54,31     |
| Pará | 147016       | Ourém                | Ourém                 | 126,2      | 22,85     |
| Pará | 347001       | Gurupizinho          | Paragominas           | 204,5      | 182,59    |
| Pará | 250002       | Irapuru              | Portel                | 174,8      | 64,62     |
| Pará | 252001       | Itapeua do Pará      | Porto de Moz          | 150        | 56,75     |
| Pará | 153000       | Prainha              | Prainha               | 250        | 96,52     |
| Pará | 47004        | Primavera            | Primavera             | 144,2      | 16,25     |
| Pará | 850000       | Redenção             | Redenção              | 177        | 84,75     |
| Pará | 455002       | Cupari               | Rurópolis             | 139        | 25,57     |
| Pará | 47002        | Salinópolis          | Salinópolis           | 232,7      | 72,13     |
| Pará | 148003       | Santa Isabel do Pará | Santa Isabel do Pará  | 410        | 1.015,76  |
| Pará | 147018       | Santa Maria do Pará  | Santa Maria do Pará   | 107,3      | 14,57     |
| Pará | 950001       | Barreira do Campo    | Santana do Araguaia   | 155,3      | 120,22    |
| Pará | 354000       | Sítio São Pedro      | Santarém              | 217,6      | 87,26     |
| Pará | 247000       | Badajós              | São Domingos do Capim | 176,9      | 79,61     |
| Pará | 651001       | Boa Esperança        | São Félix do Xingú    | 326,7      | 750,58    |
| Pará | 47006        | São João de Pirabas  | São João de Pirabas   | 186        | 11,71     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF      | Cód. Estação | Nome Estação                       | Municípios               | Chuva máx. | TR Gumbel |
|---------|--------------|------------------------------------|--------------------------|------------|-----------|
| Pará    | 649001       | Fazenda Santa Elisa                | Sapucaia                 | 163        | 92,86     |
| Pará    | 351002       | Fazenda Cipaúba                    | Senador José Porfírio    | 129,4      | 20,34     |
| Pará    | 147017       | Terra Alta                         | Terra Alta               | 130        | 18,17     |
| Pará    | 248003       | Tomé – Açu                         | Tomé – Açu               | 135,7      | 28,62     |
| Pará    | 349000       | Tucuruí                            | Tucuruí                  | 178,1      | 23,16     |
| Pará    | 48006        | Vigia                              | Vigia                    | 140,3      | 12,18     |
| Pará    | 146009       | Viseu                              | Viseu                    | 148,9      | 16,6      |
| Pará    | 749002       | Xinguara                           | Xinguara                 | 200,2      | 54,18     |
| Paraíba | 735009       | Mulungu                            | Mulungu                  | 183,6      | 1.157,60  |
| Paraíba | 737006       | Piancó                             | Piancó                   | 173        | 175,16    |
| Paraíba | 735036       | Ponte da Batalha                   | Santa Teresinha          | 155,8      | 35,26     |
| Paraíba | 735124       | Bodocongó                          | Boqueirão                | 144        | 96,71     |
| Paraíba | 638032       | Antenor Navarro                    | São João do Rio do Peixe | 125        | 22,22     |
| Paraná  | 2449000      | Capela da Ribeira                  | Adrianópolis             | 128,5      | 52,74     |
| Paraná  | 2548003      | Colônia do Cachoeira               | Antonina                 | 166,8      | 43,95     |
| Paraná  | 2549081      | Barragem Sanepar – Passaúna        | Araucária                | 111,5      | 14,71     |
| Paraná  | 2652009      | Ponte do Vitorino                  | Bom Sucesso do Sul       | 150,4      | 40,35     |
| Paraná  | 2548001      | Praia Grande                       | Campina Grande do Sul    | 166,4      | 391,87    |
| Paraná  | 2552041      | Cantagalo                          | Cantagalo                | 201        | 73,31     |
| Paraná  | 2449020      | Costas                             | Cerro Azul               | 125        | 78,12     |
| Paraná  | 2552030      | UHE Salto Santiago Chopinzinho Plu | Chopinzinho              | 189,2      | 30,42     |
| Paraná  | 2652015      | Salto Claudelino                   | Clevelândia              | 160        | 19,3      |
| Paraná  | 2449007      | Turvo                              | Doutor Ulysses           | 120,6      | 30,79     |
| Paraná  | 2554002      | Salto Cataratas                    | Foz do Iguaçu            | 164,2      | 17,31     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF         | Cód. Estação | Nome Estação                       | Municípios                   | Chuva máx. | TR Gumbel |
|------------|--------------|------------------------------------|------------------------------|------------|-----------|
| Paraná     | 2551000      | Guarapuava                         | Guarapuava                   | 184        | 57,65     |
| Paraná     | 2551001      | Leonópolis                         | Inácio Martins               | 180        | 78,35     |
| Paraná     | 2450054      | Cerro Azul                         | Ipiranga                     | 136        | 114,83    |
| Paraná     | 2550005      | Rio Claro do Sul<br>(EFUrosina)    | Mallet                       | 143        | 64,8      |
| Paraná     | 2548000      | Morretes                           | Morretes                     | 162        | 129,9     |
| Paraná     | 2551024      | Pinhão                             | Pinhão                       | 259,7      | 89,81     |
| Paraná     | 2549004      | Piraquara                          | Piraquara                    | 127,5      | 34,8      |
| Paraná     | 2651004      | Porto Vitória (Rio<br>Espingarda)  | Porto Vitória                | 224        | 81,74     |
| Paraná     | 2552000      | Quedas do Iguaçu                   | Quedas do Iguaçu             | 188,1      | 40,09     |
| Paraná     | 2549061      | Quitandinha                        | Quitandinha                  | 116,8      | 14,62     |
| Paraná     | 2449063      | Balsa do Jacaré                    | Rio Branco do Sul            | 141,5      | 10,32     |
| Paraná     | 2653009      | Santo Antônio do<br>Sudoeste       | Santo Antônio do<br>Sudoeste | 162        | 28,65     |
| Paraná     | 2549017      | Fazendinha                         | São José dos Pinhais         | 115        | 37,43     |
| Paraná     | 2651000      | União da Vitória                   | União da Vitória             | 156,2      | 20,73     |
| Pernambuco | 737023       | Afogados da In-<br>gazeira (DNOCS) | Afogados da In-<br>gazeira   | 148,6      | 135,36    |
| Pernambuco | 937031       | Águas Belas                        | Águas Belas                  | 144        | 198,72    |
| Pernambuco | 838004       | Belém de São Fran-<br>cisco        | Belém de São Fran-<br>cisco  | 156,6      | 102,7     |
| Pernambuco | 835135       | Cumaru                             | Cumaru                       | 92,8       | 13,15     |
| Pernambuco | 737027       | Flores                             | Flores                       | 137,8      | 107,25    |
| Pernambuco | 838021       | Floresta                           | Floresta                     | 175        | 102,1     |
| Pernambuco | 835140       | Engenho Mato<br>Grosso             | Gameleira                    | 202,3      | 39,7      |
| Pernambuco | 837038       | Inajá                              | Inajá                        | 122        | 36,75     |
| Pernambuco | 736040       | Jataúba                            | Jataúba                      | 99         | 15,25     |
| Pernambuco | 838002       | Açude Serrinha                     | Mirandiba                    | 143        | 78,97     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF         | Cód. Estação | Nome Estação           | Municípios               | Chuva máx. | TR Gumbel |
|------------|--------------|------------------------|--------------------------|------------|-----------|
| Pernambuco | 839034       | Fazenda Tapera         | Orocó                    | 144,2      | 53,15     |
| Pernambuco | 835141       | Palmares               | Palmares                 | 143,2      | 59,26     |
| Pernambuco | 839009       | Jacaré                 | Parnamirim               | 139,4      | 80,78     |
| Pernambuco | 735067       | Salgadinho             | Salgadinho               | 100        | 21,41     |
| Pernambuco | 840015       | Lagoa Grande           | Santa Maria da Boa Vista | 143,3      | 44,7      |
| Pernambuco | 735050       | Engenho Sítio          | São Lourenço da Mata     | 208        | 113,22    |
| Pernambuco | 838031       | Serra Talhada          | Serra Talhada            | 135        | 42,72     |
| Pernambuco | 735158       | Surubim                | Surubim                  | 100,4      | 91,83     |
| Pernambuco | 736042       | Taquaritinga do Norte  | Taquaritinga do Norte    | 142,8      | 73,76     |
| Pernambuco | 735159       | Vertentes              | Vertentes                | 86,7       | 24,99     |
| Pernambuco | 835068       | Vitória de Santo Antão | Vitória de Santo Antão   | 155,4      | 85,86     |
| Piauí      | 442005       | Fazenda Alegria        | Barras                   | 151,3      | 40,61     |
| Piauí      | 541002       | Fazenda Boa Esperança  | Castelo do Piauí         | 143        | 67,4      |
| Piauí      | 844008       | Cristino Castro II     | Cristino Castro          | 145        | 33,02     |
| Piauí      | 342002       | Esperantina            | Esperantina              | 148        | 35,83     |
| Piauí      | 742012       | Francisco Ayres        | Francisco Ayres          | 110,2      | 29,35     |
| Piauí      | 741003       | Itainópolis            | Itainópolis              | 137        | 40,66     |
| Piauí      | 743009       | Barra do Lance         | Jerumenha                | 115,6      | 13,33     |
| Piauí      | 342007       | Luzilândia             | Luzilândia               | 127,2      | 17,59     |
| Piauí      | 442010       | Miguel Alves           | Miguel Alves             | 138        | 29,18     |
| Piauí      | 543010       | Palmeirais             | Palmeirais               | 151,8      | 62,76     |
| Piauí      | 341027       | Tinguis                | Piracuruca               | 155,8      | 28,21     |
| Piauí      | 542008       | Prata do Piauí         | Prata do Piauí           | 137,7      | 41,68     |
| Piauí      | 745003       | Ribeiro Gonçalves      | Ribeiro Gonçalves        | 181,4      | 141,42    |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF             | Cód. Estação | Nome Estação            | Municípios             | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------------|--------------|-------------------------|------------------------|------------|-----------|
| Piauí          | 741009       | Santa Cruz do Piauí II  | Santa Cruz do Piauí    | 157,2      | 59,75     |
| Piauí          | 742011       | São Francisco do Piauí  | São Francisco do Piauí | 163,2      | 34,09     |
| Rio de Janeiro | 2344016      | Vila Mambucaba          | Angra dos Reis         | 375,2      | 105,71    |
| Rio de Janeiro | 2243002      | Barra do Piraí          | Barra do Piraí         | 159,6      | 102,85    |
| Rio de Janeiro | 2244034      | Ribeirão de São Joaquim | Barra Mansa            | 194,8      | 266,44    |
| Rio de Janeiro | 2242019      | Vargem Alta             | Bom Jardim             | 126,2      | 39,62     |
| Rio de Janeiro | 2242016      | Fazenda São Joaquim     | Cachoeiras de Macacu   | 190,9      | 45,61     |
| Rio de Janeiro | 2141007      | Três Irmãos             | Cambuci                | 131,2      | 85,8      |
| Rio de Janeiro | 2241001      | Farol de São Tomé       | Campo dos Goytacazes   | 170        | 176,02    |
| Rio de Janeiro | 2142022      | Aldeia                  | Cantagalo              | 120,9      | 65,52     |
| Rio de Janeiro | 2142014      | Paquequer               | Carmo                  | 140,6      | 61,6      |
| Rio de Janeiro | 2242006      | Rio Dourado             | Casimiro de Abreu      | 194,5      | 55,14     |
| Rio de Janeiro | 2241003      | Macabuzinho             | Conceição de Macabu    | 190,9      | 247,16    |
| Rio de Janeiro | 2243250      | Coroa Grande            | Itaguaí                | 270,2      | 69,37     |
| Rio de Janeiro | 2141100      | Ponto de Pergunta       | Itaocara               | 113,6      | 24,53     |
| Rio de Janeiro | 2141004      | Itaperuna               | Itaperuna              | 126,3      | 76,97     |
| Rio de Janeiro | 2241002      | Usina Quissamã          | Macaé                  | 292        | 1.507,20  |
| Rio de Janeiro | 2242012      | Represa do Paraíso      | Magé                   | 204,2      | 56,05     |
| Rio de Janeiro | 2244148      | Ibicuí                  | Mangaratiba            | 184,4      | 14,94     |
| Rio de Janeiro | 2242010      | Manuel Ribeiro          | Maricá                 | 232        | 70,87     |
| Rio de Janeiro | 2242003      | Piller                  | Nova Friburgo          | 240,6      | 220,11    |
| Rio de Janeiro | 2243003      | Paraíba do Sul          | Paraíba do Sul         | 100,4      | 23,29     |
| Rio de Janeiro | 2344008      | São Roque               | Parati                 | 327,9      | 116,04    |
| Rio de Janeiro | 2243010      | Itamarati – SE          | Petrópolis             | 187,6      | 137,73    |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF                  | Cód. Estação | Nome Estação                                  | Municípios                    | Chuva máx. | TR Gumbel |
|---------------------|--------------|---|-------------------------------|------------|-----------|
| Rio de Janeiro      | 2243219      | UHE Fontes Nova<br>Res. Lajes Barra-<br>mento | Piraí                         | 192        | 71,61     |
| Rio de Janeiro      | 2042007      | Porciúncula                                   | Porciúncula                   | 152,8      | 175,95    |
| Rio de Janeiro      | 2244039      | Fazenda Agulhas<br>Negras                     | Resende                       | 246,2      | 587,76    |
| Rio de Janeiro      | 2244099      | UHE Nilo Peçanha<br>Lídice                    | Rio Claro                     | 158        | 29,92     |
| Rio de Janeiro      | 2243007      | Taboas  | Rio das Flores                | 150,8      | 61,84     |
| Rio de Janeiro      | 2142058      | Santo Antônio de<br>Pádua                     | Santo Antônio de<br>Pádua     | 131,8      | 38,47     |
| Rio de Janeiro      | 2141005      | São Fidélis                                   | São Fidélis                   | 134,9      | 453,87    |
| Rio de Janeiro      | 2141001      | São Francisco Paula –<br>Cacimbas             | São João da Barra             | 154,4      | 78,06     |
| Rio de Janeiro      | 2242028      | Anta  | Sapucaia                      | 102        | 17,97     |
| Rio de Janeiro      | 2242007      | Quarteis                                      | Silva Jardim                  | 210,6      | 34,88     |
| Rio de Janeiro      | 2242029      | Sumidouro                                     | Sumidouro                     | 257        | 912       |
| Rio de Janeiro      | 2242027      | Fazenda Sobradinho                            | Teresópolis                   | 135,6      | 74,05     |
| Rio de Janeiro      | 2242002      | Maria Mendonça                                | Trajano de Moraes             | 128        | 26,49     |
| Rio de Janeiro      | 2243013      | Areal (Granja Gabi)                           | Três Rios                     | 157        | 282,48    |
| Rio de Janeiro      | 2244033      | Santa Isabel do Rio<br>Preto                  | Valença                       | 186,8      | 191,57    |
| Rio de Janeiro      | 2041046      | Varre-Sai                                     | Varre-Sai                     | 125,5      | 41,75     |
| Rio de Janeiro      | 2244041      | Volta Redonda                                 | Volta Redonda                 | 118        | 24,23     |
| Rio Grande do Norte | 536035       | Mendubim de Baixo                             | Açú                           | 103,5      | 18,11     |
| Rio Grande do Norte | 537034       | Augusto Severo                                | Augusto Severo                | 145,5      | 42,57     |
| Rio Grande do Norte | 637039       | Caicó   | Caicó                         | 98         | 15,98     |
| Rio Grande do Norte | 537008       | Pedra de Abelhas                              | Felipe Guerra                 | 162,2      | 139,22    |
| Rio Grande do Norte | 537036       | Governador Dix-Sept<br>Rosado                 | Governador Dix-Sept<br>Rosado | 128        | 17,99     |
| Rio Grande do Norte | 535038       | Fazenda Potengi                               | Ielmo Marinho                 | 205,7      | 311,84    |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF                  | Cód. Estação | Nome Estação                   | Municípios         | Chuva máx. | TR Gumbel |
|---------------------|--------------|--------------------------------|--------------------|------------|-----------|
| Rio Grande do Norte | 637010       | Açude Lagoinha                 | Jardim de Piranhas | 147,3      | 39,08     |
| Rio Grande do Norte | 636045       | Sítio Volta                    | Jardim do Seridó   | 115,5      | 32,31     |
| Rio Grande do Norte | 537037       | Mossoró                        | Mossoró            | 137,6      | 49,03     |
| Rio Grande do Norte | 536036       | Pendências                     | Pendências         | 115        | 35,47     |
| Rio Grande do Norte | 636019       | Santa Cruz                     | Santa Cruz         | 76         | 22,38     |
| Rio Grande do Norte | 635013       | Engenho Olho<br>D'Água         | São José de Mipibu | 163        | 44,31     |
| Rio Grande do Norte | 638044       | Açude Bonito                   | São Miguel         | 135,4      | 48,49     |
| Rio Grande do Norte | 537019       | Upanema                        | Upanema            | 144        | 44,68     |
| Rio Grande do Sul   | 2853010      | Passo Faxinal                  | Ajuricaba          | 162,7      | 52,21     |
| Rio Grande do Sul   | 2956009      | Fazenda Três Capões            | Alegrete           | 199,5      | 38,17     |
| Rio Grande do Sul   | 2851003      | Antônio Prado                  | Antônio Prado      | 322,6      | 2.377,38  |
| Rio Grande do Sul   | 3252005      | Granja Coronel<br>Pedro Osório | Arroio Grande      | 205,6      | 133,92    |
| Rio Grande do Sul   | 3057002      | Barra do Quaraí                | Barra do Quaraí    | 158        | 48,72     |
| Rio Grande do Sul   | 3051023      | Barra do Ribeiro               | Barra do Ribeiro   | 145,6      | 53,47     |
| Rio Grande do Sul   | 2751015      | Barracão                       | Barracão           | 174,2      | 49,65     |
| Rio Grande do Sul   | 2952001      | Barros Cassal                  | Barros Cassal      | 187,2      | 86,34     |
| Rio Grande do Sul   | 2850006      | Invernada Velha                | Bom Jesus          | 180,2      | 145,71    |
| Rio Grande do Sul   | 3051031      | Butiá                          | Butiá              | 146,2      | 67,44     |
| Rio Grande do Sul   | 3053022      | Caçapava do Sul                | Caçapava do Sul    | 146,1      | 21,58     |
| Rio Grande do Sul   | 3055004      | Saica                          | Cacequi            | 358        | 297,07    |
| Rio Grande do Sul   | 3053018      | Irapuazinho                    | Cachoeira do Sul   | 192,7      | 45,48     |
| Rio Grande do Sul   | 3051016      | Camaquã                        | Camaquã            | 283,4      | 414,74    |
| Rio Grande do Sul   | 2952034      | Candelária                     | Candelária         | 173,2      | 137,77    |
| Rio Grande do Sul   | 3152003      | Canguçu                        | Canguçu            | 177,3      | 174,77    |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF                | Cód. Estação | Nome Estação                       | Municípios          | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-------------------|--------------|------------------------------------|---------------------|------------|-----------|
| Rio Grande do Sul | 2954031      | Esquina dos Lima<br>(Sta. Barbara) | Capão do Cipó       | 143,6      | 37,08     |
| Rio Grande do Sul | 2852006      | Carazinho                          | Carazinho           | 229,4      | 203,24    |
| Rio Grande do Sul | 2851022      | Passo Migliavacca                  | Casca               | 180,7      | 308,79    |
| Rio Grande do Sul | 2854001      | Boa Vista                          | Catuípe             | 161        | 19,41     |
| Rio Grande do Sul | 2951022      | Nova Palmira                       | Caxias do Sul       | 168,7      | 165,06    |
| Rio Grande do Sul | 3152005      | Vila Freire                        | Cerrito             | 152,4      | 30,89     |
| Rio Grande do Sul | 3051004      | Cerro Grande                       | Cerro Grande do Sul | 152,6      | 28,4      |
| Rio Grande do Sul | 2853026      | Chapada                            | Chapada             | 152,3      | 35,48     |
| Rio Grande do Sul | 2951067      | Charqueadas                        | Charqueadas         | 110,6      | 20,13     |
| Rio Grande do Sul | 2853023      | Condor                             | Condor              | 155,2      | 21,46     |
| Rio Grande do Sul | 2852007      | Colônia Xadrez                     | Coqueiros do Sul    | 211,8      | 187,69    |
| Rio Grande do Sul | 3152011      | Passo do Mendonça                  | Cristal             | 168,6      | 49,73     |
| Rio Grande do Sul | 2853028      | Anderson Clayton                   | Cruz Alta           | 162,4      | 23,68     |
| Rio Grande do Sul | 3154003      | Torquato Severo                    | Dom Pedrito         | 185,3      | 22,37     |
| Rio Grande do Sul | 2953008      | Dona Francisca                     | Dona Francisca      | 164,8      | 41,32     |
| Rio Grande do Sul | 2951010      | Encantado                          | Encantado           | 135        | 56,23     |
| Rio Grande do Sul | 3052012      | Serra dos Pedrosas                 | Encruzilhada do Sul | 158,8      | 52,44     |
| Rio Grande do Sul | 2752006      | Erebango                           | Erebango            | 225        | 108,35    |
| Rio Grande do Sul | 2752035      | UHE Itá Erechim<br>Plu             | Erechim             | 180,8      | 56,24     |
| Rio Grande do Sul | 2851043      | Esmeralda                          | Esmeralda           | 152,2      | 25,91     |
| Rio Grande do Sul | 2855001      | Garruchos                          | Garruchos           | 278,1      | 140,66    |
| Rio Grande do Sul | 2752021      | Gaurama                            | Gaurama             | 134        | 20,96     |
| Rio Grande do Sul | 2854003      | Giruá                              | Giruá               | 237,4      | 176,09    |
| Rio Grande do Sul | 2950059      | Agropecuária Anju                  | Glorinha            | 208,5      | 112,16    |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF                | Cód. Estação | Nome Estação            | Municípios                | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-------------------|--------------|-------------------------|---------------------------|------------|-----------|
| Rio Grande do Sul | 3051005      | Guaíba Country Club     | Guaíba                    | 172,5      | 123,02    |
| Rio Grande do Sul | 2851044      | Guaporé                 | Guaporé                   | 180        | 65,76     |
| Rio Grande do Sul | 2854006      | Passo Viola             | Guarani das Missões       | 150,8      | 20,65     |
| Rio Grande do Sul | 3253004      | Herval                  | Herval                    | 146,3      | 35,54     |
| Rio Grande do Sul | 2853003      | Conceição               | Ijuí                      | 241,6      | 628,21    |
| Rio Grande do Sul | 2754010      | Esquina Araujo          | Independência             | 173        | 27,65     |
| Rio Grande do Sul | 2955002      | Cachoeira Santa Cecília | Itaqui                    | 228        | 105,28    |
| Rio Grande do Sul | 2752017      | Itatiba do Sul          | Itatiba do Sul            | 213,3      | 53,03     |
| Rio Grande do Sul | 2954007      | Jaguari                 | Jaguari                   | 239,2      | 156,14    |
| Rio Grande do Sul | 2850009      | Passo Tainhas           | Jaquirana                 | 129,1      | 53,48     |
| Rio Grande do Sul | 2751017      | Clemente Argolo         | Lagoa Vermelha            | 152        | 24,67     |
| Rio Grande do Sul | 2753014      | Liberato Salzano        | Liberato Salzano          | 225        | 362,84    |
| Rio Grande do Sul | 2856007      | Cunha                   | Maçambará                 | 191        | 45,98     |
| Rio Grande do Sul | 2955008      | Manoel Viana            | Manoel Viana              | 168,8      | 21,93     |
| Rio Grande do Sul | 2751018      | Marcelino Ramos         | Marcelino Ramos           | 135,8      | 22,58     |
| Rio Grande do Sul | 2753016      | Miraguaí                | Miraguaí                  | 206,1      | 84,17     |
| Rio Grande do Sul | 2951024      | Porto Garibaldi         | Montenegro                | 136,6      | 31,32     |
| Rio Grande do Sul | 3050007      | Solidão                 | Mostardas                 | 85,6       | 29,15     |
| Rio Grande do Sul | 2951070      | Muçum                   | Muçum                     | 130,6      | 22,61     |
| Rio Grande do Sul | 2852050      | Não-me-toque            | Não-me-toque (Campo Real) | 137,3      | 15,22     |
| Rio Grande do Sul | 2851024      | Prata                   | Nova Prata                | 201,2      | 163,36    |
| Rio Grande do Sul | 2751006      | Paim Filho              | Paim Filho                | 196,4      | 258,43    |
| Rio Grande do Sul | 3050002      | Palmares do Sul         | Palmares do Sul           | 109,5      | 21,45     |
| Rio Grande do Sul | 2753015      | Palmeira das Missões    | Palmeira das Missões      | 148        | 25,81     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF                | Cód. Estação | Nome Estação                     | Municípios                | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-------------------|--------------|----------------------------------|---------------------------|------------|-----------|
| Rio Grande do Sul | 3052016      | Pantano Grande                   | Pantano Grande            | 142,6      | 37,59     |
| Rio Grande do Sul | 3153007      | Pedras Altas                     | Pedras Altas              | 203,6      | 115       |
| Rio Grande do Sul | 3152013      | Pedro Osório                     | Pedro Osório              | 175        | 60,11     |
| Rio Grande do Sul | 3152008      | Granja São Pedro                 | Pelotas                   | 195,2      | 238,92    |
| Rio Grande do Sul | 3153008      | Pinheiro Machado                 | Pinheiro Machado          | 187        | 68,55     |
| Rio Grande do Sul | 3153021      | Estação Experimental de Piratini | Piratini                  | 278        | 216,36    |
| Rio Grande do Sul | 2755001      | Porto Lucena                     | Porto Lucena              | 190,2      | 64,92     |
| Rio Grande do Sul | 3055008      | Passo da Guarda                  | Quaraí                    | 136,5      | 16,39     |
| Rio Grande do Sul | 2954019      | Quevedos                         | Quevedos                  | 224,8      | 247,35    |
| Rio Grande do Sul | 2853014      | Santa Clara do Ingai             | Quinze de Novembro        | 200        | 165,39    |
| Rio Grande do Sul | 3252008      | Granja Santa Maria               | Rio Grande                | 201        | 121,59    |
| Rio Grande do Sul | 3054007      | Rosário do Sul                   | Rosário do Sul            | 180,2      | 22,9      |
| Rio Grande do Sul | 2751007      | Sananduva                        | Sananduva                 | 175,4      | 83,72     |
| Rio Grande do Sul | 3253003      | Granja Osório                    | Santa Vitória do Palmar   | 184,2      | 145,94    |
| Rio Grande do Sul | 3055003      | Fazenda Encerra                  | Santana do Livramento     | 200        | 25,87     |
| Rio Grande do Sul | 2954030      | Florida                          | Santiago                  | 199        | 105,21    |
| Rio Grande do Sul | 2950062      | Fazenda Nossa Senhora Conceição  | Santo Antônio da Patrulha | 128        | 26,48     |
| Rio Grande do Sul | 2855002      | Passo do Sarmento                | Santo Antônio das Missões | 231,6      | 225,81    |
| Rio Grande do Sul | 2856006      | Passo São Borja                  | São Borja                 | 167        | 24,62     |
| Rio Grande do Sul | 2955006      | Ponte do Miracatu                | São Francisco de Assis    | 153        | 13,07     |
| Rio Grande do Sul | 3054018      | São Gabriel                      | São Gabriel               | 177,6      | 46,71     |
| Rio Grande do Sul | 3052011      | Quitéria                         | São Jerônimo              | 166,2      | 115,87    |
| Rio Grande do Sul | 3151003      | São Lourenço do Sul              | São Lourenço do Sul       | 169,2      | 51        |
| Rio Grande do Sul | 2854012      | Coimbra                          | São Miguel das Missões    | 204        | 52,53     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF                | Cód. Estação | Nome Estação           | Municípios          | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-------------------|--------------|------------------------|---------------------|------------|-----------|
| Rio Grande do Sul | 2954032      | Ponte Toropí II        | São Pedro do Sul    | 200,8      | 56,52     |
| Rio Grande do Sul | 3053020      | São Sepé Montante      | São Sepé            | 223,2      | 115,12    |
| Rio Grande do Sul | 2951027      | São Vendelino          | São Vendelino       | 141        | 22,87     |
| Rio Grande do Sul | 2951028      | Sapucaia do Sul        | Sapucaia do Sul     | 146        | 75,95     |
| Rio Grande do Sul | 2753004      | Linha Cescon           | Sarandi             | 176        | 68,74     |
| Rio Grande do Sul | 2852046      | Tapejara               | Tapejara            | 186,3      | 70,54     |
| Rio Grande do Sul | 2950038      | Terra de Areia         | Terra de Areia      | 140,3      | 30,76     |
| Rio Grande do Sul | 2754001      | Alto Uruguai           | Tiradentes do Sul   | 255        | 574,55    |
| Rio Grande do Sul | 2754009      | Tucunduva              | Tucunduva           | 183        | 42,62     |
| Rio Grande do Sul | 2854013      | São Bernardo           | Tupanciretã         | 158,3      | 20,11     |
| Rio Grande do Sul | 2955007      | Unistalda              | Unistalda           | 180        | 29,41     |
| Rio Grande do Sul | 2956007      | Plano Alto             | Uruguaiana          | 230        | 54,1      |
| Rio Grande do Sul | 3050008      | Lombas                 | Viamão              | 81         | 9,85      |
| Rio Grande do Sul | 2851021      | Passo do Prata         | Vila Flores         | 150,3      | 90,73     |
| Rondônia          | 963000       | Ariquemes              | Ariquemes           | 201,2      | 62,4      |
| Rondônia          | 1161000      | Vista Alegre           | Cacoal              | 139,9      | 27,4      |
| Rondônia          | 1360001      | Cerejeira              | Cerejeiras          | 153        | 39,82     |
| Rondônia          | 1360000      | Colorado do Oeste      | Colorado do Oeste   | 165        | 32,42     |
| Rondônia          | 1264000      | Príncipe da Beira      | Costa Marques       | 135        | 14,83     |
| Rondônia          | 1065002      | Guajará                | Guajará-Mirim       | 142,4      | 51,19     |
| Rondônia          | 1062001      | Jaru                   | Jaru                | 212,8      | 191,7     |
| Rondônia          | 962000       | Mineração Oriente Novo | Machadinho D'Oeste  | 147,2      | 24,7      |
| Rondônia          | 1062003      | Mirante da Serra       | Mirante da Serra    | 115,4      | 22,24     |
| Rondônia          | 1061003      | Rondoninas (Barrocás)  | Ouro Preto do Oeste | 140,8      | 22,27     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF             | Cód. Estação | Nome Estação           | Municípios      | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------------|--------------|------------------------|-----------------|------------|-----------|
| Rondônia       | 1160002      | Fazenda Flor do Campo  | Pimenta Bueno   | 184,2      | 140,09    |
| Rondônia       | 963001       | Santo Antônio BR-364   | Porto Velho     | 185        | 77,33     |
| Rondônia       | 1161002      | Rolim de Moura         | Rolim de Moura  | 141        | 23,05     |
| Rondônia       | 1062004      | Theobroma              | Theobroma       | 134,2      | 21,58     |
| Roraima        | 8361001      | Boqueirão              | Alto Alegre     | 190,4      | 119,49    |
| Roraima        | 8361000      | Fazenda São João       | Amajari         | 115        | 20,39     |
| Roraima        | 8360002      | Fazenda Passarão       | Boa Vista       | 223        | 116,47    |
| Roraima        | 8359000      | Bonfim                 | Bonfim          | 170,7      | 86,92     |
| Roraima        | 8260002      | Boa Esperança          | Canta           | 128,7      | 21,57     |
| Roraima        | 8160003      | Agropecuária Boa Vista | Caracaraí       | 232,7      | 64,48     |
| Roraima        | 8059001      | Sítio Santa Maria      | Caroebe         | 99,3       | 12,28     |
| Roraima        | 8261001      | Fazenda Três Poderes   | Mucajá          | 232,3      | 50,35     |
| Roraima        | 8460001      | Vila Surumu            | Pacaraima       | 204,6      | 44,39     |
| Roraima        | 8060000      | Fazenda São José       | Rorainópolis    | 184,5      | 39,63     |
| Roraima        | 60001        | Fazenda São Lucas      | São Luiz        | 151,7      | 27,03     |
| Roraima        | 8459000      | Mutum                  | Uiramutã        | 106,7      | 13,24     |
| Santa Catarina | 2652000      | Abelardo Luz           | Abelardo Luz    | 210,2      | 224,27    |
| Santa Catarina | 2749041      | Agrolândia             | Agrolândia      | 137        | 66,18     |
| Santa Catarina | 2749007      | Lomba Alta             | Alfredo Wagner  | 134,6      | 55,3      |
| Santa Catarina | 2748003      | Garcia de Angelina     | Angelina        | 159,2      | 73,71     |
| Santa Catarina | 2751001      | Anita Garibaldi        | Anita Garibaldi | 165,3      | 103,27    |
| Santa Catarina | 2749027      | Anitápolis             | Anitápolis      | 170,4      | 42,49     |
| Santa Catarina | 2748016      | Antonio Carlos         | Antônio Carlos  | 195,1      | 35,55     |
| Santa Catarina | 2749016      | Neisse Central         | Apiúna          | 148        | 136,65    |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF             | Cód. Estação | Nome Estação               | Municípios             | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------------|--------------|----------------------------|------------------------|------------|-----------|
| Santa Catarina | 2648020      | Itapocu                    | Araquari               | 189,4      | 24,03     |
| Santa Catarina | 2848000      | Armazém Capivari           | Armazém                | 132        | 30,22     |
| Santa Catarina | 2649003      | Benedito Novo              | Benedito Novo          | 120        | 41,5      |
| Santa Catarina | 2649010      | Itoupava Central           | Blumenau               | 190,4      | 177,76    |
| Santa Catarina | 2749031      | Vila Canoas                | Bocaina do Sul         | 170,3      | 222,38    |
| Santa Catarina | 2849023      | Despraiado                 | Bom Jardim da Serra    | 138        | 31,71     |
| Santa Catarina | 2749045      | Botuverá – Montante        | Botuverá               | 120        | 42,63     |
| Santa Catarina | 2849030      | Branco do Norte – Montante | Braço do Norte         | 129,6      | 35,25     |
| Santa Catarina | 2748000      | Brusque (PCD)              | Brusque                | 190,8      | 280,33    |
| Santa Catarina | 2650035      | UHE Itá Caçador Plu        | Caçador                | 165,6      | 42,29     |
| Santa Catarina | 2649057      | Campo Alegre               | Campo Alegre           | 136,2      | 53,64     |
| Santa Catarina | 2750001      | Campo Belo do Sul          | Campo Belo do Sul      | 165,1      | 83,76     |
| Santa Catarina | 2653001      | Campo Erê – EM-PASC        | Campo Erê              | 204,7      | 131,56    |
| Santa Catarina | 2650018      | Pinheiros                  | Canoinhas              | 154,5      | 36,52     |
| Santa Catarina | 2751012      | Capinzal                   | Capinzal               | 158,6      | 72,08     |
| Santa Catarina | 2752005      | Concórdia                  | Concórdia              | 146        | 28,01     |
| Santa Catarina | 2652034      | Porto FAE Novo             | Coronel Freitas        | 139,2      | 25,72     |
| Santa Catarina | 2649064      | Rio Novo                   | Corupá                 | 173,4      | 25,6      |
| Santa Catarina | 2750009      | Passo Marombas             | Curitibanos            | 128,6      | 36,31     |
| Santa Catarina | 2653002      | Dionísio Cerqueira         | Dionísio Cerqueira     | 154,3      | 19,16     |
| Santa Catarina | 2649017      | Doutor Pedrinho            | Doutor Pedrinho        | 160        | 53,17     |
| Santa Catarina | 2849006      | Forquilhinha               | Forquilhinha           | 136,3      | 24,52     |
| Santa Catarina | 2648027      | Garuva                     | Garuva                 | 183,3      | 33,85     |
| Santa Catarina | 2748019      | Governador Celso Ramos     | Governador Celso Ramos | 186,7      | 81,47     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF             | Cód. Estação | Nome Estação               | Municípios     | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------------|--------------|----------------------------|----------------|------------|-----------|
| Santa Catarina | 2849008      | Rio Pequeno                | Grão Pará      | 146,1      | 51,13     |
| Santa Catarina | 2749005      | Nova Bremen Dalbergia      | Ibirama        | 192        | 2.086,95  |
| Santa Catarina | 2849022      | Íçara                      | Íçara          | 120        | 20,07     |
| Santa Catarina | 2848007      | Imbituba                   | Imbituba       | 150,6      | 21,79     |
| Santa Catarina | 2649005      | Indaial                    | Indaial        | 248,3      | 2.128,71  |
| Santa Catarina | 2753013      | Iporã                      | Iporã do Oeste | 160        | 37,8      |
| Santa Catarina | 2652001      | Bonito                     | Ipumirim       | 148,5      | 22,86     |
| Santa Catarina | 2751011      | Irani                      | Irani          | 128,2      | 23,8      |
| Santa Catarina | 2649056      | Itaiópolis                 | Itaiópolis     | 220,2      | 142,99    |
| Santa Catarina | 2749017      | Barragem Sul               | Ituporanga     | 125,6      | 46,72     |
| Santa Catarina | 2849020      | Jaguaruna                  | Jaguaruna      | 158        | 33,89     |
| Santa Catarina | 2649037      | Jaraguá do Sul             | Jaraguá do Sul | 172,8      | 48,16     |
| Santa Catarina | 2751004      | Joaçaba                    | Joaçaba        | 170        | 157,23    |
| Santa Catarina | 2648034      | Estrada dos Morros         | Joinville      | 260        | 119,65    |
| Santa Catarina | 2649061      | Barragem Norte             | José Boiteux   | 142        | 46,63     |
| Santa Catarina | 2850004      | Coxilha Rica               | Lages          | 203,4      | 149,01    |
| Santa Catarina | 2650019      | Lebon Régis                | Lebon Régis    | 112,6      | 24,11     |
| Santa Catarina | 2749034      | Leoberto Leal              | Leoberto Leal  | 120,6      | 26,06     |
| Santa Catarina | 2648002      | Luiz Alves                 | Luiz Alves     | 215        | 140,3     |
| Santa Catarina | 2651036      | Quilômetro 30              | Macieira       | 133,8      | 35,68     |
| Santa Catarina | 2748001      | Major Gercino              | Major Gercino  | 170,6      | 177,49    |
| Santa Catarina | 2650000      | Salto Canoinhas            | Major Vieira   | 144        | 72,17     |
| Santa Catarina | 2849024      | Foz do Manuel Alves        | Meleiro        | 146,4      | 19,84     |
| Santa Catarina | 2750021      | Cabeceira Ribeirão Caetano | Mirim Doce     | 134,1      | 49,77     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF             | Cód. Estação | Nome Estação                    | Municípios          | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------------|--------------|---------------------------------|---------------------|------------|-----------|
| Santa Catarina | 2653003      | Modelo                          | Modelo              | 169,5      | 36,72     |
| Santa Catarina | 2650015      | Residência Fuck<br>(Lajeadinho) | Monte Castelo       | 118,6      | 18,55     |
| Santa Catarina | 2748002      | Nova Trento                     | Nova Trento         | 220,4      | 129,04    |
| Santa Catarina | 2849001      | Orleans – Montante              | Orleans             | 150,6      | 79,9      |
| Santa Catarina | 2751029      | UHE Itá Rio do<br>Peixe         | Ouro                | 193,8      | 49,46     |
| Santa Catarina | 2750007      | Painel                          | Painel              | 134,2      | 37,63     |
| Santa Catarina | 2748004      | ETA Casan – Mont-<br>ante       | Palhoça             | 193,5      | 117,39    |
| Santa Catarina | 2653013      | Palma Sola                      | Palma Sola          | 149,6      | 22,96     |
| Santa Catarina | 2753006      | Palmitos                        | Palmitos            | 154,6      | 34,61     |
| Santa Catarina | 2650023      | Nova Cultura                    | Papanduva           | 125,4      | 42,25     |
| Santa Catarina | 2651022      | Santo Agostinho                 | Passos Maia         | 196,5      | 224,13    |
| Santa Catarina | 2748017      | Paulo Lopes                     | Paulo Lopes         | 218,4      | 28,5      |
| Santa Catarina | 2849028      | Pedras Grandes                  | Pedras Grandes      | 132,9      | 19,37     |
| Santa Catarina | 2649002      | Pomerode                        | Pomerode            | 203,6      | 270,87    |
| Santa Catarina | 2750011      | Ponte Alta do Sul               | Ponte Alta          | 136,2      | 50,91     |
| Santa Catarina | 2750010      | Ponte Alta do Norte             | Ponte Alta do Norte | 134,7      | 116,48    |
| Santa Catarina | 2651040      | Ponte Serrada                   | Ponte Serrada       | 147        | 26,87     |
| Santa Catarina | 2749006      | Pouso Redondo                   | Pouso Redondo       | 115        | 37,73     |
| Santa Catarina | 2949001      | Praia Grande                    | Praia Grande        | 171,6      | 41,52     |
| Santa Catarina | 2749020      | Rancho Queimado                 | Rancho Queimado     | 214        | 68,68     |
| Santa Catarina | 2749039      | Rio do Sul – Novo               | Rio do Sul          | 136        | 48,95     |
| Santa Catarina | 2649008      | Arrozeira                       | Rio dos Cedros      | 134        | 24,01     |
| Santa Catarina | 2649055      | Corredeira                      | Rio Negrinho        | 168,1      | 59,87     |
| Santa Catarina | 2653004      | Ponte do Sargento               | Romelândia          | 171,6      | 36,15     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF             | Cód. Estação | Nome Estação          | Municípios              | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------------|--------------|-----------------------|-------------------------|------------|-----------|
| Santa Catarina | 2651052      | Salto Veloso          | Salto Veloso            | 141,2      | 37,5      |
| Santa Catarina | 2849031      | Santa Rosa de Lima    | Santa Rosa de Lima      | 128,7      | 13,46     |
| Santa Catarina | 2748005      | Poço Fundo            | Sto Amaro da Imperatriz | 182,5      | 44,2      |
| Santa Catarina | 2748018      | São Bonifácio         | São Bonifácio           | 204,6      | 165,85    |
| Santa Catarina | 2750012      | Ponte do Rio Antinhas | São Cristóvão do Sul    | 140,9      | 88,69     |
| Santa Catarina | 2652002      | Marata                | São Domingos            | 156,5      | 44,96     |
| Santa Catarina | 2653005      | São José do Cedro     | São José do Cedro       | 210,3      | 174,28    |
| Santa Catarina | 2750008      | Passo Caru            | São José do Cerrito     | 176        | 362,92    |
| Santa Catarina | 2652031      | São Lourenço do Oeste | São Lourenço do Oeste   | 155        | 32,3      |
| Santa Catarina | 2849002      | São Ludgero I         | São Ludgero             | 205        | 740,33    |
| Santa Catarina | 2848006      | Vargem do Cedro       | São Martinho            | 136,4      | 14,38     |
| Santa Catarina | 2653007      | Saudades              | Saudades                | 196,2      | 152,72    |
| Santa Catarina | 2849029      | Serrinha              | Siderópolis             | 153,4      | 18,67     |
| Santa Catarina | 2949003      | Sombrio               | Sombrio                 | 146,2      | 31,87     |
| Santa Catarina | 2652021      | Jardinópolis          | Sul Brasil              | 140,9      | 32,88     |
| Santa Catarina | 2749003      | Taió                  | Taió                    | 170,7      | 320,67    |
| Santa Catarina | 2849019      | Timbé do Sul          | Timbé do Sul            | 138,8      | 13,32     |
| Santa Catarina | 2649004      | Timbó Novo            | Timbó                   | 168        | 166,12    |
| Santa Catarina | 2650016      | Buriti (Timbo Grande) | Timbó Grande            | 136,8      | 43,84     |
| Santa Catarina | 2749013      | Trombudo Central      | Trombudo Central        | 153,8      | 407,93    |
| Santa Catarina | 2849027      | Tubarão               | Tubarão                 | 186,1      | 48,4      |
| Santa Catarina | 2849021      | Urubici               | Urubici                 | 127,6      | 58,06     |
| Santa Catarina | 2651001      | Campina da Alegria    | Vargem Bonita           | 157,4      | 45,81     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF             | Cód. Estação | Nome Estação                                | Municípios                 | Chuva máx. | TR Gumbel |
|----------------|--------------|---|----------------------------|------------|-----------|
| Santa Catarina | 2749033      | Vidal Ramos                                 | Vidal Ramos                | 148        | 63,35     |
| Santa Catarina | 2649053      | Witmarsum                                   | Witmarsum                  | 125,8      | 25,45     |
| São Paulo      | 2246023      | Amparo                                      | Amparo                     | 127,2      | 49,19     |
| São Paulo      | 2348017      | Angatuba                                    | Angatuba                   | 109,4      | 54,52     |
| São Paulo      | 2346095      | Atibaia                                     | Atibaia                    | 203,4      | 1.093,86  |
| São Paulo      | 2448036      | Córrego Comprido                            | Barra do Turvo             | 256,6      | 620,04    |
| São Paulo      | 2345076      | Casa Grande                                 | Biritiba-Mirim             | 158,7      | 33,42     |
| São Paulo      | 2246033      | Rio Abaixo (Faz.<br>Cachoeira)              | Bragança Paulista          | 131,2      | 54,81     |
| São Paulo      | 2150024      | Fazenda N. S. Apare-<br>cida                | Braúna                     | 198,9      | 37,48     |
| São Paulo      | 2047032      | Brodósqui                                   | Brodósqui                  | 149        | 60,08     |
| São Paulo      | 2247197      | Est. Ferroviária<br>Campo Alegre            | Brotas                     | 130        | 52,53     |
| São Paulo      | 2345063      | Caçapava                                    | Caçapava                   | 144,8      | 261,82    |
| São Paulo      | 2244010      | Fazenda Santa Clara<br>(Ex Bocaina)         | Cachoeira Paulista         | 199,2      | 457,36    |
| São Paulo      | 2348034      | UHE Jurumirim<br>Campina do Monte<br>Alegre | Campina do Monte<br>Alegre | 135,8      | 65,99     |
| São Paulo      | 2245010      | Fazenda da Guarda<br>(Parque)               | Campos do Jordão           | 165,2      | 139,63    |
| São Paulo      | 2447074      | Esteiro do Morro                            | Cananéia                   | 308,5      | 114,21    |
| São Paulo      | 2348037      | Cerradinho                                  | Capão Bonito               | 163,2      | 700,17    |
| São Paulo      | 2247059      | Capivari                                    | Capivari                   | 165,2      | 225,93    |
| São Paulo      | 2147165      | Fazenda da Cach-<br>oeira                   | Casa Branca                | 158,5      | 112,51    |
| São Paulo      | 2349005      | Porto Ermitão (Faz.<br>Harmonia)            | Chavantes                  | 131,8      | 33,66     |
| São Paulo      | 2048002      | Porto Colômbia                              | Colômbia                   | 167,7      | 44,04     |
| São Paulo      | 2244048      | Campos de Cunha                             | Cunha                      | 170,2      | 464,22    |
| São Paulo      | 2047101      | Fazenda Sassafras                           | Francia                    | 210        | 90,14     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF        | Cód. Estação | Nome Estação                    | Municípios       | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-----------|--------------|---------------------------------|------------------|------------|-----------|
| São Paulo | 2148167      | Gavião Peixoto                  | Gavião Peixoto   | 128,6      | 23,91     |
| São Paulo | 2048004      | Fazenda São Domingos            | Guaíra           | 159        | 81,35     |
| São Paulo | 2245032      | UHE Funil Guaratinguetá         | Guaratinguetá    | 149,6      | 105,84    |
| São Paulo | 2347055      | Itaici                          | Indaiatuba       | 164        | 316,07    |
| São Paulo | 2448017      | Iporanga                        | Iporanga         | 140,4      | 69,86     |
| São Paulo | 2348088      | Engenheiro Bacelar              | Itapeva          | 134,6      | 36,59     |
| São Paulo | 2246191      | UHE Mogi-Guaçu Montante         | Itapira          | 177,4      | 66,02     |
| São Paulo | 2349023      | UHE Chavantes Olaria dos Padres | Itaporanga       | 136,4      | 104,4     |
| São Paulo | 2447045      | Itariri                         | Itariri          | 259        | 132,85    |
| São Paulo | 2246038      | Itatiba                         | Itatiba          | 283,6      | 7.315,32  |
| São Paulo | 2247198      | Fazenda Pequena Holanda         | Itirapina        | 153,4      | 59,46     |
| São Paulo | 2347057      | Itupeva                         | Itupeva          | 134        | 49,72     |
| São Paulo | 2047007      | Canindé                         | Ituverava        | 158,5      | 64,27     |
| São Paulo | 2048090      | Fazenda Santa Genoveva          | Jaborandi        | 136,5      | 186,38    |
| São Paulo | 2247055      | Jaguariúna                      | Jaguariúna       | 180        | 315,22    |
| São Paulo | 2346097      | Jundiaí                         | Jundiaí          | 218,6      | 438,84    |
| São Paulo | 2447042      | Barra do Açungui                | Juquiá           | 206,1      | 46.009,79 |
| São Paulo | 2347062      | Juquitiba – II                  | Juquitiba        | 167        | 104,69    |
| São Paulo | 2249103      | Turvinho                        | Lençóis Paulista | 116,8      | 31,4      |
| São Paulo | 2447043      | Pedro Barros                    | Miracatu         | 174,8      | 98,71     |
| São Paulo | 2146001      | Ponte de Canoas                 | Mococa           | 102,5      | 14,23     |
| São Paulo | 2346103      | Varinhas                        | Mogi das Cruzes  | 171,7      | 197,3     |
| São Paulo | 2246190      | UHE Mogi-Guaçu Barramento       | Mogi-Guaçu       | 103,6      | 26,59     |
| São Paulo | 2247058      | Monte Mor                       | Monte Mor        | 138,5      | 51,36     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF        | Cód. Estação | Nome Estação                         | Municípios             | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-----------|--------------|--------------------------------------|------------------------|------------|-----------|
| São Paulo | 2245048      | Pindamonhangaba                      | Pindamonhangaba        | 130        | 72,71     |
| São Paulo | 2346094      | Piracaia                             | Piracaia               | 130,2      | 129       |
| São Paulo | 2349007      | Piraju                               | Piraju                 | 152,1      | 104,75    |
| São Paulo | 2148050      | Passagem (Faz. São Vicente)          | Pitangueiras           | 145        | 138,04    |
| São Paulo | 2048033      | Desengano                            | Pontal                 | 201,2      | 505,92    |
| São Paulo | 2147034      | UHE Marimbondo<br>Porto Ferreira     | Porto Ferreira         | 132,4      | 64,98     |
| São Paulo | 2244001      | Queluz                               | Queluz                 | 160        | 101,25    |
| São Paulo | 2148168      | Guarapiranga                         | Ribeirão Bonito        | 109,4      | 24,3      |
| São Paulo | 2347042      | Salto de Pirapora                    | Salto de Pirapora      | 204        | 296,31    |
| São Paulo | 2250024      | Porto Jaú                            | Salto Grande           | 146,2      | 73,77     |
| São Paulo | 2345071      | Santa Branca                         | Santa Branca           | 125,4      | 89,41     |
| São Paulo | 2147022      | Santa Rosa do Viterbo                | Santa Rosa do Viterbo  | 135        | 51,19     |
| São Paulo | 2245011      | São Bento do Sapucaí                 | São Bento do Sapucaí   | 146        | 368,8     |
| São Paulo | 2247182      | Ribeirão do Feijão                   | São Carlos             | 183,4      | 354,27    |
| São Paulo | 2146013      | São João da Boa Vista                | São João da Boa Vista  | 99,9       | 24,24     |
| São Paulo | 2047018      | Fazenda Santa Cecília                | São Joaquim da Barra   | 138,6      | 15,83     |
| São Paulo | 2244135      | Fazenda das Garrafas                 | São José do Barreiro   | 118,7      | 37,05     |
| São Paulo | 2345067      | Ponte Alta 1                         | São Luís do Paraitinga | 353,7      | 437,87    |
| São Paulo | 2346100      | Ermelino Matarazzo                   | São Paulo              | 143,6      | 50,3      |
| São Paulo | 2147011      | UHE Marimbondo<br>Fazenda Corredeira | Serra Azul             | 135,6      | 39,36     |
| São Paulo | 2347059      | Eden (Pirajibu)                      | Sorocaba               | 157,2      | 258,64    |
| São Paulo | 2347058      | Fazenda São Matheus                  | Tatuí                  | 106,4      | 21,43     |
| São Paulo | 2345001      | Taubaté                              | Taubaté                | 107        | 68,08     |
| São Paulo | 2048020      | Terra Roxa                           | Terra Roxa             | 134,2      | 49,68     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF        | Cód. Estação | Nome Estação                     | Municípios             | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-----------|--------------|----------------------------------|------------------------|------------|-----------|
| São Paulo | 2347005      | Laranjal Paulista                | Tietê                  | 151,3      | 69,92     |
| Sergipe   | 1037078      | Capela                           | Capela                 | 180        | 71,74     |
| Sergipe   | 1137017      | Estância                         | Estância               | 180,6      | 92,42     |
| Sergipe   | 1037007      | Fazenda Belém                    | Itaporanga D'Ajuda     | 181        | 45,51     |
| Sergipe   | 1036063      | Fazenda Cajueiro                 | Japaratuba             | 182        | 38,37     |
| Sergipe   | 1137001      | Salgado                          | Salgado                | 185        | 107,02    |
| Sergipe   | 1037049      | Santa Rosa de Lima<br>(Camboatá) | Santa Rosa de Lima     | 123,5      | 38,91     |
| Tocantins | 949000       | Abreulândia                      | Abreulândia            | 146,2      | 27,27     |
| Tocantins | 1147000      | Almas                            | Almas                  | 147,3      | 85,72     |
| Tocantins | 1249000      | Alvorada                         | Alvorada               | 151        | 61,08     |
| Tocantins | 648001       | Ananás                           | Ananás                 | 201,2      | 209,2     |
| Tocantins | 849002       | Araguacema (Chácara Araguaia)    | Araguacema             | 115        | 45,44     |
| Tocantins | 1249001      | Araguaçu                         | Araguaçu               | 221,3      | 153,05    |
| Tocantins | 749001       | Boa Vista do Araguaia            | Araguaína              | 151,3      | 30,6      |
| Tocantins | 648002       | Piraquê                          | Araguanã               | 160,7      | 86,85     |
| Tocantins | 548000       | Araguatins                       | Araguatins             | 147,7      | 21,26     |
| Tocantins | 749000       | Arapoema                         | Arapoema               | 162,4      | 55,46     |
| Tocantins | 1246001      | Aurora do Norte                  | Aurora do Norte        | 145,8      | 36,8      |
| Tocantins | 748001       | Colônia                          | Bernardo Sayão         | 212        | 69,01     |
| Tocantins | 847002       | Campos Lindos                    | Campos Lindos          | 147,6      | 42,07     |
| Tocantins | 950000       | Caseara                          | Caseara                | 131,1      | 27,31     |
| Tocantins | 848000       | Colinas do Tocantins             | Colinas do Tocantins   | 128        | 24,82     |
| Tocantins | 1247002      | Rio da Palma (Faz. Chuva Manga)  | Conceição do Tocantins | 203,2      | 180,82    |
| Tocantins | 1146000      | Dianópolis                       | Dianópolis             | 125,7      | 39,94     |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código  
e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF        | Cód. Estação | Nome Estação              | Municípios               | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-----------|--------------|---------------------------|--------------------------|------------|-----------|
| Tocantins | 949001       | Dois Irmãos do Tocantins  | Dois Irmãos do Tocantins | 143,8      | 52,76     |
| Tocantins | 1149000      | Dueré                     | Dueré                    | 150        | 23,02     |
| Tocantins | 1048000      | Fátima                    | Fátima                   | 150        | 50,81     |
| Tocantins | 1149001      | Formoso do Araguaia       | Formoso do Araguaia      | 128,2      | 25,18     |
| Tocantins | 747001       | Goiatins                  | Goiatins                 | 119,5      | 28,65     |
| Tocantins | 848001       | Guaraí                    | Guaraí                   | 158        | 97,02     |
| Tocantins | 1149002      | Gurupi                    | Gurupi                   | 102        | 23,23     |
| Tocantins | 847001       | Itacajá                   | Itacajá                  | 181,6      | 92,77     |
| Tocantins | 848002       | Itaporã do Tocantins      | Itaporã do Tocantins     | 134,6      | 23,45     |
| Tocantins | 946003       | Lizarda                   | Lizarda                  | 140,4      | 25,84     |
| Tocantins | 948000       | Miracema do Tocantins     | Miracema do Tocantins    | 193,2      | 224,34    |
| Tocantins | 1047002      | Porto Gilândia            | Monte do Carmo           | 605,3      | 3.301,15  |
| Tocantins | 748003       | Muricilândia              | Muricilândia             | 153,8      | 32,45     |
| Tocantins | 1147001      | Natividade                | Natividade               | 157,4      | 55,21     |
| Tocantins | 748002       | Faz. Primavera – Rod. Bel | Nova Olinda              | 162,9      | 28,77     |
| Tocantins | 1047001      | Novo Acordo               | Novo Acordo              | 146,1      | 33,32     |
| Tocantins | 1048005      | Taquarussu do Porto       | Palmas                   | 125,6      | 27,56     |
| Tocantins | 747009       | Palmeirante               | Palmeirante              | 121,3      | 16,39     |
| Tocantins | 1248003      | Palmeirópolis             | Palmeirópolis            | 138,8      | 19,07     |
| Tocantins | 1048001      | Paraíso do Tocantins      | Paraíso do Tocantins     | 148,2      | 34,18     |
| Tocantins | 948001       | Porto Real                | Pedro Afonso             | 207,4      | 410,53    |
| Tocantins | 1248001      | Colonha                   | Peixe                    | 140        | 61,5      |
| Tocantins | 1147002      | Pindorama do Tocantins    | Pindorama do Tocantins   | 144,5      | 59,05     |
| Tocantins | 1246000      | Ponte Alta do Bom Jesus   | Ponte Alta do Bom Jesus  | 280,5      | 270,74    |

**Tab. A1 – Dados de precipitação máxima, código e nome da estação pluviométrica, com seu respectivo TR calculado por Gumbel.**

| UF        | Cód. Estação | Nome Estação               | Municípios                | Chuva máx. | TR Gumbel |
|-----------|--------------|----------------------------|---------------------------|------------|-----------|
| Tocantins | 1047004      | Ponte Alta do Tocantins    | Ponte Alta do Tocantins   | 120        | 23,58     |
| Tocantins | 1147003      | Porto Alegre               | Porto Alegre do Tocantins | 108,6      | 18,71     |
| Tocantins | 947001       | Mansinha                   | Rio Sono                  | 150,5      | 45,11     |
| Tocantins | 649003       | Porto Lemos                | Santa Fé do Araguaia      | 142,3      | 30,39     |
| Tocantins | 548001       | São Sebastião do Tocantins | S. Sebastião do Tocantins | 144        | 44,87     |
| Tocantins | 1148000      | Fazenda Lobeiro            | São Valério da Natividade | 132        | 33,24     |
| Tocantins | 647000       | Tocantinópolis             | Tocantinópolis            | 163,4      | 53,16     |
| Tocantins | 848003       | Tupiratins                 | Tupiratins                | 178,4      | 71,83     |
| Tocantins | 647001       | Wanderlândia – RD Belém    | Wanderlândia              | 147        | 77,13     |
| Tocantins | 648000       | Xambioá                    | Xambioá                   | 190,4      | 133,43    |

com apenas 76 mm, com TR calculado de 22,38 anos. Enquanto o menor tempo de recorrência calculado foi de 2,91 anos, da estação 1649006, localizada no Estado de Goiás (município de Inhumas), com uma precipitação máxima de 143,3 mm (**ver tabela A1**). Portanto, a maior precipitação máxima que consta na **tabela 1** não está necessariamente vinculada ao maior TR apresentado nela, assim como para a menor precipitação máxima e o menor TR. Para o presente estudo, foram feitos os cálculos na ordem inversa para encontrar o tempo de recorrência (TR) de cada estação, utilizando as equações de Gumbel. Os resultados são apresentados e discutidos a seguir.

Outra observação, é a diferença entre os valores máximos e mínimos de chuva e tempo de recorrência das estações. Era de se esperar que as estações com maiores precipitações máximas tivessem o maior tempo de recorrência, assim como, a menores precipitações máximas com os menores tempos de recorrência. Isso só ocorre nos Estados do Acre e da Paraíba. Os Estados de Alagoas, Amapá, Bahia,

Espírito Santo, Minas Gerais, Pará, Piauí, Rio Grande do Norte, Rondônia, Sergipe e Tocantins possuem apenas maiores precipitações máximas e maiores tempos de recorrência nas mesmas estações.

Os Estados do Amazonas, Ceará, Maranhão, Roraima, Rio Grande do Sul e Santa Catarina possuem apenas as menores precipitações máximas e menores tempos de recorrências nas mesmas estações. Já os Estados do Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Pernambuco, Paraíba, Rio de Janeiro e São Paulo possuem todas as maiores e menores precipitações máximas e os maiores e menores tempos de recorrência em estações divergentes.

O Distrito Federal não está listado na tabela e nem incluído na análise, pois possui apenas uma estação com mais de 15 anos de dados consistidos (estação 1547002, município de Planaltina) com chuva registrada de 145,0 mm no dia 25 de março de 1982 e tempo de recorrência calculado de 175,18 anos. Essa variabilidade dos resultados se dá pois os cálculos utilizados dependem do somatório das

chuvas máximas anuais registradas e da quantidade de dados disponíveis.

## 4. Conclusão

Neste trabalho, são apresentadas as precipitações máximas anuais obtidas com dados consistentes de postos pluviométricos distribuídos por todo o território nacional com no mínimo 15 anos e seus respectivos tempos de retorno estimados com o auxílio da distribuição de Gumbel para valores máximos.

Os resultados obtidos apresentaram grande variabilidade tanto nos tempos de recorrência associados às menores precipitações máximas quanto àqueles associados às maiores precipitações máximas. Isso se justifica pelo somatório dos registros de chuva e a quantidade de dados de cada estação, ou seja, pelo fato de o tempo de recorrência por Gumbel ser calculado através da média de dados e desvio padrão.

Entretanto, ampliando-se o banco de dados consistidos de precipitações e assegurando-se a continuidade desses dados, essa metodologia tem papel relevante no dimensionamento de estruturas de drenagem.

## Referências

- [1] ARAÚJO, L. E. et al. Análise estatística de chuvas intensas da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 23, n. 2, p. 162-169, 2008.
- [2] ZHANG, Q.; CHEN, X.; STEFAN, B. Spatio-temporal variations of precipitation extremes in Yangtze River Basin (1960-2012), China. Atmospheric and climate Sciences. V.1, p.1-18, 2011.
- [3] SILVA, S. R.; ARAÚJO, G. R. DE S. Algoritmo para determinação da equação de chuvas intensas. Revista Brasileira de Geografia Física, v.6, n.5, p. 1371-1383, 2013.
- [4] KHOI, D. N.; TRANG, H. T. Analysis of changes in precipitation and extremes events in Ho Chi Minh city, Vietnam. Procedia Engineering 142, 229-235, 2016.
- [5] ZAHIRI, E. P.; BAMBA, I.; FAMIEN, A. M. KOFFI, A. K.; OCHOU, A. D. Mesoscale extreme rainfall events in West Africa: the case of Niamey (Niger) and Upper Ouémé Valley (Benin). Weather and climate extremes. V.13, p.15-34, 2016.
- [6] Prólogo, T. T.; SILVA NETO, V.L.; CARMO, E. L. D. SILVEIRA JÚNIOR, O.; SILVA, L. L. Equações de chuvas intensas para o sudeste do estado do Tocantins, Brasil. Revista Sítio Novo, v.5, n.2, p.26-35,
  
- 2021.
- [7] QAMAR, M. U.; AZMAT, M. SHAHID, M. A.; GANORA, D.; AHMAD, S. CHEEMA, M. J. M.; FAIZ, M. A. SARWAR, A.; SHAFEEQUE, M.; KHAN, M. I. Rainfall Extremes: a Novel Modeling Approach for Regionalization. Water Resources Management, v.31, n.6, p.1975-1994, 2017.
- [8] PICCININI, M.R.D. Distribuições de probabilidade de precipitação de intensidade máxima para Piracicaba, SP. Piracicaba, 1993. 81 p. Dissertação (M.S.) - ESALQ/JSP.
- [9] FARIA, J. A. M.; SILVA, J. F. R. E.; COELHO, L. DA S. Determinação de equação IDF, utilizando regressão linear em base logarítmica. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20, 2013, Bento Gonçalves. Anais... Rio Grande do Sul: ABRH, 2013. p.2.
- [10] ZHAO, L.; XIA, J.; SOBKOWIAK, L.; WANG, Z.; GUO, F. Spatial Pattern Characterization and Multivariate Hydrological Frequency Analysis of Extreme Precipitation in the Pearl River Basin, China. Water Resources Management. V.26, n.12, p.3619-3637, 2012.
- [11] ARAGÃO, R. SANTANA, G. R. COSTA, C. E. F. F. DA CRUZ, M. A. S.; FIGUEIREDO, E. E. DE SRINIVASAN, V. S. Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuvas diárias. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, n.3. p. 243-252, 2013.
- [12] FADHEL, S.; RICO-RAMIREZ, M. A.; HAN, D. Uncertainty of Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves due to varied climate baseline periods. Journal of hydrology, v.547, p.600-612, 2017.
- [13] STEFFEN, J. L. RONDON, M. A. C. Determinação da vazão de projeto em bacias urbanas. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, XXVII, 2000, Porto Alegre. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2000.
- [14] GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980-2010. Journal of Hydrology. V.494, p.32-42, 2013.
- [15] OLIVEIRA, L. F. C. DE; ANTONINI, J. C. DOS A; FIOREZE, A. P.; SILVA, M. A. S da. Métodos de estimativa de precipitação máxima para o Estado de Goiás. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.12,

- n.6, p.620-625, 2008.
- [16] DUARTE, C. C. NÓBREGA, R. S. COUTINHO, R. Q. Análise climatológica e dos eventos extremos de chuva no município de Ipojuca, Pernambuco. Revista de Geografia (UFPE). v.32, n.2, p.158-176, 2015.
- [17] FERREIRA FILHO, D. F. RODRIGUES, R. S. S. DA SILVA, M. D. N. A. FERNANDES, L. L. CRISPIM, D. L. Aplicação de diferentes métodos de determinação de curvas de intensidade-duração-frequência no município de Belterra no estado do Pará, Brasil. Research, Society and Development, v.9, n. 2, p.e77922073, 2020.
- [18] SILVA NETO, V.L.; VIOLA, M. R. MELLO, C., C. R. D. SILVA, D. D. PEREIRA, S. B.; GIONGO, M. Mapeamento de Chuvas Intensas para o Estado do Tocantins. Revista Brasileira de Meteorologia, v.35, n.1, p.1-11, 2020.
- [19] FREITAS, A. J. SILVA, D. D. PRUSKI, F. F. PINTO, F. A; PEREIRA, S. B. GOMES FILHO, R. R. TEIXEIRA, A. F. BAENA, L. G. N. MELLO, L. T. A; NOVAES, L. F. Equações de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Copasa. 65p, 2001.
- [20] FARIA, R. F. L. ALVES, K. M. A. S. NÓBREGA, R. S. Climatologia da ocorrência de eventos extremos de precipitação na mesorregião do Sertão Pernambucano. Revista Geonordeste, Edição Especial 2, v.1, n.5, p. 930-941, 2012.
- [21] GUMBEL, E. J. Statistics of extremes. New York: Columbia University, 1958. 375 p.
- [22] PINTO, F. R. L. Chuvas intensas no estado de Minas Gerais: análises e modelos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. 87p.
- [23] BAZZANO, M. G.; ELTZ, F. L. F. CASSOL, E. A. Erosividade, coeficiente de chuva, padrões e período de retorno das chuvas de Quaraí, RS. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 31: 1205-1217, 2007.
- [24] RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M. DE; OLIVEIRA, T. S. DE; LOBATO, F. A. de O. Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para localidades de Fortaleza e Pentecoste, Ceará. Scientia Agraria, v.9, n.4, p.511-519, 2008.
- [25] SANSIGOLO, C. A. Distribuição de extremos de precipitação diária, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento em Piracicaba, SP (1917-2006). Revista Brasileira de Meteorologia. v.23, n.3, p.341-346, 2008.
- [26] MORUZZI, R. B. OLIVEIRA, S. C. de. Relação entre intensidade, duração, frequência de chuvas em Rio Claro, SP: métodos e aplicação. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.13, v.9, p. 59-68, 2009.
- [27] BAZZANO, M. G.; ELTZ, F. L. F. CASSOL, E. A. Erosividade e características hidrológicas das chuvas de Rio Grande (RS). Revista Brasileira de Ciência do Solo, 34: 235-244, 2010.
- [28] BACK, A. J. HENN, A. OLIVEIRA, J. L. R. Heavy Rainfall Equations for Santa Catarina, Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 35: 2127-2134, 2011.
- [29] GARCIA, S. S.; AMORIM, R. S. S. COUTO, E. G. STOPPA, W. H. Determinação da equação intensidade-duração-frequência para três estações meteorológicas de Estado de Mato Grosso. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, v.15, n.6, p.575-581, 2011.
- [30] DE PAOLA, F.; GIUGNI, M. TOPA, M. E. BUCHIGNANI, E. Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves due to varied climate projection in African cities. Springerplus. V.3, p.1-18, 2014.
- [31] ABUBAKARI, S. KUSI, K. A.; XIAOHUA, D. Revision of the Rainfall Intensity Duration Frequency Curves for the City of Kumasi-Ghana. The International Journal of Engineering and Science. V.6, n.1, p.51-56, 2017..
- [32] SHRESTHA, A.; BABEL, M. S.; WEESAKUL, S.; VOJNOVIC, Z. Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves under Climate Change Uncertainty: The case of Bangkok, Thailand. Water. V.9, n.2, 2017.
- [33] VU, M. T.; RAGHAVAN, V. S.; LIONG, S. Y. Deriving short-duration rainfall IDF curves from a regional climate model. Natural Hazards. v.85, n.3, p.1877-1987, 2017.
- [34] Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Drenagem urbana: manual de projeto. São Paulo: DAEE/CETESB, 1986. 466 p.
- [35] Jornal Nacional. Chuvas com volume recorde no Brasil são alerta de novo padrão do clima, dizem cientistas. G1 [online]. Brasil, 05 de abril. 2022. Notícia. Disponível em: <<https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2022/04/05/chuvas-com-volume-recorde-no-brasil-sao-alerta-de-novo-padroao-do-clima-dizem-cientistas.ghml>>. Acesso em: 09 de setembro de 2022.
- [36] Agência Nacional De Águas. Hidroweb - Sistemas de Informações Hidrológicas. 2012. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 20 de junho 2020.

# Objetivos do desenvolvimento sustentável: abordagem com recurso à aprendizagem automática e dados de observação da terra

Bruno Ferreira<sup>a</sup>, Muriel Iten<sup>b</sup>, Rui Silva<sup>c</sup>

<sup>a</sup>[baferreira@isq.pt](mailto:baferreira@isq.pt)

<sup>b</sup>[mcitен@isq.pt](mailto:mcitен@isq.pt)

<sup>c</sup>[rgsilva@gmail.com](mailto:rgsilva@gmail.com)

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho é avaliar, compreender e alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) através de dados de Observação da Terra (OT) e técnicas de Machine Learning (ML). Para o caso de estudo selecionado, os parâmetros analisados foram: diversos índices de vegetação e os valores das bandas espectrais, que foram extraídos de dados OT (Sentinel-2) e validados com diferentes abordagens de ML. Os resultados obtidos nas diferentes abordagens sugerem que a melhor técnica de classificação, bem como de regressão corresponde à Fusão de técnicas. No geral, constata-se que a OT desempenha um papel fundamental na monitorização e execução dos ODS, devido à sua relação custo-eficácia, à riqueza da informação, e o sucesso do ML na análise dos dados. A aplicabilidade das técnicas de ML aliadas aos dados de OT provou, com o caso de estudo, que estas podem contribuir para os ODS, assim como para outros fins.

**PALAVRAS-CHAVE:** Objetivos De Desenvolvimento Sustentável; Observação Da Terra; Dados de Observação da Terra; Machine Learning; Agricultura.

**ABSTRACT:** The main objective of this work is to evaluate and understand as well as to achieve the Sustainable Development Goals (SDGs) through Earth Observation (EO) data and Machine Learning (ML) techniques. For the selected case study, the parameters analyzed were: vegetation indices and the spectral bands' values, which were extracted from EO data (Sentinel-2) and validated with different ML approaches. The results obtained in the different ML approaches suggest that the best classification technique, as well as the best regression technique corresponds to the fusion of techniques. Overall, it is observed that EO plays a key role in monitoring and executing the SDGs, due to its cost-effectiveness, the wealth of information and the success of the ML in data analysis. The applicability of ML techniques combined with EO data proved, within the case study, that these can contribute to the SDGs and can be used for other purposes.

**KEYWORDS:** Sustainable Development Goals; Earth Observation; Earth Observation Data; Machine Learning; Agriculture.

## 1. Introdução

O conceito de Desenvolvimento Sustentável (DS), foi desenvolvido em 1960, quando se tornou evidente que os problemas ambientais podem ser causados pelo desenvolvimento econômico e industrial. Em 1972, um primeiro relatório foi publicado e apresentado na ONU, que visava aumentar a compreensão pública dos problemas contemporâneos, abordando o impacto das 5 principais tendências de preocupação global (ou seja, industrialização acelerada, rápido crescimento populacional, desnutrição generalizada, esgotamento de recursos não-renováveis e um ambiente em deterioração), consequências do rápido desenvolvimento do mundo [1]. Este relatório, denominado Relatório Meadows [1], foi fortemente

criticado na época, por advogar o não crescimento para os países em desenvolvimento [2]. Mais tarde, em 1987, o Relatório Brundtland (BR) [3] definiu o conceito de DS como o desenvolvimento que atende às necessidades essenciais do presente sem comprometer as gerações futuras de atender às suas próprias necessidades. Em 2000, os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), estabeleceram 8 objetivos para combater a pobreza e a fome, alcançar a igualdade de gênero e melhorar o setor da saúde [4]. Até 2015, os ODM [5] impulsionaram o progresso do DS, incluindo melhorias nos serviços de saúde e educação, redução da fome e lacunas de equidade e níveis mais elevados de cobertura em intervenções com grandes investimentos [6], [7]. No entanto, permaneceu incompleto, e em 2012 novos objetivos foram estabelecidos, denominados Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável (ODS) [5], definindo 17 objetivos únicos, representando uma chamada urgente para mudar o mundo para um caminho mais sustentável [8], [9].

A Observação da Terra (OT) desempenha um papel importante no apoio ao progresso de muitos dos ODS [10], [11]. De acordo com as Nações Unidas [12], é vantajoso usar dados de OT para produzir e apoiar estatísticas oficiais para complementar as fontes tradicionais de dados. Imagens de satélite podem ser uma das únicas tecnologias com boa relação custo-benefício capazes de fornecer dados em escala global [13], [14]. A enorme quantidade de dados, fornecidos por fontes de OT, precisa ser analisada e processada com métodos e ferramentas apropriados para fornecer indicadores robustos sobre o DS. O crescimento da área de Machine Learning (ML), que está presente no nosso quotidiano [15], [19], está constantemente a criar novas oportunidades para monitorizar e avaliar os esforços humanitários, desempenha um papel essencial na análise de imagens de satélite aplicadas aos ODS. Na verdade, a maioria dos métodos usados para processar dados de OT são baseados em ML [10], [20] dado a sua capacidade de processar enormes quantidades de dados e pelas suas características únicas de classificação e previsão.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: capítulo 1 (o atual), introdução de conceitos relativos aos principais tópicos de investigação deste trabalho, bem como os objetivos do mesmo. O capítulo 2 descreve os métodos e materiais utilizados, bem como os desenvolvimentos práticos e a metodologia a ser aplicada ao caso de estudo. Em seguida, no capítulo 3, o caso de estudo é descrito e os resultados apresentados e discutidos. O capítulo 4 apresenta as principais conclusões deste trabalho, considerando os resultados alcançados.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho pretende explorar novas metodologias e técnicas de ML e OT para otimizar (por exemplo, tempo, custos e recursos) e aprimorar os processos de monitorização para atingir os ODS. Isto é alcançado

através de 2 casos de estudo, onde é necessário mapear e/ou prever recursos naturais, adquirindo dados de OT disponíveis e trabalhando-os com técnicas de ML de forma a apoiar a realização e monitorização dos ODS (2, 8, 9 e 12) [5], bem como os objetivos da Estratégia Europeia para o Espaço (maximizar os benefícios do espaço para a sociedade e a economia da EU; promover um setor espacial europeu inovador e competitivo a nível mundial; reforçar a autonomia da Europa no acesso e utilização do espaço num ambiente seguro e protegido, reforçar o papel da Europa como ator global e promover a cooperação internacional) [21]. O objetivo principal deste trabalho é alcançado através de diferentes objetivos:

- Revisão e análise do estado da arte atual em Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), Observação da Terra (OT) e Machine Learning (ML);
- Análise de fontes de dados de OT europeias e públicas;
- Identificação das técnicas de ML mais adequadas para a análise e classificação de dados e imagens de OT (levantamento na literatura);
- Desenvolvimento e avaliação de técnicas de ML;
- Previsão e classificação de problemas relacionados com a agricultura (ou seja, problemas fitossanitários - culturas saudáveis ou infectadas), para uma produção sustentável e suficiente.

## 1.2 Alinhamento com os objetivos do desenvolvimento sustentável

Os resultados deste trabalho contribuem para os seguintes ODS:

- ODS 2 - Erradicar a fome e promover a agricultura sustentável: através de resultados de ML que permitam a previsão de doenças, qualidade e rendimento das culturas. Assim, é possível alcançar maior eficiência de recursos e produção;
- ODS 8 - Promover uma economia inclusiva e sustentável, emprego e trabalho decente para todos: mantendo os empregos, pois pragas como a da Xylella Fastidiosa colocam em risco vários milhares de empregos na área em toda a Europa;
- ODS 9 - Inovação industrial: através da disponibilização de informação sobre estado da

- cultura, permitindo processos e procedimentos agrícolas mais eficazes, responsáveis e recomendados;
- ODS 12 - Consumo e produção sustentáveis: através de informações que permitem a redução do impacto ambiental ou da pegada ecológica, como a previsão de doenças de árvores, que podem contribuir para a redução dos produtos químicos utilizados na agricultura;

### 1.3 Metodologia aplicada

A base teórica desta pesquisa corresponde a uma metodologia de ação-investigação, pois esta permite ao investigador atuar sobre um problema real, tentando resolvê-lo, à medida que este é estudado/investigado. Este aspecto é crucial para este trabalho devido à novidade dos campos e problemas investigados. O procedimento de pesquisa, bem como a metodologia aplicada (descrita neste capítulo), consideram cinco etapas principais (**figura 1**), a serem, posteriormente, aplicadas e adaptadas ao caso de estudo cuja o objetivo assenta em mapear e prever culturas agrícolas para fornecer apoio à monitorização através de mapas de risco.

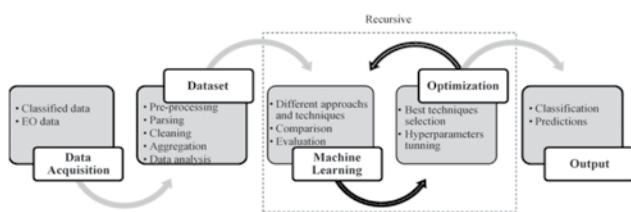


Fig. 1 – Passos da metodologia aplicada.

Tendo estabelecido a base da perspetiva teórica (estado da arte em ODS, técnicas de OT e modelos de ML), a abordagem geral apresentada na **figura 1** é implementada para ambos os casos de estudo. Em primeiro lugar, a aquisição de dados, dos dados classificados para o caso de estudo, é realizada através de contactos com especialistas e investigadores. Os restantes dados (ou seja, dados de input), necessários para construir o conjunto de dados para os algoritmos de ML, são recolhidos de fontes de dados de OT

(europeias e públicas) adequadas ao propósito de cada caso de estudo. Em seguida, para construir o conjunto de dados, algumas tarefas (ou seja, processamento, limpeza, filtragem e agregação de dados de diferentes fontes de dados) devem ser realizadas. De seguida, vários algoritmos de ML são aplicados ao conjunto de dados final, onde uma comparação e seleção das categorias e técnicas de ML mais adequadas é realizada, considerando também, um melhor entendimento sobre quais as características mais relevantes (aqueles que melhor explicam e contribuem para o resultado/objetivo de cada caso de estudo).

Cada modelo de ML selecionado deve ser aplicado 3 vezes, usando 80% dos dados para treinar e 20% para testar as técnicas. De forma garantir uma boa representação e as mesmas condições para cada técnica de ML comparada, os dados devem ser previamente “misturados/embaralhados”. A seleção das categorias de ML usadas neste trabalho (ou seja, técnicas de classificação e regressão) é baseada no tipo de saída (por exemplo, categórica, contínua ou binária) e o resultado esperado em cada caso de estudo (ou seja, classificação ou previsão).

Por último, no que diz respeito ao processo de otimização, todas as abordagens são aplicadas em primeiro lugar sem qualquer otimização (ou seja, usando os valores padrão dos parâmetros). Em seguida, é realizada a otimização das técnicas, onde os parâmetros são ajustados para obter melhores resultados. Após este processo, é produzido o resultado final, onde as técnicas devem ser aplicadas com seus melhores parâmetros.

## 2. Métodos e materiais

Uma revisão sistemática e análise de artigos publicados, em língua inglesa, foi conduzida usando ScienceDirect e Google Scholar. A pesquisa considera tópicos de pesquisa como: *desenvolvimento sustentável, objetivos do desenvolvimento sustentável, observação da Terra e machine learning*. Para explorar uma ampla gama de diferentes aplicações, o nome de vários campos (por exemplo, *agricultura, clima, floresta e prospecção mineral*) foi pesquisado em combinação com

*observação da Terra*, e em comparação com a adição de *machine learning*. A pesquisa foi refinada para sustentar resultados de relevância, considerando as pesquisas e casos de estudo mais recentes, mantendo relatos e acordos históricos.

### 3. Metodologia desenvolvimento para o caso de estudo

De forma a atingir o objetivo principal deste estudo e dar respostas à lacuna identificada por Ferreira [22] (elevada necessidade de novos métodos e técnicas de ML a serem aplicados em dados de OT para a execução e monitorização dos ODS), além das abordagens comuns, novas técnicas de ML são desenvolvidas: (i) fusão de técnicas e (ii) Random Forest baseada na árvore de decisão não binária. Para avaliar os resultados e desempenho destas técnicas, as (i) técnicas de classificação comum e (ii) de regressão, juntamente com a (iii) Árvore de Decisão Não Binária (previamente desenvolvida por Ferreira [23]) são implementadas.

- Técnicas de classificação: Para a avaliação dos resultados, 16 técnicas de classificação da biblioteca *Scikit-learn* (por exemplo, *Random Forest* e *K-Nearest Neighbor*), foram implementadas e aplicadas aos conjuntos de dados. Em seguida, uma comparação e otimização das técnicas é realizada, a fim de escolher a técnica mais adequada para esta aplicação.
- Técnicas de regressão: Esta abordagem é igual à anterior, porém em vez de utilizar técnicas de classificação, utiliza 16 de regressão (por exemplo, *Regression Trees* e *Support Vector Regression*). Para além disso, os dados usados em combinação com as técnicas de regressão são normalizados (ou seja, normalização Min-Max [24], onde os atributos/variáveis são redimensionados para um intervalo entre 0 e 1.), com o propósito de melhorar o seu desempenho [25].
- Árvore de Decisão não binária (NBDT): De forma a superar as limitações inerentes às árvores de decisão ID3 [26] (manipulação de variáveis contínuas) uma

adaptação do algoritmo original foi desenvolvida e implementada utilizando as mesmas métricas, mas permitindo a sua aplicação em dados com variáveis contínuas. Além disso, esta técnica também se mostra eficiente e precisa utilizando apenas uma pequena parte do número de atributos presentes no conjunto de dados original [23].

- Random Forest baseada na árvore de decisão não binária (NBRF): Este algoritmo proposto, foi desenvolvido com base no NBDT [23], apresentado acima, e na RF original [27]. Deste modo, em vez de produzir uma única árvore, produz n árvores e, para cada árvore, uma série de observações e atributos são removidos aleatoriamente, produzindo assim árvores diferentes. Após concluídas todas as árvores, a moda (valor mais frequente) é aplicada nos resultados de todas as árvores para cada observação. Se duas ou mais saídas possuírem o mesmo valor de moda, é selecionado o resultado da árvore com o melhor desempenho.
- Fusão de técnicas: Esta abordagem proposta é baseada no conceito da *Random Forest* (RF) [27], onde cada árvore produzida contribui para o resultado final. Assim, nesta abordagem, diferentes técnicas de classificação ou regressão são utilizadas com um conceito semelhante, o que permite produzir resultados mais confiáveis quando comparado com a aplicação de uma única técnica, pois o outlier de uma técnica será minimizado pelas restantes.

### 4. Caso De Estudo – *Xylella Fastidiosa* em Olivais

Sendo a Europa o maior produtor de azeite do mundo, onde Portugal desempenha um papel fundamental, e o facto da espécie mais afetada pela *Xylella Fastidiosa* (*Xf*) ser as oliveiras, o presente caso de estudo tem como objetivo prever ou classificar áreas com baixo e alto risco de ocorrência de *Xf* em olivais. A identificação da *Xf* é fundamental para a sua erradicação, porém, é bastante difícil, pois os sintomas visuais podem ser confundidos com inúmeras outras doenças e pragas, ou mesmo com seca [28]. Além disso, esta doença pode só manifestar

sintomas visuais após anos da data da infecção. A única forma fidedigna de identificar *Xf* é através de testes de PCR. Devido à sua taxa de disseminação, difícil identificação e ao fato de não haver cura, tornou-se importante entender seu comportamento e ter alertas precoces de áreas com maior risco de *Xf*. Deste modo, os dados de OT têm se tornado cada vez mais utilizados [28], [29], onde o cálculo de índices de vegetação permite a produção de diversos insights sobre avaliações quantitativas e qualitativas da cobertura vegetal, vigor, saúde e dinâmica de crescimento [30].

Neste caso de estudo foi necessário dois tipos de dados: dados *in-situ*: relativos à presença ou ausência de *Xf* e dados OT: relacionados com a condição e saúde das árvores (Sentinel-2).

## 4.1 Resultados

Para comparação das diferentes abordagens, a métrica *True Negative accuracy* foi a escolhida para as técnicas de classificação (considerou-se mais relevante saber com exatidão as áreas em que não há ocorrência da *Xf*, por este motivo a accuracy geral vem em segundo plano) enquanto que para as técnicas de regressão foi o *Root Mean Squared Error*.

Observando os resultados das cinco abordagens (apresentados na **tabela 1**), é possível inferir que, entre todas as abordagens, a melhor para classificação corresponde à Fusão de técnicas de classificação (*True Negative accuracy* de 100% e *accuracy* geral de 92,87%) e Extra Tree Classifier otimizado (*True Negative accuracy* de 99,178% e uma *accuracy* geral de 93,727%); e a melhor técnica de regressão é a Fusão de técnicas de regressão (RMSE 0,148) seguida pelo *K-Nearest Neighbour Regressor* otimizado (RMSE 0,206). As abordagens NBDT e NBRF foram descartadas após os primeiros testes, pois os seus resultados, apesar de positivos (especialmente a NBRF com 84,01% de *accuracy* geral), ficaram aquém das restantes abordagens. Contudo, é importante destacar o fato de que as técnicas propostas (ou seja, Fusão de técnicas e NBRF) alcançaram um desempenho superior

quando comparadas às técnicas anteriores (ou seja, técnicas de classificação e regressão e, NBDT).

**Tab. 1** – resultados das diferentes abordagens de ml.

| Abordagem                      | Accuracy | True Negative Accuracy | True Positive Accuracy | RMSE  |
|--------------------------------|----------|------------------------|------------------------|-------|
| Classificação* (ETC)           | 92,74%   | 99,72%                 | 43,56%                 | -     |
| Classificação Otimizada* (ETC) | 93,73%   | 99,18%                 | 45,78%                 | -     |
| Fusão de Classificação         | 92,87%   | 100%                   | 41,11%                 | -     |
| Regressão* (ETR)               | -        | -                      | -                      | 0,228 |
| Regressão Otimizado* (K-NN R)  | -        | -                      | -                      | 0,206 |
| Fusão de Regressão             | -        | -                      | -                      | 0,148 |
| NBDT** (0,1)                   | 56,71%   | -                      | -                      | -     |
| NBRF** (0,1)                   | 84,01%   | -                      | -                      | -     |

\*resultado da melhor técnica.

\*\* resolução dos dados.

## 4.2 Discussão

Os resultados apresentados acima, possibilitaram a previsão ou classificação e mapeamento de áreas com maior e menor risco de *Xf*, permitem:

- Reduzir os custos de monitorização e de teste;
- Reduzir o uso de produtos químicos;
- Manter empregos;
- Aumento ou mantimento da produção.

A qualidade dos dados tem grande influência no desempenho de todas as técnicas de ML. Alguns dos dados *in-situ* carecem de precisão na localização, levando a ter, não uma única árvore, mas um cluster de árvores, o que significa que os modelos irão prever ou classificar um cluster em vez de uma única árvore. Além disso, existe outro problema relacionado ao tempo de infecção de *Xf*, uma vez que não é possível estabelecer uma data inicial. Os sintomas presentes na árvore podem não ser visualmente detectados por muitos anos. Além destes requisitos, dados balanceados - entre árvores infectadas e não infectadas - também são necessários para treinar os algoritmos de uma forma não tendenciosa.

## 5. Conclusões

O Desenvolvimento Sustentável (DS) é incontornável para o crescimento de qualquer sociedade e país, e que salienta o facto dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), serem cruciais para o futuro do nosso planeta. Este trabalho destaca a importância de alcançar o DS através de dados de Observação da Terra (OT) e técnicas de *Machine Learning* (ML). Os aspetos de monitorização e avaliação relacionados ao DS alavancaram os métodos de recolha de dados OT. A OT é uma tecnologia econômica, capaz de fornecer dados em nível global e assim, possibilitar uma perspetiva diferente dos ODS. Devido à elevada quantidade de dados de OT a sua análise torna-se mais poderosa e possível quando aliada a técnicas de ML. Para este trabalho, dois casos de estudo foram utilizados para demonstrar os benefícios práticos do uso de técnicas de ML em dados de OT para alcançar os ODS.

Os resultados obtidos sugerem que, no Caso de estudo (com o objetivo de mapear e prever o risco ou ocorrência de *Xylella Fastidiosa* em olivais), de todas as técnicas aplicadas, às que se revelaram mais adequadas

foram a Fusão das técnicas de classificação e o Extra Tree Classifier. No que diz respeito à melhor técnica de regressão, foi identificada a Fusão de técnicas de regressão. Estes resultados podem alavancar e otimizar os processos nestes ambientes e indústrias, contribuindo assim para a monitorização e realização de ODS.

Em síntese, é possível afirmar que a metodologia inovadora, apresentada neste estudo - combinação dos dados de OT e técnicas de ML (em particular as técnicas comuns de classificação e regressão, e a técnica de fusão para classificação e regressão), permitem, com sucesso, contribuir e monitorizar os ODS (2, 8, 9 e 12). Por um lado, os dados da OT desempenham um papel fundamental na tradução de problemas do mundo real em variáveis e dados que podem ser utilizados pelas técnicas ML. Além disso, as abordagens ou técnicas de ML propostas (ou seja, *Random Forest* baseada na Árvore de decisão não binária, e a fusão das técnicas) obtiveram um melhor desempenho quando comparadas com as genéricas / originais (ou seja, a Árvore de decisão não binária e, técnicas comuns de classificação e regressão). Por último, os resultados obtidos também sugerem que estas metodologias e técnicas podem ser aplicadas a outros problemas, ambientais e até, a outros ODSS.

## Referências

- [1] D. H. MEADOWS, D. L. MEADOWS, J. RANDERS, AND W. W. BEHRENS III, “The Limits to Growth: A Report to The Club of Rome,” Formaliz. Math., 1972, doi: 10.2478/v10037-009-0024-8.
- [2] M. MESAROVIC AND E. PESTEL, “Mankind at the turning point: The second report of the club of Rome,” Econ. Anal. Policy, 1975, doi: 10.1016/S0313-5926(76)50005-1.
- [3] WCED, “Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development,” 1987. doi: 10.1080/07488008808408783.
- [4] United Nations, “United Nations Millennium Declaration,” Gen. Assem., no. September, p. 9, 2000, [Online]. Available: [http://www.un.org/en/events/pastevents/millennium\\_summit.shtml](http://www.un.org/en/events/pastevents/millennium_summit.shtml).
- [5] United Nations, “Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development,” A New Era Glob. Heal., no. 1, pp. 1–64, 2015, doi: 10.1891/9780826190123.ap02.
- [6] C. MOUCHERAUD ET AL. “Countdown to 2015 country case studies: what have we learned about processes and progress towards MDGs 4 and 5?,” BMC Public Health, vol. 16, no. S2, p. 794, Sep. 2016, doi: 10.1186/s12889-016-3401-6.
- [7] United Nations, The Millennium Development Goals Report 2015. New York: UN, 2015.
- [8] R. G. GUSMÃO CAIADO, W. LEAL FILHO, O. L. G. QUELHAS, D. LUIZ DE MATTOS NASCIMENTO, AND L. V. ÁVILA, “A literature-based review on potentials and constraints in the implementation of the sustainable development goals,” Journal of Cleaner Production, vol. 198. Elsevier Ltd, pp. 1276–1288, Oct. 10, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.102.

- [9] United Nations Development Programme, “Background of the Sustainable Development Goals,” United Nations Development Programme, 2017. <https://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals/background.html> (accessed Feb. 15, 2019).
- [10] A. ANDRIES, S. MORSE, R. MURPHY, J. LYNCH, E. WOOLLIAMS, AND J. FONWEBAN, “Translation of Earth observation data into sustainable development indicators: An analytical framework,” *Sustain. Dev.*, vol. 27, no. 3, pp. 366–376, May 2019, doi: 10.1002/sd.1908.
- [11] GEO, *Earth Observations in support of the 2030 Agenda for Sustainable Development*, no. March. Japan Aerospace Exploration Agency, 2017.
- [12] United Nations, “Earth Observations for Official Statistics: Satellite Imagery and Geospatial Data Task Team report,” no. December, p. 170, 2017, Accessed: May 20, 2019. [Online]. Available: [https://unstats.un.org/bigdata/taskteams/satellite/UNGWG\\_Satellite\\_Task\\_Report\\_WhiteCover.pdf](https://unstats.un.org/bigdata/taskteams/satellite/UNGWG_Satellite_Task_Report_WhiteCover.pdf).
- [13] K. MURTHY, M. SHEARN, B. D. SMILEY, A. H. CHAU, J. LEVINE, AND D. ROBINSON, “SkySat-1: very high-resolution imagery from a small satellite,” Oct. 2014, doi: 10.11117/12.2074163.
- [14] M. XIE, N. JEAN, M. BURKE, D. LOBELL, AND S. ERMON, “Testing the Race Model Inequality in Redundant Stimuli With Variable Onset Asynchrony,” *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, vol. 35, no. 2, pp. 575–579, 2016, doi: 10.1037/a0013620.
- [15] A. ALGHOUL, S. AL AJRAMI, G. AL JAROUSH, G. HARB, AND S. S. ABU-NASER, “Email Classification Using Artificial Neural Network,” 2018. Accessed: Jul. 07, 2020. [Online]. Available: [www.ijeaais.org/ijaer](http://www.ijeaais.org/ijaer).
- [16] D. VAN THIEL AND W. F. F. VAN RAAIJ, “Artificial intelligence credit risk prediction: An empirical study of analytical artificial intelligence tools for credit risk prediction in a digital era,” *Journal of Risk Management in Financial Institutions*, 2019. <https://www.ingentaconnect.com/content/hsp/jrmfi/2019/00000012/00000003/art00008> (accessed Jul. 07, 2020).
- [17] D. TRONG, H. W. LAUW, Y. FANG, AND D.-T. LE, “Modeling contemporaneous basket sequences with twin Modeling contemporaneous basket sequences with twin networks for next-item recommendation networks for next-item recommendation Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Databases and Information Systems Commons, and the E-Commerce Commons Citation Modeling Contemporaneous Basket Sequences with Twin Networks for Next-Item Recommendation,” in *Proceedings of the Twenty-Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Jul. 2018, vol. 3414, no. 3420, p. 3414, Accessed: Jul. 07, 2020. [Online]. Available: [https://ink.library.smu.edu.sg/sis\\_research](https://ink.library.smu.edu.sg/sis_research).
- [18] S. KUMER ROY, A. KANTI GHOSH, A. SIDDIKA ASA, M. PALASH UDDIN, M. RASHEDUL ISLAM, AND M. IBN AFJAL, “Bengali consonants-voice to text conversion using ma-chine learning tool,” 2017. Accessed: Jul. 07, 2020. [Online]. Available: <http://www.ijrcee.org>.
- [19] G. LUGANO, “Virtual assistants and self-driving cars,” Jul. 2017, doi: 10.1109/ITST.2017.7972192.
- [20] T. LANDRY ET AL., “Applying Machine Learning to Earth Observations In A Standards Based Workflow,” in *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Jul. 2019, pp. 5567–5570, doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898032.
- [21] European Comission, “Space Strategy for Europe,” Brussels, 2016.
- [22] B. FERREIRA, M. ITEN, AND R. G. SILVA, “Monitoring sustainable development by means of earth observation data and machine learning: a review,” *Environ. Sci. Eur.*, vol. 32, no. 1, p. 120, Dec. 2020, doi: 10.1186/s12302-020-00397-4.
- [23] B. FERREIRA, R. G. SILVA, AND V. PEREIRA, “Feature selection using non-binary decision trees applied to condition monitoring,” *IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. ETFA*, vol. 1, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1109/ETFA.2017.8247642.
- [24] L. AL SHALABI, Z. SHAABAN, AND B. KASASBEH, “Data Mining: A Preprocessing Engine,” *J. Comput. Sci.*, vol. 2, no. 9, pp. 735–739, Sep. 2006, doi: 10.3844/jcssp.2006.735.739.
- [25] C. CHEN, S. A. VANNOY, A. ADEYEMO, AND H. WIMMER, “Effects of Normalization Techniques on Logistic Regression in Data Science,” *J. Inf. Syst. Appl. Res.*, vol. 12, no. 2, p. 37, Aug. 2019, Accessed: Jan. 03, 2022. [Online]. Available: <http://conisar.org>.
- [26] J. R. QUINLAN, “Induction of Decision Trees,” *Mach. Learn.*, vol. 1, no. 1, pp. 81–106, 1986, doi: 10.1023/A:1022643204877.

- [27] L. BREIMAN, “Random Forests,” 2001, Accessed: Oct. 21, 2017. [Online]. Available: <https://www.stat.berkeley.edu/%7B~%7Dbreiman/randomforest2001.pdf>.
- [28] P. J. ZARCO-TEJADA ET AL., “Previsual symptoms of *Xylella fastidiosa* infection revealed in spectral plant-trait alterations,” *Nat. Plants*, vol. 4, no. 7, pp. 432–439, Jul. 2018, doi: 10.1038/s41477-018-0189-7.
- [29] A. HORNERO ET AL., “Using sentinel-2 imagery to track changes produced by *xylella fastidiosa* in olive trees,” pp. 9060–9062, 2018.
- [30] J. XUE AND B. SU, “Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications,” *J. Sensors*, vol. 2017, pp. 1–17, 2017, doi: 10.1155/2017/1353691.

# Estudo da densificação e formação de fases de cerâmicas de alumina dopadas com nióbio e fluoreto de lítio

Pedro Craveiro Rodrigues dos Santos Credmann<sup>a</sup>, Pedro Henrique Poubel Mendonça da Silveira<sup>b</sup>, Matheus Pereira Ribeiro<sup>c</sup>, Thuane Teixeira da Silva<sup>d</sup>, Alaelson Vieira Gomes<sup>e</sup>

<sup>a</sup>[pedro.craveiro.rodrigues@gmail.com](mailto:pedro.craveiro.rodrigues@gmail.com), Mestrado em Ciência dos Materiais. <sup>b</sup>[pedroo.poubel@gmail.com](mailto:pedroo.poubel@gmail.com), <sup>c</sup>[mpmatheusr@gmail.com](mailto:mpmatheusr@gmail.com), <sup>d</sup>[thuaneteixeiraa@gmail.com](mailto:thuaneteixeiraa@gmail.com), <sup>e</sup>[alaelson@ime.eb.br](mailto:alaelson@ime.eb.br), Aluno de Mestrado-IME / SE-8.

**RESUMO:** As propriedades das cerâmicas avançadas permitem sua adoção como proteção balística, principalmente naquelas compostas de diversas camadas, presente na primeira camada de impacto. Dentre estas cerâmicas, a alumina ( $Al_2O_3$ ) possui menor custo por sua facilidade de obtenção, mas está limitada à baixa flexão e tenacidade à fratura. Desta forma, propõe-se a adoção de aditivos, como a niobia ( $Nb_2O_5$ ) e o fluoreto de lítio ( $LiF$ ), os quais já apresentaram melhorias na sinterização e densificação do material final. O presente trabalho analisou a influência destes compostos na alumina de modo a se observar a formação de fases. Dessa forma, observou-se um incremento de cerca de 14% na densificação. Além disso, constatou-se a ausência de impurezas através da observação das fases no ensaio de DRX. As análises em MEV constatou a diminuição da porosidade e das fases formadas após a sinterização.

**PALAVRAS-CHAVE:** Densificação. Cerâmicas Avançadas. Alumina. Nióbia. Fluoreto de Lítio.

**ABSTRACT:** The properties of advanced ceramics allow their adoption as ballistic protection, especially the multilayered, which are in the first impact layer. Among these ceramics, alumina ( $Al_2O_3$ ) has a lower cost due to its ease of obtaining, but it is limited to low flexion and fracture toughness. Thus, it is proposed the use of additives, such as niobium oxide ( $Nb_2O_5$ ) and lithium fluoride ( $LiF$ ), which have already shown improvements in the sintering and densification of the final material. The present work analyzed the influence of these compounds on alumina in order to observe the phase formation. There was an increase of about 14% in densification. Furthermore, the absence of impurities was verified through the phases in the XRD test. The SEM analyzes found a decrease in porosity and phases formed after sintering.

**KEYWORDS:** Densification. Advanced Ceramics. Alumina. Niobium Oxide. Lithium Fluoride.

## 1. Introdução

As cerâmicas avançadas apresentam vasta aplicação como blindagens balísticas. Isto se deve principalmente por suas propriedades mecânicas somadas às características como baixa densidade, que fornecem uma grande relação resistência mecânica/densidade em comparação com outras classes de materiais usados para o mesmo propósito [1-3].

É possível aplicar as cerâmicas avançadas em blindagens mistas, as quais são compostas de sobreposição de placas de diferentes materiais visando empregar cada uma de suas características para se garantir o melhor desempenho possível. Como os materiais cerâmicos apresentam elevada dureza e resistência à compressão, porém baixa resistência à tração, são utilizados na primeira camada de modo a resistir aos eventos iniciais de compressão provenientes do impacto do projétil [4-6].

Uma das principais cerâmicas utilizadas na fabricação de blindagens é o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), também chamado alumina. Este material é uma das cerâmicas avançadas mais estudadas pelo fato de possuir baixo custo, facilidade de obtenção e por possuir boas propriedades mecânicas, elétricas, térmicas e químicas. Por outro lado, elas possuem limitações de aplicação devido à baixa resistência à flexão e tenacidade à fratura, com sua baixa resistência ao choque térmico [7-9].

Visando reduzir as consequências das limitações citadas, alguns elementos dopantes são inseridos na composição da alumina, o que gera uma melhora na densificação, bem como na resistência à flexão e tenacidade à fratura [10]. Um dos elementos conhecidos por influenciar nas propriedades da alumina é o óxido de niobio e niobio ( $Nb_2O_5$ ). Este óxido, quando adicionado em pequenas frações na composição da alumina, apresentou resultados que comprovam a melhora nas propriedades originais da cerâmica.

Gomes e colaboradores [11] adicionaram 4 e 6% em peso de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  na composição da alumina. Neste estudo verificou-se um aumento na densificação e redução da temperatura de sinterização de 1600 °C para 1400 °C. Já Trindade et al. [12] investigaram a influência do tempo de sinterização na densificação de cerâmicas de alumina dopadas com 4% em peso de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Dessa forma, foi verificado que o aumento no tempo total de sinterização exerce efeito significativo no aumento da densidade.

Outro dopante que pode ser utilizado em conjunto com a  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  é o fluoreto de lítio (LiF). Quando adicionado em pequenas concentrações na alumina com  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , o LiF acelera a difusão durante a sinterização e aumenta a densificação e dureza das cerâmicas de alumina. Alguns trabalhos recentes relataram o uso do LiF como dopante na composição da alumina. Santos et al. [13] investigaram a influência da adição de LiF em concentrações variando de 0% a 1,5%, junto da adição de 4% de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Neste estudo foi constatado que a adição de 0,5% de LiF conferiu melhores propriedades como maior densificação e dureza. Silveira et al. [14] estudaram a influência da ativação das fases formadas pela interação entre a  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  e LiF, através de calcinação destes materiais e depois adicionados na alumina. Foi verificado maiores densificações nos grupos com temperatura de calcinação próximas à temperatura de fusão do LiF.

Dessa maneira, o objetivo deste trabalho se dá em avaliar a densificação de cerâmicas de alumina, dopadas com nióbia e fluoreto de lítio, e analisar a formação de fases após a sinterização.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1 Materiais de partida

Os pós utilizados para a confecção das cerâmicas são:  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  APC 11 SG, da fabricante Alcoa (Brasil);  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , adquirida pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração - CBMM (Brasil); fluoreto de lítio (LiF), obtido pela Dinâmica (Brasil). O ligante orgânico utilizado para conferir resistência ao corpo à verde foi o Polietilenoglicol (PEG 300) da empresa Isofar (Brasil).

A seguir, na **tabela 1**, estão descritas as massas utilizadas para formar a mistura, a densidade de cada item e sua porcentagem em peso total.

**Tab. 1** - Densidade dos elementos constituintes das cerâmicas produzidas.

| Material                | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------------------|--------------------------------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 3,96                           |
| $\text{Nb}_2\text{O}_5$ | 4,60                           |
| LiF                     | 2,65                           |
| PEG                     | -                              |

A densidade das misturas foi determinada a partir da Regra das Misturas, dada a seguir na **equação 1**, onde foram utilizadas as densidades de cada elemento e sua fração em peso, excluindo-se o PEG, eliminado durante a sinterização.

(3)

As porcentagens de adição de cada elemento foram 0,5% em peso de LiF, 4% em peso de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  e 95,5% em peso de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Na **tabela 2**, estão descritas as densidades de cada composição da mistura.

**Tab. 2** - Densidade teórica das amostras obtidas por meio da regra das misturas.

| Material  | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---|--------------------------------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3$                         | 3,960                          |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ - 4% pNn2O5             | 3,985                          |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ -4% pNb2O5 - 0,5% p LiF | 3,979                          |

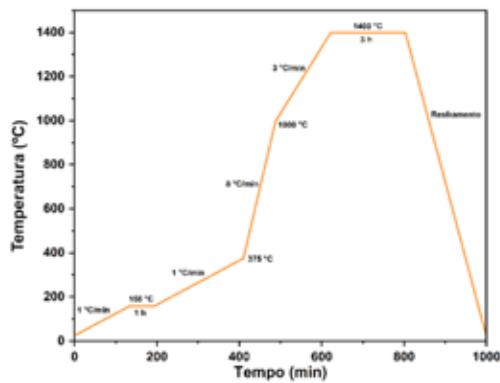
### 2.2 Processamento das amostras

Os materiais de partida foram inseridos em um jarro revestido de alumina. Foram inseridos, junto destes elementos, água deionizada na proporção de 1:1, de modo a facilitar a homogeneização, e bolas de alumina, para uma melhor cominuição dos pós. A moagem e mistura foi feita em moinho de bolas por um período de 8h, seguido de secagem em estufa, em temperatura de 80 °C, por um período de 48h.

Após a secagem, a mistura resultante da moagem foi desaglomerada com o auxílio de pistilo e almofariz, seguido de peneiração para obter granulometria desejada. Foi utilizado um agitador de peneiras por um período de 3 min, adotando-se a peneira DIN 4188 com abertura de 0,255 mm.

A preparação dos corpos cerâmicos à verde foi feita através de prensagem uniaxial a frio por uma prensa SKAY, com capacidade de 30 t. Os discos cerâmicos foram preparados com matrizes de 15 mm de diâmetro para os ensaios de Arquimedes e flexão. A sua prensagem foi realizada em duas etapas: a primeira consistiu de uma leve pré-carga para o assentamento dos pós na matriz e a posterior da prensagem com carga de 30 MPa de modo a dar o formato de pastilha aos pós.

O processo de sinterização das amostras foi realizado convencionalmente, sem a presença controlada. A sinterização foi realizada em um forno JUNG com o processo alcançando o patamar máximo de temperatura de 1400 °C. A rota de sinterização é mostrada a seguir na **figura 1**.



**Fig. 1** – Rota de sinterização utilizada neste estudo.

## 2.3 Caracterização

### 2.3.1 Cálculo de densidade verde

Apartir do valor de densidade teórica encontrada através da Regra das Misturas, foi possível calcular a densidade e densificação dos corpos cerâmicos à verde.

Dessa forma, adotou-se a **equação 2** para determinar a densidade à verde, a partir da relação entre massa e volume da amostra. Já a densificação à verde, mostrada a seguir na **equação 3**, foi calculada a partir da porcentagem da diferença do valor de densidade obtido pela densidade teórica encontrada na regra das misturas da **equação 1**.

$$\rho_v = \frac{m}{V} \quad (2)$$

$$\text{densificação} = \frac{\rho_v - \rho_t}{\rho_t} \times 100 \quad (3)$$

### 2.3.2 Densificação das amostras sinterizadas

O cálculo de densidade e densificação dos corpos cerâmicos sinterizados foi realizado com base na NBR 16667:2017 [15]. Através da equação 4, fundamentada na técnica de Arquimedes, que considera os dados de massa imersa ( $m_i$ ), massa úmida ( $m_u$ ) e massa seca ( $m_s$ ), obtém-se a densidade aparente. Com esse resultado, é possível determinar a densificação do corpo cerâmico através da diferença entre a densidade aparente e a densidade teórica do corpo (**equação 5**).

$$\rho_a = \frac{m_s}{V} \quad (4)$$

$$\text{densificação} = \frac{\rho_a - \rho_t}{\rho_t} \times 100 \quad (5)$$

### 2.3.3 Difratometria de raios X (DRX)

A análise por DRX permitiu a identificação das fases presentes nos pós de partida e nas amostras sinterizadas. O ensaio foi realizado em um difratômetro *Panalytical X'pert MRD*, com radiação de Co-K $\alpha$ , potência de 40KV e corrente de 30 m. A varredura variou entre 5 a 80°.

### 2.3.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A observação da superfície de fratura das amostras sinterizadas foi feita através de um microscópio eletrônico de varredura QUANTA FEG 250. Foi adotado um feixe com potência de 20 kV e 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro. As magnificações variaram entre 2000 e 20.000x, de modo a permitir a examinar as microestruturas. As

amostras foram anteriormente recobertas com ouro para possibilitar a visualização completa.

## 3. Resultados e discussão

### 3.1 Densificação das amostras

A seguir, na **tabela 3**, estão descritos os resultados de densificação à verde dos grupos de amostras analisados.

**Tab. 3** - Resultados de densidade relativa à verde das amostras.

| Material   | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | Densificação à verde (%) |
|--|--------------------------------|--------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 2,174 ± 0,08                   | 54,53 ± 2,09             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /4% pNb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>             | 2,506 ± 0,05                   | 62,80 ± 1,17             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /4% pNb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /0,5% p LiF | 2,322 ± 0,05                   | 58,09 ± 1,42             |

O resultado obtido para a alumina pura, 54,53 %, é compatível com a literatura [16]. É proposto nela que, para uma boa sinterização de corpos compostos de alumina, a densificação dos corpos à verde deve ser de pelo menos 55 %. A adição de nióbia na alumina influenciou consideravelmente na densificação relativa à verde dos corpos cerâmicos, onde foi observado um aumento da densificação para 62,80 %. Por sua vez, a adição de LiF exerceu uma influência pouco relevante no parâmetro das amostras analisadas.

A seguir, na **tabela 4**, estão descritos os resultados de densidade relativa das amostras após a sinterização.

**Tab. 4** - Resultados de densidade e densificação relativa das amostras sinterizadas

| Material   | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | Densificação Relativa (%) |
|--|--------------------------------|---------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 3,289 ± 0,067                  | 83,06 ± 1,69              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /4% pNb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>             | 3,700 ± 0,053                  | 92,84 ± 1,33              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /4% pNb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /0,5% p LiF | 3,836 ± 0,027                  | 96,41 ± 0,68              |

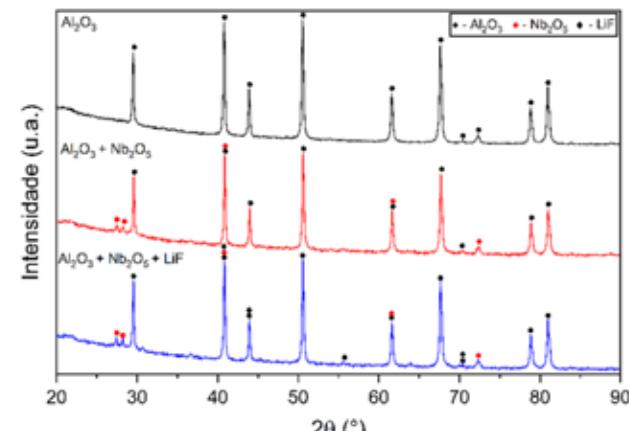
A partir dos valores exibidos na **tabela 4**, é possível observar que a densificação de todos os grupos de amostras apresentou altos valores quando comparados com a literatura. A alumina pura

apresentou densificação de 83,06 %, valor superior ao que Gomes et al. [11] encontrou para o mesmo material sinterizado a 1600 °C (71,8 %).

A adição de nióbia e do fluoreto de lítio provocou um aumento relevante na densificação das cerâmicas de alumina. As amostras com 4 % de nióbia alcançaram uma densificação média de 92,84 %, já as cerâmicas com adição de 4 % de nióbia e 0,5 % de LiF apresentaram densificação de 96,41 %. Estes valores são superiores aos encontrados em diversos outros trabalhos [11-14,17,18]. O aumento na densificação das amostras com nióbia e fluoreto de lítio se dá a partir da sinterização em fase líquida. Neste processo, os dopantes com baixo ponto de fusão formam uma fase eutética que percorre os poros e vazios da cerâmica, o que facilita o processo de difusão dos grãos e a formação dos pescos de densificação [19].

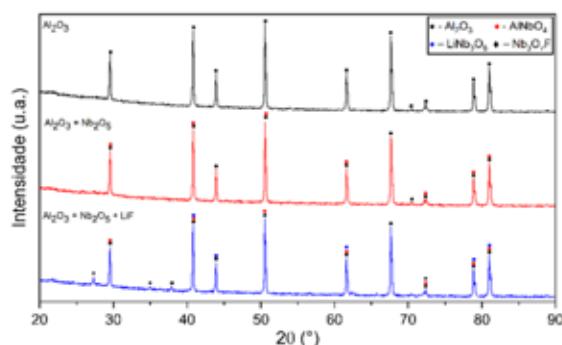
### 3.2 Difratometria de raios X

A seguir, as **figuras 2 e 3** apresentam os difratogramas dos materiais precursores usados e das cerâmicas sinterizadas com suas respectivas fases indicadas.



**Fig. 2** – Difratogramas dos pós de partida.

A partir dos difratogramas da **figura 2**, é possível observar que os materiais precursores não apresentaram impurezas que possam prejudicar a densificação das amostras. Isto se justifica a partir da presença somente das fases relativas à alumina, nióbia e fluoreto de lítio respectivamente.



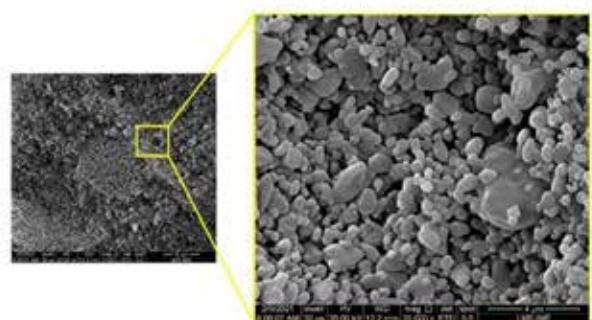
**Fig. 3 – Difratogramas das amostras sinterizadas.**

A partir dos difratogramas da **figura 3**, é possível observar a formação de três fases além da alumina, durante a sinterização. A interação da alumina com a nióbia durante a etapa de homogeneização provoca a formação de niobato de alumínio ( $\text{AlNbO}_4$ ) em altas temperaturas [20]. Por sua vez, a fase niobato de lítio ( $\text{LiNbO}_3$ ) é formada a partir da interação da nióbia em temperaturas acima de 1000 °C, formando fase líquida. A formação de  $\text{LiNbO}_3$  promove um aumento da densificação porque a fase líquida preenche os poros, o que contribui para o aumento da difusão e da densificação da alumina [21]. A fase fluoreto de nióbio ( $\text{Nb}_3\text{O}_7\text{F}$ ) também foi encontrada nas amostras sinterizadas. Esta fase é formada a partir da temperatura de fusão do LiF, onde a interação com a nióbia permite que esta desapareça por completo, restando apenas as fases  $\text{LiNbO}_3$  e  $\text{Nb}_3\text{O}_7\text{F}$  [22].

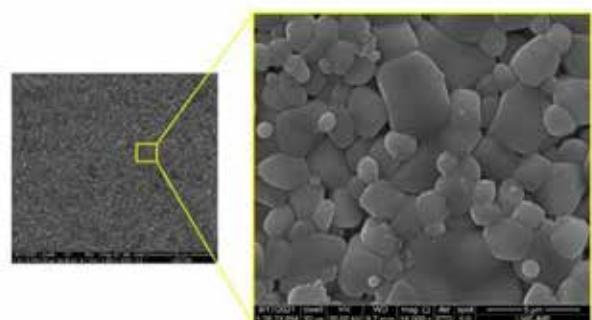
A presença dessas fases é um fator de grande importância no controle da microestrutura da alumina, pois estas fases agem diretamente na aceleração da difusividade dos contornos de grão, promovendo uma maior densificação das cerâmicas [23]. A formação dessas fases preferencialmente nos contornos de grão é a chave para o aumento na densificação, pois o fato do contorno de grão ser uma região de maior energia, os grãos tendem a crescer nessas regiões. Com isso, a área total do contorno de grão diminui, reduzindo a energia livre do sistema [24]. As fases líquidas precipitadas nos contornos de grão bloqueiam o movimento, favorecendo a eliminação dos poros atrelados a esse contorno de grão [24,25].

### 3.2 Veículo Aéreo Não Tripulado

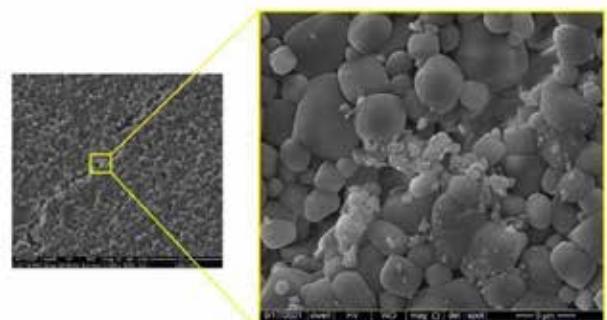
As micrografias de fratura das amostras analisadas são exibidas a seguir nas **figuras 4, 5 e 6**. A Figura 4 mostra a superfície de fratura da alumina com ampliação de 5000x e 20000x.



**Fig. 4 – Micrografias da região de fratura da amostra de alumina pura. Ampliação de 5000 e 20000x.**



**Fig. 5 – Micrografias da região de fratura da amostra de alumina dopada com nióbio. Ampliações de 2000 e 16000 x.**



**Fig. 6 – Micrografias da região de fratura da amostra de alumina dopada com nióbio e fluoreto de lítio. Ampliações de 2500 e 10000x.**

A partir das micrografias da Figura 4, é possível observar que as amostras de alumina pura

apresentaram alta porosidade. Essa alta porosidade se dá pela falta de dopantes na composição da alumina, influenciando diretamente no modo de sinterização.

As amostras de alumina dopadas com nióbia apresentaram um aumento considerável na densificação, que pode ser observado na micrografia da **figura 5** e corroborado pelos resultados de densificação apresentados no tópico 3.2 deste trabalho. A adição de nióbia na alumina formou o  $\text{AlNbO}_4$  que já é relatada em pesquisas anteriores como uma fase que promove a aceleração da difusão dos grãos, se alojando especialmente nos contornos de grão, reduzindo a porosidade do material e promovendo um aumento na densificação [11-14].

As amostras dopadas com nióbia e fluoreto de lítio apresentaram densificações relativas muito altas, quase alcançando 97% de densificação. Nas micrografias da **figura 6**, é possível observar a formação de trincas intergranulares na amostra. Essas trincas se concentraram especificamente nos contornos do grão, percorrendo a amostra em sua totalidade. A quase ausência de poros é dada devido ao preenchimento dos vazios pelas fases eutéticas

formadas durante a sinterização ( $\text{AlNbO}_4$ ,  $\text{LiNbO}_3$  e  $\text{Nb}_3\text{O}_7\text{F}$ ).

## 6. Conclusões

Neste trabalho, cerâmicas avançadas de alumina, dopadas com 4% em de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  e 0,5% em peso de LiF foram produzidas através de sinterização convencional com patamar de temperatura de 1400 °C por 3 h.

Os resultados apresentados mostraram que a adição de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  e LiF aumentaram a densificação da alumina em 14%, devido à formação de fases líquidas que favoreceram a difusão durante a etapa de sinterização das amostras.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Referências

- [1] G.J. APPLEBY-THOMAS, D.C. WOOD, A. HAMEED, J. PAINTER, B. FITZMAURICE, On the effects of powder morphology on the post-communition ballistic strength of ceramics, *Int. J. Impact Eng.* 100 (2017) 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.10.008>.
- [2] X. GUO, X. SUN, X. TIAN, G.J. WENG, Q.D. OUYANG, L.L. ZHU, Simulation of ballistic performance of a two-layered structure of nanostructured metal and ceramic, *Comp. Struct.* 157 (2016) 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.08.025>.
- [3] J. PITTAI, G. SUBHASH, J. ZHENG, V. HALLS, P. JANNOTTI, The rate-dependen fracture toughness of silicon carbide- and boron carbide-based ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.* 35 (2015) 4411–4422. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.08.027>.
- [4] L.M. BRESCIANI, A. MANES, M. GIGLIO, An analytical model for ballistic impacts against ceramic tiles, *Ceram. Int.* 44 (2018) 21249–21261. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.172>.
- [5] K. AKELLA, Studies for Improved Damage Tolerance of Ceramics Against Ballistic Impact Using Layers, *Procedia Eng.* 173 (2017) 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.006>.
- [6] C.E.J. DANCER, J.N.F. SPAWTON, S. FALCO, N. PETRINIC, R.I. TODD, Characterisation of damage mechanisms in oxide ceramics indented at dynamic and quasi-static strain rates, *J. Eur. Ceram. Soc.* 39 (2019) 4936–4945. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.06.054>.
- [7] A. BALASUBRAMANIAN, B. LEVINE, AND A. VENKATARAMANI, DTN Routing as a Resource Allocation Problem, In Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, 2007, pages 373–384, New York, NY, USA. ACM.
- [8] A. EFTEKHARI, B. MOVAHEDI, G. DINI, M. MILANI, Fabrication and microstructural characterization of the novel optical ceramic consisting of  $\square\text{-Al}_2\text{O}_3@\text{amorphous alumina nanocomposite core/shell structure}$ , *J. Eur. Ceram. Soc.* 38 (2018) 3297–3304. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.02.038>.

- [9] S. LAMOURI, M. HAMIDOUCHÉ, N. BOUAQUADJA, H. BELHOUCHE, V. GARNIER, G. FANTOZZI, J.F. TRELKAT, Control of the  $\gamma$ -alumina to  $\alpha$ -alumina phase transformation for an optimized alumina densification, *Bul. La Soc. Esp. Cer. y Vidr.* 56 (2017) 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2016.10.001>.
- [10] P. MILAK, F.D. MINATTO, C. FALLER, A. DE NONI, O.R. KLEGUES MONTEDO, The influence of dopants in the grain size of alumina - A review, *Mater. Sci. Forum.* 820 (2015) 280–284. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.820.280>.
- [11] A.V. GOMES, L.H.L. LOURO, C.R.C COSTA, Ballistic behavior of alumina with niobia additions. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, [S.L.], v. 134, p. 1009-1014, 26 jul. 2006. [Http://dx.doi.org/10.1051/jp4:2006134154](http://dx.doi.org/10.1051/jp4:2006134154).
- [12] W. TRINDADE, M.H.P. SILVA, A.V. GOMES, J.B. CAMPOS, L.H.L. LOURO, Processing and Properties of Niobia-Doped Alumina Sintered at 1400°C. *Mat. Sci. For.* 798 (2014) 665-670. [Http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.798-799.665](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.798-799.665).
- [13] J.L. SANTOS, R.L.S.B. MARÇAL, P.R.R. JESUS, A.V. GOMES, E.P. LIMA, S.N. MONTEIRO, J.B. CAMPOS, L.H.L. LOURO, Effect of LiF as Sintering Agent on the Densification and Phase Formation in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-4 Wt Pct Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Ceramic Compound. *Met. Mat. Trans. A* 48 (2017) 10 4432-4440. [Http://dx.doi.org/10.1007/s11661-017-4271-y](http://dx.doi.org/10.1007/s11661-017-4271-y).
- [14] P.H.P.M. SILVEIRA, P.R.R. JESUS, M.P. RIBEIRO, S.N. MONTEIRO, J.C.S. OLIVEIRA, A.V. GOMES, Sintering Behavior of AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics Doped with Pre-Sintered NB<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and LiF, *Mat. Sci. For.* 1012 (2020) 190-195. [Http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1012.190](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1012.190).
- [15] NBR 16661:2017. Material refratário denso conformado – determinação de volume aparente, volume aparente da parte sólida, densidade da massa aparente, densidade aparente da parte sólida, porosidade aparente e absorção. ABNT. 2<sup>a</sup> edição; 2017
- [16] J.I. Im, Y.J. Yook, FE Analysis of Alumina Green Body Density for Pressure Compaction Process. *J. of the Kor. Cer. Soc.* 43(12) (2006) 859-864. [Http://dx.doi.org/10.4191/kcers.2006.43.12.859](http://dx.doi.org/10.4191/kcers.2006.43.12.859).
- [17] W. TRINDADE, M.H.P. SILVA, A.V. GOMES, C.F.M. CHAGAS, L.H.L. LOURO, J.B. CAMPOS, Comparative Study of Solid-Phase and Liquid-Phase Assisted Sintering of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Doped Alumina, *Mat. Sci. For.* 798-799 (2014) 691-695. [Http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.798-799.691](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.798-799.691).
- [18] W. TRINDADE, M.H.P. SILVA, A.V. GOMES, C.F.M. CHAGAS, L.H.L. LOURO, Effect of Milling Medium on Alumina Additivated with Niobia. *Mat. Sci. For.* 798-799 (2014) 677-681. [Http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.798-799.677](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.798-799.677).
- [19] R.M. GERMAN, P. SURJ, S.J. PARK, REVIEW: liquid phase sintering. *J. Mat. Sci.*, [S.L.], v44(1) (2009) 1-39. [Http://dx.doi.org/10.1007/s10853-008-3008-0](http://dx.doi.org/10.1007/s10853-008-3008-0).
- [20] F. KONG, L. LV, J. WANG, G. JIAO, S. TAO, Z. HAN, Y. FANG; B. QIAN, X. JIANG, Graphite modified AlNbO<sub>4</sub> with enhanced lithium — Ion storage behaviors and its electrochemical mechanism. *Mat. Res. Bul.* 97 (2018) 405-410. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.09.034](http://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.09.034).
- [21] L.O. SVAASAND, M. ERIKSUND, G. NAKKEN, A.P. Grande, Solid-solution range of LiNbO<sub>3</sub>. *J. of Crys. Grow.* 22(3) (1974) 230-232. [Http://dx.doi.org/10.1016/0022-0248\(74\)90099-2](http://dx.doi.org/10.1016/0022-0248(74)90099-2).
- [22] Z. LI, F. HUANG, X. FENG, A. YAN, H. DONG, M. HU, Q. LI, Tunable band alignment in two-phase-coexistence Nb<sub>3</sub>O<sub>7</sub>F nanocrystals with enhanced light harvesting and photocatalytic performance, *Nanotech.* 29(22) (2018) 225605. [Http://dx.doi.org/10.1088/1361-6528/aab68e](http://dx.doi.org/10.1088/1361-6528/aab68e).
- [23] P. MILAK, F.D. MINATTO, C. FALLER, A. NONI-JUNIOR, O.R.K. MONTEDO, The Influence of Dopants in the Grain Size of Alumina - A Review, *Mat. Sci. For.* 820 (2015) 280-284. [Http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.820.280](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.820.280).
- [24] K. BODILOVÁ, D. GALUSEK, P.; Č. VANČÁREK, V. POUCHLÝ, K. MACA, Grain growth suppression in alumina via doping and two-step sintering, *Cer. Int.* 41(9) (2015) 11975-11983. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.05.162](http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.05.162).

# Produção e caracterização de filmes de MoO<sub>3</sub> para aplicação fotocatalítica na região visível do espectro solar

Paulo Victor Nogueira Costa <sup>\*a</sup>, Carlos Luiz Ferreira<sup>b</sup>, Roberto Ribeiro de Avillez<sup>c</sup>, Leila Rosa de Oliveira Cruz<sup>d</sup>

<sup>a</sup>nogueiravp@gmail.com, Instituto Militar de Engenharia

<sup>b</sup>cferreira@ime.eb.br, Instituto Militar de Engenharia

<sup>c</sup>avillez@puc-rio.br, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

<sup>d</sup>leilacruz@ime.eb.br, Instituto Militar de Engenharia

**RESUMO:** A produção de hidrogênio por fotólise da água é uma boa alternativa para substituir o uso de combustível fóssil e atender a demanda energética global. Esse trabalho teve por objetivo obter filmes de MoO<sub>3</sub> com capacidade de realizar a fotólise da água sob luz visível. O efeito da fração de oxigênio na mistura gasosa (O<sub>2</sub>/Ar+O<sub>2</sub>) sobre as fases formadas foi investigado. Os resultados de difração de raios X mostraram que os filmes depositados com 5% de O<sub>2</sub> eram majoritariamente monoclinicos, enquanto que os filmes depositados com fração de oxigênio a partir de 20% eram majoritariamente ortorrômicos. A análise de transmittância desses filmes mostrou um deslocamento no patamar de absorção fundamental, de 400 nm para 750 nm, com o decréscimo da fração de oxigênio, e um consequente decréscimo da banda proibida, de 3,20 eV para 1,51 eV, permitindo a absorção de luz na região visível do espectro solar. Além disso, as imagens de microscopia de força atômica mostraram que a rugosidade e a área superficial aumentaram com o decréscimo da fração de oxigênio. Esses resultados indicam que a fração de oxigênio na mistura gasosa pode ser usada como parâmetro controlador das propriedades óticas, microestruturais e de superfície do material.

**PALAVRAS-CHAVE:** trióxido de molibdênio, propriedades óticas, microestrutura, fotólise, pulverização catódica.

**ABSTRACT:** Hydrogen production from photocatalytic water splitting is a clean and renewable alternative to replace fossil fuels and meet the global demand for energy. Currently. The objective of this work is to obtain thin films of MoO<sub>3</sub> for dissociating water under visible light. The effect of the oxygen fraction in the gas mixture (O<sub>2</sub>/Ar+O<sub>2</sub>) on the crystalline phases was investigated. X-ray diffraction results showed that films with 5%O<sub>2</sub> were mostly monoclinic, while films deposited with oxygen fractions above 20% were mostly orthorhombic. Transmittance analyzes showed a change in the fundamental absorption edge, from 400 nm to 750 nm, as the oxygen fraction decreased. The band gap decreased from 3.20 eV to 1.51 eV, favoring visible light absorption. Atomic force microscopy images showed that the roughness and surface area increased as the oxygen fraction decreased. These results indicate that the fraction of oxygen can be used as a control parameter for the microstructural, optical and surface properties of the material.

**KEYWORDS:** molybdenum trioxide, optical properties, microstructure, photolysis, sputtering.

## 1. Introdução

Um dos maiores desafios tecnológicos no futuro próximo é atender à demanda energética, pois com o aumento contínuo da população global há um aumento no consumo de energia. Esse aumento de consumo atrelado a fontes de energia de combustíveis fósseis aceleraram o aquecimento global. Uma alternativa renovável e limpa para substituir os combustíveis fósseis é o hidrogênio, visto que ele pode ser produzido a partir da separação da água utilizando-se uma energia também renovável, como a solar [1].

A fotocatálise da água para a produção de hidrogênio pode ocorrer a partir do uso de semicondutores. Vários semicondutores como o dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), óxido de zinco (ZnO), trióxido de tungstênio (WO<sub>3</sub>), sulfeto de cádmio (CdS), entre outros, já foram testados como fotocatalisadores, sendo que, até o momento, o mais aceito é o TiO<sub>2</sub>, por ser um material de baixo custo, aceitável e estável em água.

Entretanto, devido ao alto valor de banda proibida (3,2 eV), esse material absorve na região ultravioleta do espectro luminoso, não sendo possível, portanto,

aproveitá-lo para separação da água na região visível do espectro. Além disso, a taxa de recombinação dos pares elétron/buraco é muito elevada nesse material, o que limita sua aplicação como fotocatalisador [2].

Segundo a literatura, os óxidos semicondutores de metais de transição, como os óxidos de molibdênio ( $\text{Mo}_x\text{O}_y$ ), têm se mostrado promissores em diferentes aplicações, tais como: sensores de gás, catálise, baterias de lítio, diodos orgânicos emissores de luz, células solares orgânicas e dispositivos eletrocrônicos [3, 4]. Essa diversidade de aplicações é possível devido à possibilidade de variação da estequiometria, às propriedades óticas e elétricas e à elevada estabilidade em meio aquoso [5].

O  $\text{MoO}_3$  pode ser fabricado como um semicondutor tipo-n ou isolante e apresenta polimorfismo, podendo ser ortorrômbico ( $\alpha$ - $\text{MoO}_3$ ), monoclinico ( $\beta$ - $\text{MoO}_3$ ) ou hexagonal ( $\text{h-MoO}_3$ ). Além disso, o óxido também pode apresentar sub-estequiometrias com diferentes estados de oxidação do Mo e estruturas cristalinas [6, 7], como:  $\text{MoO}_2$  (tetragonal, monoclinico e hexagonal),  $\text{Mo}_4\text{O}_{11}$  (monoclinico e ortorrômbico),  $\text{Mo}_5\text{O}_{14}$  (tetragonal),  $\text{Mo}_8\text{O}_{23}$  (monoclinico) e  $\text{Mo}_9\text{O}_{26}$  (monoclinico e triclinico).

Devido aos diferentes estados de oxidação do molibdênio, o  $\text{Mo}_x\text{O}_y$  possui uma ampla faixa de valores de banda proibida que varia entre 0,92 e 3,2 eV. Assim, o  $\text{MoO}_2$  apresenta uma banda proibida de 0,92 eV [8], enquanto que o  $\text{MoO}_3$  tem uma banda que varia entre 2,8 e 3,2 eV [3, 4, 9], o que lhe confere alta transmitância no espectro visível.

A deficiência em oxigênio pode ser causada pelos defeitos no material, como vacâncias, discordâncias, falhas de empilhamento e contornos de grão, que afetam a ligação local do oxigênio [3, 4]. Além disso, a deficiência de oxigênio também controla as propriedades elétricas do óxido.

Filmes finos de óxidos de molibdênio podem ser preparados por diversas técnicas, como: evaporação térmica, pulverização catódica, deposição por laser pulsado, entre outras [4, 10, 11]. A técnica de pulverização catódica permite a produção de filmes em baixas temperaturas e o controle da concentração de oxigênio no filme fino, variando-se os parâmetros de deposição [12].

As fases cristalinas dos filmes de óxidos de molibdênio depositados por pulverização catódica dependem dos parâmetros de deposição, incluindo a composição da mistura gasosa ( $\text{Ar}+\text{O}_2$ ), no caso de a deposição ser reativa.

O controle das fases presentes nos filmes de  $\text{Mo}_x\text{O}_y$  é importante para a aplicação como semicondutor fotocatalítico. Um semicondutor para ser empregado na fotólise da água precisa ter a energia do orbital molecular não ocupado mais baixo (LUMO) maior do que o potencial de redução da água e a energia do orbital molecular ocupado mais alto (HOMO) menor do que o potencial de oxidação.

Entretanto, nem todos os semicondutores, especificamente os materiais com resposta na região da luz visível, atendem a esse requisito, ou seja, não possuem a banda proibida e o HOMO e o LUMO necessários para a dissociação das moléculas de água. Por esta razão, um sistema fotocatalítico baseado na fotossíntese conhecido como esquema Z tem atraído atenção considerável. Este esquema consiste na combinação de dois semicondutores, um que absorverá a luz na região visível do espectro solar e outro que atenderá ao requisito para a dissociação das moléculas de água [13-15].

Dessa forma, a proposta desse trabalho é otimizar o processamento de filmes finos de  $\text{MoO}_3$  obtidos por pulverização catódica reativa, de forma a obter as fases adequadas para fotocatálise da água na região do visível. O efeito da composição da mistura gasosa ( $\text{Ar}+\text{O}_2$ ) nas fases formadas e, consequentemente, nas propriedades ópticas, microestruturais e morfológicas dos filmes será analisado.

## 2. Materiais e métodos

Os filmes de  $\text{MoO}_3$  foram depositados sobre substratos de vidro sodalime pela técnica de pulverização catódica reativa com radiofrequência (RF) e magneto, em um equipamento projetado no Laboratório de Filmes Finos do Instituto Militar de Engenharia. Um alvo de molibdênio com 3" de diâmetro, da AJA International, foi utilizado. A temperatura do substrato

e a pressão de deposição foram mantidas em 350 °C e  $5 \times 10^{-3}$  Torr, respectivamente. A fração de oxigênio na mistura gasosa ( $O_2/Ar+O_2$ ) variou entre 5 e 70%.

Essa razão foi controlada pelos fluxos de oxigênio e de argônio. A potência de trabalho foi de 165 W, exceto na amostra depositada com 5%, em que foi de 125 W, pois verificou-se que em potências maiores o material depositado era molibdênio metálico. Esses valores foram adotados em função de resultados obtidos em estudos prévios [16]. A espessura dos filmes foi mantida em torno de 500 nm.

A caracterização microestrutural foi realizada em um difratômetro de raios x, modelo D8 Discover da Bruker, com fonte de cobre, tensão de 40 kV e corrente de 40 mA, com a geometria Bragg-Brentano. A caracterização superficial foi realizada em um microscópio de força atômica modelo N-TEGRA Spectra da MT-MDT e a caracterização óptica foi realizada em um espectrofotômetro, modelo Cary 5000 da Varian, na faixa de 200 – 800 nm.

### 3. Resultados e discussões

Os espectros de transmitância dos filmes de MoO<sub>3</sub> depositados em diferentes frações de oxigênio na mistura gasosa, podem ser observados na **figura 1**. Observa-se que os filmes crescidos com quantidades maiores de O<sub>2</sub> apresentam um patamar de absorção fundamental entre 400 e 500 nm e, portanto, não absorvem a maior parte do espectro visível. Já os filmes depositados com a menor fração de O<sub>2</sub> (5%) apresentam patamar de absorção fundamental próximo de 750 nm, o que permite que eles absorvam grande parte da luz visível.

A mudança da região de absorção em função da quantidade de oxigênio na mistura gasosa está relacionada com a estrutura cristalina dos filmes e sugere que os filmes depositados com frações de O<sub>2</sub> acima de 5% sejam formados pela fase ortorrômbica α-MoO<sub>3</sub>. Essa hipótese é sustentada pelos dados da literatura [16,17] que mostram que, para filmes depositados por pulverização catódica reativa acima de 350 oC e com frações de O<sub>2</sub> acima de 10%, a fase ortorrômbica α-MoO<sub>3</sub> é preferencialmente formada, apresentando um patamar de absorção em torno de 400 nm.

A banda proibida dos filmes foi determinada a partir de um gráfico de Tauc, considerando transição indireta [16]. Os valores da banda proibida variaram entre 1,5 eV e 3,2 eV, tal como mostrados na **tabela 1**, estando dentro da faixa relatada na literatura para as fases cristalinas α-MoO<sub>3</sub> (por ex., 3,3 eV [19]) e para a mistura de óxidos sub-estequiométricos MoO<sub>3-x</sub> e o MoO<sub>2</sub> (por ex., 1,5 eV [3,4,18]).

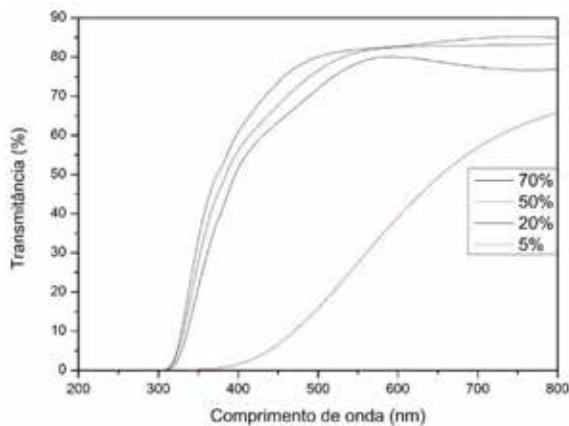
Verifica-se um aumento considerável da banda proibida dos filmes depositados com maiores frações de O<sub>2</sub> em relação àquele depositado com 5% de O<sub>2</sub>. Esse comportamento, já identificado na **figura 1**, está relacionado com a formação da fase ortorrômbica α-MoO<sub>3</sub> em frações maiores de oxigênio. Além da temperatura de crescimento, a formação das fases, α-MoO<sub>3</sub> ou β-MoO<sub>3</sub>, também depende da fração de oxigênio presente no processo de crescimento do MoO<sub>3</sub> [19].

A fase β-MoO<sub>3</sub> tem maior capacidade de estabilizar defeitos de oxigênio e, por isso, seria preferencialmente formada em processos com pequenas frações de oxigênio. A fase α-MoO<sub>3</sub> é preferencialmente formada em frações maiores de oxigênio, porque uma pressão de oxigênio mais alta aumentará a probabilidade de “curar” os defeitos de oxigênio da fase β e, consequentemente, aumentará a probabilidade de formação da fase α. Além disso, é esperado que os filmes depositados em frações maiores de oxigênio tenham composição mais próxima da estequiométrica.

A variação da banda proibida também pode ser atribuída à variação da concentração das vacâncias de oxigênio [3]. Essas vacâncias são criadas durante a deposição dos filmes de MoO<sub>3</sub>, que criam estados de defeito e estreitam a banda proibida [3]. Esses defeitos são responsáveis pela formação de estados localizados. Quando a atmosfera é rica em oxigênio, essas vacâncias desaparecem e há um claro desvio da banda proibida para regiões de maiores energias.

Portanto, nota-se a capacidade de obter um deslocamento no patamar de absorção fundamental, da região do ultravioleta para região do visível, variando-se a fração de oxigênio, possibilitando a produção da junção “esquema Z” com um filme que absorverá no visível e outro, com a maior banda proibida, que realizará a quebra da água [20, 21].

**Fig. 1** – Transmitância de filmes de MoO<sub>3</sub> depositados por pulverização catódica com diferentes frações de oxigênio na mistura gasosa



**Tab. 1** – Banda proibida dos filmes de MoO<sub>3</sub> depositados por pulverização catódica com diferentes frações de oxigênio na mistura gasosa.

| PRESSÃO DE O <sub>2</sub> | Eg (eV) |
|---------------------------|---------|
| 5%                        | 1,51    |
| 20%                       | 3,20    |
| 50%                       | 2,96    |
| 70%                       | 2,96    |

O efeito da fração de oxigênio nas fases formadas nos filmes depositados pode ser verificado nos diafratogramas de raios x da **figura 2**. Os difratogramas mostram que independentemente da fração de oxigênio todos os filmes são cristalinos.

O difratograma dos filmes de MoO<sub>3</sub> fabricados com 5% de O<sub>2</sub> mostra filmes majoritariamente a fase monoclinica β-MoO<sub>3</sub>, com a presença de pequenas quantidades de óxidos sub-estequiométricos, enquanto que as amostras produzidas acima desse percentual de oxigênio são quase que exclusivamente formadas pela fase ortorrômbica α-MoO<sub>3</sub>. As fichas utilizadas para identificação foram PDF 85-2405, para a fase β, e PDF 35-0609, para a fase α. Observa-se que o aumento da fração de oxigênio favoreceu o crescimento da fase estável α-MoO<sub>3</sub>, tal como reportado na literatura [3, 4, 16, 19].

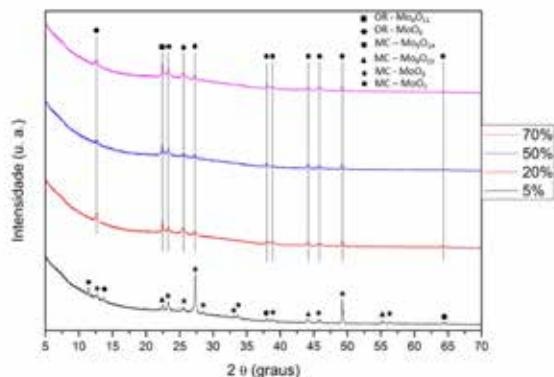
As pequenas quantidades de óxidos de molibdênio com fórmula Mo<sub>y</sub>O<sub>x</sub> foram identificadas com x/y ≈ 2,80. Esses óxidos foram identificados pelo software EVA como sendo: Mo<sub>4</sub>O<sub>11</sub>, ortorrômbico, Mo<sub>5</sub>O<sub>14</sub>, monoclinico; Mo<sub>8</sub>O<sub>23</sub>, monoclinico. Assim, para filmes formados com 5% de oxigênio, constata-se a presença de óxidos de molibdênio sub-estequiométricos com a estrutura monoclinica, a mesma da fase estável β-MoO<sub>3</sub>, enquanto que para frações de oxigênio a partir de 20%, observa-se, em uma quantidade muito pequena, a presença do óxido sub-estequiométrico Mo<sub>4</sub>O<sub>11</sub> com a estrutura ortorrômbica, a mesma da fase estável α-MoO<sub>3</sub>.

É reportado pela literatura que pequenas frações de oxigênio favorecem a formação de filmes sub-estequiométricos [3,20], o que era esperado para o filme depositado em 5%. Contudo, filmes depositados com 70% de O<sub>2</sub> ainda apresentaram uma pequena quantidade do óxido Mo<sub>4</sub>O<sub>11</sub>, ou seja, esse percentual de O<sub>2</sub> não foi suficiente para produção de óxido de molibdênio estequiométrico.

Portanto, a menor fração de oxigênio (5%) foi suficiente para produção de filmes majoritariamente monoclinicos, enquanto que frações maiores de oxigênio foram suficientes para produção de filmes quase que exclusivamente ortorrômicos.

Esses resultados mostram a possibilidade de se fabricar um uma junção semicondutora do tipo “esquema Z”, β-MoO<sub>3-x</sub>/α-MoO<sub>3</sub>, bastando promover, durante a deposição dos filmes, a transição das fases na mesma temperatura e na mesma pressão de trabalho, apenas variando a fração de oxigênio durante a deposição.

Nesse esquema, o filme depositado com a menor fração de oxigênio absorveria a luz na região visível do espectro solar enquanto que o filme depositado com 20% de oxigênio, que apresentou a maior banda proibida, seria responsável pela reação de dissociação das moléculas de água. Uma análise de voltametria cíclica poderá informar a posição dos níveis de energia HOMO e LUMO de cada filme e assim confirmar se o filme depositado com a maior banda proibida tem o requisito necessário para a fotólise.



**Fig. 2** – Difratograma de raios X de filmes MoO<sub>3</sub> depositados por pulverização catódica com diferentes frações de oxigênio na mistura gasosa

O efeito da fração de oxigênio na superfície dos filmes pode ser verificado nas imagens de microscopia de força atômica (MFA) da **figura 3**. As imagens mostram que há uma diminuição na rugosidade dos filmes com o aumento da fração de oxigênio, como pode ser verificado na **tabela 2**.

Pode-se atribuir este comportamento à potência de deposição. A imagem a) representa o filme depositado com 5% de oxigênio, o qual foi acrescido na menor potência (125 W), enquanto que as demais representam os filmes que foram depositados na maior potência (165W). Em pulverização catódica, a energia com a qual os átomos chegam ao substrato pode ser oriunda da potência de deposição e da temperatura de substrato. Então, para o filme depositado na menor potência, os átomos adsorvidos na superfície do substrato não tiveram energia suficiente para se organizarem de maneira ordenada, resultando em um crescimento desordenado e rugoso.

Por outro lado, os átomos adsorvidos oriundos de uma maior potência de deposição possuem energia suficiente para um crescimento ordenado, resultando em uma superfície suave. Outros autores relataram um crescimento similar em filmes de MoO<sub>3</sub> depositados com potência de 125 W, resultando em uma superfície rugosa, como mostrada na **figura 3.a)** [16].

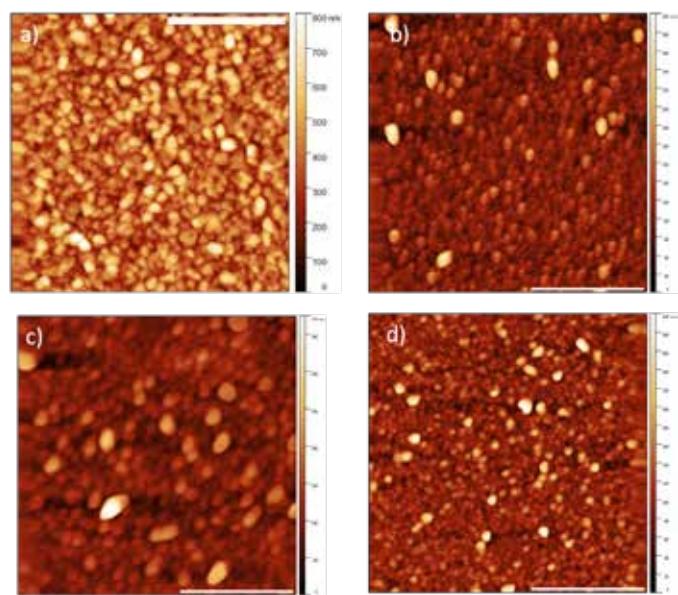
Os valores da rugosidade quadrática média variaram entre 106,9 nm e 28,6 nm, tal como mostrados na

**tabela 2**. O filme depositado com 5% apresentou a maior rugosidade, 106,9 nm, valor superior ao relatado na literatura para MoO<sub>3</sub> depositado por pulverização catódica [22, 23]. Assim, a baixa transmitância mostrada na **figura 1** pode ser atribuída à maior rugosidade do filme depositado com 5% de O<sub>2</sub>.

Apesar de esse filme ser utilizado somente para a absorção da luz visível, essa rugosidade elevada pode ser prejudicial para a produção da junção esquema Z, pois, pode adicionar pontos de recombinação dos portadores de carga na interface entre os dois filmes. Além disso, a rugosidade pode servir como um centro de espalhamento da luz, promovendo reflexão difusa e múltiplas reflexões na superfície [22].

Os filmes depositados a partir de 20% apresentaram uma rugosidade dentro da faixa relatada na literatura [22, 23] sendo que o aumento da fração de oxigênio não foi suficiente para elevar a rugosidade do filme que será responsável por realizar a quebra da água.

Também é interessante notar que os grãos dos filmes de MoO<sub>3</sub> depositados com 5% de O<sub>2</sub> cresceram com uma morfologia esférica, a qual favorece o aumento da área superficial [16].



**Fig. 3** – Imagem de AFM de filmes de MoO<sub>3</sub> depositados por pulverização catódica com diferentes frações de oxigênio na mistura gasosa: a) 5%; b) 20%; c) 50%; d) 70%

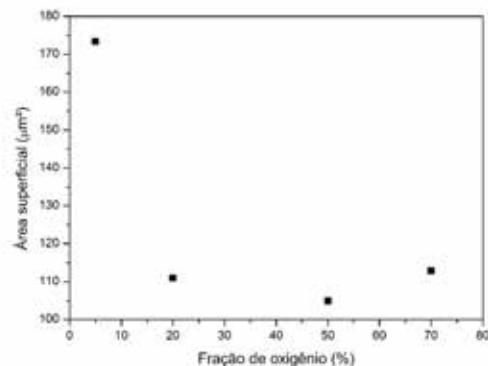
**Tab. 2** – Rugosidade quadrática média de filmes de  $\text{MoO}_3$  depositados por pulverização catódica com diferentes frações de oxigênio na mistura gasosa.

| PRESSÃO DE $\text{O}_2$ | Rugosidade quadrática média (nm) |
|-------------------------|----------------------------------|
| 5%                      | 106,9                            |
| 20%                     | 28,6                             |
| 50%                     | 35,6                             |
| 70%                     | 33,6                             |

A partir dos resultados de MFA foi possível determinar a área superficial dos filmes, mostrada na **figura 4**. Pode-se notar que o filme depositado com a menor fração de oxigênio possui a maior área de superfície, de acordo com os valores obtidos para a rugosidade quadrática média. Pode-se atribuir essa maior área de superfície à morfologia esférica dos grãos, como discutido anteriormente. O filme com 5% é o melhor em área de superfície, mas como não realizará a quebra da água, essa área pode ser prejudicial para a junção “esquema Z”. Por outro lado, os filmes depositados com 20% e 70% possuem uma área de superfície em torno de  $110 \mu\text{m}^2$ , indicando que filmes majoritariamente ortorrômicos possuem uma área de superfície menor.

A reação de dissociação da água é uma reação que ocorre na superfície do material e, por isso, uma das características que otimizam essa reação é a área superficial do semicondutor fotocatalítico. Devido a isso buscam-se materiais que possuem grande área superficial, pois quanto maior a área superficial maior será a interação entre o semicondutor e a água [24, 25]. Os filmes depositados com 20% e 70%, que apresentaram a maior área superficial, dentre os ortorrômbicos, serão investigados quanto aos níveis de energia HOMO e LUMO, bem como a eficiência fotocatalítica.

Os resultados apresentados mostram que os filmes depositados com 5% de  $\text{O}_2$  são promissores para absorver a luz solar, enquanto que os filmes depositados com 20% e 70% de  $\text{O}_2$  são promissores para separar a água. Análises adicionais, como voltametria cíclica e taxa reacional de fotocatálise, serão feitas para confirmar essa hipótese.



**Fig. 4** – Área superficial de filmes de  $\text{MoO}_3$  depositados por pulverização catódica com diferentes frações de oxigênio na mistura gasosa.

## 4. Conclusão

Filmes de  $\text{MoO}_3$  foram depositados por pulverização catódica reativa com RF em diferentes frações de oxigênio. Os filmes depositados com 5% de  $\text{O}_2$  são majoritariamente formados pela fase monoclinica  $\beta\text{-MoO}_3$  com banda proibida de 1,51 eV. A fase ortorrômica  $\alpha\text{-MoO}_3$  foi obtida para filmes depositados a partir de 20% de  $\text{O}_2$ , com banda proibida variando de 2,96 a 3,20 eV. Também foi verificado um aumento da rugosidade dos filmes e da área de superfície com o decréscimo da fração de oxigênio.

Os resultados mostraram que a fração de oxigênio pode ser usada como parâmetro de controle da estrutura cristalina dos filmes, da morfologia superficial e do patamar de absorção óptica. Com o intuito de fabricar uma heterojunção do tipo esquema Z, os filmes depositados com 5%, que são ideais para absorver a radiação visível, e os filmes depositados com 20% e 70% de  $\text{O}_2$ , que são promissores para separar a água, serão investigados quanto à eficiência fotocatalítica e à localização dos níveis de energia HOMO e LUMO.

## Agradecimentos

Esse trabalho foi financiado pela CAPES-PROEx. Os autores agradecem ao LDRX-PUC e ao LRPMN -PUC, pelas análises de DRX e AFM.

## Referências

- [1] JAFARI, T. et al. Photocatalytic Water Splitting-The Untamed Dream: A Review of Recent Advances. *Molecules*, v. 21, p. 900, 2016.
- [2] CHEN, Y. et al. Single-crystalline orthorhombic molybdenum oxide nanobelts: synthesis and photocatalytic properties. *Cryst Eng Comm*, v. 12, p. 3740-3747, 2010.
- [3] ARFAOUI, A. et al. Effect of annealing in a various oxygen atmosphere on structural, optical, electrical and gas sensing properties of Mo<sub>x</sub>O<sub>y</sub> thin films. *Optical Materials*, v. 45, p. 109-120, 2015.
- [4] BORAH, D. J. et al. Effect of thickness and post deposition annealing temperature on the structural and optical properties of thermally evaporated molybdenum oxide films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, v. 93, p. 111-122, 2019.
- [5] JULIEN, C. et al. Synthesis and characterization of flash-evaporated MoO<sub>3</sub> thin Films. *Journal of Crystal Growth*, v. 156, p. 235-244, 1995.
- [6] DE MELO, O. et al. Optical and electrical properties of MoO<sub>2</sub> and MoO<sub>3</sub> thin films prepared from the chemically driven isothermal close space vapor transport technique. *Journal of Physics Condensed Matter*, v. 31, 2019.
- [7] RASMUSSEN, F. A., THYGESEN, K. S. Computational 2D Materials Database: Electronic Structure of Transition-Metal Dichalcogenides and Oxides. *J. Phys. Chem.*, v.119, p. 13169-13183, 2015.
- [8] NISHANTHIA, S. T. et al. New low temperature environmentally friendly process for the synthesis of tetragonal MoO<sub>2</sub> and its field emission properties. *Applied Surface Science*, v. 467, p. 1148-1156, 2019.
- [9] SHAKIR, I. et al. MoO<sub>3</sub>-MWCNT nanocomposite photocatalyst with control of light harvesting under visible light and natural sunlight irradiation. *J. Mater. Chem.*, v. 22, p. 20549, 2012.
- [10] DOMÍNGUEZ, A. et al. Molybdenum oxide 2D flakes: role of thickness and annealing treatment on the optoelectronic properties of the material. *J. Mater. Sci.*, v. 53, p. 6147-56, 2018.
- [11] INZANI, K. et al. Electronic properties of reduced molybdenum oxides. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, v. 19, p. 9232-45, 2017.
- [12] MEHMOOD, H. et al. Electrical, optical and surface characterization of reactive RF magnetron sputtered molybdenum oxide films for solar cell applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, v. 101, p. 46-46, 2019.
- [13] GUO, Y. et al. A Z-scheme photocatalyst for enhanced photocatalytic H<sub>2</sub> evolution, constructed by growth of 2D plasmonic MoO<sub>3-x</sub> nanoplates onto 2D g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanosheets. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 567, p. 213-223, 2020.
- [14] KHAN, A. et al. Facile Synthesis of a Z-Scheme ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub>/MoO<sub>3</sub> Heterojunction with Enhanced Photocatalytic Activity under Visible Light Irradiation. *ACS Omega*, v. 5, p. 8188-8199, 2020.
- [15] MEI, F. et al. A Z-scheme Bi<sub>2</sub>MoO<sub>6</sub>/CdSe-diethylenetriamine heterojunction for enhancing photocatalytic hydrogen production activity under visible light. *Dalton Trans.*, v. 48, p. 1067, 2019.
- [16] GONÇALVES, H. P. et al. Caracterização óptica e microestrutura de filmes finos de MoO<sub>3</sub> para aplicação em células solares orgânicas. *Revista Matéria*, v. 26, p. e13083, 2021.
- [17] CARCIA, P., McCARRON. Synthesis and properties of thin film polymorphs of molybdenum trioxide. *Thin Solid Films*, v. 155, p. 53-63, 1987.
- [18] DUKSTIENE, N., SINKEVICIUTE, D., GUOBIEINE, A. Morphological, structural and optical properties of MoO<sub>2</sub> films electrodeposited on SnO<sub>2</sub>|glass plate. *Cent. Eur. J. Chem.*, v. 10, p. 1106-1118, 2012.
- [19] KODAN, N. et al. Favorable band edge alignment and increased visible light absorption in  $\beta$ -MoO<sub>3</sub>/ $\alpha$ -MoO<sub>3</sub> oxide heterojunction for enhanced photoelectrochemical performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 43, p. 15773-15783, 2018.
- [20] LI, Y. et al. Oxygen vacancy-rich MoO<sub>3-x</sub> nanobelts for photocatalytic N<sub>2</sub> reduction to NH<sub>3</sub> in pure water. *Catal. Sci. Technol.*, v. 9, p. 803-810, 2019.
- [21] SILVA, C. A. A., SILVA, C. F., MATOS, J. M. E. Synthesis, characterization and application of molybde-

- num trioxide in photocatalysis of synthetic textile effluent. Cerâmica, v. 64, p. 454-465, 2018.
- [22] FANTINI, M., TORRIANI, I. The compositional and structural properties of sprayed  $\text{SnO}_2:\text{F}$  thin films. Thin Solid Films, v. 138, p. 255-265, 1986.
- [23] PONCE-MOSSO, M. et al. Enhanced photocatalytic activity of amorphous  $\text{MoO}_3$  thin films deposited by rf reactive magnetron sputtering. Catalysis Today, v. 349, p. 150- 158, 2020.
- [24] SONG, Y., K. et al. Preparatio of Transparente Particulate  $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$  and  $\text{WO}_3/\text{TiO}_2$  Films and Their Photocatalytic Properties. Chem. Mater., v. 13, p. 2349-2355, 2001.
- [25] SINGH, J., SONI, R. K. Fabrication of hydroxyl groupenriched mixedphase  $\text{TiO}_2$  nano flowers consisting of nano flakes for efficient photocatalytic activity. Journal of Materials Science: Materials in Electronic, v. 31, 2020.
- [26] SALGADO, B. C. B., VALENTINI, A. Síntese e Desempenho Fotocatalítico de Esferas Macroporosas de Sílica Revestidas com Dióxido de Titânio. Revista Virtual de Química, v. 7, p. 2291-2310, 2015.

# Algoritmo de alinhamento em movimento para um sistema de navegação inercial do tipo strapdown

Ana Cristina Vieira Gonçalves<sup>\*a</sup>, Marcos Ferreira Duarte Pinto<sup>\*b</sup>, Paulo Cesar Pellanda<sup>\*c</sup>,  
<sup>\*a</sup>[ana.vieira@ime.eb.br](mailto:ana.vieira@ime.eb.br), <sup>b</sup>[mpinto11310@gmail.com](mailto:mpinto11310@gmail.com), <sup>c</sup>[pcpellanda@ieee.org](mailto:pcpellanda@ieee.org)

**RESUMO:** Este artigo apresenta um novo algoritmo para o alinhamento em movimento de um Sistema de Navegação Inercial do tipo Strapdown (SNIS), com base em um método clássico da literatura. A novidade consiste na introdução de estimativas da repetibilidade dos biases dos sensores iniciais e dos ângulos de altitude de rolagem e arfagem, a partir de observações indiretas e sem auxílio de sensores externos de altitude. O algoritmo permite reiniciar o SNIS sem a necessidade de parar o veículo ou interromper a sua operação durante a navegação, recuperando a precisão do sistema com o veículo em movimento. O alinhamento em movimento evita atrasos de missões ou exposições temporárias do veículo em ambientes perigosos causados por paradas forçadas para alinhamento após a ocorrência de falhas momentâneas, quedas de energia ou desligamentos para manutenção preventiva. O algoritmo é executado em duas etapas, alinhamento grosso e fino, ambos usando filtros de Kalman na estimativa dos biases dos sensores iniciais e dos erros das variáveis navegacionais do sistema. Com a estimativa da repetibilidade dos biases, o SNIS calcula os dados de posição, velocidade e de altitude com maior precisão, a cada período de amostragem. O algoritmo desenvolvido foi validado por meio de simulações da navegação de um navio de guerra.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistemas iniciais. Alinhamento em movimento. Sensores iniciais.

**ABSTRACT:** This paper presents a new algorithm for the in-motion alignment of a Strapdown Inertial Navigation System (SNIS), based on a classic method in the literature. The novelty is the introduction of estimates of the repeatability of biases of inertial sensors and roll and pitch attitude angles, based on indirect observations and without the aid of external attitude sensors. The algorithm allows restarting the SNIS without stopping the vehicle or interrupting its operation during navigation, recovering the system's accuracy while it is in motion. In-motion alignment avoids mission delays or temporary exposure of the vehicle in hazardous environments caused by forced stops for alignment after the occurrence of momentary failures, power outages, or shutdowns for preventive maintenance. The algorithm is performed in two steps, coarse and fine alignment, both using Kalman filters to estimate the biases of inertial sensors and the errors of the navigational variables of the system. With the estimation of the repeatability of biases, the SNIS calculates the position, velocity, and attitude data with greater precision at each sampling period. The developed algorithm was validated through simulations of warship navigation.

**KEYWORDS:** Inertial systems. In-motion alignment. Inertial sensors.

## 1. Introdução

Um Sistema de Navegação Inercial Strapdown (SNIS), estima os parâmetros ou variáveis navegacionais descritas pelas grandezas de posição, velocidade e altitude de um veículo ou plataforma, onde se encontra instalado. Um dos parâmetros que compõem a informação de posição é a altitude, ou seja, o deslocamento na vertical local, de veículos aéreos ou terrestres. Para veículos aquáticos e subaquáticos, em geral, a altitude se refere ao *heave* (movimento linear vertical) e à profundidade, respectivamente. Ao longo do texto, o termo altitude será utilizado genericamente para indicar esses parâmetros.

Um SNIS executa, primeiramente, o processo de alinhamento por meio da estimação dos valores iniciais das variáveis navegacionais, ou seja, as condições iniciais dos integradores das equações diferenciais que modelam a dinâmica dos parâmetros de navegação. Em seguida, conhecidas as condições iniciais, as equações diferenciais são integradas no processo de navegação e a estimativa das variáveis navegacionais iniciada e realizada continuamente. O processo de alinhamento pode ser realizado com o SNIS parado ou em movimento.

O alinhamento em movimento permite reiniciar um SNIS sem a necessidade de parar o veículo após uma interrupção dos cálculos das variáveis navegacionais, seja por queda de energia, mau funcionamento, troca de sensores ou componentes,

ou por outras razões. Em geral, o alinhamento em movimento é realizado por meio do uso de medidas dos parâmetros de navegação fornecidos por fontes externas instaladas no veículo, tais como um SNIS suplementar e/ou por sensores de auxílio. Entretanto, os erros aleatórios presentes nos sinais medidos pelo SNIS suplementar ou pelos sensores de auxílio, somados aos erros dos sensores iniciais do SNIS em alinhamento, passam para as condições iniciais das equações dinâmicas de navegação e se propagaram ao longo do tempo, causando derivas crescentes nos valores calculados das variáveis navegacionais. Para reduzir os erros das condições iniciais, pode ser introduzido um Filtro de Kalman (FK) no processo de alinhamento.

O FK é um filtro estatístico desenvolvido para aplicação no contexto do espaço de estados que usa, na sua estrutura, a matriz de transição de estados das equações de estados e a matriz de sensibilidade ou de observação das equações de saídas ou de medidas dos estados. No processo de alinhamento em movimento, os estados do FK são definidos como a diferença entre os valores calculados pelas equações do alinhamento e as medidas fornecidas pelos sensores de auxílio. Esta definição implica que o modelo dinâmico dos estados é descrito por equações diferenciais dos erros das variáveis de navegação do processo de alinhamento, e que as equações de observação dos estados são função das medidas fornecidas pelos sensores de auxílio.

O alinhamento em movimento é executado em duas etapas: alinhamento grosso e fino. Para cada etapa do processo, é utilizada uma estrutura diferente para o FK. Os sensores de auxílio usados como fontes externas de posição, velocidade e altitude do algoritmo de alinhamento são, em geral, o *Global Positioning System* (GPS), o odômetro ou GPS e o altímetro (ou o sensor de *heave/profundímetro*), respectivamente.

As medidas dos sensores iniciais e dos sensores de auxílio são introduzidas nas estruturas do FK, em cada etapa do alinhamento, para estimar os erros dos valores das condições iniciais (estados) do sistema e os *biases* dos sensores iniciais.

Os processos de alinhamento são realizados em malha fechada e os novos modelos da dinâmica dos erros do sistema, descritos no espaço de estados, manipulam erros grandes de azimute no alinhamento grosso e erros pequenos, no alinhamento fino.

Os erros estimados são realimentados no algoritmo para corrigir os parâmetros navegacionais calculados pelas equações de alinhamento, como também para compensar os erros dos sensores iniciais no modelo de instrumentação utilizado no algoritmo.

Consequentemente, os valores de posição, atitude e velocidades iniciais corrigidos, no fim do processo de alinhamento, tendem para seus valores reais com incertezas especificadas, os quais são usados para inicializar as equações diferenciais do processo de navegação.

O alinhamento em movimento é menos discutido na literatura que o alinhamento parado. Ali; Muhammad [6] apresenta um esquema de alinhamento em movimento para uma unidade de medição inercial de baixo custo usando uma estrutura de FK consistente e robusta. Já no artigo de Hao *et al* [7], um modelo dinâmico não linear para o alinhamento em movimento do sistema de navegação inercial é apresentado para o caso em que as variáveis de observação são as informações de velocidade. Esse modelo também se adequa ao alinhamento de transferência dos parâmetros navegacionais provenientes de outro Sistema de Navegação Inercial (SNI) presente no veículo.

Bimal; Joshi [9] apresenta uma abordagem não linear para o problema de alinhamento em movimento usando medições de sensores Doppler de velocidade, considerando desconhecidas as informações de atitude inicial do veículo. Os modelos de erro do referencial de *wander azimuth* fornecem observabilidade parcial do erro do ângulo de *heading*. A simulação de alinhamento é repetida com FK *unscented* que não requer função de transformação linearizada.

Qi; Pengfei [8] apresentam um método de alinhamento com base no referencial de *wander azimuth* cuja informação de atitude inicial é completamente desconhecida e o erro inicial de

azimute atinge valores de 0 a 360 graus. Trata-se de uma abordagem robusta que traz versatilidade para aplicações de resposta rápida.

O alinhamento em movimento tem grande aplicação em veículos autônomos e militares. Por exemplo, em um navio de guerra, a principal vantagem consiste em evitar paradas temporárias, o que implica em atrasos na missão ou exposição em ambientes perigosos.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um novo algoritmo de alinhamento em movimento, com base em um método clássico da literatura [1], para melhoria do desempenho e da precisão das estimativas das condições iniciais dos parâmetros navegacionais. No algoritmo de alinhamento proposto, são usados sensores de auxílio de posição, velocidade e altitude. No entanto, não é considerado disponível o auxílio para as medidas dos ângulos de altitude, definidos pelos ângulos de Euler (*roll*, *pitch* e *heading*). Então, o modelo dinâmico dos erros do processo de alinhamento, usado na estrutura do FK, é reformulado para manipular erros grandes de altitude, o que os reduz gradativamente até que estes se tornem pequenos, quando um outro modelo mais adequado é usado para manipular erros pequenos de altitude.

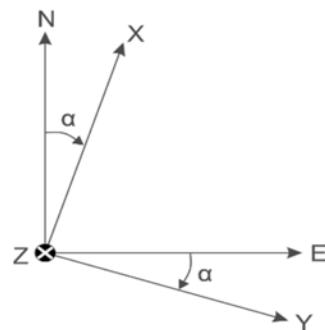
Este artigo apresenta, então, uma melhoria no algoritmo de alinhamento em movimento apresentado por Robert M. Rogers [1]. A novidade é a inclusão do desvio angular de azimute e a repetibilidade dos *biases* dos sensores inerciais no vetor de estados do modelo dinâmico dos erros do SNIS, aumentando a sua ordem e o número de variáveis estimadas pelo FK. Além disso, observações indiretas de *roll* e *pitch* sintetizadas a partir de medidas dos acelerômetros e do altímetro, são introduzidas no algoritmo de navegação como se fossem variáveis de sensores de auxílio. Um filtro de mistura é também utilizado para integrar as medidas externas do sensor de altitude (altímetro). O filtro de mistura aumenta a largura de banda da altitude calculada, atenua o ruído do sensor de altitude e estabiliza a velocidade vertical e a altitude estimadas.

## 2. Métodos

As grandezas físicas vetoriais envolvidas nos processos de alinhamento e navegação de um SNIS podem ser descritas com base em diversos referenciais. Conforme a mecanização adotada, é necessário expressá-las nos mesmos referenciais escolhidos para a formulação das equações de ambos os processos [5].

Geralmente, em um SNIS, são utilizados os seguintes referenciais: Corpo  $(b)_- \{X_b, Y_b, Z_b\}$  Inercial  $(i) \{X_i, Y_i, Z_i\}$ ; da Terra  $(e) \{X_e, Y_e, Z_e\}_e$  e Negacional, que pode ser o geográfico (*g*) – North-East-{N, E, D} ou *Wander Azimuth* – WA (*n*) –  $\{X_n, Y_n, Z_n\}$  [3].

A **figura 1** mostra a relação entre os referenciais navegacionais WA (*n*) e geográfico (*g*). O referencial WA é rotacionado em relação ao referencial navegacional geográfico (*g*) pelo *wander angle*,  $\alpha$ . O referencial WA é importante porque evita singularidades da atitude que ocorrem durante a navegação próxima aos pólos da terra.



**Fig. 1** – Relação entre os referenciais navegacional geográfico

(g) - NED e *Wander Azimuth-WA* (*n*) –  $X_n-Y_n-Z_n$  [1].

A Matriz de Cossenos Diretores (MCD) que opera a transformação do referencial geográfico (*g*) para o referencial WA (*n*) é definida como,

$$C_g^n = [c\alpha \quad s\alpha \quad 0 \quad -s\alpha \quad c\alpha \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad (1)$$

onde  $s(\cdot)$  e  $c(\cdot)$  representam as funções trigonométricas de seno e cosseno, respectivamente.

### 3. Equações dinâmicas de navegação

As equações de navegação serão implementadas no referencial navegacional WA ( $n$ ). As equações apresentadas a seguir foram desenvolvidas nas referências [1], [3] e [4'].

### 3.1 Equações dinâmicas de posição

Na mecanização do SNIS no referencial navegacional WA, a posição de um corpo na vizinhança da Terra é definida pela altitude ( $h$ ), e pelos ângulos de posição latitude ( $\lambda$ ), longitude ( $\alpha$ ) e *wander angle* ( $L$ ). Estes ângulos são os argumentos das funções trigonométricas que formam os elementos da MCD de posição

$$C_e^n = [-casLcl - sasl - casLcl + sacl \quad cacL \quad sasLcl - sacl \quad (2) \\ sasLsl + cacl - sacL - cLcl - cLsl - sL]$$

que define a orientação do referencial da Terra ( $e$ ) em relação ao referencial navegacional WA ( $n$ )

A dinâmica dos ângulos de posição é obtida da derivada em relação ao tempo da matriz de posição  $C_e^n$ , definida como:

$$\dot{C}_e^n = -\Omega_{en}^n C_e^n \quad (3)$$

onde  $\Omega_{en}^n$  é a matriz anti simétrica associada ao vetor velocidade de transporte ou *transport rate*,  $\omega_{en}^n$ . A velocidade de transporte é a velocidade angular do veículo quando este se desloca sobre a superfície da Terra, e corresponde à velocidade angular do referencial navegacional em relação ao referencial da Terra expressa no referencial navegacional. A matriz  $\Omega_{en}^n$  representa o produto vetorial ( $\omega_{en}^n \times$ ) e no hemisfério Norte é representada como:

$$\omega_{en}^n = \rho = [\rho_x \ \rho_y \ \rho_z] = \left[ \frac{v_y}{(R_y + h)} - \frac{v_x}{(R_x + h)} \ \rho_z \right] \quad (4)$$

onde  $R_{y_i}$  e  $R_{x_i}$  são os raios normal e meridional da curvatura da Terra, respectivamente, obtidos da forma geométrica da terra assumida como um elipsóide de revolução [10].

No SNIS baseado no referencial navegacional WA, a componente vertical da *transport rate* é definida como nula [3]:

$$\rho_z = 0 \quad (5)$$

A dinâmica de altitude é definida como a integral da velocidade vertical, o que completa os estados de posição:

$$\frac{dh}{dt} = v_z^n \quad (6)$$

Neste artigo, para o cálculo da altitude, foi introduzido um filtro de mistura integrado com um altímetro externo para estabilizar a altitude calculada.

### 3.2 Equações dinâmicas de velocidade

A equação dinâmica de velocidade desenvolvida no referencial navegacional ( $n$ ) é definida como [1]:

$$\frac{dv^n}{dt} = C_b^n f^b - (2\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n)v^n + g^n \quad (7)$$

onde,  $v^n$  é o vetor de velocidade linear;  $f^b$  é o vetor de força específica no referencial do corpo;  $\Omega_{en}^n$  é a matriz antissimétrica da *transport rate*;  $\Omega_{en}^n$  é a matriz anti-simétrica associada ao vetor velocidade angular da Terra expressa no referencial navegacional,  $\omega_{ie}^n$ ; e  $g^n$  é o vetor de gravidade normal local.

### 3.3 Equações dinâmicas de atitude

A MCD que define a orientação do referencial do corpo (b) em relação ao referencial navegacional WA (n) é descrita como:

$$C_b^n = [c\theta c\psi \ -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi \ s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi \ c\theta s\psi \\ c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi \ -s\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi \ -s\theta \ s\phi c\theta \ c\phi c\theta ] \quad (7)$$

onde  $\phi, \theta$  e  $\psi$  São os ângulos de *roll, pitch e heading*, conhecidos como ângulos de Euler.

A dinâmica dos ângulos de atitude é obtida da derivada em relação ao tempo da matriz de atitude  $C_b^n$  definida como[1]:

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{nb}^n \quad (9)$$

## 4. Modelo dinâmico dos erros de navegação

O modelo de erros dos parâmetros de navegação é descrito pelas equações dinâmicas dos erros de posição, velocidade e atitude do sistema, expressas no referencial navegacional  $WA(n)$ . O modelo é obtido por meio de perturbações lineares das variáveis nominais das equações dinâmicas de navegação (3), (7) e (9). Considerar que as perturbações são lineares implica em assumir que os termos de erros são pequenos. Assim, as variáveis nominais acrescidas de pequenos erros definem as variáveis calculadas que são representadas por uma barra sobreescrita. A expressão genérica para as variáveis calculadas é dada por:

$$\underline{x} = x + \delta x \quad (10)$$

onde  $x$  é a variável nominal,  $\underline{x}$  é o valor calculado e  $\delta x$  é o termo de erros pequenos.

Substituindo as variáveis nominais das equações diferenciais de navegação pelas variáveis computadas, efetuando as operações com as variáveis substituídas, desprezando produtos de erros e subtraindo as variáveis nominais, obtém-se as equações dinâmicas dos erros de navegação.

### 4.1 Equações dinâmicas dos erros de posição

A matriz de posição computada é descrita como [1]:

$$\underline{C}_e^n = C_e^n + \delta C_e^n \quad (11)$$

onde  $\delta C_e^n$  representa o erro da matriz de posição (2).

A matriz computada  $\bar{C}_e^n$  corresponde à matriz  $C_e^n(t+\Delta t)$ , tal que,

$$C_e^n(t+\Delta t) = [-\Delta\Psi] C_e^n(t) \quad (12)$$

A rotação da matriz nominal  $C_e^n$  durante o intervalo  $\Delta t$  é igual ao incremento de ângulo produzido pelos desvios angulares de posição  $\delta\theta_x$ ,  $\delta\theta_y$  e  $\delta\theta_z$  em torno dos eixos X, Y e Z, respectivamente, os quais definem o vetor de desvio angular de posição [1]:

$$\delta\Theta = [\delta\theta_x \ \delta\theta_y \ \delta\theta_z]^T \quad (13)$$

O vetor  $\delta\Theta$ , associado à matriz antissimétrica ( $\delta\Theta_x$ ), representa a matriz  $\Delta\Psi$ , em (12). Assim, substituindo  $\Delta\Psi$  por  $(\delta\Theta_x)$  em (11) e comparando as equações (11) e (12), obtém-se a matriz de posição calculada:

$$\bar{C}_e^n = C_e^n + \delta C_e^n = [I - \delta\Theta \times] C_e^n \quad (14)$$

Da equação (14), verifica-se que o erro da matriz de posição

$$\delta C_e^n = \bar{C}_e^n - C_e^n = -(\delta\Theta \times) C_e^n \quad (15)$$

é resultado dos desvios angulares de  $\delta\Theta$ .

Derivando ambos os membros de (15):

$$\delta \dot{C}_e^n = \dot{\bar{C}}_e^n - \dot{C}_e^n = -(\delta \Theta \times) C_e^n - (\delta \Theta \times) \dot{C}_e^n \quad (16)$$

Expandindo o primeiro membro de (16), obtém-se

$$\begin{aligned} \dot{\bar{C}}_e^n - \dot{C}_e^n &= \bar{\Omega}_{en}^n \bar{C}_e^n + \Omega_{en}^n C_e^n \\ &= \bar{\Omega}_{en}^n [I - (\delta\Theta \times)]_e^n + \Omega_{en}^n C_e^n \\ &\approx -[\bar{\Omega}_{en}^n - \Omega_{en}^n - \Omega_{en}^n (\delta\Theta \times)] C_e^n \end{aligned} \quad (17)$$

e expandindo o segundo membro de (17), chega-se a:

$$-(\delta \Theta \times) C_e^n - (\delta \Theta \times) \dot{C}_e^n = [(\delta \Theta \times) - (\delta \Theta \times) \Omega_{en}^n] C_e^n \quad (18)$$

Comparando ambos os membros expandidos e rearranjando os termos obtém-se a equação dinâmica matricial do erro de posição,

$$\begin{aligned}\dot{(\delta\Theta\times)} &= \bar{\Omega}_{en}^n - \Omega_{en}^n - \Omega_{en}^n(\delta\Theta\times) + (\delta\Theta\times)\Omega_{en}^n \\ &= (\delta\rho\times) - \Omega_{en}^n(\delta\Theta\times) + (\delta\Theta\times)C_e^n\end{aligned}\quad (19)$$

e a sua equivalente na forma vetorial

$$\dot{\delta\Theta} = \delta\rho - \omega_{en}^n \times \delta\Theta \quad (20)$$

Visto que o erro em torno do eixo Z no referencial WA (erro de azimute) é atribuído unicamente ao *wander angle*, é válido assumir que  $\delta\theta_z = 0$ , o que implica  $\delta\dot{\theta}_z = 0$

Assim, da terceira componente de  $\delta\rho$ , em (20), obtém-se o erro da velocidade de transporte no eixo Z, como,

$$\delta\rho_z = -\rho_y\delta\theta_x + \rho_x\delta\theta_y \quad (21)$$

Os desvios angulares de posição,  $\delta\Theta$ , são devidos aos erros angulares de posição  $\delta L$ ,  $\delta l$  e  $\delta\alpha$ . A relação entre eles é obtida pela substituição dos ângulos de posição computados ( $\bar{L}$ ,  $\bar{l}$  e  $\bar{\alpha}$ ) na matriz de posição computada – primeiro membro da equação (14). Comparando com a expressão do erro – segundo membro de (14) –, geram-se as seguintes expressões para os erros de latitude, longitude e *wander angle* em função dos desvios angulares de posição:

$$\delta L = -s\alpha\delta\theta_x - c\alpha\delta\theta_y \quad (22.1)$$

$$\delta l = \frac{c\alpha\delta\theta_x - s\alpha\delta\theta_y}{cL} \quad (22.2)$$

$$\delta\alpha = \delta\theta_z - sL\delta l = -sL\delta l \quad (22.3)$$

## 4.2 Equações dinâmicas dos erros de velocidade

As equações dinâmicas dos erros de velocidade são obtidas substituindo as variáveis nominais em (7) pelas variáveis calculadas [1]:

$$\dot{\bar{v}}^n = \bar{f}^n - (\bar{\omega}_{en}^n + 2\bar{\omega}_{ie}^n) \times \bar{v}^n + \bar{g}^n \quad (23)$$

onde as grandezas computadas seguem a forma geral dada em (10):

$$\bar{v}^n \quad \bar{f}^n \quad \bar{\omega}_{en}^n \quad \bar{\omega}_{ie}^n \quad \bar{g}^n = = = = v^n + \delta v^n \quad (24)$$

$$\bar{C}_b^n + f^b = (-(\varphi \times) f^n +$$

$$\delta f^n \quad \omega_{en}^n + \delta \omega_{en}^n \quad \omega_{ie}^n +$$

$$\delta \omega_{ie}^n \quad g^n + \delta g^n$$

Esfetuando as multiplicações, desprezando produtos de erros e subtraindo a equação dinâmica de velocidade nominal, obtém-se as equações diferenciais dos erros da velocidade [1]:

$$\begin{aligned}\dot{\delta v}^n &= -(2\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) \times v^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v^n \\ &\quad + f^n \times \varphi + \delta f^n + \delta g^n\end{aligned}\quad (25)$$

em que,  $\varphi$  é o vetor de desvios angulares de altitude;  $\delta\omega_{en}^n$  e  $\delta\omega_{ie}^n$  são os erros da velocidade de transporte e da velocidade angular da Terra, definidos por [1]:

$$\delta\omega_{en}^n = \left[ \left( -\frac{\delta v_y^n}{R_y} - \frac{\delta\rho_x}{R_y} \right) \left( -\frac{v_x^n}{R_x} - \frac{\rho_y}{R_x} \delta h \right) \delta\rho_z \right]^T \quad (26)$$

$$\delta\omega_{ie}^n = \omega_{ie}^n \times \delta\theta \quad (27)$$

onde  $\omega_{ie}^n = [0 \ 0 \ \Omega]^T$  é o vetor de velocidade angular da Terra, e  $\Omega$  representa a intensidade (módulo) do vetor velocidade angular da Terra;  $\delta f^n$  é o vetor de erro dos acelerômetros; e  $\delta g^n$  é o vetor de erro da gravidade normal.

## 4.3 Equações dinâmicas dos erros de altitude

A matriz de altitude (8) calculada é representada por:

$$\bar{C}_b^n = [I - (\varphi^n \times)] C_b^n \quad (28)$$

em que,  $\varphi^n$  é o vetor dos desvios angulares de altitude, obtido a partir dos erros dos ângulos de Euler  $\delta\phi$ ,  $\delta\theta$  e  $\delta\psi$ . Este vetor é representado no referencial WA como:  $\delta\phi$ ,  $\delta\theta$  e  $\delta\psi$ . Este vetor é representado no referencial WA como:

$$\varphi = [\varphi_x \ \varphi_y \ \varphi_z]^T \quad (29)$$

Analogamente ao erro da matriz de posição, o erro da matriz de atitude é obtido por:

$$\delta C_b^n = \bar{C}_b^n - C_b^n = -(\varphi \times) C_b^n \quad (30)$$

Derivando ambos os membros da equação (30), gera:

$$\delta \dot{C}_b^n = \dot{\bar{C}}_b^n - \dot{C}_b^n = -(\dot{\varphi} \times) C_b^n - (\varphi \times) \dot{C}_b^n \quad (31)$$

em que, a derivada  $\dot{C}_b^n$  é dada em (9). Substituindo a expressão (9) em (31) e procedendo às mesmas operações realizadas para o cálculo da dinâmica dos erros de posição, obtém-se as equações dinâmicas dos erros de atitude:

$$\left( \frac{d\varphi}{dt} \times \right) = -\Omega_{bn}^n (\varphi \times) + (\varphi \times) \Omega_{bn}^n + (\bar{\Omega}_{bn}^n - \Omega_{bn}^n) \quad (32)$$

ou na sua forma vetorial equivalente [1]:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \varphi \times \omega_{bn}^n + (\bar{\omega}_{bn}^n - \omega_{bn}^n) \quad (33)$$

Os termos entre parênteses correspondem às velocidades angulares calculadas e nominais do corpo em relação ao referencial navegacional expresso no referencial navegacional. As velocidades  $\bar{\omega}_{bn}^n$  e  $\omega_{bn}^n$  são expandidas em função das velocidades angulares dos giroscópios [2]:

$$\omega_{bn}^n = \omega_{in}^n - C_b^n \omega_{ib}^b \text{ e } \bar{\omega}_{bn}^n = \bar{\omega}_{in}^n - \bar{C}_b^n \bar{\omega}_{ib}^b \quad (34)$$

em que, as velocidades angulares calculadas dos giroscópios, expressas no referencial do corpo no qual estão instalados, são descritas por:

$$\bar{\omega}_{ib}^n = \omega_{ib}^n - C_b^n \varepsilon^b \quad (35)$$

O termo  $\varepsilon^b$  representa o vetor de erros aleatórios das medidas giroscópicas no referencial do corpo.

Substituindo as expressões (34) e (35) em (33) e manipulando os termos das velocidades angulares obtém-se a forma mais adequada para representar as equações dinâmicas dos erros de atitude [1]:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \delta \omega_{en}^n + \delta \omega_{ie}^n - \omega_{in}^n \times \varphi + C_b^n \varepsilon^b \quad (36)$$

O vetor de desvios angulares de atitude,  $\delta\varphi$ , é produzido pelos erros dos ângulos de Euler  $\delta\phi$ ,  $\delta\theta$  e  $\delta\psi$ . A relação entre eles é obtida pela substituição dos ângulos de Euler calculados,  $\bar{\phi}$ ,  $\bar{\theta}$  e  $\bar{\psi}$ , na matriz de atitude calculada – primeiro membro de (28) –, e comparando com a sua expressão de erro – segundo membro de (28) –, o resultado gera as seguintes expressões para os erros de *roll*, *pitch* e *heading* em função dos desvios angulares de atitude:

$$\delta\phi = \frac{s\psi\phi_y - c\psi\phi_x}{c\theta} \quad (37.1)$$

$$\delta\theta = c\psi\phi_y - s\psi\phi_x \quad (37.2)$$

$$\delta\psi = \phi_z (c\psi\phi_x - s\psi\phi_y) \tan \theta \quad (37.3)$$

O alinhamento em movimento tem por hipótese que todo erro de azimute é atribuído ao *wander angle* e, consequentemente, o desvio angular de atitude no eixo Z é considerado nulo, ou seja:

$$\varphi_z = 0 \quad (38)$$

## 5. Alinhamento em movimento

O processo de alinhamento pode ser realizado com o sistema estacionário ou em movimento. Ambos os processos possuem em comum a tarefa de estimar os valores iniciais dos parâmetros navegacionais como condições iniciais para os integradores das equações diferenciais de navegação. Estimadas as condições iniciais, as operações de integração e o processo de navegação podem ser inicializados.

No processo de alinhamento estacionário, o SNIS está parado, sendo, então, a posição inicial conhecida por meio de referências astronômicas ou de medidas do GPS e a velocidade inicial nula. Quanto à atitude inicial, o processo executa o auto alinhamento que usa como referências o vetor da gravidade normal, que define a vertical local, e a componente horizontal da velocidade angular da Terra, que aponta para o Norte.

Combinadas as medidas dos acelerômetros horizontais com a referência vertical, os ângulos de pitch e roll iniciais são aproximadamente determinados. Os ângulos de pitch e roll definem a atitude inicial do SNIS em relação ao plano horizontal local, o que determina os ângulos que nivelam o sistema. Esse processo de nivelamento é chamado de alinhamento grosso. Conhecidos os ângulos iniciais de *pitch* e *roll*, a resultante das medidas dos giroscópios, montados no plano horizontal do sistema, é projetada no plano horizontal do referencial navegacional e comparada com a componente horizontal da velocidade angular da Terra para determinar o ângulo inicial de *heading*. O *heading* inicial define o alinhamento inicial do sistema propriamente dito, em relação à direção Norte. Ao fim do alinhamento grosso, os ângulos iniciais de *roll*, *pitch* e *heading* são obtidos e a atitude inicial do sistema é aproximadamente determinada.

Os sensores inerciais são perturbados por erros determinísticos e aleatórios. Os determinísticos são compensados, e os aleatórios são estimados e depois compensados. Os erros aleatórios dos giroscópios e acelerômetros propagam-se ao longo do tempo no cálculo da posição, velocidade e atitude. Assim, torna-se necessário usar um método que estime os erros das variáveis navegacionais do sistema. Conhecidos os erros estimados, estes são usados para corrigir os valores calculados, refinando o nivelamento e o alinhamento obtido na fase do alinhamento grosso. Esse processo é conhecido como alinhamento fino e a estimação é comumente feita pelo uso de um FK.

Tanto no alinhamento em movimento como no estacionário, a posição e as velocidades iniciais do sistema, no referencial navegacional geográfico (*g*), são obtidas pelo uso de sensores de auxílio. As medidas externas de posição e velocidades são também perturbadas por erros aleatórios e se fossem empregadas diretamente como informação das condições iniciais das equações diferenciais (3) e (7), sem o processo de alinhamento, introduziram erros nas operações de integração das equações, que aumentariam ao longo do tempo. As medidas dos sensores de posição e velocidade são usadas na observação dos estados dos erros de posição e velocidade dos FK aplicados nos processos do

alinhamento. Quanto à atitude inicial, as referências do vetor da gravidade local e da componente horizontal da velocidade angular da Terra são perdidas durante o movimento do sistema, e sem sensores de auxílio para medir os ângulos de *roll*, *pitch* e *heading*, não se pode iniciar corretamente a operação de integração da equação diferencial matricial de atitude (9), por falta de informação das condições iniciais de atitude.

Para realizar o alinhamento em movimento, novas hipóteses precisam ser estabelecidas para contornar a falta de informação da atitude inicial do sistema.

No processo de alinhamento em movimento, é adotada a mecanização *Wander Azimuth*, para o referencial navegacional. O auxílio de posição mede as variáveis de posição no referencial navegacional geográfico (*g*); assim, a latitude, longitude e a altitude são conhecidas, mas o *wander angle* é desconhecido. Consequentemente, a matriz de posição (2) pode ser parcialmente inicializada. Os auxílios de velocidade medem as velocidades iniciais do sistema, então as condições iniciais das equações diferenciais de velocidade (7) são conhecidas e o processo de integração pode ser iniciado. Sem sensores de auxílio de atitude e com a perda das referências para o cálculo da atitude inicial, os ângulos de *roll*, *pitch* e *heading* iniciais são desconhecidos; assim, a matriz de atitude (8) não pode ser inicializada.

Para resolver o problema de inicialização da posição e atitude, as seguintes hipóteses são estabelecidas:

1. É assumido que os ângulos iniciais de atitude são todos nulos; com esta hipótese, a matriz de atitude  $C_b^n$  é inicializada como uma matriz identidade;
2. É assumido que o *wander angle* inicial é nulo, mesmo que haja a possibilidade de ocorrer um erro grande de azimute, de até 180°; com esta hipótese a matriz de posição  $C_e^n$  pode ser inicializada;
3. É assumido que não há sensores de auxílio de atitude;
4. É assumido que o veículo mantém a velocidade linear constante na direção longitudinal  $X_b$  e nula nas direções  $Y_b$  e  $Z_b$ , do referencial do corpo (*b*), bem como o ângulo de *heading* nulo,  $\psi=0$ .

Adotadas as hipóteses i e ii e usando os sensores de auxílios de posição e velocidades, as equações dinâmicas (3), (7) e (9) são inicializadas e podem ser integradas

numericamente. Entretanto, como os estados do sistema terão erros significativos, um novo modelo de erros do sistema é proposto para incluir os erros grandes de azimute a serem usados na estrutura do FK. Com base na hipótese iii, as medidas dos ângulos de altitude não podem ser obtidas, o que implica que as observações dos estados dos erros de altitude do FK não são realizadas. Para contornar este problema, a hipótese iv garante que, usando o auxílio de altitude/heave e as medidas dos acelerômetros, é possível observar os ângulos de roll e pitch do veículo.

Uma vez que os ângulos de roll e pitch são observados, tal como medidos por sensores de auxílio de altitude (magnetômetros, por exemplo), os biasses repetibilidade dos acelerômetros e dos giroscópios podem ser observados de forma indireta a partir das medidas de altitude.

O objetivo do algoritmo de alinhamento em movimento, usando a nova estrutura de FK, é estimar a posição, as velocidades, os biasses repetibilidade dos sensores iniciais, os erros de altitude e do *wander angle* a partir da possibilidade de erros grandes de roll, pitch e *wander angle*, para corrigir os parâmetros navegacionais computados pela integração das equações dinâmicas de alinhamento. Este algoritmo que manipula os erros grandes de azimute executa o processo chamado de alinhamento grosso.

Com base na hipótese ii, a ideia é associar os erros grandes de *azimute* aos erros das funções trigonométricas, seno e cosseno do ângulo  $\alpha$ , presentes na MCD de posição, e assumir que todo erro de azimute é atribuído ao *wander angle*, o que implica no desvio angular de altitude do eixo Z igual a zero,  $\phi_z = 0$  em (29). Esta consideração é válida porque, no referencial navegacional *Wander Azimuth*, o plano horizontal local contém os ângulos de azimute do sistema.

Os erros das funções trigonométricas do ângulo  $\alpha$  são definidos como:

$$\delta s\alpha = \delta \sin \alpha = \underline{\sin \alpha} - \underline{\sin \alpha} \quad (39)$$

$$\delta c\alpha = \delta \cos \alpha = \underline{\cos \alpha} - \underline{\cos \alpha} \quad (40)$$

cuja dinâmica integra as equações de estados do novo modelo de erros do sistema a ser usado na estrutura do FK para o alinhamento grosso [2].

Os estados estimados dos erros das funções trigonométricas  $\delta s\alpha$  e  $\delta c\alpha$  são relacionados ao erro do *wander angle* pela expressão [1]:

$$\delta\alpha = c\alpha\delta\alpha - s\alpha\delta\alpha \quad (41)$$

O erro estimado do *wander angle* é usado para corrigir o *wander angle* calculado por meio da relação

$$\alpha = \bar{\alpha} - \delta\alpha \quad (42)$$

O novo modelo da dinâmica dos erros de navegação para erros grandes de *azimute*, é usado na fase de alinhamento grosso até que os valores dos erros das funções trigonométricas sejam reduzidos para níveis considerados pequenos. A partir deste limite, é assumido um novo modelo para a dinâmica dos erros de navegação considerando erros pequenos do ângulo de *azimute* [1]. Neste modelo, o erro do *wander angle* passa a ser um estado direto a ser estimado pelo FK, reformulado para erros pequenos do ângulo de azimute. Este algoritmo que manipula os erros pequenos de *azimute* corresponde ao processo denominado alinhamento fino.

## 6. Equações dinâmicas dos erros de navegação para erros grandes de Azimute

O modelo dos erros do SNIS para erros grandes do ângulo de azimute é desenvolvido no referencial navegacional *Wander Azimuth* (n) e usado no alinhamento grosso.

### 6.1 Equações dinâmicas dos erros de posição para erros grandes de azimute

As equações dinâmicas dos erros de posição do SNIS sujeitos a erros grandes de azimute são desenvolvidas a partir da fatoração da matriz de posição nominal (2) no seguinte produto matricial:

$$C_e^n = C_g^n C_e^g \quad (43)$$

onde,  $C_g^n$  é dada em (1) e  $C_e^g$  é definida como:

$$C_e^g = [-sLcl - sLsl \ cL - sl \ cl \ 0 - cLcl - cLsl - sL] \quad (44)$$

Analogamente a (43), a matriz de posição calculada é fatorada como:

$$\bar{C}_e^n = \bar{C}_g^n \bar{C}_e^g \quad (45)$$

Expandindo a matriz computada  $\bar{C}_g^n$  em termos da matriz de erros de posição entre os referenciais navegacionais  $WA(n)$  e geográfico ( $g$ ),  $\delta C_g^n$ , e a matriz computada  $\bar{C}_e^g$  em termos da matriz anti simétrica dos desvios angulares de posição entre o referencial navegacional geográfico ( $g$ ) e o referencial da Terra ( $e$ ),  $\delta\theta^g x$ , tem-se:

$$\bar{C}_e^n = (C_g^n + \delta C_g^n) [I - (\delta\theta^g x)] C_e^g \quad (46)$$

em que, o vetor dos desvios angulares de posição no referencial navegacional geográfico é definido como:

$$\delta\theta^g = [\delta\theta_N \ \delta\theta_E \ \delta\theta_D]^T \quad (47)$$

em que,  $\delta\theta_N$ ,  $\delta\theta_E$  e  $\delta\theta_D$  estão torno dos eixos N, E e D, respectivamente.

A matriz calculada  $\bar{C}_e^g$  é dada pela equação [1]:

$$\bar{C}_e^g = (I - \delta\theta^g x) C_e^g \quad (48)$$

e a matriz dos erros das funções trigonométricas é definida como:

$$\delta C_g^n = [\delta c\alpha \ \delta s\alpha \ 0 - \delta s\alpha \ \delta c\alpha \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (49)$$

Visto que todo erro de azimute, em torno do eixo Z do referencial navegacional WA do sistema, é computado como erro do *wander angle*, assume-se que, para a fase de alinhamento grossoiro em movimento,

o desvio angular de posição no eixo vertical do referencial navegacional geográfico ( $g$ ) em relação ao referencial da Terra ( $e$ ) é nulo:

$$\delta\theta_D = \delta\theta_Z = 0 \quad (50)$$

o que implica em

$$\frac{d\delta\theta_Z}{dt} = 0 \quad (51)$$

Então, a matriz antissimétrica do desvio angular de posição no referencial geográfico é descrita como:

$$\delta\theta^g = [0 \ 0 \ \delta\theta_E \ 0 \ 0 - \delta\theta_N - \delta\theta_E \ \delta\theta_N \ 0] \quad (52)$$

Realizando o produto matricial em (46) e organizando os termos, obtém-se:

$$\bar{C}_e^n = [I + EC_g^n] C_e^n \quad (53)$$

em que, a matriz de erros é dada por:

$$E = [\delta c\alpha \ \delta s\alpha - \delta\theta_y - \delta s\alpha \ \delta c\alpha \ \delta\theta_x \ \delta\theta_E - \delta\theta_N \ 0] \quad (54)$$

e

$$\delta\theta_x = c\alpha\delta\theta_N + s\alpha\delta\theta_E \quad (55)$$

$$\delta\theta_y = -s\alpha\delta\theta_N + c\alpha\delta\theta_E \quad (56)$$

A matriz E é denominada matriz de erros grandes de azimute, e seus elementos correspondem aos desvios angulares de posição,  $\delta\theta_x$  e  $\delta\theta_y$ , mais os erros das funções trigonométricos,  $\delta s\alpha$  e  $\delta c\alpha$ , que correspondem aos estados do modelo de erros para erros grandes de azimute usados no FK do alinhamento grossoiro.

Da equação (53), obtém-se a matriz de erros de posição em função da matriz de erros grandes de azimute E:

$$\bar{C}_e^n - C_e^n = \delta C_e^n = EC_g^n C_e^n \quad (57)$$

Derivando a equação (57), obtém-se:

$$\delta \dot{C}_e^n = \dot{\bar{C}}_e^n - \dot{C}_e^n = \dot{E} C_e^g + \dot{C}_e^g E \quad (58)$$

em que

$$\dot{C}_e^g = -\Omega_{eg}^g C_e^g \quad (59)$$

e  $\Omega_{eg}^g$  é a matriz anti simétrica associada ao vetor  $\omega_{eg}^g$ , ou  $\rho^g$ , que representa a velocidade angular de transporte do referencial navegacional geográfico em relação ao referencial da Terra, definida como:

$$\rho^g = [\rho_N \ \rho_E \ \rho_D]^T \quad (60)$$

Substituindo a equação (59), considerando a condição (6), as expressões de (3) e  $\dot{\bar{C}}_e^n$ , as fatorações (43) e (45) e, por fim, a matriz dos erros das funções trigonométricas (49), na equação (58), e em seguida desprezando os produtos dos erros e rearranjando os termos, pode-se obter a dinâmica da matriz de erros grandes de azimute  $E$ , cujos elementos descrevem a evolução no tempo dos desvios angulares de posição e dos erros das funções trigonométricas:

$$\frac{dE}{dt} = E \Omega_{eg}^g - \Omega_{en}^n E + (\Omega_{en}^n - \bar{\Omega}_{en}^n) C_g^n \quad (61)$$

desenvolvimento completo da equação diferencial (61) é apresentado no Apêndice C da referência [1].

A partir da derivada dos elementos  $\delta\theta_x$ ,  $\delta\theta_y$ ,  $\delta s\alpha$  e  $\delta c\alpha$  da matriz  $\frac{dE}{dt}$ , são obtidas as equações diferenciais do desvio angular de posição e dos erros das funções trigonométricas, as quais integram o modelo dinâmico de erros usado no FK do alinhamento grosso.

Durante o alinhamento grosso, é considerada a hipótese de que os erros trigonométricos são constantes. Assim,

$$\dot{\delta s\alpha} = 0 \quad (62)$$

$$\dot{\delta c\alpha} = 0 \quad (63)$$

Existe uma correspondência entre a matriz de erros grandes de azimute,  $E$ , e a matriz anti simétrica dos desvios angulares de posição ( $\delta\theta\times$ ), definida para erros pequenos de azimute. Comparando as matrizes de posição computadas,  $\dot{\bar{C}}_e^n$ , dadas pelas equações (14) e (53), resulta na relação:

$$-\delta\Theta x \approx EC_n^g \quad (64)$$

A dinâmica do erro de altitude é definida como:

$$\frac{d\delta h}{dt} = \delta v_z^n \quad (65)$$

## 6.2 Equações dinâmicas dos erros de velocidade para erros grandes de Azimute

O modelo da dinâmica dos erros de velocidade para erros grandes de azimute é similar ao modelo apresentado na equação (25), com exceção do erro da velocidade angular da Terra expresso no referencial navegacional. Este é redefinido, com base na relação dada em (64):

$$\delta\omega_{ie}^n = EC_n^g \omega_{ie}^n = E\omega_{ie}^g \quad (66)$$

em que  $\omega_{ie}^g = [\Omega_N \ 0 \ \Omega_D]$  é o vetor velocidade angular da Terra representada no referencial navegacional geográfico, e  $\Omega_N$  e  $\Omega_D$  são os componentes nas direções North e Down.

## 6.3 Equações dinâmicas dos erros de altitude para erros grandes de Azimute

O modelo dinâmico de altitude para erros grandes de azimute, no referencial WA, é semelhante ao modelo apresentado na equação (36), com exceção do erro da velocidade angular da Terra no referencial de navegação, conforme definida em (66). Então [1]:

$$\dot{\varphi} = \delta\omega_{en}^n + \delta\omega_{ie}^n - \omega_{in}^n \times \varphi + C_b^n \varepsilon^b \quad (67)$$

onde,  $\omega_{in}^n$  É a velocidade angular do referencial navegacional em relação ao referencial inercial expressa no referencial navegacional descrita em (34).

Expandindo o terceiro termo de (67), baseado na hipótese 2, que implica em (38), obtém-se uma nova expressão para o desvio da velocidade angular de transporte no eixo Z<sub>n</sub>:

$$\delta\rho_z = -\Omega_n s\alpha \delta\theta_x - \Omega_n c\alpha \delta\theta_y - \omega_y \delta\phi_x + \omega_x \delta\phi_y - \varepsilon_z \quad (68)$$

em que:

$$\omega_x = \omega_{lex}^g + \omega_{enx}^n \quad (69)$$

$$\omega_y = \omega_{ley}^g + \omega_{eny}^n \quad (70)$$

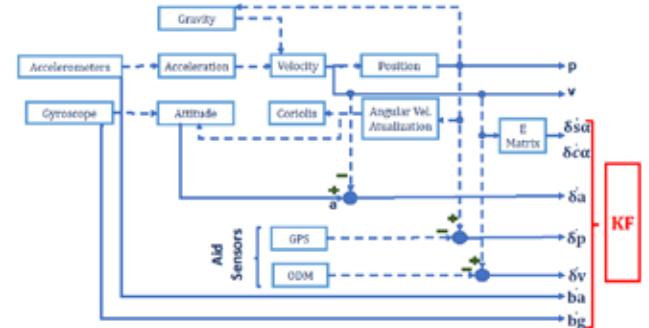
## 7. Modelo dinâmico dos erros do alinhamento grosso para erros grandes de azimute

O processo de alinhamento grosso em movimento (**figura 2**) emprega o modelo dinâmico de erros que opera os erros grandes de azimute descrito pelo sistema de equações diferenciais no espaço de estados, definido pelas dinâmicas expressas em (31), (65), (25) e (67), usando (66), e mais as dinâmicas dos *biases* dos sensores iniciais descritas a seguir pelas equações (71) e (72). As variáveis de estados do modelo dinâmico de erros descrevem os erros do alinhamento grosso, representados pelos desvios da posição angular, o erro da altitude, os erros de velocidade, os desvios angulares de altitude, os erros das funções trigonométricas, e os modelos dinâmicos dos *biases* dos acelerômetros e giroscópios, descritos como:

$$\dot{\delta Ba} = 0 \quad (71)$$

$$\dot{\delta Bg} = 0 \quad (72)$$

Diferentemente de [1], neste trabalho, os desvios angulares de altitude no eixo Z é considerado um dos estados do modelo de erros, embora tenha sido assumido  $\phi_z = 0$ .



**Fig. 2 – Diagrama de blocos do alinhamento grosso em movimento.**

O vetor de estados do modelo dinâmico dos erros do alinhamento grosso é definido como:

$$x_G = \begin{bmatrix} \delta\theta_x & \delta\theta_y & \delta h & \delta v_x & \delta v_y & \delta v_z & \phi_x & \phi_y & \phi_z & \delta s\alpha & \delta c\alpha \\ \delta Ba_x & \delta Ba_y & \delta Ba_z & \delta Bg_x & \delta Bg_y & \delta Bg_z \end{bmatrix}^T \quad (73)$$

e o modelo dinâmico como:

$$\frac{dx_G}{dt} = F_G x_G + w_G \quad (74)$$

em que,  $F_G$  é a matriz de transição de estados mostrada na **figura 3** e  $w_G$  é o vetor de ruídos brancos dos sensores iniciais, definido como:

$$w_G = \begin{bmatrix} 0_{1x3} & (-v_y \varepsilon_z + \delta f_x) & (v_x \varepsilon_z + \delta f_y) \\ \delta f_z & \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z & 0_{1x8} \end{bmatrix}^T \quad (75)$$

A matriz de transição de estados do modelo dinâmico dos erros (**figura 3**) é introduzida na estrutura do FK do alinhamento grosso para estimar os erros de posição, velocidade, altitude, *biases* dos sensores iniciais e os erros das funções trigonométricas, os quais implementam a correção dos estados calculados pelas equações do alinhamento grosso na configuração *feedback*.

## 8. Modelo dos erros do alinhamento fino para erros pequenos de Azimute

O alinhamento grosso continua a operar até que a variância dos erros das funções trigonométricas

seja reduzida. Então, para o processo de alinhamento fino, o modelo dinâmico dos erros grandes de azimute é reformulado para a versão do modelo dinâmico de erros que opera erros pequenos de Azimute, onde o erro do *wander angle*,  $\delta\alpha$ , é um estado do modelo dinâmico dos erros do alinhamento fino a ser estimado diretamente pelo FK.

O erro estimado do *wander angle* é relacionado ao erro das funções trigonométricas pelas expressões:

$$\delta s\alpha = c\alpha\delta\alpha \quad \text{e} \quad \delta c\alpha = -s\alpha\delta\alpha \quad (76)$$

A dinâmica do erro estimado do *wander angle*,  $\frac{d\delta\alpha}{dt}$ , é obtida a partir da expansão do elemento (1,1) da matriz  $dE/dt$ , dada em (61):

$$\begin{aligned} \frac{d\delta\alpha}{dt} &= \delta s\alpha\rho_D + \delta\theta_y\rho_E - \rho_z\delta s\alpha - \rho_y\delta\theta_E - \delta\rho_z s\alpha \\ &= \delta s\alpha(\rho_D - \rho_z) + \delta\theta_y\rho_E - \rho_y\delta\theta_E - \delta\rho_z s\alpha \\ &= -\frac{d\alpha}{dt}\delta s\alpha + \delta\theta_y\rho_E - \rho_y\delta\theta_E - \delta\rho_z s\alpha \end{aligned} \quad (77)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta\theta_x \\ \delta\theta_y \\ \delta h \\ \delta v_x \\ \delta v_y \\ \delta v_z \\ \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \\ \frac{\delta\alpha}{dt} \\ \delta s\alpha \\ \delta c\alpha \\ \delta B_{ax} \\ \delta B_{ay} \\ \delta B_{az} \\ \delta B_{gx} \\ \delta B_{gy} \\ \delta B_{gz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{v_y}{R^2} & 0 & \frac{1}{R} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\rho_y & -\rho_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v_x}{R^2} & -\frac{1}{R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_x & -\rho_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(v_y\Omega_y + 2v_z\Omega_z) & v_y\Omega_x & -\frac{v_xv_z}{R^2} & \frac{v_z}{R} & 2\Omega_z & -(\rho + 2\Omega)_y & 0 & -f_z & f_y & 2v_z\omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_y\Omega_x & -(v_x\Omega_x + 2v_z\Omega_z) & -\frac{v_xv_y}{R^2} & -2\Omega_z & \frac{v_z}{R} & (\rho + 2\Omega)_x & f_z & 0 & -f_x & 2v_z\omega_y & 2v_z\omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_x\Omega_y & -v_x\Omega_z & \frac{v_xv_z + v_yv_z}{R^2} & 2(\rho + \Omega)_y & -2(\rho + \Omega)_z & 0 & -f_y & f_x & 0 & -2v_x\omega_z & -2v_y\omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2v_x\Omega_z & 2v_y\Omega_z & \frac{v_xv_z + v_yv_z}{R^2} & 2(\rho + \Omega)_y & -2(\rho + \Omega)_z & 0 & -f_y & f_x & 0 & -2v_x\omega_z & -2v_y\omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Omega_z & -\omega_y & 0 & \frac{1}{R} & 0 & 0 & 0 & \Omega_z & -\omega_y & 0 & \Omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Omega_z & 0 & \frac{v_x}{R^2} & -\frac{1}{R} & 0 & 0 & 0 & -\Omega_z & 0 & \omega_z & -\Omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_y & \omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_y & -\omega_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\theta_x \\ \delta\theta_y \\ \delta h \\ \delta v_x \\ \delta v_y \\ \delta v_z \\ \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \\ \frac{\delta\alpha}{dt} \\ \delta s\alpha \\ \delta c\alpha \\ \delta B_{ax} \\ \delta B_{ay} \\ \delta B_{az} \\ \delta B_{gx} \\ \delta B_{gy} \\ \delta B_{gz} \end{bmatrix} \quad (78)$$

em que,  $\frac{d\alpha}{dt} = \rho_z - \rho_D$

Substituindo (74) em (76) e transformando os termos  $\rho_E$  e  $\delta\theta_E$  do referencial navegacional geográfico para o referencial WA, obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta\alpha}{dt} &= -\frac{d\alpha}{dt}\delta s\alpha + \\ & sa(\omega_y\delta\theta_x - \omega_x\delta\theta_y - \omega_y\phi_x + \omega_x\phi_y - \varepsilon_z) \end{aligned} \quad (79)$$

Derivando a segunda equação de (74), obtém-se:

$$\frac{d\delta\alpha}{dt} = -\frac{d\alpha}{dt}\delta s\alpha - sa\frac{d\delta\alpha}{dt} \quad (79)$$

Comparando (77) com (78), gera a derivada do erro de *wander angle* descrita pela equação diferencial:

$$\frac{d\delta\alpha}{dt} = -\omega_y\delta\theta_x + \omega_x\delta\theta_y + \omega_y\phi_x - \omega_x\phi_y + \varepsilon_z \quad (80)$$

**Fig. 3 – Matriz de transição de estados do modelo dinâmico de erros do alinhamento grosso.**

$$\begin{bmatrix} \delta\theta_x \\ \delta\theta_y \\ \delta h \\ \delta v_x \\ \delta v_y \\ \delta v_z \\ \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \\ \frac{d\delta\alpha}{dt} \\ \delta s\alpha \\ \delta c\alpha \\ \delta B_{ax} \\ \delta B_{ay} \\ \delta B_{az} \\ \delta B_{gx} \\ \delta B_{gy} \\ \delta B_{gz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{v_y}{R^2} & 0 & \frac{1}{R} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\rho_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v_x}{R^2} & -\frac{1}{R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_x & -\rho_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(v_y\Omega_y + 2v_z\Omega_z) & v_y\Omega_x & -\frac{v_xv_z}{R^2} & \frac{v_z}{R} & 2\Omega_z & -(\rho + 2\Omega)_y & 0 & -f_z & f_y & 2v_z\omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_y\Omega_x & -(v_x\Omega_x + 2v_z\Omega_z) & -\frac{v_xv_y}{R^2} & -2\Omega_z & \frac{v_z}{R} & (\rho + 2\Omega)_x & f_z & 0 & -f_x & v_z\omega_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_x\Omega_z & 2v_y\Omega_z & \frac{v_xv_z + v_yv_z}{R^2} & 2(\rho + \Omega)_y & -2(\rho + \Omega)_z & 0 & -f_y & f_x & 0 & -2(v_x\omega_z + v_y\omega_x) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Omega_z & -\omega_y & 0 & \frac{1}{R} & 0 & 0 & 0 & \Omega_z & -\omega_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Omega_z & 0 & \frac{v_x}{R^2} & -\frac{1}{R} & 0 & 0 & 0 & -\Omega_z & 0 & \omega_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_y & \omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_y & -\omega_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\theta_x \\ \delta\theta_y \\ \delta h \\ \delta v_x \\ \delta v_y \\ \delta v_z \\ \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \\ \frac{d\delta\alpha}{dt} \\ \delta s\alpha \\ \delta c\alpha \\ \delta B_{ax} \\ \delta B_{ay} \\ \delta B_{az} \\ \delta B_{gx} \\ \delta B_{gy} \\ \delta B_{gz} \end{bmatrix} \quad (78)$$

**Fig. 4 – Matriz de transição de estados do modelo dinâmico de erros do alinhamento fino.**

O vetor de estados do modelo dinâmico dos erros do alinhamento fino é definido como:

$$\mathbf{x}_F = \begin{bmatrix} \delta\theta_x & \delta\theta_y & \delta h & \delta v_x & \delta v_y & \delta v_z & \phi_x & \phi_y & \phi_z & -(\delta\alpha) \\ \delta Ba_x & \delta Ba_y & \delta Ba_z & \delta Bg_x & \delta Bg_y & \delta Bg_z \end{bmatrix}^T \quad (81)$$

e o modelo dinâmico dos erros é descrito como:

$$\frac{dx_F}{dt} = F_F \mathbf{x}_F + w_F \quad (82)$$

onde  $F_F$  é a matriz de transição de estados mostrado na **figura 4** e  $w_F$  é o vetor de erros aleatórios dos sensores iniciais:

$$w_F = \begin{bmatrix} 0_{1x3} & (-v_y \varepsilon_z + \delta f_x) & (v_x \varepsilon_z + \delta f_y) & \delta f_z & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & \varepsilon_z & 0_{1x7} \end{bmatrix}^T \quad (83)$$

## 9. Equações de medidas

Os modelos dinâmicos dos erros para o alinhamento grosseiro e fino são descritos pelos sistemas de equações diferenciais de estados dados em (74) e (82). Para completar a representação de estados das etapas do alinhamento, é necessário descrever as equações de observações ou medidas dos estados. As medidas dos erros das variáveis navegacionais são dependentes das medidas dos sensores de auxílio. Os sensores de auxílio considerados disponíveis, tanto para o alinhamento grosseiro quanto para o alinhamento fino, são o GPS para posição, odômetro ou GPS para as velocidades e o altímetro para a altitude (sensor de *heave*).

Com base nas hipóteses iii e iv, as medidas dos auxílios de velocidade e altitude e as medidas dos acelerômetros permitem observar, indiretamente, os ângulos de *roll* e *pitch*.

Para a observação do ângulo de *pitch*, a velocidade vertical calculada pelo filtro de mistura [1], expressa no referencial navegacional, para o alinhamento grosso e fino  $v_z^n$ , é igual à projeção da velocidade longitudinal do corpo, medida pelo sensor de auxílio,  $v_x^n$ , na direção vertical (D) do referencial navegacional. A relação é representada pelas expressões [3]:

$$v_x^b = v_z^n \operatorname{sen}(\theta) \quad (84)$$

$$\theta = \operatorname{arcsen}\left(\frac{v_x^b}{v_z^n}\right) \quad (85)$$

O ângulo calculado é usado como medida de auxílio para o erro de *pitch*, utilizado na observação dos estados de altitude do FK.

Para a observação do ângulo de *roll*, são assumidas as hipóteses iii e iv. A partir da equação de aceleração (7) reescrita de modo a explicitar os valores da força específica no referencial navegacional,

$$f^n = \frac{dv}{dt} + (2\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n)v^n - g^n \quad (86)$$

em que,  $\frac{dv}{dt}$ ,  $v_y^b$  e  $v_z^b$  são nulos segundo a hipótese iv, e utilizando as medidas dos sensores auxílio de velocidade, a velocidade angular da Terra, a gravidade e o ângulo de *pitch* observado em (85), as componentes da aceleração calculada  $f^n$ , em (86), ficam em função apenas dos ângulos de *roll* e da latitude. Comparando as projeções das componentes da aceleração, expressas no referencial do corpo,  $C_n^b f^n$ , com as medidas dos acelerômetros  $f_y^b$  e  $f_z^b$  efetuadas no referencial do corpo, a tangente do ângulo de *roll* é observada. A relação é descrita pelas expressões [3]:

$$\operatorname{sen}\phi = \frac{(f_x^n \operatorname{sen}\theta + f_z^n \operatorname{cos}\theta) f_y^b - f_y^n f_z^b}{(f_x^n \operatorname{sen}\theta + f_z^n \operatorname{cos}\theta)^2 + f_y^n} \quad (87)$$

$$\operatorname{cos}\phi = \frac{(f_x^n \operatorname{sen}\theta + f_z^n \operatorname{cos}\theta) f_z^b + f_y^n f_y^b}{(f_x^n \operatorname{sen}\theta + f_z^n \operatorname{cos}\theta)^2 + f_y^n} \quad (88)$$

$$\phi = \operatorname{arctanarctan} \left( \frac{\operatorname{sen}\phi}{\operatorname{cos}\phi} \right) \quad (89)$$

em que,  $f_y^n = 2\Omega v_x^b (\cos \phi \cos L \operatorname{sen}\theta - \cos \phi \operatorname{sen}L \cos \theta)$  e.

$$f_z^n = \frac{v_x^b}{R} (\operatorname{cos}\theta)^2 - g$$

A partir das observações indiretas de *roll* e *pitch*, é possível também observar indiretamente os *biases* repetibilidade dos acelerômetros e dos giros,  $\delta Ba$  e  $\delta Bg$ , respectivamente. Usando os ângulos de *roll* e *pitch* observados, suas derivadas e a observação

das velocidades, obtidas pelos sensores de auxílio de velocidade, os biases repetibilidade são calculados a partir da diferença da medida dos sensores inerciais e dos valores calculados das acelerações e velocidades angulares às quais os acelerômetros e giros estão submetidos.

Os estados observados para os modelos de erros do alinhamento grosso e fino são os mesmos, mas as dimensões das matrizes de observação diferem apenas pelos estados não observados dos erros do *wander angle*. Desta forma, as equações de medidas para ambos os modelos de erros são formuladas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} z = Hx = & [I_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ \Lambda \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ I_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \\ & 0_{3 \times 3} \ \Lambda \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ I_{3 \times 3} \ \Lambda \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \\ & 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ \Lambda \ I_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ \Lambda \ 0_{3 \times 3} \ I_{3 \times 3}] \\ & [\delta\theta_x \ \delta\theta_y \ \delta h \ \delta v_x : ] + v \end{aligned} \quad (90)$$

em que  $H$  é a matriz de observação de estados (matriz de fator de escala) para os modelos de erros, sendo  $\Lambda=0_{3 \times 2}$  para o alinhamento grosso e  $\Lambda=0_{3 \times 1}$  para o alinhamento fino, e  $v$  é o vetor de ruídos dos sensores de auxílio de posição, velocidade e indireto de atitude [3]:

$$v = [v_{lat} \ v_{long} \ v_h \ v_{vx} \ v_{vy} \ v_{vz} \ v_{roll} \ v_{pitch}]^T \quad (91)$$

Os ruídos  $v_{roll}$  e  $v_{pitch}$  se referem aos ruídos dos acelerômetros e dos sensores de velocidade, como pode ser visto nas equações (85), (87) e (88).

## 10. Simulações

Nesta seção, são apresentados os resultados da simulação do alinhamento, grosso e fino, em movimento.

A simulação inicia com o alinhamento grosso, durante 3000 s, seguido pelo alinhamento fino por mais 4200 s, com tempo total de simulação de 7200 s. Nas figuras 5 a 14, é possível observar a ocorrência de uma descontinuidade nos instantes 3000 s, resultado da transição do algoritmo de alinhamento grosso para o fino.

As simulações dos algoritmos de alinhamento foram realizadas considerando como veículo um navio de guerra com trajetória pré-definida igual a uma linha

reta, de modo a facilitar o nivelamento e manter o *wander angle* variando a uma taxa constante. Isto leva a valores pequenos para os ângulos de atitude. Nesta simulação, os ângulos de *roll* e *pitch* foram definidos por movimentos senoidais, com amplitude máxima de 2° e frequência de 0,1 Hz, resultado de um estado de mar com ondas classificadas como “swell”, e o ângulo de *heading* igual a 0°. O navio se move com velocidade linear de 16 km/h (4,44 m/s) somente na direção longitudinal do corpo. Para a posição angular, as condições iniciais foram definidas como 23° de latitude, 43° de longitude e 35° de *wander Azimuth*, e quanto à altitude o valor mínimo igual à zero.

Os erros aleatórios dos sensores *inerciais*, *biases* e ruído branco foram definidos como:

a. Acelerômetros: *biases* repetibilidade  $1 \times 10^{(-3)}$  g (acel. X e Y) e  $1 \times 10^{(-4)}$  g (acel. Z) e desvio padrão de  $0,25 \times 10^{(-3)}$  g (acel. X e Y) e  $0,25 \times 10^{(-4)}$  g (acel. Z); ruído branco com média zero e desvio padrão de  $1 \times 10^{(-3)}$  g (acel. X e Y) e  $1 \times 10^{(-3)}$  g (acel. Z);

b. Giroscópios: *bias* repetibilidade 0,1 grau/h e desvio padrão de 0,025 grau/h; ruído branco com média zero e desvio padrão de 0,05 grau/h.

Os erros aleatórios dos sensores de auxílio de posição, velocidade e altitude foram definidos como ruído branco com média zero e a variância,  $\sigma$ , igual a:

a. Sensor de posição – GPS: desvio padrão Lat/Long:  $\sigma = 0,0235$  graus (1,5') e altitude:  $\sigma = 0,1$  m;

b. Sensor de velocidade – odômetros/GPS:  $\sigma = 0,025$  m/s;

c. Sensor de *heave* (altitude máx. de 5 m):  $\sigma = 0,0005$  m.

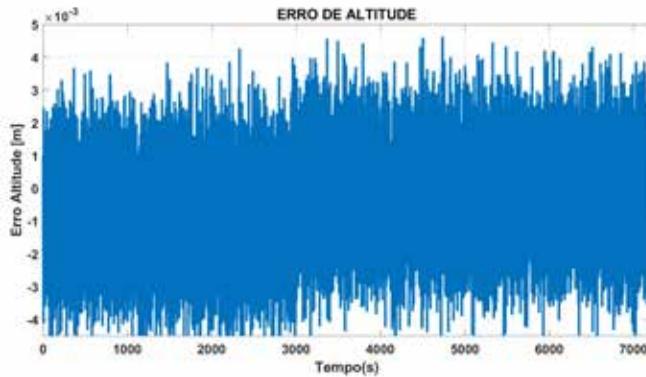
Cabe ressaltar, que a medida de altitude fornecida pelo GPS foi usada na observação do erro de altitude e a medida do sensor de *heave* no filtro de mistura.

Os erros apresentados nas figuras a seguir, são relacionados à diferença entre os valores reais e os estimados.

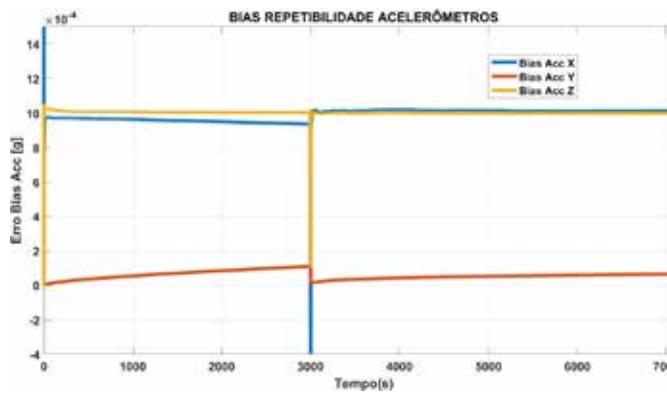
A **figura 5** apresenta o erro de altitude durante a simulação do alinhamento em movimento, de onde observa-se a eficácia, em estabilizar as medidas estimadas de altitude, do filtro de mistura integrado a um sensor de altitude. O erro de altitude ao fim da simulação é da ordem de  $10^{(-3)}$  m.

Os erros presentes nos sensores inerciais, como *biases* repetibilidade (**figura 6 e 7**) se propagam para as equações de navegação produzindo erros nos parâmetros navegacionais, que crescem com o tempo. Assim, a estimativa destas *biases* melhoraram significativamente os resultados do sistema

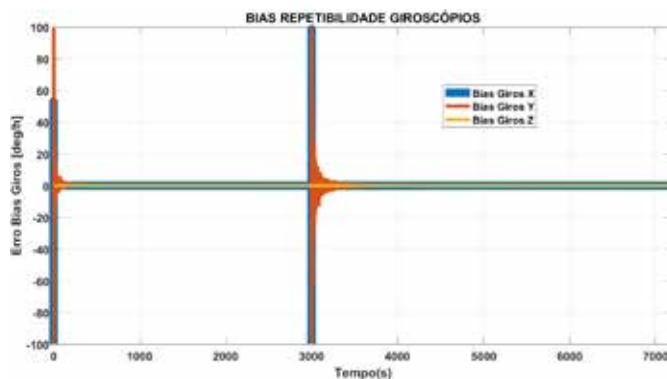
inercial. A estimativa dos biases dos acelerômetros X e Y é de  $1 \mu\text{g}$ , com erro de  $0,013 \mu\text{g}$  e  $0,0009 \mu\text{g}$ , respectivamente, e para o eixo Z estimativa de  $100 \mu\text{g}$  com erro de  $0,001 \mu\text{g}$ .



**Fig. 5** – Erro da altitude durante a simulação.



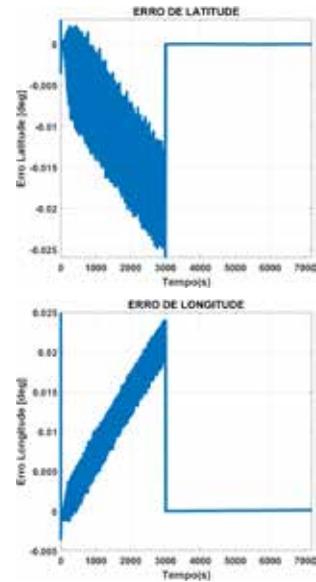
**Fig. 6** – Estimativa da repetibilidade dos *biases* do Acelerômetro: Acc. X (azul), Acc. Y (laranja) e Acc. Z (amarelo) para toda simulação.



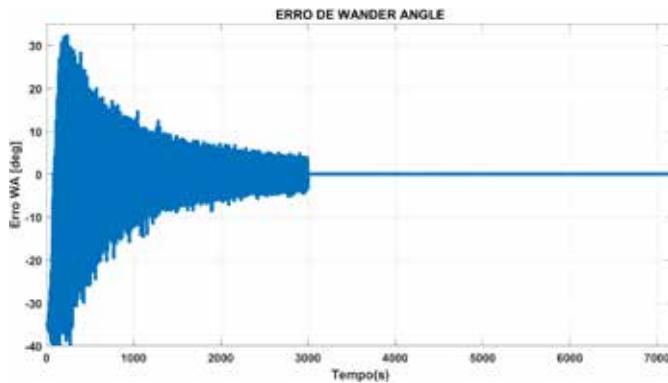
**Fig. 7** – Estimativa da repetibilidade dos *biases* dos Giroscópios: Giros X (azul), Giros Y (laranja) e Giros Z (amarelo) para toda simulação.

A estimativa dos *biases* dos giroscópios X, Y e Z foi da ordem de  $0,1 \text{ grau/h}$  com erros de  $0,001$ ,  $0,0004$  e  $0,0001 \text{ grau/h}$  para os X, Y e Z, respectivamente.

Na **figura 8**, são apresentados os erros de latitude e longitude. No instante inicial do alinhamento os valores de latitude e longitude são conhecidos, fornecidos pelo GPS, consequentemente o erro inicial é zero. Entretanto, com o passar do tempo, os erros das posições angulares se propagam aumentando sem limite. Este comportamento é esperado em todo sistema inercial devido à impossibilidade de estimar perfeitamente os erros aleatórios presentes nos sensores iniciais, que geram erros de posição crescentes com o tempo. Durante o alinhamento fino, a estimativa dos *biases* repetibilidade convergem para valores próximos aos reais, o que melhora a correção da medida dos sensores iniciais, diminuindo os erros dos ângulos de posição ao longo do tempo. Corrigindo os erros de latitude e longitude, obtidos das equações (22.1) e (22.2) em função dos desvios angulares de posição estimados, chega-se, ao fim da simulação, a uma acurácia para latitude da ordem de  $10^{-5}$  graus e para longitude da ordem de  $10^{-4}$  graus.



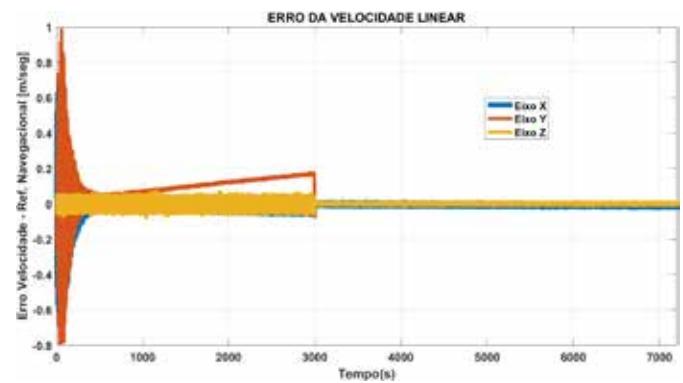
**Fig. 8** – Erro de Latitude e Longitude durante a simulação.



**Fig. 9 –** Erro do *wander angle* durante a simulação.

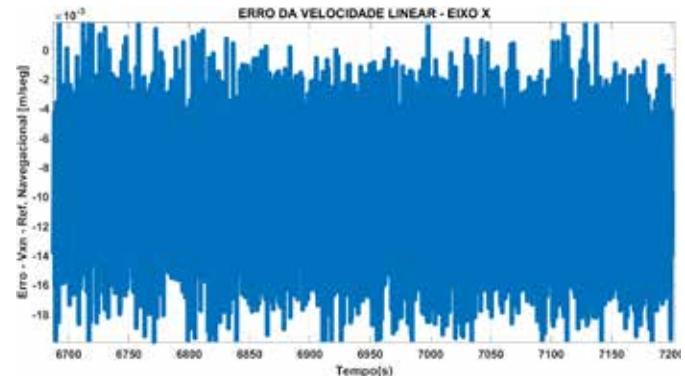
A **figura 9** apresenta o comportamento do erro de *wander angle* durante a simulação do alinhamento em movimento. Para inicializar a equação dinâmica de posição (3), a condição inicial do *wander angle* para os valores calculados e estimados é assumida como zero. No alinhamento grosso, os erros trigonométricos,  $\delta s\alpha$  e  $\delta c\alpha$ , são estados estimados pelo FK cuja combinação linear fornece o erro estimado de *wander angle*,  $\delta\alpha$ . Corrigindo o *wander angle* com  $\delta\alpha$ , observa-se que após 3000 segundos o erro do ângulo  $\alpha$  é de aproximadamente  $|1.5|$  graus. Convertendo para o algoritmo fino, onde  $\delta\alpha$  é um estado estimado diretamente, o erro do *wander angle*, no final do alinhamento em movimento é da ordem de  $10^{-2}$  grau.

A **figura 10** mostra os erros das velocidades lineares no referencial navegacional *wander Azimuth* durante o alinhamento em movimento. A velocidade linear no eixo  $Y_n$  seria nula caso não houvesse erros. Da **figura 10**, observa-se que no final do alinhamento o erro na direção do eixo  $Y_n$  tem acurácia da ordem de  $10^{-3}$ . O comportamento do erro mostra que o uso do filtro de mistura garante a convergência do valor da velocidade linear no eixo  $Z_n$ ,  $v_z^n$ , para o valor correspondente à projeção vertical da velocidade linear longitudinal do navio, de 4,44 m/s alinhada com o eixo  $X_b$ , produzida pela oscilação do ângulo de pitch. Ao fim do alinhamento a acurácia da velocidade  $v_z^n$  é da ordem de  $10^{-2}$ .



**Fig. 10 –** Erro da velocidade linear durante a simulação.

A velocidade no eixo  $X_n$  é a projeção horizontal da velocidade longitudinal ( $X_b$ ) do navio. O gráfico da **figura 11** mostra que a acurácia do erro da velocidade na direção  $X_n$ ,  $v_x^n$ , é  $10^{-3}$  m/s, no fim do período de simulação.



**Fig. 11 –** Erro no eixo X da velocidade linear ao fim da simulação.

As **figura 12, 13 e 14** mostram os valores dos erros dos ângulos de *roll*, *pitch* e *heading* para os alinhamentos grosso e fino. Os desvios angulares de altitude, estimados pelo FK, são usados para calcular os erros de *roll* e *pitch* conforme as equações (37), que corrigem a altitude calculada pelo sistema. Neste artigo, o desvio angular de azimute é incluído como estado e é estimado. Ao fim do alinhamento, a acurácia dos ângulos de *roll* e *pitch* possuem erros menores que  $|0,005|$  grau, enquanto o ângulo de *heading* possui acurácia menor que  $|0,02|$  grau.

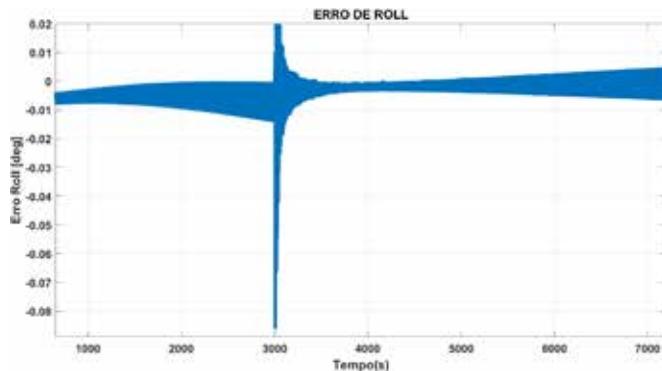


Fig. 12 – Erro do ângulo de *Roll* durante a simulação.

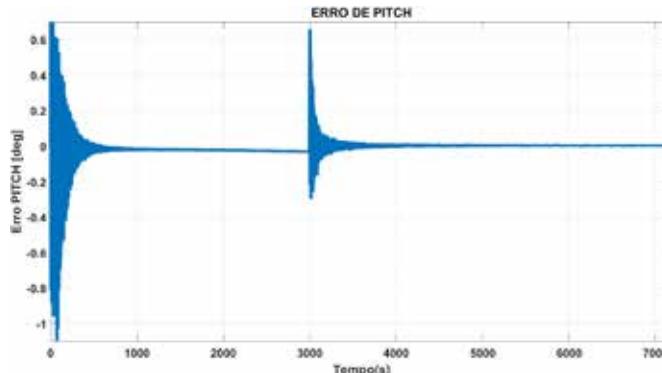


Fig. 13 – Erro do ângulo de *Pitch* durante a simulação.

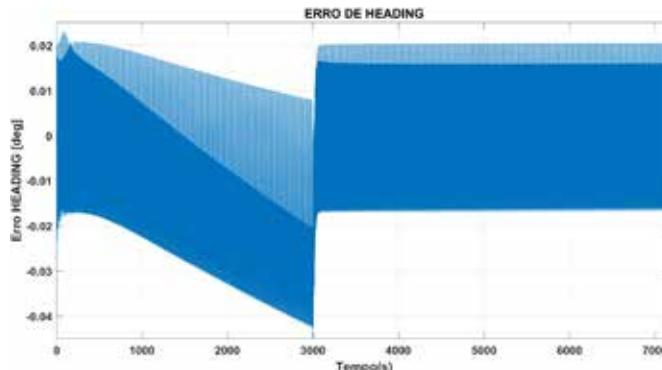


Fig. 14 – Erro do ângulo de *Heading* durante a simulação.

## 11. Conclusão

Neste trabalho, o algoritmo de alinhamento em movimento de um SNIS apresentado por [1] foi aprimorado. O aperfeiçoamento consistiu em introduzir as estimativas do desvio angular de *heading* e dos biases repetibilidade dos sensores iniciais na estrutura do

FK. Com base nas hipóteses iii e iv, uma estratégia para observar indiretamente os ângulos de *roll* e *pitch* foi implementada usando as medidas dos acelerômetros e do altímetro. Além disso, a partir dessas observações, das suas derivadas dos ângulos e das observações de velocidade, os biases repetibilidade dos sensores iniciais também puderam ser observados indiretamente. Como consequência, as medidas de atitude e dos biases são estimadas, nas simulações realizadas, com acurácia de  $|0,005|$ ,  $|0,005|$  e  $|0,02|$  grau para os ângulos de *roll*, *pitch* e *heading*, respectivamente; e erros de  $10^{-4}$  grau para os acelerômetros, e  $10^{-2}$  grau para os giroscópios.

As medidas do altímetro são introduzidas também em um filtro de mistura integrado com a velocidade vertical estimada, para estabilizar a altitude calculada pelo sistema.

A estimativa dos *biases* repetibilidade implementam a compensação das medidas dos sensores iniciais, na configuração feedback, o que proporciona uma melhora significativa da precisão dos parâmetros de navegação durante o processo de alinhamento do SNIS.

O estudo aponta como possibilidade de trabalho futuro o desenvolvimento de um novo modelo para a dinâmica de erros de um algoritmo de alinhamento em movimento. Um tal modelo incluiria também as estimativas iniciais dos ângulos de *roll* e *pitch* na fase de inicialização e de alinhamento grosso do SNIS e consideraria como variáveis a serem estimadas, não somente os erros das funções trigonométricas do *wander angle*, associadas aos erros grandes de azimute, como também os erros das funções trigonométricas dos ângulos de atitude, *roll* e *pitch*.

## Agradecimento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## Referências

- [1] ROGERS, Robert M. Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems. AIAA Education Series. Second Edition. Blacksburg, Virginia. United States of America, 2003.
- [2] GONÇALVES, Ana Cristina Vieira. Algoritmo de Alinhamento em Movimento de um Sistema de Navegação Inercial do tipo Strapdown. Instituto Militar de Engenharia. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro. Brasil, 2017.
- [3] TITTERTON, D. H.; WESTON, J. L. Strapdown inertial navigation technology. The Institution of Electrical Engineers – IEE. Second Edition. United Kingdom, 2004.
- [4] SAVAGE, P.G. Strapdown Inertial Navigation Lectures Notes. Strapdown Associates, Inc. Minnesota. United States of America, 1985.
- [5] BRITTING, K. R.. Inertial Navigation Systems Analysis. Cambridge, Massachusetts, April 1971.
- [6] ALI, Jamshaid.; MUHAMMAD, Ushaq. A consistent and robust Kalman filter design for in-motion alignment of inertial navigation system. Measurement 42.4 (2009): 577-582.
- [7] HAO, Yanling; ZHILAN, Xiong; ZAIGANG Hu. Particle filter for INS in-motion alignment. 1ST IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2006.
- [8] QI, Nie; PENGFEI, Zhao. SINS in-motion alignment for initial attitude uncertainty. In: 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). IEEE, 2015. p. 200-203.
- [9] BIMAL, Raj, K.; JOSHI, Ashok. In-motion alignment of inertial navigation system with doppler speed measurements. In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2015. p. 0096.
- [10] World Geodetic System. International Civil Aviation Organization, Second Edition. 1984

# Ensaio da estimativa da topografia do nível médio do mar local em marégrafos da costa brasileira

Everton Gomes dos Santos<sup>\*a</sup>, Leonardo Castro de Oliveira<sup>b</sup>

<sup>a</sup>everton.santos@ibge.gov.br

<sup>b</sup>leonardo@ime.eb.br

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho, é indicar um procedimento para determinação da estimativa da Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) como insumo à definição moderna de um sistema vertical. A modelagem empregada foi baseada nas abordagens geométrica e oceanográfica, na qual são utilizadas observações do Nível Médio do Mar (NMM) provenientes de marégrafos. As principais etapas da modelagem foram: a determinação da posição geocêntrica dos marégrafos; o cálculo do NMM local; e o cálculo da altura geoidal. Os valores obtidos para os sítios de Niterói-RJ, Arraial do Cabo-RJ e Macaé-RJ apontam que a região não apresenta variações muito significativas. Os sítios de Imbituba-SC e Salvador-BA apresentam valores próximos entre si, apesar de possuírem peculiaridades importantes. O sítio de Fortaleza-CE não difere significativamente dos valores obtidos em outras pesquisas. A estratégia empregada apontou que os valores de TNMM para parte da costa brasileira são coerentes com outras abordagens. Esses resultados podem ser subsídios ao aprimoramento de referências verticais.

**ABSTRACT:** The objective of this work is to indicate a procedure for determining the estimate of the Sea Surface Topography (SSTop) as an input to the modern definition of a vertical system. The modeling used was based on geometric oceanographic and approaches, in which observations of Mean Sea Level (MSL) from tide gauges are used. The main steps of the modeling were: the determination of the geocentric position of the tide gauges; calculating the local MSL; and the calculation of the geoid height. The values obtained for the sites of Niterói-RJ, Arraial do Cabo-RJ and Macaé-RJ indicate that the region does not present very significant variations. The Imbituba-SC and Salvador-BA sites have similar values despite having important peculiarities. The Fortaleza-CE site does not differ significantly from values obtained in other researches. The strategy employed indicated that the SSTop values for part of the Brazilian coast are consistent with other approaches. These results can be subsidies for the improvement of vertical references

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistema vertical. Geóide. Nível médio do mar. Modelo Global do Geopotencial.

**KEYWORDS:** Height system. Geoid. Mean Sea Level. Global Geopotential Model.

## 1. Introdução

A definição clássica do geóide foi primeiramente explicitada por Gauss, em 1828, como sendo a referência para a representação geométrica (ou um modelo) da superfície terrestre. Posteriormente, em 1973, Listing chamou tal modelo de geóide (ou superfície geoidal da Terra). O geóide consiste em uma superfície equipotencial que mais se aproxima do nível médio não perturbado dos mares. A definição moderna reconhece que a superfície média dos oceanos não coincide com a superfície de nível do campo de gravidade terrestre [1]. Essa não coincidência se deve ao fato do Nível Médio do Mar (NMM) não ser estático. Isto é ocasionado pelo movimento das correntes

oceânicas e por outros efeitos quase estacionários [2], ou seja, não é uma superfície em equilíbrio com o campo de gravidade da Terra. Logo, existe uma diferença (ou separação) entre o NMM e o geóide conhecida como Topografia do Nível Médio do Mar – TNMM (do inglês *Sea Surface Topography* – SSTop) [3].

Esta diferença se dá pela interação de vários fenômenos físicos, como por exemplo, os meteorológicos e os oceanográficos, podendo ainda variar em função do tempo [4]. Quando comparado ao geóide, tal separação é da ordem de  $\pm 2$  m [5]. Isto posto, leva a conclusão de que cada ponto da costa, ou seja, cada marégrafo, está relacionado a um valor diferente de TNMM [6].

As redes geodésicas clássicas de muitos países, inclusive o Brasil, utilizaram, e ainda utilizam,

como referência *data* verticais definidos e realizados baseados em um, ou mais, valor(es) de NMM obtido(s) em determinado período e vinculado a uma época específica [7] supondo uma coincidência entre o NMM e o geóide.

No Brasil os dois *data* (sistemas) verticais, isto é, o *Datum* de Imbituba – SC, definido por observações de nível do mar no período de 1949 a 1957, e o *Datum* de Santana – AP, definido por observações de nível do mar no período de 1957 a 1958, foram baseados em observações maregráficas desconsideradas as variações temporais e espaciais do nível médio do mar e do movimento vertical da crosta [6].

A concepção moderna entende que a determinação de um sistema vertical deve ser a mais homogênea possível. Para tanto, requer uma infraestrutura geodésica complexa, onde é necessária a compatibilização de informações e metodologias que tenham padronização a nível global. Essa questão, no âmbito do continente americano, vem sendo discutida pelo Grupo de Trabalho III do SIRGAS (*Datum Vertical*) estabelecido em 1997 [8]. Vale ressaltar que outros grupos da comunidade científica têm coordenado esforços no que tange ao desenvolvimento de conhecimentos voltados ao aprimoramento da componente vertical [9]. Contudo, a citada infraestrutura depende do avanço da tecnologia em algumas áreas do conhecimento, além de estudos aplicados, a fim de tornar possível o objetivo de construir um sistema vertical unificado a nível global.

Nesse sentido, a *International Association of Geodesy* (IAG), por meio de sua resolução Nº. 1 de julho de 2015 [9], preconiza a adoção de uma superfície equipotencial do campo da gravidade com geopotencial  $W_0 = 62\ 636\ 853,4\ m^2 s^{-2}$  como superfície de referência que possibilitará a unificação dos diferentes sistemas altimétricos existentes. Evidentemente, a TNMM deve ser considerada na realização de tais sistemas.

Um subsídio fundamental à unificação de diferentes *data* locais é a combinação de observações do NMM, coletadas através de marégrafos, à TNMM, obtida por

meio de satélites altimétricos ou abordagens associadas a Modelos Globais do Geopotencial – MGGs.

O objetivo desse trabalho é indicar uma modelagem baseada nas abordagens geométrica e oceanográfica para determinação da estimativa da TNMM, em estações maregráficas na costa brasileira, como insumo às discussões sobre a definição moderna de um *datum* vertical.

## 2. Modelagem para determinação da estimativa da tnmm

A abordagem geométrica é o método que combina registros das médias do nível do mar com modelos geopotenciais, como proposto por [10] e revisitado por [11]. A solução para a estimativa da TNMM é dada pela Eq. (1), baseada em variáveis que compõem o sistema dos referenciais maregráficos. A modelagem apresentada será aplicada para parte dos marégrafos da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG.

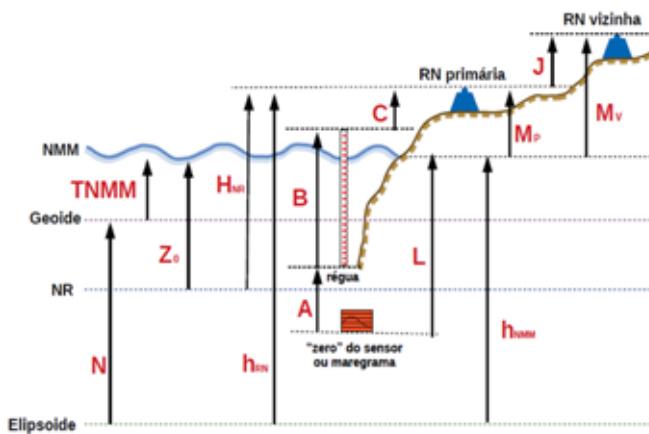
$$TNMM = h_{RN} - N - H_{NR} + Z_0 \quad (1)$$

Na Eq. (1) tem-se que  $h_{RN}$  é a altitude elipsoidal da Referência de Nível (RN) primária de um marégrafo,  $N$  é a altura geoidal fornecida pelos modelos do geopotencial ou pelos modelos geoidais,  $H_{NR}$  é a altura da RN acima do Nível de Redução (NR) – informada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação na ficha F 41 [12] – e  $Z_0$  a altura do nível do mar acima do NR. Caso se disponha da altura do NMM referida a um elipsóide ( $h_{NMM}$ ) a Eq. (1) pode ser reescrita na forma de abordagem oceanográfica [13]:

$$TNMM = h_{NMM} - N \quad (2)$$

A **figura 1** esquematiza os termos da Eq. (1) e as superfícies relacionadas a ela. Cabe destaque, dentre essas superfícies e elementos, respectivamente, o Nível de Redução (NR), referência a qual corresponde à média das menores marés de sizígia [14], e o “zero”

do sensor mareigráfico, ponto de referência ao qual a observação mareigráfica está vinculada.

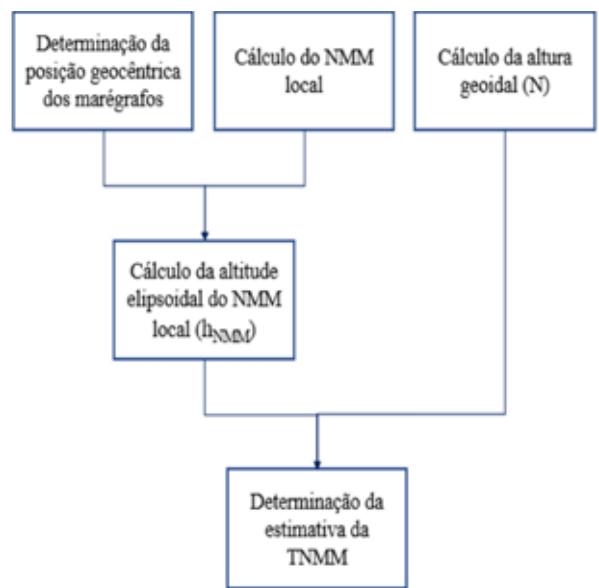


**Fig. 1 – Componentes do sistema para cálculo da estimativa da TNMM.** Fonte: Adaptado de [10] e [16]

Para a devida leitura e compreensão da **figura 1**, a qual apresenta também as demais grandezas para vinculação da TNMM à RN primária, tem-se que:

- A - desnível entre os “zeros” dos marégrafos e da régua, resultante da aferição dos sensores obtido por meio do Teste Van de Castele [15];
- B - leitura nominal do pino/topo da régua;
- C - desnível do pino/topo da régua até a RN primária (nívelamento geométrico da régua);
- J - desnível entre as Referências de Nível (RN primária e vizinha) (obtido através do nívelamento geométrico científico do Controle Geodésico de Estações Mareigráficas – CGEM [16]);
- L - Nível médio do mar local obtido das leituras do sensor mareigráfico;
- Mp e Mv - altura da RN primária e vizinha acima do nível médio do mar local [16].

A **figura 2** apresenta o fluxograma da estratégia utilizada para a determinação da estimativa da TNMM que será detalhada nas próximas seções.



**Fig. 2 – Fluxograma para determinação do valor da TNMM**

Foram selecionados seis sítios distribuídos ao longo da costa brasileira a fim de se ter uma melhor representatividade espacial do litoral brasileiro. Foram considerados ainda pontos importantes para estudos voltados ao acompanhamento das evoluções temporal e espacial dos *data* verticais brasileiros e suas relações com os demais níveis de referência utilizados na região costeira. São eles: Imbituba-SC, por ser o *Datum* que cobre a maior parte da Rede Altimétrica de Alta Precisão; Niterói-RJ; Arraial do Cabo-RJ e Macaé-RJ, por estarem na porção da Rede Geodésica de Referência Costeira [17]; Salvador-BA e Fortaleza-CE, por se localizarem na Região Nordeste, complementando a disposição espacial. Além das razões explicitadas, os sítios de Imbituba-SC e de Fortaleza-CE são estações escolhidas para estudos sobre o *International Height Reference System/Frame* – IHRS/IHRF (ver [3]).

## 2.1 Determinação da posição geocêntrica dos marégrafos

A estratégia para determinação da posição geocêntrica dos marégrafos, materializados pelas RRNN primárias as quais os sensores e as réguas de

maré estão vinculadas, foi baseada na metodologia apresentada por [18]. Foram selecionadas três RRNN pertencentes às sub-redes de cada marégrafo com estrutura de Dispositivo de Centragem Forçada (DCF), exceto para o sítio de Macaé, que não possui o citado dispositivo instalado. A **figura 3** apresenta um modelo de RN composta por DCF e realização do rastreio GNSS com um suporte metálico de 10 cm (nesse caso não varia a altura da antena; no caso de Macaé varia).



**Fig. 3 –** DCF implantado em um marco geodésico.

Um aspecto fundamental sobre o nivelamento no âmbito do CGEM, tanto dos DCFs quanto das demais estações geodésicas de controle, é que se tem alcançado erros de fechamento melhores que  $1\text{mm}\sqrt{D_{Km}}$ , sendo D o comprimento de uma seção de nivelamento em quilômetros. Diante do exposto, a altitude elipsoidal estimada ( $h_A$ ), da RN primária do marégrafo, é dada pela Eq. (3):

$$h_A = h_B - \Delta J_{BA} \quad (3)$$

na qual  $h_B$  é a altitude elipsoidal da RN vizinha e  $\Delta J_{BA}$  o desnível ajustado entre os pontos A e B.

Os dados utilizados foram oriundos dos levantamentos *Global Navigation Satellite System* (GNSS), referentes a 4 sessões com duração de 6 horas de rastreio a um intervalo de 15 segundos (ver [19]), e desníveis resultantes do CGEM do ano 2019, realizado pelo IBGE nos marégrafos da RMPG. No caso de Macaé foram utilizados os dados correspondentes do CGEM do ano 2015, uma vez que depois que cessaram as atividades desse marégrafo não se realizaram demais controles.

O processamento das observações GNSS foi realizado com o *software Leica Infinity 3.1* no método relativo para a semana SIRGAS da época do levantamento. O elipsóide de referência foi o GRS80.

Em relação aos desníveis utilizados no cálculo, cabe informar que foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados, no programa *Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial data* (GHOST), com desvio padrão igual a  $1\text{mm}\sqrt{D_{Km}}$ . Foi utilizado o conceito de maré permanente médio, logo, também foi necessário realizar a conversão das altitudes elipsoidais para o conceito de maré média, conforme apresentado por [20]. A **tabela 1** apresenta os valores da altitude elipsoidal estimada para cada marégrafo conforme a Eq. (3), bem como seu desvio padrão.

**Tab. 1 –** Altitude elipsoidal estimada para cada sítio.

| Marégrafo       | Desnível<br>nivelamento<br>geométrico<br>$\Delta J_{BA}$ (m) | Altitude<br>elipsoidal<br>calculada<br>$h_B$ (m) | Altitude<br>elipsoidal<br>estimada<br>$h_A$ (m) | Desvio<br>padrão<br>(m) |
|-----------------|--|--|---|-------------------------|
| Niterói         | 0,450  | -3,807   | -4,257  | 0,006                   |
| Arraial do Cabo | -0,017   | -2,973   | -2,956  | 0,002                   |
| Macaé           | 0,257  | -3,265   | -3,522  | 0,001                   |
| Imbituba        | 5,950  | 9,253  | 3,0303  | 0,006                   |
| Salvador        | 0,676  | -8,039   | -8,716  | 0,002                   |
| Fortaleza       | 2,943  | -2,582   | -5,525  | 0,008                   |

De maneira complementar foi realizado o cálculo da altura da RN primária acima do nível médio do mar local ( $M_p$ ). Para tanto foi utilizada a Eq. (4), que relaciona as componentes apresentadas na **figura 1**. Os resultados dos valores de MP para cada sítio estudado são mostrados na **tabela 2**.

$$M_p = A + B + C - L \quad (4)$$

**Tab. 2 –** Altura elipsoidal da RN primária

| Marégrafo       | A (m)  | B (m) | C (m)  | L (m) | Mp (m) |
|-----------------|--------|-------|--------|-------|--------|
| Niterói         | 0,001  | 3,800 | -0,224 | 1,908 | 1,669  |
| Arraial do Cabo | -0,002 | 3,013 | 1,463  | 1,739 | 2,735  |
| Macaé           | 0,161  | 0,313 | 1,498  | 1,341 | 3,331  |
| Imbituba        | 0,998  | 2,016 | 0,487  | 1,984 | 1,607  |
| Salvador        | 5,015  | 4,015 | 0,233  | 7,283 | 1,980  |
| Fortaleza       | 3,257  | 6,030 | 0,264  | 6,339 | 3,212  |

## 2.2 Cálculo da altura geoidal

De acordo com [21], para a determinação da TNMM são mais adequados os modelos do tipo combinado, isto é, modelos que, além dos dados de satélite, têm em sua constituição dados de gravimetria terrestre, entre outras informações. O XGM2019e é um MGG do tipo combinado que trouxe em sua realização inovações importantes [22] e [23]. O Brasil, por meio do IBGE, contribuiu com um conjunto de dados de 1.970 pontos de observações GNSS/nivelamento para o XGM2019e. Essa medida proporcionou uma melhoria significativa nos valores de desvio padrão, sobretudo no Estado do Rio de Janeiro e de Santa Catarina, como relatado por [24].

Outra maneira de calcular a altura geoidal para o território brasileiro é por meio do MAPGEO2015, disponibilizado na página do IBGE (<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/10855-modelo-de-ondulacao-geoidal.html?=&t=acesso-ao-produto>). No entanto, o citado modelo não apresenta compatibilidade de dados com os MGGs, pois estes são fundamentados em séries de parâmetros que envolvem, consistentemente, gravimetria por satélites e observações terrestres do globo inteiro, além de informações gravimétricas do oceano. Essas informações são fundamentais à consistência dos dados em regiões litorâneas, foco da presente pesquisa. Informações complementares sobre MAPGEO2015 podem ser encontradas em [25].

De posse da posição geocêntrica da referência de cada marégrafo constante nessa pesquisa, através do site do ICGEM (<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>) foi possível calcular a altura geoidal para cada um deles. O elipsóide de referência foi o GRS80, assim como foi feito na seção 2.1. O conceito de maré foi o médio. A adoção desse conceito para essa pesquisa foi baseada na recomendação da IAG na resolução Nº 1 de 2015, que se coaduna com o estabelecido para o IHRS. Não foi considerado o termo de grau zero. A função para o cálculo foi a *geoid*. Em relação ao grau e ordem foi utilizado até 2.190, máximo de desenvolvimento disponível até a data do cálculo. Por

fim, não foi utilizado o filtro gaussiano para não inserir suavização da superfície calculada. O cálculo da altura geoidal, para determinação da TNMM, foi realizado por meio do MGG XGM2019e [22]. Na **tabela 3** são apresentados os valores encontrados para as alturas geoidais, referentes a cada sítio dessa pesquisa, vinculadas às RRNN primárias de cada marégrafo.

**Tab. 2** – Altura geoidal para cada sítio.

| Marégrafo       | RN primária (m) | Altura geoidal (m) |
|-----------------|-----------------|--------------------|
| Niterói         | 2994 L          | -5,57              |
| Arraial do Cabo | 2987 P          | -5,30              |
| Macaé           | 3086 U          | -6,31              |
| Imbituba        | 3012 X          | 1,75               |
| Salvador        | 3640A           | -10,62             |
| Fortaleza       | 4336A           | -8,49              |

## 2.3 Cálculo do nível médio do mar local

A determinação dos níveis médios do mar locais foi executada de acordo com o descrito em [16]. Portanto, as ferramentas computacionais aplicadas a cada etapa de cálculo foram provenientes do pacote de software SLP 64 [26].

O período das observações para determinação do NMM em cada sítio pesquisado é variável conforme a data de instalação do marégrafo ou da possibilidade de recuperação dos dados. Desta maneira, o período limite para a maior parte das séries é 2019, excetuando apenas o marégrafo de Macaé que teve uma interrupção da coleta de dados em maio de 2015. Outro aspecto relevante é que o cálculo do NMM local não levou em consideração a correção de efeitos geodinâmicos. Frente a essa questão, as variações determinadas de NMM aqui utilizadas são relativas. Informações adicionais sobre essa questão podem ser encontradas em [27].

Uma vez obtidos os valores do NMM, estes precisam ser referenciados ao elipsóide a fim de satisfazer o cálculo da Eq. (2). Tendo em vista essa necessidade, por meio da Eq. (5), foram calculados os valores de  $h_{NMM}$ .

$$h_{NMM} = h_A + M_P \quad (5)$$

A **tabela 4** apresenta os valores do NMM para cada local contemplado na pesquisa e o período de observação, bem como os valores de altura do NMM referenciado ao elipsóide GRS80.

**Tab. 4** – Nível médio do mar para cada sítio.

| Marégrafo       | NMM (m) | $h_{NMM}$ (m) | Período de observação |
|-----------------|---------|---------------|-----------------------|
| Niterói         | 1,908   | -5.926        | 2009-2019             |
| Arraial do Cabo | 1,739   | -5.692        | 2009-2019             |
| Macaé           | 1,341   | -6.853        | 2001-2015             |
| Imbituba        | 1,984   | 1.696         | 2001-2019             |
| Salvador        | 7,283   | -10.696       | 2004-2019             |
| Fortaleza       | 6,339   | -8.737        | 2008-2019             |

## 2.4 Determinação da estimativa da TNMM local

A Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) é a separação entre o NMM e o geóide, assim sua determinação pode ser obtida pela diferença entre o NMM referido a um elipsóide ( $h_{NMM}$ ) e a altura geoidal (N) proveniente de um MGG, Eq. (2) (apresentados na **tabela 3**). Para tanto é necessário que o NMM esteja referenciado ao mesmo elipsóide que as alturas geoidais.

A TNMM calculada foi referenciada às RRNN primárias de cada marégrafo. Dado que tais RRNN estão muito próximas aos sensores, menos de 3 m, assume-se, portanto, que a variação do gradiente geoidal não apresenta diferenças significativas. A **tabela 5** apresenta os valores estimados da TNMM referentes aos marégrafos desta pesquisa calculados por meio da Eq. (2).

**Tab. 5** – Topografia do nível médio do mar estimada para cada sítio.

| Marégrafo       | TNMM (m) |
|-----------------|----------|
| Niterói         | -0,356   |
| Arraial do Cabo | -0,395   |
| Macaé           | -0,538   |
| Imbituba        | -0,050   |
| Salvador        | -0,074   |
| Fortaleza       | -0,242   |

## 3. Análise dos resultados

Os sítios de Niterói, Arraial do Cabo e Macaé apresentam valores de TNMM compatíveis entre si, desta forma aponta que a TNMM na região não apresenta variações muito significativas. Observa-se que à medida que vai se deslocando no sentido sul-norte tais valores vão diminuindo gradativamente, indicando como se dá o comportamento do gradiente geoidal em relação ao NMM na região. No entanto, vale frisar que a heterogeneidade das séries temporais do nível do mar, das observações GNSS e dos nivelamentos também podem introduzir desvios importantes aos cálculos.

Ossítios de Imbitubae Salvador apresentam valores próximos de TNMM, respectivamente de 0,050 m e 0,074 m, apesar de possuírem peculiaridades importantes relacionadas à natureza de cada local. Como exemplos, a plataforma continental, o regime meteorológico, a temporalidade da série de NMM, entre outros aspectos. Na pesquisa de [28] é apontada essa similaridade de valores. Vale assinalar que na citada pesquisa foi utilizada uma metodologia diferente da tratada nesse artigo: baseada em modelos oceânicos de TNMM e referenciada ao elipsóide.

O valor de TNMM obtido para o sítio de Fortaleza foi de -0,242 m (utilizando o GRS80). A mesma estação apresentou o valor de -0,260 m na investigação realizada por [29] quando este autor utilizou o WGS84. A discrepância observada traduz, dentre outros possíveis fatores, a diferença de elipsóide, a época e a metodologia do levantamento GNSS. Em contrapartida, utilizando o mesmo elipsoide (GRS80), a diferença passa a ser de 0,916 m, dado que em [29] o valor da TNMM estimada é de 0,674 m. É fundamental salientar que a metodologia empregada por [29], apesar de ter considerado o mesmo elipsóide e o mesmo MGG aqui utilizados, têm diferenças significativas deste trabalho.

Por outro lado, a adoção do mesmo MGG possibilita fazer comparações mais adequadas, principalmente por que a altura geoidal é um dos fatores principais no cálculo da estimativa da TNMM (ver Eq. (2)). A adoção do tipo de MGG para a solução

é deveras importante, pois tal modelo pode ou não ser adequado à região de estudo. Uma comparação sobre essa questão aplicada ao Brasil pode ser vista em [23], no qual são analisados cinco diferentes MGGs, incluindo o XGM2019e, e apresentadas suas melhorias em termos de desvio padrão.

Outro aspecto fundamental tratado nessa pesquisa foi a análise da estimativa do potencial do modelo geoidal (ou quase geoidal). Ferreira *et al* [30] sustentam que é possível realizar tal análise por meio da comparação dos valores de altura geoidal/anomalia de altura provenientes de observação GNSS/Nivelamento com as derivadas do MGG. Os mesmos autores adicionam que o desvio padrão é o recurso estatístico mais indicado para a análise dos resultados. Ao aplicar a citada verificação aos sítios estudados obteve-se valores de desvios padrões variando entre 0,004 m a 0,007 m, o que indica que o modelo XGM2019e se adequa às regiões pesquisadas. Cabe pontuar que as menores discrepâncias foram apresentadas nos sítios de Niterói-RJ e Arraial do Cabo-RJ e as maiores em Salvador-BA e Fortaleza-CE, concordando com os resultados encontrados por [23].

As séries utilizadas no cálculo do NMM são fatores que implicam diretamente na determinação da TNMM. O recomendado é que sejam utilizadas séries de 18,6 anos (ciclo completo de nutação da Lua)<sup>[1]</sup>. No entanto, nos sítios adotados nesta pesquisa não se dispõe dessa quantidade de observações.

A decisão de utilizar os períodos em sua totalidade, ao invés de um período comum de observações, reside no fato de que quanto menor o período observado mais propício é o risco de variações pontuais afetarem os valores da série, ocasionando, consequentemente, tendências fictícias. Nesse sentido foram realizadas simulações, as quais mostraram que as estimativas do NMM resultaram em valores menos homogêneos à medida que o tempo de observações ia sendo diminuído; em alguns casos ocorria um aumento significativo desses valores. Essa questão aponta para a ocorrência de fatores sazonais em determinados períodos que podem apresentar tendências negativas ou positivas das séries maregráficas.

Outro aspecto relevante, como mencionado na seção 2.3, é que o cálculo do NMM não levou em consideração a correção de efeitos geodinâmicos, uma vez que as estações maregráficas de Niterói-RJ, Arraial do Cabo-RJ e Macaé-RJ não possuem uma estação GNSS contínua que possibilita o acompanhamento do fenômeno de movimentação crustal local. Já para o caso de Imbituba-SC, Salvador-BA e Fortaleza-CE, que possuem estações de monitoramento contínuo, existem questões relacionadas à alteração de referência do *International GNSS Service* [31] que necessitam de correções mais rigorosas, mas que fogem ao escopo desta pesquisa.

A detecção e quantificação dos movimentos verticais de origem não oceânicas são fundamentais para o refinamento dos valores dos NMM. Também são para realizar uma comparação de fato compatível dos valores de TNMM provenientes dos modelos globais de TNMM, uma vez que esses modelos não sofrem com os possíveis desvios provocados pela movimentação vertical crustal, ao contrário dos sensores instalados na superfície terrestre.

## 4. Conclusões

O ensaio para determinação da estimativa da TNMM apresentada por este trabalho traz contribuições para a discussão sobre os preceitos atuais da determinação de referenciais verticais modernos.

O cálculo do NMM local mostrou-se consistente com o realizado em 2016 pelo IBGE [16]. Os aprimoramentos na análise e a inserção de dados do período de 2016 a 2019 permitiram representar e entender melhor o comportamento das tendências de elevação do nível do mar, além de proporcionar séries mais refinadas para estudos geodésicos, sobretudo nas séries com períodos de aproximadamente 15 anos, como as de Macaé-RJ, Imbituba-SC e Salvador-BA.

O MGG utilizado para determinação da TNMM, o XGM2019e, resultou adequado à região de estudo no grau e ordem utilizados, isto é, 2.190. Espera-se que quando esse MGG atinja seu desenvolvimento máximo de 5.540, possa contribuir com soluções ainda mais precisas.

A estratégia empregada neste trabalho apontou que os valores de TNMM para parte da costa brasileira estão coerentes com as abordagens que vêm sendo desenvolvidas em outras pesquisas. Esses resultados podem ser utilizados como subsídios para pesquisas que discutem acerca da utilização e aprimoramento de referenciais verticais.

Apesar dos resultados permitirem apontar o comportamento da relação entre o geóide e o NMM ao longo da costa brasileira, ainda é necessário estender esse estudo a outros locais com o objetivo de conhecer melhor o panorama da TNMM para o Brasil. Existem outros locais que possuem infraestrutura mareográfica

e geodésica que permitem aprimorar essa pesquisa, como exemplo, o marégrafo de Cananéia-SP.

É preciso considerar também a necessidade de mais aprimoramentos a fim de se ter o melhor refinamento possível para a determinação da estimativa da TNMM. Nesse sentido, é fundamental analisar os impactos da aplicação das taxas de movimentação crustal aos valores de NMM nos marégrafos que dispõem dessa informação, sobretudo, nos que possuem série temporal próxima de 18 anos. Outro fator relevante consiste em verificar a utilização de modelos globais oceânicos para o cálculo da TNMM, com o propósito de avaliar a influência da movimentação crustal na determinação da variação do NMM.

## Referências

- [1] W. TORGÉ, W.; J. MÜLLER, GEODESY. 4th. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2012. 433 p.
- [2] J. IHDE; L. SÁNCHEZ; R. BARZAGHI; H. DREWES; C. FOERSTE; T. GRUBER; G. LIEBSCH, U. MARTÍ; R. PAIL; M. SIDERIS, Definition and proposed realization of the International Height Reference System (ITRS). *Surveys in Geophysics*, Springer Science and Business Media LLC, v. 38, n. 3, p. 549–570, Mar. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10712-017-9409-3>>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- [3] L. SÁNCHEZ; M. G. SIDERIS, Vertical datum unification for the International Height Reference System (ITRS). *Geophysical Journal International*, London: Royal Astronomical Society - RAS; Oxford: Oxford University Press, v. 209, n. 2, p. 570-586, May 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/gji/ggx025>>. Acesso em: 08 dez. 2021
- [4] L. M. DA SILVA, Análise da evolução temporal do datum vertical brasileiro de Imbituba. 270 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/47347>>. Acesso em: 10 jan. 2021.
- [5] L. E. SJÖBERG; M. BAGHERBANDI, Gravity Inversion and Integration. 1. ed. Stockholm: Springer International Publishing, 2017. 283 p. ISBN 978-3-319-50297-7. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-50298-4>>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- [6] R. T. LUZ, Cálculo de altitudes científicas e sua aplicação no reajusteamento da rede altimétrica de alta precisão do sistema geodésico brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 61, n. 1, p. 79–97, 2016. Disponível em: <<https://rbg.ibge.gov.br/index.php/rbg/article/view/43>>. Acesso em: 16 jan. de 2021.
- [7] M. S. FILMER; C. W. HUGHES; P. L. WOODWORTH; W. E. FEATHERSTONE; R. J. BINGHAM, Comparison between geodetic and oceanographic approaches to estimate mean dynamic topography for vertical datum unification: evaluation at Australian tide gauges. *Journal of Geodesy*, Springer Science and Business Media LLC, v. 92, n. 12, p. 1413–1437, Apr. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00190-018-1131-5>>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- [8] SIRGAS. Sistema de Referência Geodésico para as Américas. Grupo de Trabalho III. Disponível em: <<https://sirgas.ipgh.org/pt/organizacao/grupos-de-trabalho/grupo-de-trabalho-iii/>>. Acesso em: 19 mar. 2022.
- [9] H. DREWES, F. G.; KUGLITSCH; J. ADÁM; S. RÓZSA. The Geodesist 's Handbook 2016. *Journal of Geodesy*, v. 90, n. 10, p. 907-1205, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00190-016-0948-z>>. Acesso em: 18 mar. 2022
- [10] T. HAYDEN; E. RANGELOVA; M. G. SIDERIS; M. VÉRONNEAU, Evaluation of W0 in Canada using tide gauges and GOCE gravity field models. *Journal of Geodetic Science*, Walter de Gruyter GmbH, v. 2, n. 4, p. 290–301, Dec. 2012a. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/document/doi/10.2478/v10156-012-0003-9/html>>. Acesso em: 17 jan. 2021.

- [11] V. C. SILVA; G. N. GUIMARÃES, Analysis of the gravity potential in the stations of the permanent tide gauge network for geodesy obtained with different geoid models. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, Instituto de Geociências - UFRJ, v. 41, n. 3, p. 605–613, Dec. 2018. Disponível em: <[https://doi.org/10.11137/2018\\_3\\_605\\_613](https://doi.org/10.11137/2018_3_605_613)>. Acesso em: 16 jan. de 2021.
- [12] DHN. Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos. 2017. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br.dhn/files/normam/NORMAN-25-REV2-MOD1.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2021.
- [13] O. B. ANDERSEN; K. NIELSEN; P. KNUDSEN; C. W. HUGHES; R. BINGHAM; L. FENOGLIO-MARC; M. GRAVELLE; M. KERN, S. P. POLO, Improving the coastal mean dynamic topography by geodetic combination of tide gauge and satellite altimetry. Marine Geodesy, Informa UK Limited, v. 41, n. 6, p. 517–545, Nov. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01490419.2018.1530320>>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- [14] DHN. Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br.dhn/files/normam/NORMAN-25-REV2-MOD1.pdf>>. Acesso em: 08 dez. 2021.
- [15] R. DALAZOANA. Estudos dirigidos à análise temporal do Datum Vertical Brasileiro. 188 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/3922>>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- [16] IBGE. Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG - 2001 a 2015. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, Relatório Técnico, 2016. 61 p.
- [17] S. SOARES; E. G. SANTOS; R. T. LUZ, Rede Geodésica de Referência Costeira (RGRC) como in-sumo para integração de altitudes e profundidades: resultados preliminares. In: VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife: UFPE, 2018. p. 742–751. Disponível em: <<https://www.ufpe.br/documents/39451/1384233/Anais+do+VII+SIMGEO/2ff23c73-935d-4418-8728-fefb24630f34>>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- [18] S. SOARES; E. G. SANTOS; A. L. DA SILVA; M. K. LIMA; J. C. S. SIQUEIRA; R. T. LUZ, Avaliação metodológica para conexão da estação GNSS (Global Navigation Satellite System) permanente de Imbituba a Rede Altimétrica Brasileira. In: Simpósio SIRGAS. Rio de Janeiro - RJ: Boletin No. 24, 2019. Disponível em: <[https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/71\\_Soares\\_et\\_al\\_2019\\_Conexion\\_Imbituba\\_GNSS.pdf](https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/71_Soares_et_al_2019_Conexion_Imbituba_GNSS.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- [19] IBGE. Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, Manual Técnico, 2017. 56 p.
- [20] R. TENZER; V. VATRT; A. ABDALLA; N. DAYOUB, Assessment of the LVD offsets for the normal-orthometric heights and different permanent tide systems - a case study of New Zealand. Applied Geomatics, Springer Science and Business Media LLC, v. 3, n. 1, p. 1–8, Dec. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12518-010-0038-5>>. Acesso em: 16 jan. de 2021.
- [21] J. HUANG, Determining coastal mean dynamic topography by geodetic methods. Geophysical Research Letters, American Geophysical Union (AGU), v. 44, n. 21, Nov. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2017gl076020>>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- [22] P. ZINGERLE.; R. PAIL.; T. GRUBER; X. Oikonomidou, The experimental gravity field model XGM2019e. GFZ Data Services, 2019. Disponível em: <<https://dataservices.gfz-potsdam.de/icgem/showshort.php?id=escidoc:4529896>>. Acesso em: 20 jan. 2021
- [23] P. ZINGERLE.; R. PAIL.; T. GRUBER; X. Oikonomidou, The combined global gravity field model XGM2019e. Journal of Geodesy, Springer Science and Business Media LLC, v. 94, n. 7, Jul. 2020. Disponív-

- el em: <<https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0>>. Acesso em: 16 jan. de 2021.
- [24] T. GRUBER; P. ZINGERLE; R. PAIL; X. Oikonomidou, Heigh resolution gravity field models as global reference surface for heights. In: SIRGAS 2019. Rio de Janeiro: [s.n.], 2019. Disponível em: <[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/44\\_Gruber\\_et\\_al\\_2019\\_HR\\_Models.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/44_Gruber_et_al_2019_HR_Models.pdf)>. Acesso em: 19 jan. 2021.
- [25] D. BLITZKOW, A. C.; MATOS; J. ADÁM; V. C. MACHADO.; M. A. NUNES; N. V. LENGRUBER; E. L. X. XAVIER; L. P. S. Fortes. MAPGEO2015: o novo modelo de ondulação geoidal do brasil016. Revista Brasileira de Cartografia, v. 68, n. 10, p. 1873-1884, 2016. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44289>>. Acesso em: 18 mar. 2022.
- [26] P. CALDWELL, HOURLY SEA Level Data Processing and Quality Control Software: SLP64 User Manual. Honolulu: University of Hawaii Sea Level Center, 2014. v. 4. 67 p.
- [27] E. G. SANTOS, Integração entre a Rede Altimétrica de Alta Precisão, a Rede Geodésica de Referência Costeira e os Níveis de Referência Maregráficos. 132 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Cartográfica). Instituto Militar de Engenharia.
- [28] V. P. REIS; L. G. BARBOSA; A. S. Palmeiro. Determinação da topografia do nível médio do mar com altimetria por satélites. R. bras. Geom., Curitiba, v. 6, n. 2, p. 77-98, abr/jun. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/5517>>. Acesso em: 08 dez. 2021.
- [29] T. A. SANTANA, Contribuições para os estudos de integração das componentes verticais terrestre e marinha ao longo da costa brasileira. 141 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/3922>>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- [30] V. G. FERREIRA; S. R. C. DE FREITAS; B. A. HECK, Separação entre o geoide e o quase geoide: uma análise no contexto brasileiro. Revista Brasileira de Cartografia, v. 63, n. Edição especial, 2011. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43766>>. Acesso em: 19 jan. 2021.
- [31] IBGE. Solução multianual das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS no período de 2000 a 2019. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, relatório metodológico, 2021. 117 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101895.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

# Crédito Imobiliário Digital

Sua casa própria com as melhores condições

Juros baixos para aquisição de imóvel, terreno e material de construção\*.

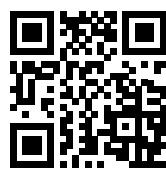


## Diferenciais:

**Teto IPCA** – limite de 6,5% a.a. para a inflação.

**Garante30** – possibilidade de alterar, em até 30 meses, a forma de atualização do contrato.

**Idade limite** – 85 anos.



**FHE**

**POUPEX**

poupex.com.br  
0800 061 3040

Consulte as normas e condições vigentes.  
\*Material de construção somente para militares das Forças Armadas e conveniados.



## PÓS-GRADUAÇÃO NO IME

Bolsas: CAPES, CNPq e FAPERJ

### Mestrado

- Engenharia Nuclear
- Engenharia Elétrica
- Engenharia de Transportes
- Sistemas e Computação

### Mestrado e Doutorado

- Química
- Ciência dos Materiais
- Engenharia de Defesa



Apoio:

**CREA-RJ**

Matrículas: Fluxo Contínuo

Tel.: (21) 2546-7114 – Fax: (21) 2546-7089 – [www.ime.eb.br](http://www.ime.eb.br) – [sd1@ime.eb.br](mailto:sd1@ime.eb.br)