



# ENGENHARIA MILITAR

**Mobilidade,  
Contramobilidade e  
Proteção**

Contribuição ao projeto otimizado de pavimentos de concreto simples – Pág 03

Procedimentos de desenvolvimento de pavimento semirrígido adaptado para região amazônica de cimento, zeólito sintético e solo de subleito – Pág 14

Planejamento de Trajetória de Múltiplos Robôs Terrestres Autônomos em Ambientes Dinâmicos – Pág 27

Dinâmica da digitação aplicada à autenticação periódica de usuários em ambientes virtuais de aprendizagem: um estudo de caso com o Moodle – Pág 37

Arquitetura de um sistema de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas para operações em Defesa – Pág 54

Identificação de sistemas lineares multivariáveis por ajuste das respostas freqüenciais baseada nas respostas temporais ao degrau unitário – Pág 65

ATLAS-DET: Um código para o cálculo de propriedades termodinâmicas de explosivos – Pág 82

Energia elétrica via fusão termonuclear controlada – Pág 97





## 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. 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: [dvcmcl@graficadoexercito.eb.mil.br](mailto:dvcmcl@graficadoexercito.eb.mil.br)



REVISTA MILITAR de  
CIÊNCIA e TECNOLOGIA

REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA - Volume XXXVII  
3º Trimestre de 2021

BIBLIOTECA DO EXÉRCITO

EDITORA (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



REVISTA MILITAR de  
CIÊNCIA e TECNOLOGIA

**C**aros leitores interessados na pesquisa e no desenvolvimento científico-tecnológico relacionados à Estratégia Nacional de Defesa, apresentamos a terceira edição do ano de 2021. Neste ciclo, além do desenvolvimento de assuntos acadêmicos, comemoramos em 13 de agosto o 229º aniversário do IME e em 03 de agosto o dia do Quadro de Engenheiros Militares.

Na edição do último trimestre brindamos o nosso público com assuntos de cinco áreas do conhecimento: Engenharia de Defesa, Engenharia Mecânica, Engenharia Elétrica, Engenharia de Computação e Engenharia de Materiais, com destaque para implementação da teoria perturbacional de esferas duras KLRR para a avaliação de excessos termodinâmicos de fluidos a altas densidades e pressões.

Nessa edição, a pesquisa na área de Engenharia Civil apresentou uma contribuição ao projeto otimizado de pavimentos de concreto simples e procedimentos de desenvolvimento de pavimento semirrígido adaptado para região amazônica de cimento. No campo da robótica foi estudado o planejamento de trajetória de múltiplos robôs terrestres autônomos em ambientes dinâmicos. E também, a arquitetura de um sistema de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas para operações em Defesa. A Inteligência Artificial nos brindou com a dinâmica da digitação aplicada à autenticação periódica de usuários em ambientes virtuais de aprendizagem. Na pesquisa de materiais para indústria de Defesa foi apresentado o ATLAS-DET, um código para o cálculo de propriedades termodinâmicas de explosivos. A área de Engenharia Elétrica e do Planejamento Energético foi pesquisada através do artigo: energia elétrica via fusão termonuclear controlada. E para o sistema de comando e controle das operações militares, foi estudada a identificação de sistemas lineares multivariáveis por ajuste das respostas freqüenciais baseada nas respostas temporais ao degrau unitário.

Quem faz pesquisas científicas, desenvolve competências imprescindíveis para a vida profissional, como: análise crítica, diligência, empreendedorismo, maturidade e capacidade de solucionar problemas. Esperamos que nossos textos ajudem nesse progresso individual. Boa leitura!

*Marcelo de Miranda Reis*

---

# SUMÁRIO

---

03

- Contribuição ao projeto otimizado de pavimentos de concreto simples  
*Eduardo S Lira, João Carlos C Barbirato, Eduardo N Lages*

14

- Procedimentos de desenvolvimento de pavimento semirrígido adaptado para região amazônica de cimento, zeólito sintético e solo de subleito  
*Daniel Jardim Almeida, Francisco Heber Lacerda de Oliveira, Marcos Valerio Mendonça Baia, Nilton de Souza Campelo*

27

- Planejamento de Trajetória de Múltiplos Robôs Terrestres Autônomos em Ambientes Dinâmicos  
*Johnathan Fercher da Rosa, Paulo Fernando Ferreira Rosa*

37

- Dinâmica da digitação aplicada à autenticação periódica de usuários em ambientes virtuais de aprendizagem: um estudo de caso com o Moodle  
*Marco A S Cruz, Otávio A M Camargo, Julio Cesar Duarte, Ronaldo Goldschmidt*

54

- Arquitetura de um sistema de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas para operações em Defesa  
*Erick M. Moreira, Nicolas Souza de Melo Miranda de Oliveira, Fábio Luiz Jr*

65

- Identificação de sistemas lineares multivariáveis por ajuste das respostas freqüenciais baseada nas respostas temporais ao degrau unitário  
*Tatiane C. Ramalho, Paulo C. Pellanda, Roberto Ades, Marcelo A. Oliveira*

82

- ATLAS-DET: Um código para o cálculo de propriedades termodinâmicas de explosivos  
*Paulo Conceiro*

97

- Energia elétrica via fusão termonuclear controlada  
*Filipe Wiltgen*

# Contribuição ao projeto otimizado de pavimentos de concreto simples

Eduardo S Lira<sup>a</sup>, João Carlos C Barbirato<sup>b</sup>, Eduardo N Lages<sup>\*c</sup>

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas

Av. Lourival Melo Mota, S/N – Tabuleiro do Martins – Maceió - AL – CEP 57072-900,

<sup>\*</sup>enl@ctec.ufal.br

**RESUMO:** No projeto de pavimentos de concreto simples da PCA (1984), empregam-se tabelas e ábacos para verificar a fadiga da placa de concreto e a erosão do subleito/sub-base. Caso um desses critérios não seja atendido, ou se constate o atendimento dos critérios com margem de segurança elevada, repete-se o cálculo para um novo conjunto de parâmetros, sendo usual o ajuste da espessura da placa. Concede-se um algoritmo computacional para minimizar o custo da placa do pavimento, que combina a espessura da placa com a resistência característica à tração na flexão do concreto. Adota-se o guia da AUSTROADS (2010), por reunir explicitamente as equações analíticas envolvidas no processo de verificação dos critérios em pauta. Um exemplo numérico é apresentado e discutido, o qual evidencia que o ajuste combinado da espessura da placa com a resistência do concreto possibilita a definição de projetos mais otimizados frente àqueles em que se ajusta apenas a espessura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimento rígido. Otimização. Custo. MATLAB.

## 1. Introdução

**D**esde 1995, pesquisas da Confederação Nacional do Transporte vêm oferecendo um criterioso levantamento da qualidade geral das rodovias brasileiras, que revelam a necessidade de se priorizar o setor [1]. Constata-se que a densidade da malha rodoviária pavimentada do Brasil é demasiadamente pequena, quando considerada a de outros países de dimensão territorial semelhante, além de sua expansão apresentar um ritmo bem inferior ao da frota de veículos.

Até o início da década de 50, foi grande o uso de pavimentos de concreto no Brasil (vias urbanas, rodovias e aeroportos), sendo substituído pelo pavimento asfáltico, que demonstrou franca expansão em todo o mundo. Esse quadro começou a mudar com

**ABSTRACT:** In the design of simple rigid pavements of the PCA (1984), tables and abacuses are used to verify the plate's bending fatigue and subgrade erosion. If one of these criteria is not met, or even if the criteria are met by a high margin, the calculation must be repeated for a new set of parameters, in which the adjustment of the plate's thickness is usual. A computational algorithm, which combines the thickness of the plate with the characteristic tensile strength in the concrete bending, is designed to minimize the cost of the simple rigid pavement plate. The AUSTROADS guide (2010) is used to explicitly gather the analytical equations involved in the process of verifying the criteria in question. A numerical example is presented and discussed, which shows that the combined adjustment of the plate's thickness with the concrete's resistance allows the definition of more optimal projects compared to those in which only the thickness is accounted for.

**KEYWORDS:** Rigid pavement. Optimization. Cost. MATLAB.

o ressurgimento dos pavimentos de concreto em diversos países desenvolvidos e com economia estável, culminando, no Brasil, com a retomada, em 2003, do pavimento rígido nas duplicações de rodovias federais [2].

O projeto de pavimentos de concreto simples, de acordo com o método PCA de 1984 [3], e adotado no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura Rodoviária (DNIT), é um processo iterativo e usualmente manual no qual a análise estrutural deve procurar satisfazer as restrições prescritas para os fenômenos de fadiga e de erosão. Apesar da existência do programa computacional PCAPAV, da própria PCA, para este procedimento [4], esse não mais é uma ferramenta facilmente acessível, frente ao sistema operacional, no caso o DOS (acrônimo para *Disk Operating System*), em desuso, para o qual foi desenvolvido. O próprio Manual de Pavimentos

Rígidos do DNIT [5] faz uso extensivo de ábacos e tabelas, não sendo citado tal programa. Registra-se, ainda, o programa computacional IMEPAV [6], que também automatiza o projeto de pavimentos rígidos pelo método PCA/84, e que dispensa o uso de ábacos e tabelas.

Neste trabalho, desenvolve-se inicialmente um código computacional de verificação dos critérios governantes de fadiga e de erosão. Toma-se como referência o guia da AUSTROADS de 2010 [7], que é baseado no método PCA de 1984 [3], por reunir as equações analíticas envolvidas no processo de verificação dos critérios em pauta. Em seguida, conscientes dos altos custos atrelados a este tipo de empreendimento, associa-se este código a um procedimento de otimização do custo da placa de concreto, assumindo-se como variáveis de projeto a espessura da placa e a resistência característica à tração na flexão do concreto.

Seguindo os preceitos da pesquisa reproduzível, do inglês *Reproducible Research* [8], todos os arquivos do código computacional desenvolvido e dos exemplos analisados são disponibilizados no seguinte repositório RR público: <http://loi.lccv.ufal.br/art-pcs>.

## 2. Referencial teórico

### 2.1 Pavimento de concreto simples

Pavimentos de concreto simples são aqueles constituídos de placas de concreto de cimento Portland, separadas por juntas moldadas ou serradas, com possibilidade de uso de dispositivos de transferência de carga [9]. Essas placas são geralmente apoiadas sobre uma camada que representa a sub-base, granular ou tratada, e que está diretamente assentada sobre o subleito.

Para o pavimento de concreto simples, que não é estruturalmente armado, toda a responsabilidade de suportar os esforços de tração na flexão da placa é atribuída ao concreto, sendo a espessura da placa e a resistência característica à tração na flexão parâmetros a serem considerados no projeto.

Ainda para o dimensionamento da placa do

pavimento rígido, deve-se conhecer o coeficiente de recalque do subleito, também denominado de módulo de reação do subleito ou módulo de Westergaard [5]. Admite-se o uso de uma correlação entre os valores do módulo de reação do solo do subleito e os respectivos valores obtidos para o Índice de Suporte Califórnia (do inglês *California Bearing Ratio* – CBR), como apresentada, por exemplo, por Senço [10].

### 2.2 Dano por fadiga

As tensões de tração na flexão da placa consideradas no cálculo são as produzidas pela carga tangente à borda longitudinal e a meio caminho entre as juntas. A partir da clássica relação de tensões  $S_r$ , dada por

$$S_r = \frac{\sigma_t}{f_{cf}} \quad (1)$$

na qual  $\sigma_t$  é a tensão de tração na flexão que se desenvolve na placa em função do carregamento atuante e  $f_{cf}$  é a resistência característica à tração na flexão do concreto, haverá um número limite  $N_f$  de aplicações de determinada carga acima do qual o concreto romperá por efeito do fenômeno de fadiga.

De acordo com o guia da AUSTROADS de 2010 [7], calcula-se a relação de tensões como

$$S_r = \frac{S_e}{0,944 f_{cf}} \left( \frac{P FSC}{4,45 FAC_f} \right)^{0,94} \quad (2)$$

na qual  $S_e$  é a tensão equivalente do eixo de carga de referência para fadiga [MPa],  $f_{cf}$  é a resistência característica à tração na flexão de projeto do concreto,  $P$  é a carga do eixo [kN],  $FSC$  é o fator de segurança de carga e  $FAC_f$  é o fator de ajustamento de carga para a fadiga devido ao grupo de eixo (**tabela 1**).

**Tab. 1** – Fatores de ajustamento de carga para a fadiga.

Grupo de eixo	$FAC_f$
Simples com roda simples (SAST)	9
Simples com roda dupla (SADT)	18
Tandem com roda simples (TAST)	18
Tandem com roda dupla (TADT)	36
Triple com roda dupla (TRDT)	54
Quad com roda dupla (QADT)	72

**Tab. 2** – Coeficientes para previsão da tensão equivalente, com e sem acostamento, em função do tipo de eixo.

Coeficiente	Sem acostamento de concreto				Com acostamento de concreto			
	SAST & TAST	SADT	TADT	TRDT & QADT	SAST & TAST	SADT	TADT	TRDT & QADT
a	0,118	0,560	0,219	0,089	-0,051	0,330	0,088	-0,145
b	125,4	184,4	399,6	336,4	26,0	206,5	301,5	258,6
c	-0,2396	-0,6663	-0,3742	-0,1340	0,0899	-0,4684	-0,1846	0,0080
d	26969	44405	-38	-10007	35774	28661	4418	1408
e	0,0896	0,2254	0,1680	0,0830	-0,0376	0,1650	0,0939	0,0312
f	0,19	19,75	-71,09	-83,14	14,57	2,82	-59,93	-61,25
g	-352174	-942585	681381	1215750	-861548	-686510	280297	488079
h	-0,0104	-0,0248	-0,0218	-0,0120	0,0031	-0,0186	-0,0128	-0,0058
i	-1,2536	-4,6657	3,6501	5,2724	1,3098	-1,9606	4,1791	4,7428
j	-1709	-4082	2003	4400	-4009	-2717	1768	2564

Fonte: adaptada de [7]

A tensão equivalente  $S_e$ , por sua vez, é calculada a partir da **equação 3**:

$$S_e = a + \frac{b}{D} + c \ln(E_f) + \frac{d}{D^2} + e [\ln(E_f)]^2 + f \frac{\ln(E_f)}{D} + \frac{g}{D^3} + h [\ln(E_f)]^3 + i \frac{[\ln(E_f)]^2}{D} + j \frac{\ln(E_f)}{D^2} \quad (3)$$

na qual  $D$  é a espessura da placa de concreto [mm],  $E_f$  é o CBR efetivo (%) de projeto e os coeficientes  $a-j$  encontram-se listados na **tabela 2**, que dependem da presença ou não do acostamento de concreto e do grupo de eixo.

Para o método PCA de 1984 [3], assim como no proposto pela AUSTROADS de 2010 [7], usam-se as seguintes expressões [11] para determinação desse número limite de repetições:

$$N_f = \left( \frac{4,2577}{S_r - 0,4325} \right)^{3,268} \quad (4)$$

quando  $0,45 \leq S_r \leq 0,55$ , e

$$\log_{10} N_f = \frac{0,9718 - S_r}{0,0828} \quad (5)$$

quando  $S_r > 0,55$ . No caso de  $S_r$  ser menor do que 0,45, o número de repetições é ilimitado, não contribuindo para a fadiga do pavimento.

A regra de Palmgren-Miner do dano acumulado por fadiga é a base do modelo comportamental do pavimento no que se refere ao fenômeno de fadiga. O

consumo de resistência à fadiga do concreto é a relação percentual entre o número previsto de repetições de uma dada carga e o número admissível de repetições da mesma carga. Quando se somam todos os consumos de resistência à fadiga individuais, em todas as categorias de eixo consideradas, obtém-se o consumo total de resistência à fadiga  $CRF$  para uma dada espessura-tentativa da placa de concreto, ou seja,

$$CRF = 100 \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

na qual  $n_i$  é o número de repetições previstas para a  $i$ -ésima carga de referência e  $N_i$  é o número de repetições admissíveis para essa mesma carga.

O pavimento especificado é considerado adequado em relação à fadiga quando o valor de  $CRF$  não ultrapassa o limite de 100% [5].

Ainda que o método da PCA de 1984 tenha força normativa no Brasil, esse não considera o empenamento das placas de concreto gerado pelos diferenciais térmicos, como comentado, por exemplo, em [12] e [13].

## 2.3 Dano por erosão

No que se refere ao critério de projeto associado à erosão do pavimento, motivada pelo fenômeno de bombeamento de finos do subleito, determina-se o número de repetições de carga admissível para uma certa carga de eixo a partir de

$$\log(C_a N_e) = 14,524 - 6,777 \left[ \max \left( 0, \left( \frac{P FSC}{4,45 FAC_e} \right)^2 \frac{10^{F_e}}{41,35} - 9 \right) \right]^{0,103} \quad (7)$$

na qual  $P$  e  $FSC$  são similares às definições apresentadas anteriormente,  $C_a$  é um coeficiente adimensional que vale 0,06 para pavimentos sem acostamento e 0,94 para pavimentos com acostamento de concreto,  $FAC_e$  é o fator de ajustamento de carga para a erosão devido ao grupo de eixo (tabela 3) e  $F_e$  é o fator de erosão, calculado de forma equivalente ao cálculo da tensão equivalente  $S_e$ , equação 3, porém com os coeficientes  $a$ – $j$  listados nas tabelas 4 e 5, que dependem da presença ou não do acostamento de concreto e do grupo de eixo.

**Tab. 3** – Fatores de ajustamento de carga para a erosão.

Grupo de eixo	$FAC_e$
Simples com roda simples (SAST)	9
Simples com roda dupla (SADT)	18
Tandem com roda simples (TAST)	18
Tandem com roda dupla (TADT)	36
Triple com roda dupla (TRDT)	54
Quad com roda dupla (QADT)	54

**Tab. 4** – Coeficientes para previsão do fator de erosão para bases sem barras de transferência de carga, sem e com acostamento, em função do tipo de eixo.

Coeficiente	Sem acostamento de concreto				Com acostamento de concreto			
	SAST	SADT	TADT & TAST	TRDT & QADT	SAST	SADT	TADT & TAST	TRDT & QADT
<i>a</i>	0,745	1,330	1,907	2,034	0,345	0,914	1,564	2,104
<i>b</i>	533,8	537,5	448,3	440,3	534,6	539,8	404,1	245,4
<i>c</i>	-0,2071	-0,1929	-0,1749	-0,2776	-0,1711	-0,1416	-0,1226	-0,2473
<i>d</i>	-42419	-43035	-35827	-36194	-44908	-44900	-32024	-15007
<i>e</i>	0,0405	0,0365	0,0382	0,0673	0,0347	0,0275	0,0256	0,0469
<i>f</i>	27,27	26,44	0,64	15,77	20,49	16,37	-9,79	8,86
<i>g</i>	1547570	1586100	1291870	1315330	1676710	1654590	1150280	518916
<i>h</i>	-0,0044	-0,0039	-0,0060	-0,0084	-0,0038	-0,0032	-0,0052	-0,0075
<i>i</i>	-1,4656	-1,4547	1,0741	-1,2068	-1,3829	-0,9584	2,1997	1,5517
<i>j</i>	-1384	-1344	50	-625	-913	-765	469	-599

Fonte: adaptada de [7]

**Tab. 5** – Coeficientes para previsão do fator de erosão para bases com barras de transferência de carga, sem e com acostamento, em função do tipo de eixo.

Coeficiente	Sem acostamento de concreto				Com acostamento de concreto			
	SAST	SADT	TADT & TAST	TRDT & QADT	SAST	SADT	TADT & TAST	TRDT & QADT
<i>a</i>	0,072	0,643	1,410	2,089	-0,184	0,440	0,952	1,650
<i>b</i>	679,9	684,5	498,9	351,3	602,3	609,8	544,9	359,4
<i>c</i>	-0,0789	-0,0576	-0,1680	-0,3343	-0,0085	-0,0484	-0,0404	-0,1765
<i>d</i>	-58342	-58371	-39430	-25576	-50996	-52519	-47500	-28901
<i>e</i>	0,0179	0,0128	0,0322	0,0723	-0,0122	0,0017	0,0179	0,0435
<i>f</i>	6,70	4,61	13,80	29,58	8,99	9,62	-31,54	-15,97
<i>g</i>	2139330	2131390	1437580	923081	1874370	1949350	1719950	1085800
<i>h</i>	-0,0021	-0,0017	-0,0044	-0,0086	0,0008	-0,0007	-0,0051	-0,0084
<i>i</i>	-0,5199	-0,2056	-0,0380	-1,6301	-0,4759	-0,6314	3,3789	3,2908
<i>j</i>	-187	-185	-697	-1327	-374	-326	1675	758

Fonte: adaptada de [7]

O consumo do dano por erosão é a relação percentual entre o número previsto de repetições de uma dada carga e o número admissível de repetições da mesma carga. Quando se somam todos os consumos do dano por erosão individuais, em todas as categorias de eixo consideradas, obtém-se o consumo total do dano por erosão *CDE* para uma dada espessura-tentativa da placa de concreto, ou seja,

$$CDE = 100 \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (8)$$

na qual  $n_i$  e  $N_i$  são os números de repetições previstas e admissíveis para a carga  $i$  de referência. O pavimento especificado é considerado adequado em relação à erosão quando o valor de *CDE* não ultrapassa o limite de 100%.

### 3. Modelo de otimização

Nesta seção, apresenta-se o modelo de otimização proposto e implementado em MATLAB®. Este modelo de otimização manipula duas variáveis de projeto associadas à placa do pavimento (espessura da placa e resistência característica à tração na flexão do concreto) e visa encontrar o conjunto correspondente ao menor custo da placa, satisfazendo os dois critérios de projeto (fadiga e erosão).

Assim, o problema de otimização mono-objetivo que se propõe resolver consiste em

$$\text{achar } \arg \min \text{custo} (D, f_{cf}) \quad (9)$$

no qual a função objetivo é o custo por unidade de área da placa de concreto do pavimento, dado por

$$\text{custo} (D, f_{cf}) = D \text{cuc} (f_{cf}) \quad (10)$$

em que  $\text{cuc}(f_{cf})$  é a função custo unitário do concreto que retorna o custo por unidade de volume (R\$/m<sup>3</sup>) do concreto para um  $f_{cf}$  específico, em MPa, que pode ser definida pelo usuário a depender, por exemplo, dos valores praticados pelas indústrias de concreto.

Como restrições não lineares para a otimização têm-se

os limites superiores de 100% para os consumos totais de resistência à fadiga *CRF* e do dano por erosão *CDE*, além das restrições de fronteira das variáveis de projeto

$$0 \leq D \leq \infty \quad (11)$$

e

$$f_{cf_{min}} \leq f_{cf} \leq f_{cf_{max}} \quad (12)$$

em que os limites da restrição de fronteira de  $f_{cf}$  são os limites dos valores do levantamento de preço realizado nesta pesquisa.

O algoritmo foi concebido em três módulos fundamentais: *pcs\_v.m*, *pcs\_o.m* e *pcs\_c.m*, que serão descritos a seguir.

#### 3.1 Módulo *pcs\_v.m*

O módulo *pcs\_v.m* (acrônimo para Pavimento de Concreto Simples – Verificação) é uma *function* desenvolvida na linguagem do MATLAB® que verifica os critérios de fadiga e de erosão para um dado par de valores da espessura da placa,  $D$ , de concreto do pavimento e da resistência característica à tração na flexão do concreto,  $f_{cf}$ , conhecendo-se ainda o CBR efetivo do subleito, o fator de segurança de carga, a indicação da presença ou não de acostamento, a indicação da presença ou não das barras de transferência de carga, as cargas de referência para os diversos tipos de eixo e os números de repetições previstas de cargas de referência para os diversos tipos de eixo, para a vida útil definida para o pavimento.

Para se adequar à chamada da função *fmincon* de otimização não linear com restrições do MATLAB®, esta função retorna as diferenças entre os consumos totais de resistência à fadiga *CRF* e do dano por erosão *CDE* e o limite de segurança de 100%.

Esta função contida no módulo *pcs\_v.m* pode ser utilizada para verificação dos critérios de projeto para um conjunto qualquer de parâmetros do pavimento rígido, de forma independente da estratégia de otimização. O vetor de saída desta função, quando somado a 100, contém os consumos totais *CRF* e *CDE* do projeto de interesse.

### 3.2 Módulo *pcs\_o.m*

O módulo *pcs\_o.m* (acrônimo para Pavimento de Concreto Simples – Otimização) contém a *function* desenvolvida na linguagem do MATLAB® que controla o processo de otimização através da chamada da função de otimização mono-objetivo não linear com restrição *fmincon* do *Optimization Toolbox™* do MATLAB®, configurado para uso do algoritmo *interior-point* [14], e dos módulos *pcs\_v.m* e *pcs\_c.m*.

Uma vez que esta função determina os parâmetros ótimos de projeto (espessura da placa, resistência característica à tração na flexão do concreto, custo e consumos totais de resistência à fadiga e do dano à erosão), os parâmetros de entrada são o CBR efetivo do subleito, o fator de segurança de carga, a indicação da presença ou não de acostamento, a indicação da presença ou não das barras de transferência de carga, as cargas de referência para os diversos tipos de eixo, bem como os respectivos números de repetições previstas de cargas de referência para os diversos tipos de eixo.

### 3.3 Módulo *pcs\_c.m*

O módulo *pcs\_c.m* (acrônimo para Pavimento de Concreto Simples – Custo) contém a *function* desenvolvida na linguagem do MATLAB® que calcula o custo unitário do volume [R\$/m<sup>3</sup>] do concreto para uma dada resistência característica à tração na flexão [MPa]. Este módulo pode ser reescrito pelo usuário do sistema de acordo com a realidade de preço praticada, devendo retornar, além do custo unitário, os valores limites mínimo e máximo da resistência característica à tração na flexão do concreto para os quais esta função é válida.

## 4. Exemplo de aplicação

Nesta seção, exploram-se os dados do exemplo de projeto apresentado pela AUSTROADS de 2010 [7], APPENDIX L - EXAMPLES OF USE OF DESIGN PROCEDURE FOR RIGID PAVEMENTS – p. 242–246 – GUIDE TO PAVEMENT TECHNOLOGY – PART 2: PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN (2010).

O tráfego previsto em um período de 40 anos contempla os grupos de eixos SAST, SADT, TAST, TADT e TRDT, cujas cargas base e números de repetições estão indicados nas **tabelas 6 a 10**. Assume-se o fator de segurança de carga de 1,3.

**Tab. 6** – Cargas base e números de repetições (SAST).

Carga base [kN]	Número de repetições
130	2735
120	2735
110	2735
100	5565
90	17088
80	124864
70	1022114
60	3661188
50	4706568
40	2469612
30	2430312
20	1230404
10	44079

**Tab. 7** – Cargas base e números de repetições (SADT).

Carga base [kN]	Número de repetições
130	1864
120	8847
110	31309
100	106425
90	226832
80	353197
70	496600
60	733898
50	1283520
40	1675452
30	1792344
20	664374
10	265337

**Tab. 8** – Cargas base e números de repetições (TAST).

Carga base [kN]	Número de repetições
200	200
190	260
180	492
170	831
160	1540
150	3038
140	5540
130	10595
120	21251
110	35186
100	51912
90	57420
80	59796
70	60516
60	36972

**Tab. 9** – Cargas base e números de repetições (TADT).

Carga base [kN]	Número de repetições
230	1658
220	3336
210	8298
200	34509
190	88423
180	193007
170	368194
160	592281
150	831908
140	676922
130	608961
120	616627
110	649261
100	750271
90	788500
80	1012068
70	1133384
60	985340

**Tab. 10** – Cargas base e números de repetições (TRDT).

Carga base [kN]	Número de repetições
260	474
250	5358
240	14818
230	45963
220	138469
210	304051
200	499234
190	457794
180	360942
170	285285
160	243608
150	237274
140	198971
130	186302
120	195242
110	219099

Considera-se inicialmente a presença de acostamento de concreto e a ausência de barras de transferência de carga.

Admite-se o subleito com CBR de 5%, que combinado com uma sub-base de concreto compactado a rolo, com 150 mm de espessura, resulta no CBR efetivo do subleito de 75% (vide *figure 9.1*, p. 127 – AUSTROADS de 2010) [7].

Antes da apresentação do processo de otimização, verifica-se inicialmente a acurácia do módulo computacional desenvolvido em cálculos correntes destinados ao projeto de pavimentos de concreto simples. A segunda parte do exemplo presta-se à averiguação do processo de otimização.

## 4.1 Verificação

No repositório RR público associado a este trabalho, o exemplo em pauta é reproduzido pelo arquivo *pcs\_exv.m*, cujo único parâmetro de entrada é a espessura da placa de concreto (em mm) do pavimento de concreto simples, e os dois parâmetros de saída são os correspondentes consumos totais de resistência à fadiga (CRF) e do dano por erosão (CDE).

Inicialmente, define-se uma espessura da placa de 210 mm, que ao ser processada pela função implementada resulta no consumo total de resistência à fadiga de 125,3350% e de dano à erosão de 119,3405%. Para uma precisão numérica com uma casa decimal, esses valores igualam-se aos valores registrados no memorial de cálculo do guia (p. 249 – AUSTROADS de 2010) [7].

Quanto ao exemplo original da AUSTROADS de 2010 [7], anteriormente reproduzido, a viabilidade estrutural não está garantida, como o próprio guia e a PCA recomendam, já que os consumos totais ultrapassaram o limite de segurança de 100%, sendo sugerido no memorial de cálculo o aumento da espessura da placa para 215 mm. Com este novo valor da espessura, o módulo computacional leva aos consumos totais de 66,3385% e 93,3104% para a resistência à fadiga e do dano por erosão, respectivamente. Mais uma vez esses valores coincidem com os registrados no guia da AUSTROADS de 2010 [7].

Como um exercício especulativo, não mais registrado no guia da AUSTROADS de 2010 [7], uma vez que há uma folga dos consumos totais em relação ao valor limite de 100%, reduz-se a espessura da placa para 214 mm, e chega-se agora aos consumos totais de 75,1559% e 98,0029% para a resistência à fadiga e do dano por erosão, respectivamente. Registra-se ainda que a redução da espessura da placa para 213 mm inviabiliza o projeto, posto que se atingem os consumos totais de 85,2488% e 102,9278% para a resistência à fadiga e do dano por erosão, respectivamente, sendo esse último superior ao limite de segurança de 100%.

## 4.2 Otimização

Nesta segunda parte do exemplo, acoplam-se os

dados do projeto em pauta à ferramenta de otimização desenvolvida e disponibilizada neste trabalho, que agora permite a busca combinada pela espessura da placa de concreto do pavimento [mm] e pela respectiva resistência característica à tração na flexão [MPa] que levem ao menor custo do metro quadrado da placa [R\$/m<sup>2</sup>].

Para que a otimização possa ser realizada, deve-se construir a função do custo unitário do volume de concreto [R\$/m<sup>3</sup>] a depender da resistência característica à tração na flexão do concreto [MPa]. Normalmente o custo unitário do volume de concreto é estabelecido a partir da resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias ( $f_{ck}$ ). Como o algoritmo de otimização trabalha com a resistência característica à tração na flexão do concreto, usa-se na conversão dessas resistências a expressão

$$f_{cf} = 0,75 \sqrt{f_{ck}} \quad (13)$$

recomendada na *Section 6.6.3* do guia da AUSTROADS de 2010 [7]. Neste trabalho, computa-se o custo unitário em pauta para um determinado valor de  $f_{ck}$  a partir do ajuste polinomial do 3º grau de uma pesquisa de preço realizada junto à empresa CONCRETO REDIMIX DO BRASIL S/A, cujos dados encontram-se apresentados na **tabela 11**.

**Tab. 11** – Custo unitário do concreto usinado em função da resistência característica à compressão.

Resistência [MPa]	Custo unitário [R\$/m <sup>3</sup> ]
20	290,00
25	300,00
30	320,00
35	340,00
40	360,00
45	380,00
50	410,00
55	430,00
60	450,00

O ajuste polinomial desses dados leva à seguinte função de custo unitário do concreto:

$$cuc(f_{ck}) = 302,21 - 3,8054 f_{ck} + 0,1854 f_{ck}^2 - 0,0013 f_{ck}^3 \quad (14)$$

que apresenta coeficiente de determinação de 0,9988. Para o desenvolvimento do módulo *pcs\_c.m*, que calcula o custo unitário do volume [R\$/m<sup>3</sup>], que se encontra disponível no repositório RR deste trabalho, utiliza-se a expressão descrita na **equação 14**.

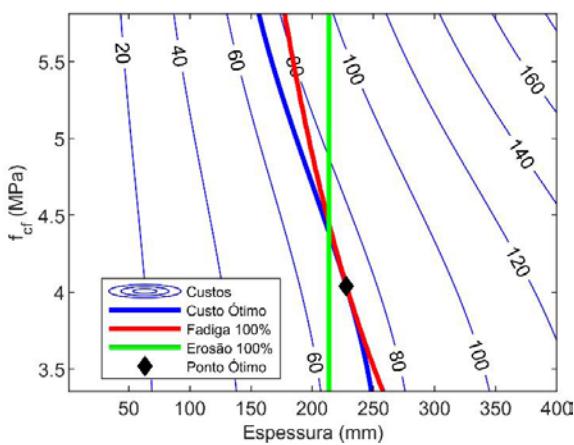
O módulo *pcs\_exo1.m* contém a *function* desenvolvida na linguagem do MATLAB®, que define os dados gerais do projeto, chama o módulo de otimização *pcs\_o.m* e apresenta os parâmetros otimizados com saídas numéricas e gráficas.

Os projetos estruturalmente viáveis com espessuras de 215 mm e 214 mm, avaliados na primeira parte deste exemplo, cuja resistência característica à tração na flexão do concreto é de 4,5 MPa, apresentam custos da placa do pavimento de R\$ 74,14 e R\$ 73,80 por metro quadrado, respectivamente.

Com o processamento do módulo *pcs\_exo1.m*, o projeto otimizado converge para uma espessura da placa de 227,9 mm, para uma resistência característica à tração na flexão do concreto de 4,0 MPa, que leva a um custo da placa do pavimento de R\$ 72,02 por metro quadrado, tendo consumos totais da resistência à fadiga de 100% e do dano por erosão de aproximadamente 49,99. Constatam-se reduções no preço por metro quadrado da placa do pavimento de, respectivamente, 2,9% e 2,4%, obtidos com um aumento da espessura da placa e uma redução da resistência característica à tração na flexão do concreto.

Na **figura 1**, representam-se as curvas de nível do custo por metro quadrado da placa do pavimento com acostamento e sem barras de transferência, com destaque para a curva de nível do custo ótimo, as curvas de nível dos consumos totais de 100% para os dois critérios de projeto (fadiga e erosão), bem como o ponto com as variáveis ótimas de projeto.

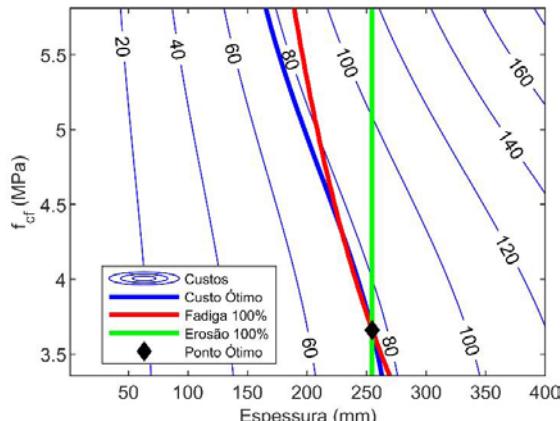
Da **figura 1** observa-se que o projeto ótimo foi controlado pelo critério de resistência à fadiga, tendo sido atingido o consumo total de 100%, havendo uma folga em relação ao dano por erosão, sendo desnecessário o uso de barras de transferência de carga.



**Fig. 1** – Curvas de nível e ponto ótimo do projeto com acostamento e sem barras de transferência.

Ao considerar um novo cenário de projeto sem a presença do acostamento em concreto (*pcs\_exo2.m*), o novo projeto otimizado converge para uma espessura da placa de 254,6 mm, para uma resistência característica à tração na flexão do concreto de 3,7 MPa, que leva a um custo da placa do pavimento de R\$ 76,18 por metro quadrado, tendo consumos totais de 100% tanto da resistência à fadiga quanto do dano por erosão.

Na **figura 2**, representam-se as curvas de nível do custo por metro quadrado da placa do pavimento sem acostamento e sem barras de transferência, com destaque para a curva de nível do custo ótimo, as curvas de nível dos consumos totais de 100% para os dois critérios de projeto (fadiga e erosão), bem como o ponto com as variáveis ótimas deste novo cenário de projeto.

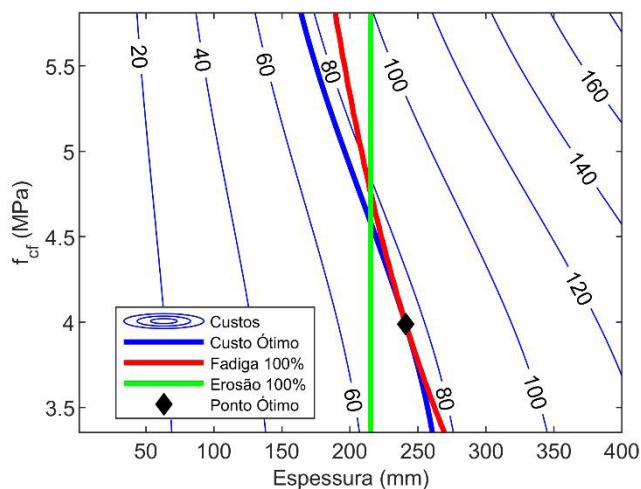


**Fig. 2** – Curvas de nível e ponto ótimo do projeto sem acostamento e sem barras de transferência.

Em relação ao cenário do projeto anterior, houve um aumento da espessura da placa do pavimento, com redução da respectiva resistência característica à tração na flexão do concreto, porém com um aumento no custo por metro quadrado da placa.

Por fim, cria-se um cenário sem a presença do acostamento, porém com a presença de barras de transferência de carga (*pcs\_exo3.m*), cujo projeto otimizado converge para uma espessura da placa de 241,0 mm, para uma resistência característica à tração na flexão do concreto de 4,0 MPa, que leva a um custo da placa do pavimento de R\$ 75,53 por metro quadrado, que apresenta consumo total de 100% para a resistência à fadiga, retornando a folga em relação ao dano por erosão, cujo consumo foi de 31,4913%.

Na **figura 3**, representam-se as curvas de nível do custo por metro quadrado da placa do pavimento sem acostamento e com barras de transferência, com destaque para a curva de nível do custo ótimo, as curvas de nível dos consumos totais de 100% para os dois critérios de projeto (fadiga e erosão), bem como o ponto com as variáveis ótimas deste último cenário de projeto.



**Fig. 3** – Curvas de nível e ponto ótimo do projeto sem acostamento e com barras de transferência.

Este último cenário apresentou valores intermediários da espessura da placa, e do custo por metro quadrado da placa em relação aos dois cenários anteriores, porém com resistência característica à tração na flexão do concreto equivalente à do primeiro

cenário. Todos os valores ótimos para os três cenários estudados encontram-se resumidos na **tabela 12**.

**Tab. 12** – Variáveis de projeto e custo unitário por metro quadrado da placa para os três cenários de projeto.

Cenário	AC	BT	D [mm]	$f_g$ [MPa]	Custo da Placa [R\$/m <sup>2</sup> ]
1	Sim	Não	227,9	4,0	72,02
2	Não	Não	254,6	3,7	76,18
3	Não	Sim	241,0	4,0	75,53

AC: acostamento / BT: barras de transferência de carga

Como já apontavam as equações governantes do critério de dano por erosão, **equações 7 e 8**, nas **figuras 1, 2 e 3** observa-se que a curva de nível associada ao consumo total relacionada com esse critério é governada apenas pela espessura da placa do pavimento, não havendo contribuição da resistência característica à tração na flexão do concreto.

As combinações de acostamento e barras de transferência de carga apontaram que o projeto de menor custo da placa de concreto do pavimento não necessariamente mobiliza integralmente os consumos totais da resistência à fadiga e ao dano por erosão.

## 5. Conclusões

Os clássicos métodos de projeto de pavimentos rígidos produzem pavimentos seguros, mas a otimização proposta neste trabalho incluiu no dimensionamento da placa um critério de economicidade que conduz à solução otimizada.

Foram revisados os critérios de projeto de pavimento de concreto simples associados aos consumos totais da resistência à fadiga e do dano por erosão, adotado no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura Rodoviária (DNIT), baseado no método da PCA de

1984 [3], com o apoio das equações analíticas do guia da AUSTROADS de 2010 [7].

Foram desenvolvidos códigos computacionais em MATLAB®, tanto para verificação de um cenário de projeto quanto para otimização da placa do pavimento, com referências às variáveis de projeto da espessura da placa e da correspondente resistência característica à tração na flexão do concreto, em que foram experimentados cenários combinados de projeto frente a presença ou não de acostamento de concreto e de barras de transferência de carga.

O código computacional de verificação foi testado frente a resultados de exemplo desenvolvido no guia da AUSTROADS de 2010, sendo posteriormente aplicado junto ao módulo de otimização, sendo disponibilizado em repositório RR público (<http://loi.lccv.ufal.br/art-pcs>) juntamente com os arquivos dos exemplos analisados neste trabalho. Ferramentas computacionais como essas contribuem sobremaneira para a agilidade do trabalho de projetistas, possibilitando, inclusive, a otimização de recursos.

Ainda que o processo de otimização se volte exclusivamente ao custo da placa de concreto simples do pavimento, a ideia proposta neste trabalho pode ser estendida, incluindo o custo de novos elementos do pavimento e outras variáveis de projeto. De forma semelhante, é possível também avaliar a influência de outros modelos de fadiga [9] e erosão, bem como de outras relações entre as resistências características do concreto à compressão e à tração em flexão.

## Agradecimentos

O último autor agradece ao CNPq pela concessão da bolsa de Produtividade em Pesquisa.

## Referências Bibliográficas

- [1] Confederação Nacional do Transporte (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2017: relatório gerencial, Brasília, 2017.
- [2] Maschio, A. A Evolução do Pavimento de Concreto no Brasil. Vias Concretas – Pavimentação com Sustentabilidade – 16º Encontro Técnico – DER/PR, 2012.
- [3] Packard, R. G. Thickness design for concrete highway and street pavements. Portland Cement Association: Skokie, IL, 1984. 46 p.
- [4] Rufino, D. M. S. Estudo dos Procedimentos de Dimensionamento e dos Novos Programas de Análise de Tensões em Pavimentos de Concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.
- [5] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Manual de Pavimentos Rígidos. 2ª edição. Publicação IPR – 714: Rio de Janeiro, RJ, 2005. 234 p.
- [6] Vieira, A.; Silva, P. A. L.; Moreira Júnior, G. S. D.; Ramos, K. O. Dimensionamento de Pavimentos de Concreto: Programa IMEPAV de Automatização do Método PCA/84. 37ª Reunião Anual de Pavimentação, Goiânia/GO, 2006.
- [7] AUSTROADS. Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design, 2010.
- [8] Vandewalle, P.; Kovacevic, J.; Vetterli, M. Reproducible research in signal processing. IEEE Signal Processing Magazine, v. 26, n. 3, p. 37–47, 2009.
- [9] Silva, J. E. M.; Carneiro, L. A. V. Pavimentos de concreto: histórico, tipos e modelos de fadiga. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, v. XXXI, 3º trimestre, p. 14-33, 2014.
- [10] Senço, W. Manual de Técnicas de Pavimentação: volume 1, 2ª edição, São Paulo: PINI, 2007.
- [11] Packard, R. G.; Tayabji, S. D. New PCA design procedure for concrete highway and street pavements. Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University; 1985, p. 225–236.
- [12] Balbo, J. T.; Severi, A. A. Thermal Gradients in Concrete Pavements in Tropical Environment: Experimental Appraisal. Transportation Research Record, v. 1809, p. 12–22, 2002.
- [13] Balbo, J. T. Análise Crítica dos Métodos para Dimensionamento Estrutural de Pavimentos de Concreto Simples. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2003.
- [14] Waltz, R. A.; Morales, J. L.; Nocedal, J.; Orban, D. An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps. Mathematical Programming, v. 107, n. 3, p. 391–408, 2006.

# Desenvolvimento de pavimento semirrígido adaptado para região amazônica com cimento, zeólito sintético e solo de subleito

Daniel Jardim Almeida<sup>a\*</sup>, Francisco Heber Lacerda de Oliveira<sup>b</sup>, Marcos Valerio Mendonça Baia<sup>c</sup>, Nilton de Souza Campelo<sup>c</sup>

<sup>a</sup> PGED, Instituto Militar de Engenharia, RJ, Brasil,

<sup>b</sup> DET, Universidade Federal do Ceará, CE, Brasil,

<sup>c</sup> PPGEc, Universidade Federal do Amazonas, AM, Brasil,

\*danieljardimalmeida@ime.eb.br

**RESUMO:** Situações atípicas da região amazônica, caracterizadas por solos de baixa capacidade de suporte e pela escassez de agregados granulosos, despertam a necessidade do desenvolvimento de soluções específicas para pavimentação. Somado a isso, o regime intenso de chuvas, as inundações sazonais e o isolamento tecnológico limitam o período útil de execução das obras. Deste modo, são propostos procedimentos executivos de pavimento de rápida execução que consiste em camada única de base semirrígida utilizando-se do próprio solo de subleito estabilizado com cimento e aditivo químico a base de zeólito sintético. Os procedimentos são avaliados por intermédio de estudo de caso localizado em estrada militar, vicinal à AM-010. Desenvolveu-se o dimensionamento do pavimento, a execução e avaliação técnica por inspeção visual e ensaios de resistência. Pode-se concluir que o pavimento de base de solo-cimento-aditivo surge com uma alternativa em regiões com escassez de geomaterial, tempo de execução limitado e risco de inundações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimentação. Zeólito Sintético. Solo-Cimento. Amazonas.

## 1. Introdução

O Estado do Amazonas apresenta características singulares no que tange a pavimentação. Como o principal modo de transporte é o hidroviário [1], características únicas perfazem essa região em relação ao desenvolvimento rodoviário, onde apenas 15% das rodovias são consideradas ótimas ou boas [2]. A dificuldade em garantir a qualidade e o prazo de execução em locais onde o regime pluviométrico é intenso e em áreas de várzea que estão sujeitas a inundações, com solos de características geralmente plásticas e de baixa capacidade de suporte devido à sua formação geológica, tornam limitadas as chances de sucesso dos projetos tradicionais de pavimentação [3]. Assim, novas

**ABSTRACT:** The Amazon region is characterized by unusual situations such as low support capacity or scarcity of coarse aggregates that motivate the interest to develop specific paving solutions. In addition, the intense rain regime, seasonal floods and technological isolation reduce the period of work for carrying out the works. Thus, work procedures for fast execution pavement are proposed, which consists of a single layer of semi-rigid base using the subgrade soil stabilized with cement and chemical additive based on synthetic zeolite. Procedures are evaluated through a case study located on a military road, adjacent to AM-010. Pavement dimensioning, execution and technical evaluation by visual inspection and resistance tests were developed. It can be concluded that the soil-cement-additive base pavement appears as an alternative in regions with geomaterial scarcity, limited execution time and risk of flooding.

**KEYWORDS:** Pavement. Synthetic Zeolite. Soil-cement. Amazon

técnicas executivas de pavimentação, que garantam à obra maior resistência, impermeabilidade, vida útil e redução do custo de manutenção, vem ganhando espaço no cenário amazonense.

Observa-se, segundo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte [4], que as características admissíveis de solo, o potencial de impermeabilização e a influência da água não são considerados e limitam sua aplicabilidade em regiões sem possibilidade de troca de solo ou de realização de melhoramento granulométrica.

A técnica de pavimentação de execução de base semirrígida utilizando-se de solo do subleito com cimento e aditivo de compostos químicos a base de zeólitos sintéticos (ZS), como elemento capaz de absorver as cargas solicitadas, vem sendo alvo de estudos internacionais

quando aplicado em regiões de condições extremas [5] [6]. A minimização das etapas de trabalho, a capacidade do aditivo de estabilizar solos argilosos e a conservação da resistência adquirida, mesmo quando submerso durante chuvas críticas, mostra-se como uma técnica promissora a ser aplicada em zonas isoladas como a região amazônica.

Assim, é proposto procedimentos de execução de obra rápida de pavimentação constituída de camada única de base semirrígida de espessura variável utilizando-se de solo do subleito estabilizado com cimento e ZS. É apresentada metodologia adaptada de projeto de pavimentação que busca superar dificuldades enfrentadas no Amazonas. É considerado o mínimo de informações e dados geotécnicos necessários para desenvolvimento de um projeto de qualidade. Por fim, é avaliada a eficiência da técnica e sua adequabilidade por meio de um estudo de caso constituído da construção de uma seção teste de 70 m.

## 2. Fundamentação teórica

Localizadas em planícies alagáveis denominadas de terras de várzea da Bacia Amazônica [7], grande parte das estradas no Estado do Amazonas, em determinados períodos do ano, permanecem submersas ou sofrem com a precipitação intensa, prejudicando a sua vida útil substancialmente. Alguns autores Ferreira *et al* [8] utilizaram imagens de radar multitemporal PALSAR L-band combinadas com análise de imagem baseada em objetos, técnicas de data mining e dados de campo para derivar padrões de inundação na Amazônia Central. Para um trecho de várzea baixa distribuída em 37,7% da área total analisada, observou-se que seu regime de inundação é de 120–180 dias por ano alagado, ao passo que a várzea alta (18,7%), permanece alagado ao menos que 40 dias por ano.

Geologicamente, o Estado do Amazonas é caracterizado por uma extensa cobertura sedimentar fanerózóica, distribuída nas Bacias Acre, Solimões, Amazonas e Alto Tapajós, depositado sobre um substrato rochoso pré-cambriano onde predominam rochas de natureza ígnea, metamórfica e sedimentar [9]. As argilas do Médio Amazonas [10] são encontradas sob a forma de depósitos aluvionares holocênicos relacionados a um sistema

fluvial representado por canais ou barras de meandros e depósitos de planície de inundação. Por meio do Sistema Rodoviário de Classificação (AASHTO) e do Índice de Suporte Califórnia (ISC), 90% das jazidas analisadas no levantamento da Secretaria de Infraestrutura do Estado do Amazonas [11] apresentaram solos do tipo A-4 a A-7, com valor médio de ISC de 26,11%.

Encontrar jazidas de solo com boa qualidade, sem conflitos ambientais e legalmente habilitadas torna-se um grande desafio na maioria dos municípios. A carência de material pétreo na região da Amazônia Central é tratada por Picanço [12], indicando a ocorrência de afloramento de rochas somente a grandes distâncias dos principais centros urbanos. A fim de solucionar a falta de material disponível na região, opta-se pelo uso de materiais alternativos.

A técnica de pavimento com uma camada única de base semirrígida utilizando-se solo do próprio subleito e cimento apresenta-se relevante ao ponderar as condicionantes regionais. Ao utilizar o próprio material do subleito estabilizado com cimento há uma redução no custo da construção e na exploração de jazidas e bota-foras, conduzindo a benefícios ambientais e desenvolvimento sustentável [13] [14].

Antes, durante e depois da inundação, a qualidade da infraestrutura da estrada é fundamental [5]. O problema refere-se ao fato de que os materiais tradicionais não consolidados possuem maior susceptibilidade à erosão enquanto que os materiais consolidados estão propensos à ruptura quando as camadas inferiores sofrem erosão. Estudos sobre transformação *in situ* de subleito em base com cinzas volantes e cimento para tráfego de construção e operação [16] mostraram benefícios mesmo em subleito de baixa capacidade de suporte, com redução na espessura final do revestimento asfáltico.

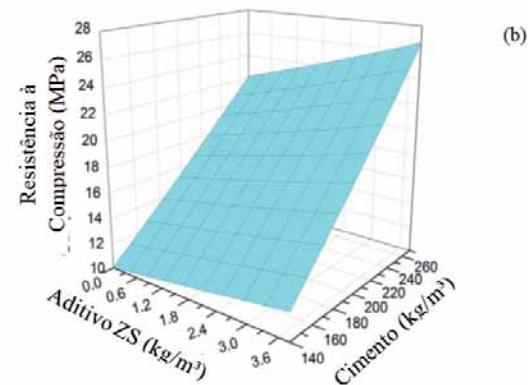
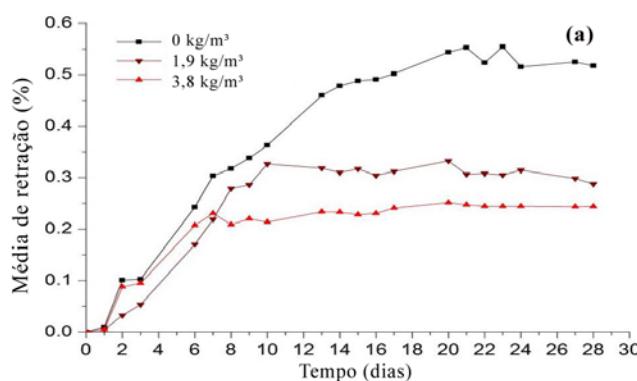
As propriedades dos materiais estabilizados com cimento são fortemente determinadas pela natureza da matéria-prima utilizada, que pode ser argila, silte, areia ou pedregulho. O tipo de solo influencia na escolha apropriada do estabilizante e controla as propriedades estruturais do produto final estabilizado. Em grande parte, a variabilidade das propriedades do solo é fortemente atribuída à distribuição granulométrica e ao arranjo das partículas, ao formato dos grãos e a sua

composição mineralógica [17].

Estruturas de solo-cimento estão propensas à retração hidráulica principalmente durante a umidade perdida na hidratação do cimento ou pela variação de temperatura. O acúmulo de trincas, provocado pela retração, pode acelerar os danos ao pavimento, processos erosivos e a redução da resistência e durabilidade da camada de base. Já a adição do aditivo ZC conjuntamente com cimento para transformação de solo *in situ* modifica a dinâmica do processo de hidratação cimentícia em uma escala nanométrica, melhorando os processos de formação da microestrutura cristalina, troca iônica, absorção e imobilização de compostos potencialmente nocivos em solos que, em uma abordagem tradicional, precisariam ser removidos ou descartados a um custo significativo, tornando-os materiais relevantes e adequados para serem usados na construção de estradas [18], conforme mostra a **figura 1**.

Assim, os zeólitos sintéticos aumentam a força, rigidez e flexibilidade dos compósitos de solo-cimento e melhoram o desempenho geral das camadas estabilizadas de pavimento [6] [19] [20]. No Estado do Amazonas, testes foram realizados em solos argilosos, identificando ganho de resistência à compressão simples (RCS) quando se utilizou o aditivo ZS em sua composição [21].

Para aplicação em campo, este aditivo é usado em baixa dosagem (de 1,2 a 2,4 kg/m<sup>3</sup>) [22]. A dosagem do aditivo pode ser aumentada baseando-se nas condições locais como as características do solo, o tempo para abertura do tráfego e as condições climáticas existentes durante a construção.



**Fig. 1** – Efeito do ZS (a) na redução da retração e (b) no ganho de RCS em função da dosagem (Adaptado de Wu [6]).

### 3. Proposta de procedimentos executivos

Considerando a execução de pavimento com apenas uma camada semirrígida de espessura variável, utilizando-se do solo estabilizado de subleito a fim de minimizar impactos ambientais e acelerar processos, são propostos procedimentos de projeto divididos em três fases. A primeira fase, denominada de concepção inicial, consiste na apresentação sistemática das atividades antes do início da obra, coletando informações para desenvolvimento do dimensionamento estrutural do pavimento. A segunda fase, denominada de execução de obra, delineou as etapas construtivas que deveriam ser estabelecidas para garantia da qualidade da execução. Por fim, a terceira fase, denominada avaliação e monitoramento pós-obra, apresentou os testes que deveriam ser executados para verificar a qualidade da construção após 28 dias de conclusão. Essas etapas serão mais detalhadas nos subitens a seguir.

#### 3.1 Concepção inicial

Mediante estudo do subleito, cimento e tráfego determina-se o traço dos materiais que serão utilizados no projeto e o desenvolvimento do dimensionamento estrutural.

### 3.1.1 Caracterização do subleito

É necessário inicialmente identificar as características da camada superior de solo natural, no qual será tratada com cimento e o aditivo ZS e será considerada a camada de base do pavimento, além de determinar a capacidade de suporte na camada inferior (subleito). As propriedades que influenciam as características dos solos, com suas respectivas metodologias, estão definidas na **tabela 1**.

**Tab. 1** – Parâmetros de caracterização do subleito.

Parâmetros	Ensaios
Propriedades químicas	Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C [23] Determinação da Composição Química
Distribuição granulométrica	Análise Granulométrica [24] [30]
Consistência	Determinação de limite de liquidez [25] Determinação do limite de plasticidade [26]
Classificação SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos solos
Capacidade de suporte	Ensaio de Compactação na Energia Modificada [27] Ensaio Índice Suporte Califórnia [28] Teste de Placa (Plate test). Deflectômetro de Impacto tipo Falling Weight Defle- tometer (FWD) [29]

As propriedades químicas influenciam na composição da mistura enquanto que a quantidade de matéria orgânica determina o traço. A distribuição granulométrica e a consistência do solo auxiliam na sua classificação, obtida pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). Considerando a dificuldade em elaborar ensaios de módulo de rigidez a **tabela 2** estabelece uma relação entre o Módulo de rigidez com deformações de 50 µm/m e o tipo de solo para dimensionamento [5].

### 3.1.2 Seleção do tipo de cimento utilizado

O processo de cristalização prolongada muda significativamente ao se usar o ZS. O aditivo pode ser utilizado com qualquer tipo de cimento disponível no mercado. Contudo, a utilização de cimento com altas taxas de cal hidratada em seu conteúdo, na

estabilização de solos argilosos, não é recomendada, visto que, a cal hidratada pode consumir a água ligada quimicamente às partículas de argila, criando retracções e possíveis fissuras.

**Tab. 2** – Módulo de rigidez por tipo de solo.

Tipo de solo	Módulo de rigidez
Orgânico	25 MPa
Argiloso	50 MPa
Argilo Arenoso	75 MPa
Arenoso	100 MPa

### 3.1.3 Determinação da dosagem

Após classificação do tipo de solo do subleito, é realizada a definição do traço, utilizando a **tabela 3** como referência, levando em conta sua classificação SUCS [5]. Para cada tipo de solo é definido uma dosagem de ZS e cimento. Essa dosagem é avaliada por meio de ensaios de RCS e ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) ser ensaios simples e acessíveis mesmo em regiões isoladas. Caso os valores esperados sejam atingidos, o módulo de rigidez estimado é definido para fins de dimensionamento de camada.

**Tab. 3** – Dosagem de cimento e ZS em função do tipo de solo.

Tipo	Indicativo de quantidade de ZS (kg/m <sup>3</sup> ) na densidade máxima seca	Indicativo de quantidade de cimento (kg/m <sup>3</sup> ) na densidade máxima seca	Valor esperado de Resistência compressão Simples 28 dias (MPa)	Módulo de rigidez com 50 µm/m estimado (MPa)
GW	1.0 – 1.4	100 – 140	10-15	10.000
GP	1.2 – 1.6	120 – 160	6-11	6.000
GW-GM	1.2 – 1.6	120 – 160	10-15	10.000
GW-GC	1.4 – 2.0	140 – 200	10-15	10.000
GP-GM	1.4 – 2.0	140 – 200	6-11	6.000
GP-GC	1.4 – 2.0	140 – 200	6-11	6.000
GM	1.5 – 1.8	150 – 180	6-11	6.000
GC	1.6 – 2.0	160 – 200	5-10	5.000
GC-GM	1.6 – 2.0	160 – 200	5-10	5.000
SW	1.2 – 1.6	120 – 160	5-13	8.000
SW-SM	1.2 – 1.6	120 – 160	6-11	6.000
SW-SC	1.4 – 2.0	140 – 200	7-12	7.000
SP	1.2 – 1.8	140 – 200	5-10	5.000
SP-SM	1.2 – 1.6	120 – 160	5-10	5.000
SP-SC	1.4 – 1.8	140 – 180	5-8	5.000

Tipo	Indicativo de quantidade de ZS (kg/m <sup>3</sup> ) na densidade máxima seca	Indicativo de quantidade de cimento (kg/m <sup>3</sup> ) na densidade máxima seca	Valor esperado de Resistência compressão Simples 28 dias (MPa)	Módulo de rigidez com 50 µm/m estimado (MPa)
SM	1.4 – 1.8	140 – 180	5-8	5.000
SC	1.6 – 2.0	160 – 200	5-8	4.000
ML	1.6 – 2.0	160 – 200	5-8	5.000
CL	1,7 – 2.0	170 – 200	5-6	3.500
OL	1.5 – 1.9	150 – 190	5-7	3.500
MH	1.6 – 2.0	160 – 200	5-7	3.000
CH	1.8 – 2.2	180 – 220	4-7	3.000
OH	2.0 – 2.4	200 – 240	4-6	3.000
PT	2.2 – 2.8	220 – 280	1-3	1.000

### 3.1.4 Modelagem e ruptura dos corpos-de-prova

Com quantidades de aditivo ZS e cimento definido para mistura, realiza-se a avaliação da resistência mecânica do traço através da produção de corpos-de-prova (CP). Para moldagem e ruptura dos corpos-de-prova, seguem-se os preceitos de moldagem de corpo-de-prova [31] [32] [33], adaptado em função da utilização do aditivo ZS [34]:

- A quantidade mínima de ZS é de 50g. Em caso de doses inferiores, nem todas substâncias ativas podem estar contidas na mistura gerando resultados não desejados;
- A homogeneização do material deve ocorrer em equipamento homogeneizador ou argamassadeira com capacidade para 50kg;
- O ZS deve ser homogeneizado ao solo antes de adicionar o cimento. Em caso de solos argilosos ou orgânicos, recomenda-se deixar a mistura solo/ZS por 3 horas antes de aplicar o cimento, homogeneizando a mesma ocasionalmente;
- Após determinação da umidade ótima (wóptima) pelo ensaio de compactação [27], realiza-se a homogeneização da mistura com solo na umidade wóptima +2% a +4%;
- A homogeneização se dá como concluída após confirmar ausência de diferentes colorações da mistura. As amostras devem ser compactadas em no máximo 2 horas após adição de cimento na mistura. Deve-se agitar a mistura a cada 15 minutos. Durante a compactação das amostras,

deve-se manter o resíduo da mistura vedado para conservação da umidade;

- O molde cilíndrico (100mm x 120mm) deve ser bipartido para auxiliar na desmoldagem sem danificar a amostra. A utilização de parafina ou óleo lubrificante nas paredes internas do molde deve ocorrer antes de iniciar a compactação;
- Finalizado a compactação, o desmolde é aconselhado após 24 horas para solos arenosos ou imediatamente para solos argilosos e as amostras serão armazenadas em câmara úmida (maior que 90%) à temperatura 23°C até o momento da ruptura.

Para avaliar o ganho de resistência inicial e sua resistência característica, realiza-se a ruptura dos corpos-de-prova nas idades 3, 7 e 28 dias, sendo que os valores de resistência com 28 dias devem se enquadrar na faixa definida na **tabela 3**. Em caso de divergência com os limites estabelecidos, aumenta-se taxa de cimento e aditivo ZS para valores inferiores e vice-versa.

### 3.1.5 Estudo de tráfego

O estudo de tráfego tem como objetivo fornecer elementos necessários para avaliação e desenvolvimento do dimensionamento do pavimento. A expectativa de carregamento e a função do pavimento determina o tipo de construção, tipo de material utilizado, espessura da camada e critérios específicos. O parâmetro de projeto [35] que indica o número total de repetições equivalentes do eixo simples de rodas duplas com 80kN, que ocorrerá em todo o horizonte de projeto, é denominado Número N.

### 3.1.6 Dimensionamento do pavimento

Para a determinação da espessura da camada única de base formada de solo-cimento-aditivo ZS, considerando as características dos materiais e tráfego, a espessura é definida através de *software* capaz de operar métodos de dimensionamento mecanístico-empírico através de análises elástico linear dos materiais, utilizando-se de parâmetros de

rigidez e viscosidade para interpretação das tensões e identificação das deformações nos pontos críticos da construção da pista.

### 3.2 Execução da obra

A programação de atividades é proposta seguindo as principais condicionantes e prevendo eventualidades típicas encontradas na região. A expectativa de clima na região amazônica é geralmente de alternância entre períodos de calor intenso e chuva, com canteiro de obras muito úmido. Assim, equipamentos com boa tração são fundamentais. Em relação aos elementos de drenagem, a condução de águas superficiais e o controle de processos erosivos devem ser mantidos sem alteração.

De modo geral, a obra se dá pela adição e mistura do aditivo ZS e cimento, seguido pelo nivelamento, compactação e acabamento da superfície. Neste processo, a adição do aditivo ZS pode ocorrer um dia antes da aplicação do cimento, por meio das seguintes etapas:

Etapa 1 - Abertura de camada de solo in situ: após fechamento da pista, realiza-se a remoção de matéria orgânica remanescente e impurezas da pista. O trecho para receber a mistura de solo-cimento deve estar preparado para a drenagem, nivelamento e seção transversal fixados no projeto. Realiza-se a abertura da camada de solo in situ com auxílio da recicladora. Em seguida, prepara-se a camada para aplicação do aditivo através do nivelamento com motoniveladora e a correção superficial com rolo compactador liso.

Etapa 2 - Distribuição do ZS: para realizar o espalhamento aditivo ZS na pista segundo as taxas definidas em projeto, utiliza-se um distribuidor de agregados ou delimitam-se marcas na pista para alocação manualmente de cada saco com o aditivo (**figura 2a**). Na sequência, a recicladora mistura o solo e o ZS à 2/3 da espessura da camada final de projeto (**figura 2b**). Após a completa incorporação do aditivo, a pista é levemente compactada para prevenir infiltração de água em caso de chuva.

Etapa 3 - Adição de cimento e água à mistura: realiza-se a distribuição uniforme do cimento na superfície manualmente ou com auxílio de máquina distribuidora de agregados na dosagem de projeto. Inicia-se a

homogeneização do solo-cimento-aditivo ZS na espessura final de projeto até que seja observado tonalidade uniforme em toda a camada e a correção da umidade progressivamente com auxílio do caminhão pipa.

Etapa 4 - Nivelamento, compactação e acabamento superficial: tendo concluído a homogeneização da mistura, realiza-se a regularização da pista para dar início à compactação utilizando rolo compactador adequado para espessura de projeto (**figura 3a**). O tempo entre o contato do cimento com solo e a compactação final deve ocorrer em até 3 horas. Após este intervalo, a compactação pode quebrar ligações iniciais realizadas entre o solo e o cimento, reduzindo a resistência da camada. Posteriormente, realiza-se a conformação do trecho ao greide e o abaulamento desejados (**figura 3b**), para depois, realizar polimento com rolo compactador liso e acabamento final com rolo pneumático leve (**figura 3c**).



Fig. 2 – Distribuição do ZS por (a) espalhamento manual do e (b) homogeneização com solo in situ através da recicladora.



Fig. 3 – Etapas de (a) compactação, (b) abaulamento, (c) acabamento final e (d) cura do solo.

Etapa 5 – Cura: Finaliza-se a atividade com lançamento abundante de água na superfície acabada por meio de caminhão pipa com pneus levemente vazios (50% da sua capacidade total). A base estabilizada permanece sem tráfego até o sétimo dia, aplicando-se sobre ela uma camada de areia, capim ou outro material para a perda rápida de umidade. Realiza-se também a molhagem da base de duas a três vezes por dia durante este período (**figura 3d**). Em casos de abertura da via antes da data prevista, verifica-se resistência à compressão para amostras com três dias de idade.

### 3.2.1 Controle tecnológico

Para garantia da qualidade da execução, devem-se seguir todas as recomendações e testes necessários durante a obra de solo-cimento [36]. Durante a execução da obra, utiliza-se a mistura da pista, realizada pela reciclagem antes da compactação, para moldagem de CP e verificação da sua resistência mecânica futura. Os ensaios de resistência dos CP moldados na obra servem para verificar a qualidade da mistura e preceder resultados rápidos com 3 e 7 dias. Seus resultados devem atingir valores semelhantes aos ensaios realizados com a mistura em laboratório.

### 3.3 Avaliação e monitoramento

Para avaliação e monitoramento da qualidade da estrutura executada, geralmente, realiza-se inspeção de campo, ensaio de compressão simples para amostras extraídas da pista após 28 dias de conclusão de obra, conforme sugerido na **tabela 4**.

**Tab. 4** – Ensaios pós-obra.

Ensaios	Método	Frequência
Inspeção Visual	Verificação de danos e deformações na pista e espessura da camada nos locais onde é extraído amostra de campo.	Todo trecho
Resistência à compressão	Extrai-se CP da pista e analisa sua resistência mecânica através de ensaio de compressão simples	A cada 5 estacas e em pontos críticos

A inspeção visual tem por objetivo identificar a intensidade do processo de retração hidráulica e propagação de trincas, e propor medidas mitigatórias. Os ensaios de resistência dos CP extraídos com 28 dias servem para verificar a qualidade da cura e o seu

comportamento estrutural. Durante a extração da amostra avalia-se a espessura da camada novamente. O CP deve possuir diâmetro mínimo de 150 mm e serem nivelados e capeados para realização de ensaio de compressão simples. Os valores de resistência do CP extraído podem atingir patamar entre 30% e 70% da resistência requerida de projeto [37] [38] [39].

## 4. Estudo de caso – Ramal militar da AM-010

Para avaliar a eficiência e a velocidade de execução dos procedimentos propostos no Capítulo 3, foi realizado um estudo de caso. Uma seção teste foi construída de camada única de base estabilizada de solo cimento e aditivo ZS em um ramal militar não pavimentado, coadjuvando na identificação das principais características e considerações para futuras aplicações em condições similares. Procedeu-se com inspeção visual, ensaios de RCS antes, durante e após a construção; e ensaios de RTCD para amostras moldadas em laboratório, buscando identificar a qualidade geral da estrutura, dos elementos de drenagem, afundamentos, trincas e fissuras.

### 4.1 Localização

Foi selecionado um trecho de 70 m de comprimento com 7,5 m de largura de uma estrada militar vicinal não pavimentada da AM-010, KM 53, ao norte de Manaus/AM (**figura 4**) para aplicação dos procedimentos executivos de pavimento de base de cimento e zeólito sintético utilizando o próprio solo de subleito. Elaborou-se dimensionamento estrutural, avaliação do desempenho mecânico *in loco* e levantamento de produção e custo.



**Fig. 4** - Localização do trecho experimental.

## 4.2 Aditivo ZS

O aditivo a base de zeólito sintético utilizado possui nome comercial Roadcem®. É um fino pó de cor acinzentada inodoro, com massa específica de aproximadamente 1.100kg/m<sup>3</sup> e pH situado entre 10-12 (em água, a 20 °C) [6]. Sua composição química é composta principalmente por:

- a) Metais alcalinos e metais alcalino-terrosos (60-80%, em massa), incluindo cloreto de sódio, cloreto de potássio, cloreto de cálcio e cloreto de magnésio;
- b) Zeólitos sintéticos e óxidos (5-10%, em massa);
- c) Ativadores (5-10%, em massa).

## 4.3 Solo

As características geotécnicas do solo estão discriminadas na **tabela 5**. Subleito é caracterizando como solo argilo-arenoso.

**Tab. 5** – Propriedades geotécnicas do solo.

Propriedades Geotécnicas	Resultados
Teor orgânico [23] (%)	0,62
Teor de argila [24] (%)	44,11
Teor de silte [24] (%)	6,66
Teor de areia [24] (%)	46,92
LL [25]	34,40
IP [26]	13,74
Classificação do solo (USCS)	SC
Umidade ótima – Energia Modificada [27] (%)	12,4
Densidade máxima seca – Energia Modificada [27] (kg/m <sup>3</sup> )	1.954
Índice de Suporte Califórnia [28] (%)	31,13
Expansão [28] (%)	0,03
Massa específica dos grãos [30] (kg/m <sup>3</sup> )	2.630
pH H <sub>2</sub> O milli-q [40]	5,39
Módulo de Rígidez (Tabela 2) (MPa)	75

## 4.4 Cimento

O cimento utilizado apresentou uma composição de 52% de óxido de cálcio e 26,7% de dióxido de silício, caracterizado pelo maior tempo de cura inicial e uma taxa de desenvolvimento de resistência mais lenta que cimentos Portland tradicionais [41]. O tempo de cura inicial mais longo contribui para garantir tempo suficiente para realização da mistura e compactação das amostras em laboratório.

Para definição das principais propriedades físicas e químicas do cimento realizaram-se diversos ensaios de caracterização e os resultados estão reunidos na **tabela 6**.

**Tab. 6** – Caracterização do cimento.

Propriedades de Engenharia	Principais componentes químicos (%)	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,02	CaO 60,69
Finura método de Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	4951	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2,82
Área específica (cm <sup>2</sup> /g)	4530	SiO <sub>2</sub> 26,91
Passante na peneira #200 (%)	0,19	CaO Livre 1,73
Resistência compressão 3 dias (MPa)	23,9	MgO 1,15
Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	32,5	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1,30
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	42,7	SO <sub>3</sub> 2,37
Início de pega (min)	133	Resíduos insolúveis 1,20
Fim de pega (min)	226	
Índice de consistência normal (%)	30,64	
Perda ao fogo (%)	1,90	

## 4.5 Dimensionamento do estudo de caso

O solo caracterizado define o subleito do trecho experimental. Utilizando-se da **tabela 3**, definiu-se o traço da camada de base para solo de classificação SC em 1,7 kg/m<sup>3</sup> de ZS (0,09% em relação ao solo seco) e 160 kg/m<sup>3</sup> de cimento (8,20%). Os resultados de RCS dos CP moldados em laboratório antes da obra nesta dosagem encontraram valores em torno a 8 MPa para 28 dias, atendendo a condição mínima estabelecida, e foi definido a resistência característica para o solo-cimento-aditivo com módulo de rigidez com deformações de 50 µm/m de 4500 MPa, em função dos bons resultados de RCS.

A expectativa de crescimento do tráfego é baixa devido a função da estrada ser uma vicinal para utilização do Exército Brasileiro, sendo previsto caminhões e veículos blindados (450kN). Quanto ao tráfego definiu-se:

- a) Tráfego tipo normativo: veículos blindados

(carga por roda de 75 kN);

- b) Carregamento de eixo padrão de 150 kN;
- c) Pressão nos pneus normativos de veículos de 557kPa;
- d) Máximo carregamento na construção: 75 kN carga por roda;
- e) Vida útil estimada da construção: 5 anos;

A **tabela 7** apresenta os critérios definidos e o cálculo de espessura das camadas através do emprego do *software* BISAR 3.0, da empresa Royal Dutch Shell. Por conseguinte, ficou estabelecido que, para a dosagem e tráfego estabelecidos, a espessura da camada estabilizada deveria possuir 35 cm (4500 MPa).

**Tab. 7** – Critérios para desenvolvimento de projeto.

Tráfego	Número de Repetições do Eixo-padrão (N)	2,5 x 104
Camada 2 Base	Material	Solo-Cimento-ZS
	Módulo de rigidez	4500 MPa
	Espessura	35 cm
Camada 1 Subleito	Material	Solo (SC)
	Módulo de rigidez	75 MPa
Propriedades do Solo-cimento-ZS	Número mínimo de repetições de carga para causar falha (Ni)	4,6.106
	Deformação Horizontal limite	150 mm/m
Cálculos software Bisar	Cálculo de deformação Horizontal devido ao carregamento axial Padrão	111 mm/m
	Checkagem de Fadiga (N/Ni < 1)	0,01

## 4.6 Avaliação em campo

A execução da obra seguiu conforme procedimentos executivos descritos no item 3.6, sendo que no primeiro dia foi preparado o local e incorporado apenas o aditivo ao solo. No segundo dia, incluiu-se o cimento e água na umidade ótima e realizaram-se os

restantes das etapas (**figura 5**). O trecho experimental recebeu identificação com placa e coloração preta na pista.



**Fig. 5** - Aspecto final da seção teste com 1 dia de conclusão em 10/16 (a) e após 490 dias em 02/18 (b).

Para verificação da resistência mecânica da obra, realizou-se a moldagem de CP em três etapas. Em laboratório, antes de iniciar obra, são preparados CP com a dosagem estabelecida. A preparação de CP seguiu a metodologia descrita no capítulo 3, sendo avaliado a RCS e RTCD nas idades de ruptura de 3, 7, 14 e 28 dias em cura úmida.

Durante a execução da obra, realizou-se nova moldagem de CPs, coletando mistura homogeneizada de solo-cimento-RC, imediatamente antes de iniciar o procedimento de compactação em campo. Esses CPs podem indicar a qualidade da mistura realizada na obra. Para estas amostras, ensaio de RCS foi realizado, nas idades de ruptura de 3, 7, 14 e 28 dias.

Para uma terceira comparação, com 28 dias de conclusão de obra, realizou-se extração de seis amostras diretamente da pista (**figura 6**). A extratora utilizada possui diâmetro de 200mm e as amostras coletadas possuíam altura de 20cm ± 1cm. A utilização de água durante a extração se faz necessária para minimizar os efeitos da vibração que podem danificar o CP. Para regularização da face das amostras, utilizou-se de lixadeira orbital, removendo sobras grosseiras e capeamento com enxofre. Após a extração, as amostras foram levadas imediatamente para laboratório e verificado sua RCS.



Fig. 6 – Extração de CPs da pista (a) e aspecto final (b).

Na seção teste foram realizadas todas as avaliações e testes estabelecidos. O controle de umidade foi realizado através de teste *Speedy*, o grau de compactação avaliado pelo método de determinação da densidade in situ com frasco de areia e a espessura da camada solta foi garantido pela própria régua embutida da recicladora no ato da abertura das camadas.

Mediante inspeção visual da obra durante as primeiras 48 horas de cura, observou-se surgimento de algumas trincas transversais, superficiais e isoladas com profundidades média de 1 mm, mostrada na figura 7.



Fig. 7 – Regeneração de trincas 1mm (a) 24 horas e (b) 48 horas após a compactação.

Neste período ocorre expansão volumétrica que geram tensões internas de tração no material ainda em estado fresco. A microestrutura em formação, sofre com crescimento secundário da fase impura da etringita. E, como consequência da continuidade da hidratação do  $C_3S$ , o silicato de cálcio hidratado começa a se formar no interior da carapaça hidratada [42].

Este efeito fica mais intenso em argilas plásticas com teores elevados de cimento expostas a alta umidade que a floresta exerce durante a noite e ao

calor intenso durante o dia. No entanto, o ganho de resistência contínuo do material interrompeu a propagação das trincas nos dias subsequentes, sendo incorporadas naturalmente por solos finos dando um aspecto de regeneração natural da base. Os resultados de resistência à compressão das amostras moldadas em laboratório, das moldadas com mistura de campo e das extraídas da pista podem ser observadas na figura 8. Todos os testes foram realizados com mesmo solo e taxa de aditivo ZS e cimento, contudo valores de resistência alteraram significativamente.

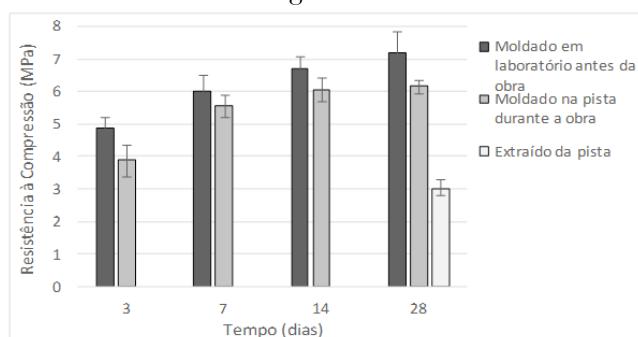


Fig. 8 – Comparativo de RCS para amostras moldadas em laboratório, durante a obra e extraídas diretamente da pista.

Dos CPs moldados com a mistura da pista durante a obra, observou-se resultados de resistência à compressão próximos a valores dos moldados em laboratório. A qualidade da mistura feita pela recicladora e o tempo entre a homogeneização e a compactação são os principais fatores que ilustram a diferença entre a resistência das amostras moldadas em laboratório e moldadas com mistura em campo que foram em torno de 15%.

Já amostras extraídas diretamente da pista resultaram em resistência 41% inferior quando comparada às amostras moldadas em laboratório. A alteração é causada principalmente pelas técnicas de construção, a qualidade da mistura e da compactação pelos equipamentos em campo que possuem dificuldades inerentes inevitáveis, enquanto em laboratório busca-se sempre condições ideais. Durante o processo de extração de amostra, a água utilizada na lâmina durante a operação e a vibração excessiva podem danificar a matriz estrutural do CP reduzindo

a resistência real.

Em relação às tensões de tração que as regiões inferiores do pavimento recebem devido às cargas verticais impostas pelo tráfego, avaliou-se a RTCD do material em CP de 7, 14 e 28 dias. Os resultados indicados na **figura 9** apresentaram valores superior a 1 MPa com 7 dias.

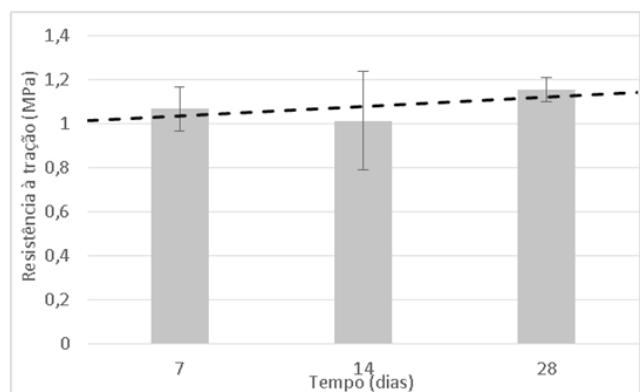
## 5. Considerações finais

A técnica de estabilização utilizando do próprio solo de subleito com cimento e aditivo produz um pavimento mais resistente às condições encontradas em regiões amazônicas, passíveis de chuvas intensas e inundações, com mitigação da utilização de insumos predatórios e minimiza as dificuldades logísticas. Os procedimentos de obra propostos descreveram de maneira ampla as etapas a fim de obter sucesso na execução de estabilização de solos com cimento e aditivo a base de zeólitos sintéticos.

O trecho experimental apresentou bom aspecto visual após a construção. A ausência de trincas superficiais controla a infiltração por percolação interna ou drenagem superficial gerando uma solução definitiva para obras em locais com solos expansíveis e plásticos com nível d'água elevado.

## Referências Bibliográficas

- [1] Carvalho, D.; Santos, J. T. A. N. Pesquisa SINDARMA : Transporte Hidroviário Interior de Passageiros e Cargas. Manaus: 2015.
- [2] Confederação Nacional do Transporte. CNT; SST; SNAT. Pesquisa CNT de Rodovias 2017: Relatório Gerencial, 2017.
- [3] Villibor, D. F. & Nogami, J. S. Pavimentos econômicos - Tecnologia do uso dos solos finos lateríticos, Arte & Ciência. 292 p., São Paulo. 2009.
- [4] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. DNIT 143/2010: Pavimentação – Base de solo-cimento - Especificação de Serviço, 2010.
- [5] Gersonuis, B.; Egyed, C.. Macro-economic Effects of Using the PowerCem Technology on Road Infrastructure in flood risk Areas, UNESCO-IHE, Report. 2012.
- [6] Wu, P, 'Cement stabilized materials with use of roadcem additive', Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2015.
- [7] Prance, G. T. Notes On The Vegetation Of Amazonia III. The Terminology Of Amazonian Forest Types Subject To Inundation. v. 31, n. 1, p. 26–38, 1979.
- [8] Ferreira-Ferreira, J. S. et al. Combining ALOS/PALSAR derived vegetation structure and inundation patterns to characterize major vegetation types in the Mamiraua Sustainable Development Reserve, Central Amazon



**Fig. 9** – Tensão de ruptura do ensaio de RTCD para amostras moldadas em laboratório.

A ligação cimentícia modificada com aditivo ZS apresentou-se satisfatoriamente nos testes mecânicos aplicados, com resultados adequados de resistência a compressão para corpo de provas moldados em laboratório. Os CPs extraídos em campo e o ensaio de tração por compressão diametral apresentaram valores dentro da faixa de resultado da literatura revisada, contudo não há normas nacionais que definam valores mínimo de resistência.

## Agradecimentos

Agradecimentos à CAPES, à empresa POWERCEM TECHNOLOGIES e ao Exército Brasileiro.

- floodplain, Brazil. *Wetlands Ecology and Management*, v. 23, n. 1, p. 41–59, 2014.
- [9] Reis, N. J. et al. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas*. Manaus, 2006.
- [10] Riker S.R.L., Reis N.J., D'antona R.J.G., Brito I.A. Projeto materiais de construção no domínio médio Amazônia : Informe de Recursos Minerais, Série Rochas e Minerais Industriais. Manaus, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 168 p. 2008.
- [11] Secretaria de Infraestrutura do Estado do Amazonas. *Catálogo de Jazidas no Estado do Amazonas*, 2014.
- [12] Picanço, H. et al. Refletividade, Radiação Solar e temperatura em diferentes tipos de revestimentos das vias urbanas no município de Manaus (Am). In: CONINFRA 2011 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. 5a ed., São Paulo, 2011.
- [13] Vorobieff, G. *Performance and Design of Insitu Stabilised Local Government Roads*. Technology Transfer Seminar, 1998.
- [14] Michener, J. E. *Effects of Environmental Factors on Construction of Soil-Cement Pavement Layers*. Brigham Young University, 2008.
- [15] Guthrie, W. & Michener, John & Wilson, Bryan & Eggett, Dennis. *Effects of Environmental Factors on Construction of Soil-Cement Pavement Layers*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2009.
- [16] Kolias, S.; Kasselouri-Rigopoulou, V.; KARAHALIOS, A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 2, p. 301–313, 2005.
- [17] Molenaar, A. Cohesive and non-cohesive soils and unbound granular materials for bases and sub-bases in roads, Lecture Notes, Delft University of Technology. 2010.
- [18] Nogueira, L. D. Crisóstomo, P. Silva, M E Frota, C. *Avaliação do Comportamento Geotécnico de solos provenientes de Áreas de floresta no Amazonas Misturados Com Cimento Portland E Roadcem®*. Foz Do Iguaçu, Pr44a Rapv – Reunião Anual De Pavimentação, 2015.
- [19] Marjanovic, P. et al. *The Road to the Future - Manual for working with RoadCem*, 2009.
- [20] Mutepfa, W. A. T. *Laboratory Evaluation of the Effect of Cement Concentration, Water Salinity and the Roadcem Additive on Kalahari Soil Strength*. Dissertação de Mestrado. University of Botswana, África do Sul, 2010.
- [21] Nogueira, L. D. et al. *Avaliação do comportamento geotécnico de solos provenientes de áreas de floresta no Amazonas misturados com cimento Portland e Roadcem®*. Foz Do Iguaçu, Pr44a Rapv – Reunião Anual De Pavimentação, 2015.
- [22] Vu, Thao & Ngo, Huong & Nguyen, Quoc & Ngo, Anh & Lanh, Ho. *Study on Cement-Treated Soil with RoadCem Additive in Construction of Rural Roads: A Case Study in Viet Nam*. 2019.
- [23] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 13600: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C*. Rio de Janeiro, 1996.
- [24] \_\_\_\_\_. *NBR 7181: Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro. 2016a
- [25] \_\_\_\_\_. *NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro. 2016b
- [26] \_\_\_\_\_. *NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro. 2016c.
- [27] \_\_\_\_\_. *NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro. 2016d.
- [28] \_\_\_\_\_. *NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2016e.
- [29] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER-PRO 273: *Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”*. 1996.
- [30] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro. 2016f
- [31] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. *DNER-ME 202-94: Solo - cimento - moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos*, 1994a.
- [32] \_\_\_\_\_. *DNER-ME 201/94: Solo - cimento - compressão axial de corpos de prova cilíndricos*, 1994b.
- [33] Associação Brasileira de Normas Técnicas Argamassas e concretos – *Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: NBR 7222*. Rio de Janeiro, 1993, 3p.
- [34] Powercem. *Manual for laboratory research RoadCemTM*. p. 1–39, 2015.
- [35] Balbo, J. T. *Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- [36] Departamento de Infraestrutura de Transporte. *DNIT 143/2010: Pavimentação – Base de solo-cimento - Espe-*

- cificação de Serviço, 2010.
- [37] Gaspard, K. J. In-place Cement Stabilized Base Reconstruction Techniques Interim Report: "Construction and Two Year Evaluation", 2002.
- [38] Wu, P.; Houben, L. J. M.; Egyed, C. Study of The Variables in Laboratory Testing of Cement Stabilized. International Journal of Pavements Conference, 2013.
- [39] Vorobieff, G. Performance and Design of Insitu Stabilised Local Government Roads. Technology Transfer Seminar, 1998.
- [40] Centro Nacional de Pesquisa de Solos. EMBRAPA. Manual de métodos de análise do solo. Brasília. 212p.1997.
- [41] Tobergte, D. R.; CURTIS, S. TRH13: Cementitious stabilizers in road construction. Journal of Chemical Information and Modeling, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 1986.
- [42] Scrivener, K. L. The Microstructure of Concrete. em SKALNY, J. P. Materials Science of Concrete I. Westerville: American Ceramic Society, 1989. 473p.

# Planejamento de Trajetória de Múltiplos Robôs Terrestres Autônomos em Ambientes Dinâmicos

Johnathan Fercher da Rosa\*, Paulo Fernando Ferreira Rosa

Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270,  
Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

\*johnathanfercher22@gmail.com

**RESUMO:** Este artigo demonstra uma abordagem para tratar o problema de planejamento de trajetória de múltiplos robôs em ambientes dinâmicos. Nesse trabalho, buscou-se tratar o problema de maneira a possibilitar o uso de diferentes tipos de robôs em ambientes com presença de obstáculos móveis. Devido ao dinamismo do problema, foram utilizadas técnicas de baixo custo computacional para uma execução em tempo real e navegação segura. Por último, o artigo busca resolver o problema em ambientes reais. A solução proposta encontra caminhos viáveis e guia robôs ao longo dos mesmos, boa parte das colisões são evitadas durante o percurso, porém algumas ainda ocorrem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Planejamento de Trajetória. Múltiplos Robôs. Autônomos. Tempo Real. Robôs Cooperativos.

**ABSTRACT:** This paper presents an approach to treat the problem of multiple robots path planning in dynamic environments. In this work, we deal with the problem in a way to enable the use of different robot types in environments with mobile obstacles. Due to the dynamic nature of problem, we used a low cost techniques to enable real-time execution and secure navigation. Finally, this work tries to resolve the problem in real environments. The solution proposed finds viable paths and guides robots along them, a good part of possible collisions are avoided during the course, but some collisions still happen.

**KEYWORDS:** Path Planning. Multiple Robots. Autonomous. Real-time. Cooperating Robots.

## 1. Introdução

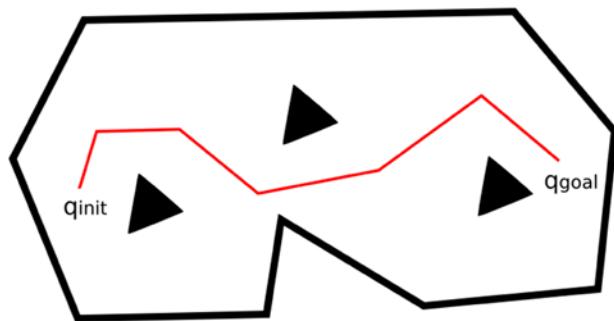
A robótica vem evoluindo muito nas últimas duas décadas. O que antes somente era utilizado em fábricas, nos dias de hoje está ganhando presença no cotidiano. Isso ocorre, pois a evolução computacional está possibilitando que tarefas antes impossíveis de serem resolvidas com computadores comuns, hoje em dia sejam passíveis de resolução. Com isso, a robótica móvel também vem se tornando cada vez mais comum, tanto em ambientes industriais quanto no dia a dia.

Esse artigo trata de um dos problemas mais primordiais que todo robô móvel deve resolver: planejamento e controle de trajetória. Para que um robô seja capaz de resolver qualquer problema de mais alto nível que requeira movimentação, é necessário que o mesmo consiga definir uma rota e percorrê-la.

O ato de planejar, segundo *LaValle* [6], pode ser definido, de maneira genérica, como encontrar uma sequência de ações que levem o robô de um estado

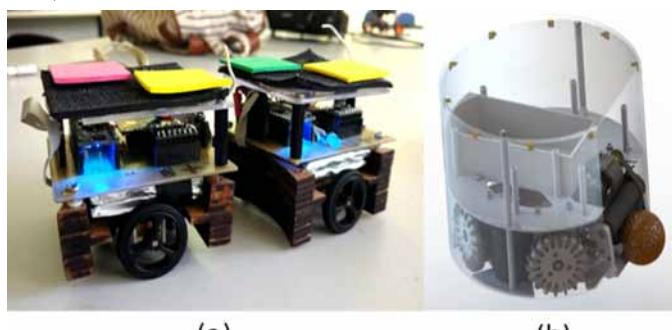
inicial a um estado final. Planejar trajetórias segue a mesma base, porém com algumas modificações que incluem definições geométricas. Como citado em [7], o problema de planejamento de trajetória pode ser definido, de maneira que, dado um espaço de trabalho limitado e que pode possuir áreas não-convexas, é necessário encontrar uma sequência de pontos que conectem duas localizações no espaço. Na figura 1, encontra-se uma representação do problema, as localizações que devem ser conectadas estão representadas pelos pontos  $q_{init}$  e  $q_{goal}$  e o caminho encontrado é representado por uma sequência de pontos, conectados por segmentos de retas. Note que, o caminho evita contato com obstáculos no ambiente, representados por áreas pretas dentro do espaço.

O objeto de estudo desse trabalho busca resolver uma especialização do problema básico de planejamento de trajetória. Foram levadas em consideração a utilização de múltiplos robôs em ambientes com presença de obstáculos móveis, e a possibilidade de execução no mundo real.



**Fig. 1** – Espaço de trabalho limitado com obstáculos fixos. O caminho encontrado é representado por uma sequência de pontos conectados por segmentos de retas.

Foram adicionadas essas premissas devido à abrangência de aplicações que poderiam usufruir dessa solução. A solução descrita aqui também possibilita a utilização de diferentes tipos de robôs, como robôs diferenciais e omnidirecionais. Na **figura 2**, encontra-se dois exemplos de plataformas que foram utilizadas: (a) dois robôs diferenciais da equipe de futebol de robôs (Liga VSS), e (b) um robô omnidirecional da equipe de futebol de robôs (Liga SSL).



**Fig. 2** – Plataformas utilizadas: (a) Liga VSS e (b) Liga SSL.

É necessário atenção em detalhes de cinemática quando se busca utilizar robôs no mundo real. Muitas soluções de planejamento de trajetória buscam encontrar caminhos para um determinado tipo de robô, o que torna a solução muito específica, visto que, diferentes tipos de estruturas de movimentação possuem diferentes restrições e benefícios. Por exemplo, como pode ser visto em [2], robôs omnidirecionais possuem vantagens de manobrabilidade, pois conseguem movimentar-se

em qualquer direção, a qualquer momento. Robôs diferenciais possuem menor manobrabilidade, porém, conseguem conservar melhor a energia. Para que uma solução possa ser utilizada por diferentes tipos de robôs, é necessário que sejam levadas em consideração tais características.

## 1.1 Motivação

Qualquer aplicação que funcione a céu aberto em ambientes reais deve considerar que o ambiente possui incertezas, como obstáculos móveis com movimentações nem sempre previsíveis. Um exemplo de aplicação que está começando a ser utilizada em ambientes como esse, são os carros autônomos. Rodovias são ambientes que possuem muitos obstáculos fixos e móveis, como: sinais, pedestres e carros no ambiente. Um acontecimento que retrata bem a importância de se preocupar com tais incertezas ocorreu recentemente. Em 2018, um carro autônomo se envolveu em um acidente com um pedestre que tentava atravessar fora da faixa [15]. Esse ocorrido representa bem a necessidade de soluções que considerem a existência de variáveis incontroláveis no ambiente.

Outra questão tratada por esse trabalho, é a utilização de múltiplos robôs, que trazem benefícios, como a divisão de trabalho e a possibilidade de resolução de problemas que não são passíveis de serem resolvidos por um único robô. Um exemplo onde múltiplos robôs apresentam um melhor desempenho, que somente um único robô, é a organização dos armazéns de uma empresa de varejo [1]. A empresa vem investindo em robôs para automatizar o processo de localização, busca e embalagem de produtos, o que possibilita que sejam enviados de forma mais eficiente um grande número de produtos. Já em problemas onde existe a necessidade de cooperação, como as categorias de futebol de robôs, a utilização de múltiplos robôs é necessária.

## 1.2 Organização do trabalho

Esse trabalho está organizado em mais 5 seções. Na seção 2 são apresentados os trabalhos relacionados ao

objeto de estudo desse artigo. Na seção 3 é apresentada a formulação do problema. Na seção 4 é apresentada a metodologia empregada para resolução. Na seção 5 são apresentados os experimentos e os resultados obtidos. Por último, na seção 6 são apresentados a conclusão e trabalhos futuros.

## 2. Revisão de Literatura

Existem muitos artigos que buscam resolver problemas parecidos com o objeto de estudo desse trabalho. Porém, nesse artigo é buscada a solução para um problema mais complexo, onde os requisitos de utilização de múltiplos robôs em ambientes reais com presença de obstáculos móveis faz com que não seja possível, simplesmente, utilizar os trabalhos relacionados sem adaptação.

### 2.1 Planejamento de trajetória de múltiplos robôs aplicados a liga SSL

Em [3], é abordada a construção de um time de futebol de robôs para a categoria de futebol de robôs *Small Size League* (SSL). Nessa categoria, dois times de seis robôs omnidirecionais se enfrentam. Os robôs possuem capacidade de dominar a bola, tocar, realizar chute baixo e chute alto. Tal problema é conhecido por prover um ambiente de alta complexidade, pois trata de cooperação de múltiplos robôs, execução em tempo real, no ambiente com obstáculos dinâmicos. Nesse trabalho é utilizada uma adaptação do algoritmo de planejamento de trajetória *RRT* (*Rapidly-Exploring Random Trees*) [8]. O algoritmo denominado *BK-BGT* (*Behavioral Kinodynamic Balanced Growth Trees*) une a funcionalidade do *RRT* de encontrar caminhos, decisões de comportamento de estratégias de jogo, e limitações cinemáticas e dinâmicas das plataformas utilizadas.

Diferente do apresentado em [3], nesse trabalho não existe preocupação com estratégias de futebol e existe a necessidade de trabalhar com diferentes tipos de robôs. Devido à utilização de decisões de jogo e restrições da plataforma utilizada serem levadas em conta no planejamento, a solução apresentada nesse trabalho relacionado não é passível de utilização sem adaptação.

### 2.2 Campos potenciais aplicados à condução de robôs em ambientes dinâmicos

Em [4], é abordado o problema de planejamento de trajetória de um único robô em ambientes altamente dinâmicos. Neste trabalho, existe preocupação em levar um robô de uma localização inicial para uma localização final, evitando colisões.

O ambiente tratado é simulado e possui obstáculos fixos e móveis, com cerca de 300 obstáculos móveis que executam movimentos circulares e lineares. A abordagem do autor busca separar o problema em etapas; inicialmente, é encontrado um caminho que desvie de obstáculos fixos e posteriormente o robô é guiado ao longo do caminho utilizando a técnica de *APF* (Campos Potenciais Artificiais) [9]. O autor não fornece definição clara de qual algoritmo de planejamento de trajetória utiliza e cita os algoritmos *PRM* (*Probabilistic Roadmap*), *EST* (*Expansive-Spaces Trees*) e *RRT* como possibilidades para resolução da primeira etapa.

Apesar de resolver o problema proposto em [4], a mesma abordagem não seria aplicável no objeto de estudo desse artigo, pois o mesmo, não leva em consideração as restrições cinemáticas e dinâmicas dos robôs, além da movimentação dos obstáculos ser previsível.

### 2.3 Planejamento de trajetória para múltiplos robôs: uma abordagem dupla

Em [5] é abordado o problema de planejamento de trajetória de múltiplos robôs em ambiente simulado, onde existem obstáculos fixos e móveis. A abordagem utilizada define o problema como uma questão de otimização, onde é definido que os caminhos encontrados devem ser suavizados e devem evitar colisões.

A otimização definida, busca calcular todos os caminhos dos robôs durante toda a execução, isto é, são levados em consideração a movimentação de todos os objetos durante todos os passos de simulação. Para que isso seja possível, o trabalho [5] parte da premissa que todos os obstáculos possuem movimentações conhecidas; assim, resolve-se todo o problema em

uma única etapa *offline*.

A premissa de considerar que é possível saber a localização de todos os obstáculos no ambiente durante todo momento, faz com que a solução proposta seja limitada e não atenda aos requisitos propostos neste trabalho.

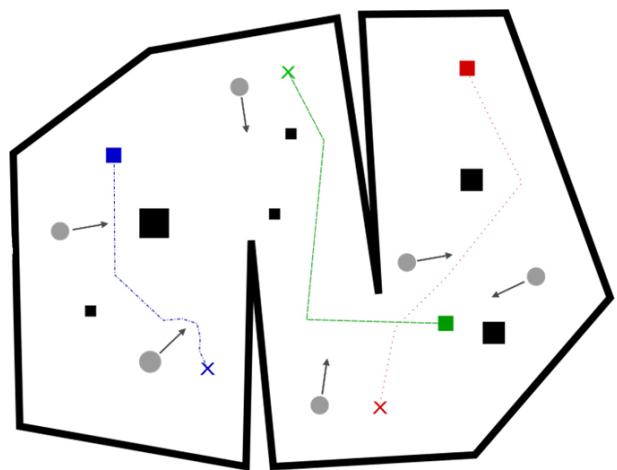
### 3. Formulação do problema

Seja um espaço euclidiano  $W$ , denominado espaço de trabalho e representado por  $\mathbb{R}^2$ , que pode possuir qualquer configuração espacial, podendo conter não-convexidades. Seja a pose que um robô pode ocupar em  $W$  representada por  $p = [xy\theta]$ . Seja uma trajetória contínua que ligue uma pose inicial  $p_i$  e uma pose final  $p_f$  representada por uma sequência de poses  $P = \{p_p p_2 \dots p_n\}$ . Seja um robô representado por  $u = [p\ r]^T$  onde  $r$  é o raio do círculo que circunscreve o robô no espaço, um obstáculo representado por  $o = [xy\ r]^T$  e um estado do espaço de trabalho representado por  $E = \{R, O\}$ , onde  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  é um conjunto de robôs controláveis e  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$  é um conjunto de obstáculos. Assumindo que a forma de  $U$  e  $O$  são conhecidas e que  $O$  possui obstáculos fixos e móveis. O problema pode ser definido como:

Para cada  $u_n \in U$ , encontrar uma trajetória  $P_n$ , que ligue à pose atual  $P_n$  a pose final  $p_f$ , de maneira a evitar contato com  $O$  e com os demais robôs em  $U$ .

Na **figura 3**, encontra-se um exemplo do ambiente onde o problema é tratado. Na imagem: (i) os limites do espaço de trabalho são representados pelos segmentos de reta aos extremos, (ii) obstáculos fixos são representados por quadrados pretos, (iii) obstáculos dinâmicos são representados por círculos em cinza e (iv) os robôs são representados pelos quadrados nas cores vermelho, verde e azul (com suas respectivas áreas de objetivo e caminhos da mesma cor).

A existência de obstáculos com movimentação imprevisível acrescenta dificuldade à resolução do problema, além de impossibilitar o uso de algoritmos que resolvam o problema de forma totalmente *offline*, isto é, calculem todos os passos de solução antes de iniciar a resolução.



**Fig. 3** – Exemplo de ambiente onde o problema é tratado. A área de atuação é limitada e existem obstáculos fixos e móveis.

Também existe o problema do crescimento computacional. Por exemplo, o algoritmo clássico de planejamento de trajetória *RRT* tem sua complexidade aumentada, o que originalmente possuiria complexidade da ordem de  $O(K^2 + KD)$ , onde  $K$  é o número máximo de interações para resolver o problema e  $D$  é a complexidade do algoritmo de detecção de colisões. Lidando com múltiplos robôs, a complexidade cresce para  $O(R(K^2 + KD))$  e lidando com a existência de obstáculos móveis, a complexidade de  $D$  também cresce. O que limita mais rapidamente a quantidade de robôs que podem ser utilizados, pois é mais fácil extrapolar a quantidade de computação que um computador pode realizar. No caso das Ligas *VSS* e *SSL*, a quantidade de robôs de um time é limitada a 3 e 6 respectivamente, assim o custo computacional para encontrar caminhos nessas categorias é menor.

### 4. Metodologia

A abordagem utilizada nesse trabalho busca dividir a resolução em duas etapas: uma de processamento *offline* e outra de processamento *online*. Na etapa de processamento *offline* é realizado o planejamento de trajetória dos robôs e na etapa de processamento *online* é realizado o controle de trajetória dos robôs ao longo dos trajetos.

## 4.1 Etapa de processamento offline

A tarefa a ser realizada nessa etapa pode ser definida como: para cada  $u_n \in U$ , encontrar uma trajetória  $P_n$  que ligue a pose atual do robô  $p_a$  e a pose final  $p_f$ , de maneira a evitar contato com os obstáculos fixos de  $O$ . O algoritmo utilizado foi o *RRT*, pois o mesmo é conhecido por encontrar caminhos nos mais diversos ambientes. Para a implementação foi utilizado a biblioteca de planejamento de trajetória *OMPL (Open Motion Planning Library)* [14]. As trajetórias calculadas nessa etapa não buscam evitar colisões com obstáculos móveis e nem entre robôs. A motivação desta decisão é evitar o aumento da complexidade e a presença de obstáculos móveis.

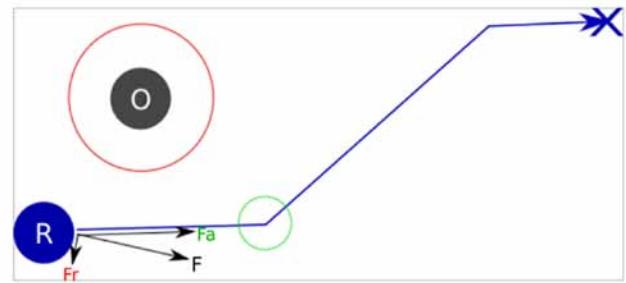
## 4.2 Etapa de processamento online

Essa etapa é iniciada após todos os robôs em  $U$  possuírem caminhos definidos a serem percorridos. O processamento nessa etapa é realizado de forma retroativa, ou seja, durante toda a tarefa de percorrer os caminhos. Para que os robôs consigam seguir as trajetórias, é utilizada a técnica *APF*, como apresentada em [9]. A técnica se baseia nos campos potenciais, onde na presença de objetos com cargas elétricas positivas e negativas, é criado um campo de força, onde os objetos de cargas opostas se atraem e objetos de mesma carga se afastam.

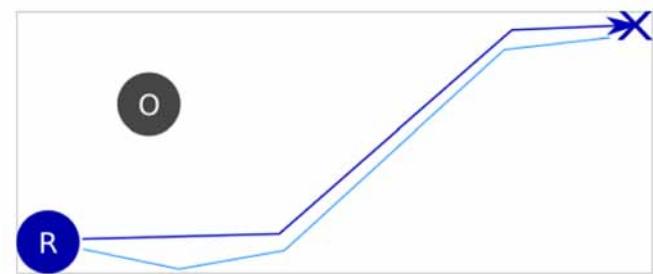
Na técnica é definido que robôs e obstáculos possuem a mesma carga e poses objetivo possuem carga inversa. Dessa forma, os robôs evitam contato entre si e com obstáculos, ao mesmo tempo que se direcionam para as poses objetivo. Na **figura 4**, encontra-se um exemplo de funcionamento da técnica. Um robô é representado por um círculo azul, um obstáculo é representado por um círculo cinza e o caminho calculado na etapa *offline* é representando por retas azuis conectadas, que partem do robô para a pose final representada por um **X**. A força de repulsão gerada pela proximidade do obstáculo é representada por um círculo vermelho e a força atrativa de uma pose é representada por um círculo verde. Na **figura 4**, a força resultante  $\vec{F}$  que representa a tendência de movimento é gerada pela

soma das forças repulsivas  $\vec{F}_r$  e força atrativa  $\vec{F}_a$ . Note que, quanto mais próximo de um obstáculo mais forte é a força repulsiva, e quanto mais próximo a uma pose objetivo menor é a força de atração; dessa forma os robôs tendem a evitar se aproximar de obstáculos e se aproximar de forma segura de poses objetivo.

Como cada robô do conjunto  $U$  possui uma trajetória  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  que parte de sua pose inicial  $p_1$  para sua pose final  $p_n$ , foi criado um algoritmo que altera as poses objetivo de forma a guiar os robôs pelo caminho. Como os robôs possuem poses iniciais  $p_1$ ; inicialmente suas poses objetivos são  $p_2$ , dessa forma, todo cálculo é feito de modo a levar os robôs de suas poses iniciais para seus respectivos  $p_2$ . Após se aproximarem de  $p_2$ , a pose objetivo é incrementada para  $p_3$ . O algoritmo segue dessa forma até que o robô alcance  $p_n$ . Na **figura 5**,



**Fig. 4** – Exemplo de funcionamento da técnica APF. Na imagem, o vetor  $F_r$  representa a força repulsiva gerada por um obstáculo,  $F_a$  representa a força atrativa para uma pose e  $F$  representa a força resultante, que dirige o movimento.



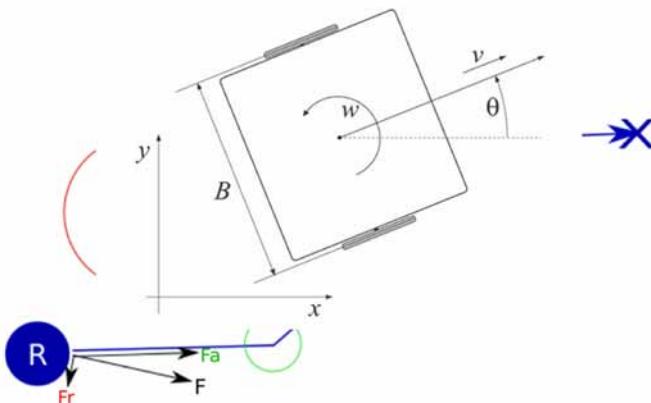
**Fig. 5** – Exemplo de trajetória ao seguir um caminho utilizando a técnica APF.

A técnica *APF* nesse caso é completamente geométrica; ou seja, não é levada em consideração a maneira como os robôs vão seguir a força resultante. Para isso é utilizado um modelo cinemático dos robôs.

## 4.3 Controle de velocidades

Essa etapa ocorre concomitante ao processamento *online*. A cada iteração após possuir a força/torque resultante de cada robô, é necessário converter essa informação para velocidade das rodas. Para isso, é utilizado um modelo cinemático de movimentação daquele tipo de robô. Cada plataforma possui modelos diferentes, os robôs da Liga *VSS* são diferenciais e os robôs da Liga *SSL* são omnidirecionais. Para alternar entre diferentes tipos de robôs, basta utilizar diferentes modelos.

Para o controle de robôs diferenciais, foi utilizado o modelo apresentado em [11]. Na **figura 6**, encontra-se a vista superior de uma plataforma diferencial, onde  $w$  representa uma velocidade angular,  $v$  uma velocidade linear,  $B$  é o comprimento do eixo do robô e  $\theta$  é a orientação do robô.



**Fig. 6** – Vista superior de um robô diferencial com parâmetros utilizados pelo modelo cinemático.

Para controlar um robô com essa configuração, existe a necessidade de encontrar  $v$  e  $w$ , que façam com que o robô se direcione como a força resultante  $\vec{F}$  indica. Com esse propósito é utilizada a **equação 1**, onde  $\dot{p}$  está relacionado com  $\vec{F}$ .

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (1)$$

Os valores de  $v$  e  $w$  são utilizados nas **equações 2 e 3** para obter as velocidades das rodas direita  $v_R$  e

esquerda  $v_L$ .

$$v_R = v + \frac{w_B}{2} \quad (2)$$

$$v_L = v - \frac{w_B}{2} \quad (3)$$

O modelo cinemático é uma aproximação do modelo físico; com isso, os valores obtidos estão sujeitos a erros e variações. Para corrigir esse problema é utilizada a técnica de controle *PID* (*Proportional, Integral and Derivative*) [10], que foi calibrado a partir de experimentações.

## 5. Experimentos

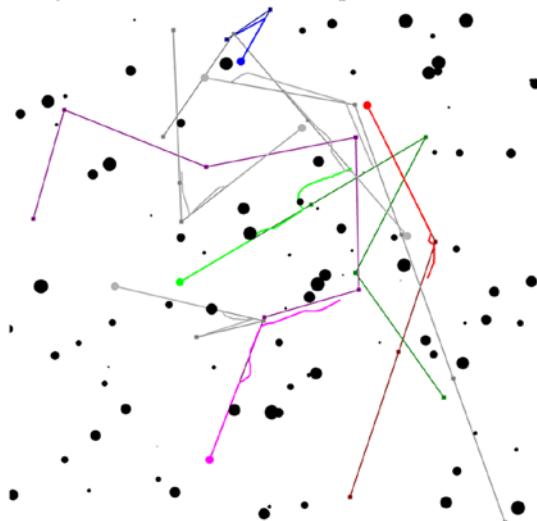
Foram realizados experimentos em três plataformas simuladas e em uma plataforma em ambiente real. Inicialmente foram feitas simulações em uma plataforma criada, a fim de validar a viabilidade computacional do algoritmo. Em um segundo momento, a solução foi adaptada para se comunicar com o simulador *grSim* [12] e foram realizadas simulações em um ambiente que considerava as restrições cinemáticas de robôs omnidirecionais. Por fim, foram realizados experimentos no simulador da plataforma *VSS-SDK* [13] e em ambientes reais, ambos com robôs diferenciais.

### 5.1 Simulações sem restrições cinemáticas

Na primeira fase da pesquisa, foi criado um simulador de planejamento de controle de trajetórias 2D. As simulações no simulador não consideravam nenhum tipo de restrições cinemáticas. O principal intuito era validar o crescimento computacional e as chances de resolução de caminhos. Para possibilitar a utilização de múltiplos robôs, a solução deveria ser leve. Na **figura 7**, encontra-se um exemplo do ambiente de testes criado.

Na **figura 7** são representados os obstáculos móveis como círculos pretos, os caminhos calculados como sequências de pontos ligados por segmentos de retas,

e a trajetória dos robôs ao seguir esses caminhos são desenhados por cima com cores mais vivas. Note que a trajetória representada pela cor vermelha tem o desenho de outra trajetória vermelha mais clara por cima.



**Fig. 7** – Ambiente de testes inicial. Obstáculos móveis representados por círculos pretos e caminhos representados por sequência de pontos ligados por retas.

A primeira representa o caminho criado na etapa *offline* e a segunda representa a trajetória de um robô sendo controlado ao longo do caminho na etapa *online*.

Foram realizados 5000 experimentos com esse simulador. As simulações foram separadas em 5 casos de acordo com a quantidade de robôs, que variavam de 5 a 10. Para cada caso foram criadas 1000 situações, variando as posições iniciais e finais dos robôs, a quantidade de obstáculos, de 1 a 99 por simulação, e o diâmetro desses obstáculos. O espaço de trabalho possuía 1000x1000pixels e os obstáculos possuem movimentação aleatória.

A solução utilizando o algoritmo *RRT* para processamento *offline* e *APF* para controle de trajetória obteve os resultados presentes na **tabela 1**. Na tabela, os casos foram separados de acordo com o número de robôs. Os dados computados levam em consideração todos os estados das simulações, desde o início do planejamento *offline* de todos os robôs até o tempo em que o último robô leva para chegar a seu ponto objetivo final. São comparadas também a taxa

média de sucesso de resolução de caminhos e a taxa de colisões.

**Tab. 1**– Resultados obtidos no ambiente de simulação sem restrições cinemáticas.

Quantidade de Robôs	Tempo de Execução	Porcentagem de Sucesso	Taxa de Colisões
5	0.096s	96.4%	0.30
6	0.121s	97.6%	0.46
7	0.165s	97.6%	0.62
8	0.188s	95.6%	0.76
9	0.221s	97.2%	0.87
10	0.265s	94.1%	1.00

A abordagem não reduz totalmente o número de colisões; porém, essas colisões ocorrem de forma esporádica. Analisando a **tabela 1**, no caso de controle de 10 robôs, ocorreu em média 1 colisão no controle de todos os robôs ao percorrerem os caminhos. Por fim, a solução utilizada em média conseguiu resolver 96.88% dos experimentos realizados, tendo sido executada de forma rápida.

## 5.2 Simulações no grSim

Para validar o funcionamento da resolução com robôs que possuem limitações quanto à movimentação, foi utilizado o simulador de futebol de robôs da categoria *Small Size League* (*SSL*), o *grSim* [12]. Na **figura 8**, encontra-se o simulador.



**Fig. 8** – Simulador *grSim*. No simulador, existem dois times de seis robôs com cores principais azul e amarelo.

Foram realizadas 100 simulações utilizando o *grSim*. Em cada experimento, os obstáculos se moviam de

forma aleatória e os robôs possuíam poses iniciais e poses finais diferentes. Devido a limitações do ambiente, os experimentos somente possuíam 6 robôs e 6 obstáculos móveis. Na **tabela 2**, encontram-se os resultados obtidos. Em 98% dos casos, todos os caminhos foram resolvidos e, em média, ocorriam 0.52 colisão na resolução dos 6 caminhos.

**Tab. 2 – Resultados obtidos nas simulações no grSim.**

Quantidade de Robôs	Porcentagem de Sucesso	Taxa de Colisões
6	98.0%	0.52

Comparando a porcentagem de caminhos resolvidos nos experimentos no grSim com 6 robôs (98%) e a porcentagem obtida nas simulações, também com 6 robôs, na plataforma onde os robôs não possuíam restrições de cinemática (97.6%), fica claro que o algoritmo *RRT* mantém uma boa taxa de resolução de caminhos. A taxa de colisões ocorridas levemente maior no grSim (0.52) em comparação à plataforma simplificada (0.46), demonstra um comportamento razoável, visto que os robôs no grSim são modelados de forma a simular restrições dinâmicas de plataformas reais; isto é: os robôs possuem velocidade e aceleração máximas bem definidas, e frenagem e capacidade de curva em altas velocidades limitadas.

### 5.3 Simulações no VSS-Simulator

Após a validação utilizando robôs omnidirecionais, buscou-se validar com robôs com movimentações diferentes e com mais limitações de movimento. Foi utilizada a plataforma *VSS-Simulator* [13] da categoria de futebol de robôs *VSS*, para trabalhar com robôs diferenciais. Na **figura 9** encontra-se o simulador, o mesmo possui um ambiente não-convexo e limitado com 2 times de 3 robôs diferenciais cada. Foi realizada uma adaptação no mesmo para possibilitar o desenho de caminhos. Na imagem, os caminhos possuem a mesma cor das cores secundárias de cada robô, por exemplo, o robô verde possui o caminho marcado com a cor verde.



**Fig. 9 – Plataforma VSS-Simulator.** Existem 2 times de robôs diferenciais, para cada robô controlado são desenhados caminhos.

Foram realizados 40 experimentos utilizando o *VSS-Simulator*. Os experimentos foram divididos em duas situações: na primeira os robôs adversários não se moviam e na segunda os robôs se moviam de forma aleatória. Cada experimento tinha duração de 1 minuto de execução. Inicialmente foram geradas poses finais aleatórias para que os robôs seguissem; após isso, eram calculados os caminhos utilizando *RRT* e os robôs começavam a percorrer os caminhos utilizando *APF*. Após um robô chegar a sua pose final, era calculado uma nova pose para o mesmo.

Com a finalidade de validação da diminuição de colisões, foi criado uma simplificação da abordagem que utiliza somente o campo atrativo. Na **tabela 3**, encontram-se os resultados obtidos nas simulações em ambientes estáticos.

**Tab. 3 – Resultados em ambientes estáticos simulados.**

	Resol.	C. Robôs	C. Obstácl.
RRT com APF	56.2	1.7	0.6
Somente Campo Atrativo	50.2	27.7	23.8

Comparando os resultados da abordagem do *RRT* com *APF* em relação à solução somente com campo atrativo, fica claro que existe benefício em calcular caminhos defensivos e segui-los de forma defensiva. Além de reduzir em 93.8% o número de colisões entre robôs e em 97.4% o número de colisões com obstáculos, também existem ganhos de 11.9% de caminhos resolvidos.

Os ganhos ficam cada vez mais evidentes quando se busca trabalhar em ambientes dinâmicos. Na **tabela 4** encontram-se os resultados obtidos em ambientes dinâmicos.

**Tab. 4** – Resultados em ambientes dinâmicos simulados.

	Resol.	C. Robôs	C. Obstácl.
RRT com APF	57.3	2.8	4.9
Somente Campo Atrativo	30	39.6	44.6

Enquanto a resolução de caminhos de nossa abordagem aumenta em média 1.9% em ambientes dinâmicos, a resolução sem foco em segurança cai em média 40.2%. Em relação à quantidade de colisões, a solução sem foco em segurança sofre em média 1.414% mais colisões entre robôs e 910.2% mais colisões com obstáculos no ambiente.

#### 5.4 Experimentos em ambiente real

Os últimos experimentos foram realizados em ambiente real e serviam para validação em plataformas robóticas reais. Para reduzir a complexidade desse tipo de experimento, foi utilizada a plataforma de futebol de robôs *IEEE Very Small Size (VSS)* do Laboratório de Sistemas Inteligentes e Robótica (SIRLab) da Faculdade de Educação Tecnológica do Estado do Rio de Janeiro (FAETERJ), campus Petrópolis.

Foi utilizada a plataforma *opensource VSS-SDK* para realizar os experimentos em ambiente real; pois além de estar integrado com o *VSS-Simulator*, o mesmo provê um sistema de visão computacional, que foi utilizado para obter a localização dos robôs e obstáculos no campo. Na **figura 10**, encontra-se o ambiente de experimento. O campo possui 130x150cm, os gols possuem 10 cm de profundidade, os robôs possuem raio máximo de 8 cm e os obstáculos são representados por padrões de cores azuis na base do campo.



**Fig. 10** – Campo da categoria de futebol de robôs VSS, com robôs e obstáculos.

Foram realizados 10 experimentos de 1 minuto cada, seguindo os padrões dos experimentos em ambiente simulado. Na **tabela 5** encontram-se os resultados obtidos.

Devido ao limite de apenas 3 robôs da plataforma *VSS*, foram realizados experimentos somente com obstáculos estáticos. Os resultados obtidos foram semelhantes aos

**Tab. 5** – Resultados em ambientes estáticos reais.

	Resol.	C. Robôs	C. Obstácl.
RRT com APF	55.5	3.5	2.7

resultados em ambiente simulado. Houve uma queda de resolução de apenas 1.2% em média, e ocorrem em média uma colisão entre robôs a cada 15.8 caminhos resolvidos e uma colisão com obstáculos a cada 20.5 caminhos resolvidos.

### 6. Conclusões e trabalhos futuros

A abordagem utilizada para resolução do problema de planejamento e controle de trajetória de múltiplos robôs em ambientes dinâmicos, demonstrou-se funcional e possibilitou a utilização de diferentes tipos de robôs. A adaptação da abordagem para tratar de robôs omnidirecionais e diferenciais, demonstrou-se simples, bastando a troca do modelo cinemático dos mesmos.

Além de tornar o trajeto dos robôs mais seguro, a abordagem provê um pequeno ganho na resolução do problema, resolvendo caminhos de forma mais rápida. A separação do problema em uma etapa *offline* e uma etapa *online* possibilita que caminhos sejam traçados de forma segura em relação a obstáculos fixos e que o custo computacional seja baixo, possibilitando que computadores comuns consigam controlar um conjunto de robôs.

Contudo, a abordagem pode ser melhorada. Mesmo com todas as medidas para evitar colisões elas ainda ocorrem, pois os obstáculos dinâmicos com movimentação aleatória às vezes forçam a ocorrência de colisões. Para projetos futuros, o refinamento do modelo cinemático deve ser

realizado, extendendo-o para considerar as limitações dinâmicas das plataformas. Também pode ser considerada a utilização de modelos para prever a movimentação dos obstáculos.

## Agradecimentos

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

## Referências Bibliográficas

- [1] As Amazon Pushes Forward With Robots, Workers Find New Roles. <https://www.nytimes.com/2017/09/10/technology/amazon-robots-workers.html>
- [2] Nourbakhsh, I. and Siegwart, R. (2004). Introduction to autonomous mobile robots, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, England.
- [3] Rodrigues, S. H. (2013). Sistemas Autônomos e Inteligentes para Robôs Cooperativos no Ambiente Small Size League. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- [4] Chiang, H.-T., Malone, N., Lesser, K., Oishi, M, and Tapia, L. (2015). Path-guided artificial potential fields with stochastic reachable sets for motion planning in highly dynamic environments, Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on, IEEE, pp. 2347-2354.
- [5] Motee, N., Jadbabaie, A. and Pappas, C. (2010). Path planning for multiple robots: An alternative duality approach, American Control Conference (ACC), 2010, IEEE, pp. 1611-1616.
- [6] LaValle, S. M. (2006). Path Planning Algorithms. Cambridge University press, 2006.
- [7] Latombe, J. -C. (2012). Robot motion planning, Vol.124, Springer Science & Business Media.
- [8] LaValle, S. M. (1998). Citeseer. Rapidly-exploring random trees a new tool for path planning.
- [9] Goodrich, M. A. (2002). Citeseer . Potential fields tutorial.
- [10] Ogata, K. (2003). Modern control engineering, Prentice Hall PRT.
- [11] Blazic, S. (2014). On periodic control laws for mobile robots. IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- [12] Monajjemi, V. Koochakzadeh, A. Ghidary, S. S. (2011) SpringerLink. grSim – RoboCup Smal Size Robot Soccer Simulator.
- [13] VSS-SDK (2016). Um projeto opensource que auxilia novas equipes a ingressarem na competição de futebol de robôs IEEE Very Small Size [Soccer]. 05 out. de 2016. <https://github.com/SIRLab/VSS-SDK>
- [14] Sucan, I. A, Moll, M. Kavraki, L. E. (2012). The Open Motion Planning Library. IEEE Robotics & Automation Magazine.
- [15] Self-driving Uber kills Arizona woman in first falta crash involving pedestrian. <https://www.theguardian.com/technology/2018/mar/19/uber-self-driving-car-kills-woman-arizona-tempe>.

# Dinâmica da digitação aplicada à autenticação periódica de usuários em ambientes virtuais de aprendizagem: um estudo de caso com o Moodle

Marco A S Cruz\*, Otavio A M Camargo, Julio Cesar Duarte, Ronaldo Goldschmidt

Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270  
Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

\*marco.aurelio.s.cruz@gmail.com

**RESUMO:** A autenticação de usuários em Ambientes Virtuais de Aprendizagem (AVAs) geralmente exige uma senha para conexão. Tal método é incapaz de garantir a autenticidade de cada atividade do usuário após a autenticação. Para mitigar esse problema, Cruz et al. propôs um mecanismo de autenticação periódica de usuários em AVAs [1]. Foram aplicadas técnicas de aprendizado de máquina para construir modelos de reconhecimento baseados na dinâmica da digitação dos usuários. Para demonstrar sua viabilidade em um cenário real, com um grande número de usuários, este trabalho conduziu um estudo de caso aplicado, usando o Moodle, a um grupo de 307 usuários, produzindo um total de 4.829 palavras avaliadas. Cerca de 89% dos modelos de reconhecimento atingiram pelo menos 80% de acurácia, indicando a eficácia do mecanismo na identificação de autorias suspeitas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aprendizado de Máquina. Reconhecimento de Usuários. Dinâmica da Digitação. Ambiente Virtual de Aprendizagem. Moodle.

**ABSTRACT:** The authentication of users in Virtual Learning Environments (AVAs) usually requires a password to connect to the environment. Such method is unable to ensure the authenticity of every user activity. In order to mitigate this problem, Cruz et al. proposed an engine to execute periodic and non-intrusive authentication of users in VLE [1]. Machine learning techniques were applied to build recognition models based on the keystroke dynamics of users and it is VLE independent. In order to demonstrate its practical feasibility in a real scenario with a large number of users, this paper conducted an applied case study, using Moodle, to a group of 307 users, producing a total of 4,829 evaluated strings. About 89% of the recognition models achieved at least 80% of accuracy, indicating the effectiveness of the engine at identifying suspicious authorships.

**KEYWORDS:** Machine Learning. User Recognition. Keystroke Dynamics. Virtual Learning Environments. Moodle.

## 1. Introdução

**A** Educação a Distância (EaD) é uma modalidade de ensino que vem crescendo significativamente nos últimos anos em todo o mundo [2]. O censo sobre a Educação superior brasileira, realizado em 2015 pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP), revela que o número de matrículas em cursos de graduação à distância de instituições públicas e privadas cresceu, respectivamente, 16,3% e 41,2%, entre 2013 e 2014 [3].

A evolução das tecnologias da informação e comunicação (TIC) em muito tem contribuído para apoiar o amadurecimento da EaD [4]. Entre tais TICs, estão os chamados Ambientes Virtuais

de Aprendizagem (AVAs). Segundo [5], AVAs são “tecnologias integradoras e abrangentes capazes de organizar e definir um ponto focal para os processos educacionais mediados por computador, apoiar os professores e promover o engajamento dos alunos”. Em geral, os AVAs oferecem recursos síncronos e assíncronos para que estudantes e tutores possam interagir, independentemente da disponibilidade de tempo e da localização física de cada um.

Atualmente, existem diversos AVAs que podem ser adotados sem custo pelas instituições de ensino [6]”me ndeley”: {“formattedCitation”: “[6]”, “plainTextForma ttedCitation”: “[6]”, “previouslyFormattedCitation”: “[ 6]”}, “properties”: {“noteIndex”: 0}, “schema”: “https://github.com/citation-style-language/schema/raw/

master/csl-citation.json”}. Entre os mais conhecidos no Brasil estão o *Moodle*, o *Teleduc* e o *AulaNet* [5]. Parte deles se mantém em constante atualização, procurando suprir demandas de seus usuários nos mais variados aspectos tais como portabilidade, usabilidade, segurança, dentre outros [7].

Apesar de todos os avanços proporcionados pelos AVAs na EaD, uma das principais questões acerca desta modalidade de ensino é quanto à autenticidade dos usuários dessas plataformas [8]–[10]. Em geral, a autenticação de um usuário junto a um AVA é intrusiva e pontual, ocorrendo no momento em que o usuário se conecta ao ambiente, mediante a digitação de uma senha [10]–[12]. No entanto, essa abordagem permite que usuários não credenciados, após a autenticação inicial, assumam o papel de usuários credenciados, o que pode ocasionar diversos problemas, como, por exemplo: falhas de segurança (por meio de acesso não autorizado a determinados conjuntos de informações e de usuários) ou distorções sobre a percepção do desempenho acadêmico dos estudantes (ao permitir que tarefas e atividades propostas no ambiente sejam desenvolvidas por usuários diferentes daqueles que, de fato, deveriam desenvolvê-las) [8], [9], [12], [13].

Com o objetivo de aumentar a segurança e mitigar os problemas mencionados nos AVAs, Cruz *et al.* [1] propôs um mecanismo que permite verificações de autoria periódicas e não intrusivas em AVAs.

O mecanismo citado usa técnicas de aprendizado de máquina para construir modelos de reconhecimento baseados na dinâmica de pressionamento de tecla dos usuários e é independente do AVA. Embora este tenha apresentado resultados preliminares promissores foi avaliado em um contexto restrito a 17 usuários.

Portanto, a fim de demonstrar sua viabilidade prática em um cenário real com mais usuários e dados, este artigo relata um estudo de caso no qual o mecanismo foi integrado ao Moodle e aplicado a um grupo de 307 usuários. Mais de 1,6 milhão de toques foram coletados.

O artigo apresenta mais seis seções. A seção 2 apresenta os conceitos básicos sobre dinâmica de teclas e aprendizado de máquina, necessários para

entender o mecanismo de autenticação periódica do usuário usado em nosso estudo de caso. A seção 3 discute trabalhos relacionados, comparando-os com o motor proposto por [1] e com o estudo de caso relatado no presente trabalho. As principais características desse mecanismo estão resumidas na seção 4. A seção 5 contém os detalhes do protótipo implementado. Detalhes sobre o estudo de caso e seus resultados são apresentados na seção 6. A seção 7 conclui o trabalho, resumindo as principais conclusões e sugerindo possibilidades para trabalhos futuros.

## 2 Fundamentos

### 2.1 Reconhecimento de usuários baseado na dinâmica da digitação

Existem basicamente três formas de se autenticar usuários em sistemas de informação [14]:

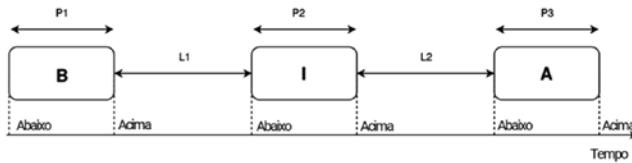
- a partir de recursos de que o usuário disponha (e.g. a utilização de *tokens*);
- a partir de informações conhecidas pelo usuário, como, por exemplo, o uso de senha (uma sequência de caracteres previamente memorizada), sendo esta a forma de autenticação mais comumente utilizada;
- a partir dos atributos físicos ou das características biométricas do usuário.

Existem diversas técnicas biométricas que exploram diferentes partes e características físicas do corpo, como, por exemplo, a análise da face, da íris dos olhos, da digital dos dedos, dentre outras [15].

A dinâmica da digitação é uma técnica biométrica que busca identificar pessoas por meio do seu padrão de digitação [16]. Segundo essa técnica, na medida em que o usuário digita informações no teclado, são coletados dados em sua forma bruta (denominação adotada neste artigo para indicar dados que não tenham recebido nenhum tratamento especial). Tais dados são armazenados em uma estrutura simples, tal como a indicada na **tabela 1** e compreendem o código da tecla pressionada, o tempo (escrito como uma sequência de números que representa a quantidade de milissegundos desde primeiro de janeiro de 1970 [17] até o momento da ação), e a ação, que é o tipo de evento ocorrido.

**Tab. 1** – Estrutura dos Dados Brutos

Tecla	Tempo	Ação
65	21469976126324	Down
65	21469976126430	Up
70	21469976126525	Down
70	21469976126629	Up

**Fig 1** - Processo de coleta de dados da digitação. Fonte: [19].

Desses dados brutos são extraídas duas informações: latência, tempo entre as teclas pressionadas e tempo total de pressionamento de cada tecla.

O tempo de pressionamento corresponde ao tempo em que uma tecla demorou sendo pressionada. Para conseguir esta informação, basta diminuir o instante de tempo capturado no momento em que a tecla foi solta pelo instante de tempo capturado quando a tecla foi pressionada [18]. Por exemplo, na **figura 1** os eventos de pressionamento e soltura da tecla são representados por Abaixo (*Down*) e Acima (*Up*), respectivamente. Portanto, o resultado da subtração do tempo obtido no evento *Up* ocorrido na tecla “B” com o de *Down* da mesma é igual ao tempo de pressionamento, representado por  $P_1$ . O mesmo se repete para as demais teclas.

A latência é o tempo entre o pressionamento de duas teclas. Ela pode ser explorada de diferentes maneiras. Por exemplo, podem ser utilizadas as distâncias entre dois eventos *Down* consecutivos de duas teclas, ou dois eventos *Up* consecutivos, entre outros. Alternativamente, pode ser utilizada a combinação de diferentes eventos [18]. No exemplo da **figura 1**, a latência é o tempo decorrido entre o evento *Up* de uma tecla com o evento *Down* da tecla seguinte, representada por  $L_1$  e  $L_2$ . Diferentemente do tempo de pressionamento, a latência pode resultar em valores negativos, bastando uma tecla ser pressionada antes da tecla anterior a ela ser solta.

Em geral, após a coleta dos dados brutos, é executada

uma fase de extração de características consideradas relevantes para o processo de reconhecimento do usuário [20]–[22]. Tal fase consiste em gerar novos atributos a partir dos dados coletados. A média e o desvio padrão do tempo de pressionamento das teclas são exemplos de informações que podem ser extraídas a partir da consolidação dos dados brutos coletados durante a digitação dos textos. Este tipo de consolidação permite construir modelos de reconhecimento que sejam independentes das teclas digitadas pelos usuários.

Uma providência comumente adotada após a extração de características dos dados coletados é a normalização dessas características [21]. A normalização de dados consiste em ajustar os valores dos atributos de forma que todos assumam uma mesma ordem de grandeza [23]. Tal providência é importante para evitar que alguns atributos, por apresentarem escalas de valores em ordem de grandeza maior que outros, influenciem de forma tendenciosa a construção dos modelos de reconhecimento de usuário.

Em geral, o reconhecimento de usuário é tratado como um problema de classificação, uma das mais importantes tarefas de aprendizado de máquina [23]. Existem diferentes algoritmos de classificação que podem ser utilizados no reconhecimento de usuário [24], inclusive no contexto da dinâmica da digitação [25]–[27]. Detalhes sobre esses algoritmos se encontram na próxima seção.

## 2.2 Aprendizado de máquina

No contexto de aprendizado de máquina, a tarefa de classificação consiste em, dado um conjunto de registros de entrada associados a classes (rótulos categóricos pré-definidos), construir um modelo que seja capaz de mapear novos registros nas classes pré-definidas correspondentes [23]. Em geral, a tarefa de classificação segue a abordagem de aprendizado supervisionado, que se divide em duas fases: uma de treinamento e outra de testes.

A fase de treinamento compreende a abstração de um modelo de conhecimento a partir dos dados apresentados na forma de pares ordenados (entrada,

saída desejada). No contexto de reconhecimento de usuários baseado na dinâmica da digitação, cada par ordenado corresponde a uma amostra dos dados coletados. A entrada consiste de um conjunto de valores extraídos e normalizados a partir dos dados brutos da amostra (vide Seção 2.1). A saída desejada é uma classe entre duas possíveis: positiva (caso o texto da amostra tenha sido digitado pelo usuário correspondente) ou negativa (caso contrário). Diferentes amostras devem ser utilizadas no conjunto de treinamento, sendo a quantidade dessas amostras, das duas classes, equilibrada.

A etapa de testes tem como objetivo avaliar o desempenho do modelo de classificação produzido pela etapa anterior. Para isso, recebe como entrada um conjunto de teste formado por pares ordenados (entrada, saída desejada) diferentes dos utilizados no treinamento. A entrada de cada par é submetida ao modelo que produz uma resposta e a compara com a saída desejada, computando acerto (caso a saída desejada coincida com a saída produzida) ou erro (caso contrário). Ao final desta etapa, o desempenho do modelo é aferido.

Dentre as medidas de desempenho usualmente utilizadas para avaliar modelos de classificação, a acurácia é uma das mais populares [23]. Ela informa o percentual de acertos do modelo em relação ao total de amostras do conjunto de testes. Logo, quanto maior a acurácia do modelo, melhor é o desempenho do referido modelo (deve ser considerada a proporção de dados entre as classes para isso).

A construção, a avaliação e a aplicação de modelos de classificação é realizada por meio de algoritmos de classificação [24].

Embora existam muitos algoritmos de classificação, nenhum deles é absolutamente melhor que os outros [24]. Assim, os algoritmos de classificação são geralmente avaliados e comparados entre si para verificar qual deles supera os demais em um dado contexto [23].

Uma breve descrição dos algoritmos utilizados neste trabalho é apresentada abaixo.

O *k-Nearest Neighbors* (k-NN) é um algoritmo de classificação baseado em distância. Para classificar um

novo registro de dados, o k-NN calcula as distâncias entre um registro “n” e cada registro de dados do conjunto de treinamento. Em seguida, o algoritmo seleciona os registros de dados “n” mais próximos, identifica a classe mais frequente “c” entre o grupo selecionado e indica “c” como sua saída. A distância euclidiana é uma das métricas de distância mais comumente adotadas pelas implementações de k-NN.

No método do centroide mais próximo [28], cada classe é representada por um registro de dados do centroide (média de todos os registros de dados que pertencem à mesma classe no conjunto de treinamento). Dado um novo registro “r”, o centroide mais próximo calcula iterativamente as distâncias entre “r” e cada registro centroide do conjunto de treinamento. Tem um funcionamento similar ao algoritmo K-NN, que calcula as distâncias entre todos os N elementos mais próximos para definir a classe. O algoritmo K-Means utiliza o método do centroide mais próximo, os pontos no espaço amostral são as médias de cada classe e assim é calculada a distância entre a média das classes. As distâncias euclidiana e de Manhattan são métricas usadas tradicionalmente pelas implementações do centroide mais próximo.

Árvores de decisão [29] são modelos de conhecimento representados por gráficos acíclicos. Em uma árvore de decisão, cada nó interno denota uma decisão sobre um atributo do conjunto de dados. Tal decisão determina como os registros de dados são particionados. Os nós das folhas indicam as classes. A escolha do atributo usado em cada decisão é geralmente guiada por índices como entropia ou *gini impurity* [30]. Existem alguns algoritmos que implementam Árvores de Decisão, por exemplo, ID3 [31], C4.5 [32], Árvore de Classificação e Regressão (ACR) [33], etc.

*Random Forest* é um algoritmo [34] que gera um conjunto de árvores de decisão baseado em amostras de dados selecionadas aleatoriamente do conjunto de treinamento. Dado um novo registro de dados “r”, todas as árvores são aplicadas para classificar “r”. O resultado de cada árvore de classificação é usado como voto para uma classe específica. A classe mais votada é designada como a classe resultante do algoritmo. A

velocidade é uma das principais vantagens da *Random Forest*.

A máquina de vetores de suporte (SVM) [35] usa classificadores lineares para criar dados ótimos que separam os hiperplanos. Para classificar registros de dados não lineares, o SVM mapeia os registros em um espaço dimensional mais alto, para que melhores partições de dados possam ser alcançadas. O mapeamento entre espaços é configurado por uma função do *kernel*. Linear, *radial basis function* (RBF) e Sigmoid são exemplos de funções alternativas do *kernel*.

O Classificador Bayesiano Ingênuo (NBC) é um algoritmo baseado em probabilidade condicional. Ele usa a Regra de Bayes, que assume independência de atributo para estimar a probabilidade de um determinado registro de dados de entrada ser atribuído a cada classe [36]. A classe com maior probabilidade é a saída da NBC.

Redes Neurais Artificiais são técnicas inspiradas no cérebro humano [37]. Uma rede neural é uma estrutura composta de componentes artificiais chamados neurônios. Basicamente, esses neurônios são geralmente organizados em camadas e as conexões entre eles são ponderadas. Durante a fase de treinamento da aprendizagem supervisionada, os pesos são ajustados para minimizar o erro entre a saída produzida pela rede e a saída desejada. Número de camadas, número de neurônios em cada camada são exemplos de parâmetros de redes neurais que devem ser configurados antes do treinamento. *Multilayer Perceptron* (MLP) é um popular modelo de rede neural com bons resultados em muitas aplicações [38].

A validação cruzada *k-fold* é uma técnica amplamente utilizada para comparar os desempenhos dos algoritmos de classificação [39]. Ele divide o conjunto de registros de dados em *k* subconjuntos chamados dobras. Uma “dobra” (um subconjunto dos dados, também conhecido como *folds*) é escolhida como o conjunto de teste e as dobras restantes (*k*-1) formam o conjunto de treinamento. Este processo é repetido *k* vezes. Cada iteração tem uma combinação diferente de conjuntos de teste e treinamento. O

modelo aprendido é avaliado e seu desempenho é salvo. Após o loop, o desempenho médio do algoritmo em toda a iteração é calculado e salvo. O processo acima mencionado é repetido para cada algoritmo disponível. No final, os desempenhos médios dos algoritmos podem ser recuperados e comparados.

### 3. Trabalhos relacionados

#### 3.1 Reconhecimento de usuários

É muito comum sistemas de informação serem projetados com apenas um processo de autenticação de usuários feito no momento do primeiro acesso e com base em um conjunto de caracteres (senha) que o usuário conhece [10]–[12]. Porém, nada impede que usuários informem suas credenciais a outras pessoas, o que compromete a fidedignidade do processo.

Diante deste cenário, existem diferentes técnicas de reconhecimento de usuários que exploram as características intrínsecas ao indivíduo, são as chamadas técnicas de biometria [26]

Entre as principais técnicas de biometria estão [15]:

- Reconhecimento da íris [40]: uma técnica que se baseia na extração de características da textura da íris. Apresenta boa acurácia, contudo necessita de equipamentos específicos para gerar imagens dos olhos e possui limitações quanto a movimentação da cabeça e da pálpebra;
- Reconhecimento facial [41], [42]: busca identificar pessoas por diferentes características ligadas a geometria da face e outras particularidades. Tem boa precisão, contudo necessita de dispositivos específicos para capturar imagens, além de ser intrusiva;
- Reconhecimento de voz [43]: identifica pessoas através do padrão de voz. Apresenta boa acurácia em ambientes controlados, contudo pode ter problemas com ruídos sonoros e distância do microfone, além de ser intrusiva;
- Reconhecimento de impressões digitais e de mãos [44], [45]: o reconhecimento de digitais é amplamente utilizado pois possui ótima acurácia apesar de necessitar de hardware específico.

Outra técnica biométrica de reconhecimento de usuário que vem ganhando notoriedade nos últimos anos é a dinâmica da digitação [27], [46]. É uma técnica que não demanda de hardware específico para coleta de dados e também não é intrusiva, ela é detalhada na próxima seção.

### 3.2 Reconhecimento de usuários baseado na dinâmica da digitação

A digitação de senhas periodicamente não é uma técnica viável de autenticação pois muitas aplicações não podem ter interrupções que distraiam os usuários. Adicionalmente, o uso de técnicas biométricas apresentadas nesta seção requer normalmente o uso de equipamentos caros e específicos.

O reconhecimento de usuário baseado na dinâmica da digitação é uma solução factível para mitigar esses problemas, pois é uma técnica biométrica. Tal característica impede que os usuários possam simplesmente passar suas credenciais para outras pessoas. Além disso, não necessita de nenhum equipamento adicional para a utilização.

De fato, a dinâmica da digitação para reconhecimento de usuários pode ser empregada de forma periódica e não intrusiva em sistema de informação [18], [47]. Cada vez que o usuário digita algo o sistema verifica a autenticidade do texto. A verificação pode ser feita sem o conhecimento do usuário, isso é importante em cenários onde o usuário não pode ser distraído. E por último, esta técnica não apresenta os potenciais riscos a privacidade que os métodos envolvendo reconhecimento facial, da íris e de voz.

As pesquisas que exploram a análise de padrões de digitação dividem-se em duas categorias: aquelas cujos padrões são identificados a partir da digitação de textos pré-definidos e aquelas que analisam padrões de digitação de textos dinâmicos (o usuário decide o que escrever) [16]. Em geral, o reconhecimento de usuários por meio de padrões de digitação pré-definidos apresenta melhor desempenho do que pela digitação de textos dinâmicos [48]. Isso ocorre basicamente porque os usuários escrevem sequências de caracteres previamente conhecidas, evitando que ocorram interrupções para pensamento ou consulta durante a digitação. O presente trabalho se enquadra na segunda categoria, na análise do

padrão de digitação em textos dinâmicos.

Muitos estudos de análise de textos dinâmicos reportam uma alta acurácia (acima de 97%) em diferentes cenários com grande quantidade de usuários (100 ou mais) e amostras (pelo menos 2000) [16], [25], [49].

### 3.3 Mecanismos de autenticação em AVAs

Em AVAs, a autenticação de usuários baseada exclusivamente em usuário e senha propicia oportunidades de fraude, a partir do momento que pessoas não autenticadas podem facilmente substituir as autenticadas para executar tarefas, causando percepções incorretas sobre a performance acadêmica dos usuários [10].

A baixa confiabilidade dos sistemas baseados em usuário e senha tem encorajado o desenvolvimento de soluções alternativas, algumas delas vem do uso de técnicas biométricas [1], [12], [50]–[53].

Alguns estudos têm investigado o uso de ferramentas de reconhecimento facial, contudo, essa abordagem acaba violando a privacidade do usuário pois pode expô-lo em momentos íntimos [1], [12], [50], [52], [53]. Além disso, nenhum estudo real com grande volume de dados foi reportado por estes trabalhos.

Outros trabalhos combinaram diferentes tipos de biometria para o reconhecimento de usuários [12], [53]. No trabalho de [12], foi investigada uma abordagem baseada no reconhecimento de digitais e da face. No trabalho de [53], foi feito reconhecimento facial, e na análise dos padrões da digitação e do mouse. Embora a combinação de diferentes tipos de biometria possa melhorar a acurácia do processo de reconhecimento, ambos os trabalhos propuseram soluções que, além de violar privacidade, geram interrupções em diferentes momentos do uso do sistema, forçando o usuário a se autenticar diversas vezes ao longo do processo. Além disso, para viabilizar a abordagem proposta por estes trabalhos, é preciso que o usuário possua uma câmera, o que nem sempre ocorre em computadores pessoais ou empresariais. E também, nenhum estudo com grande volume de dados foi reportado nestes trabalhos.

Utilizar a dinâmica da digitação no reconhecimento de usuários EaD pode mitigar os problemas

mencionados. O processo de reconhecimento pode ocorrer de forma periódica e transparente para o usuário. E, além disso, o único requisito de hardware necessário é um teclado, componente usualmente necessário na utilização de AVAs em geral.

Apesar do exposto, não foram encontrados trabalhos que investigassem a viabilidade do uso da abordagem de reconhecimento de usuário baseada na dinâmica da digitação aplicada de forma periódica, não intrusiva e integrada a AVAs. Embora o mecanismo proposto em [1] produza bons resultados preliminares, a amostra avaliada é consideravelmente pequena (apenas 17 usuários). O presente trabalho é baseado nesta abordagem em um estudo de caso envolvendo 307 usuários, que produziram ao todo 4829 palavras e geraram mais de 1,6 milhão de registros de *keystrokes*.

## 4. Sistema de autenticação periódica proposto

Conceitualmente, o processamento do mecanismo proposto se divide em três fases. A primeira é responsável por coletar amostras de digitação de usuários do AVA e permitir a construção de um modelo de reconhecimento específico para cada usuário do ambiente. A segunda fase compreende a aplicação desses modelos na medida em que os respectivos usuários utilizam as funcionalidades do AVA. A cada vez que um usuário digita algum texto em uma funcionalidade do ambiente, o mecanismo proposto avalia o padrão de digitação, aplicando o modelo de reconhecimento correspondente, e armazena o resultado da avaliação junto ao texto gravado. A terceira fase compreende a apresentação de relatórios periódicos que indicam usuários responsáveis por ocorrências de digitação cuja autoria não tenha sido reconhecida pelo mecanismo proposto. As **figuras 1, 2 e 3** ilustram graficamente os módulos funcionais da primeira, segunda e terceira fases, respectivamente. As próximas subseções detalham cada um desses módulos funcionais.

Cabe ainda ressaltar que para que o mecanismo proposto opere de forma integrada ao AVA desejado,

o administrador do sistema deve configurar o ambiente, definindo que funcionalidades deverão ser submetidas ao processo de autenticação periódica. É importante também notar que a análise da dinâmica da digitação é complementar ao reconhecimento inicial de usuário por meio de login e senha.

### 4.1 Coleta de dados

De forma a verificar se um usuário é realmente quem ele diz ser, usando a dinâmica da digitação, é necessário antes, capturar o padrão de digitação desse usuário. O módulo de Coleta de Dados, primeiro módulo da **figura 2**, tem como objetivo capturar amostras do padrão de digitação.

Com o intuito de identificar o padrão de digitação do usuário, o módulo de Coleta de Dados apresenta um formulário em branco com perguntas cujas respostas precisam ser digitadas. Em algumas delas, o conteúdo do texto a ser digitado é fixo. Nas demais o texto é dinâmico, podendo ser digitado livremente pelo usuário.

Na medida em que o usuário preenche o formulário, os registros de digitação de cada tecla são coletados de forma transparente ao usuário e são armazenados em uma espécie de histórico, que contém os dados brutos, no formato apresentado na **tabela 2**.

### 4.2 Construção do modelo de reconhecimento

Esta seção detalha o segundo módulo apresentado na **figura 2**. Nele, um modelo de reconhecimento é construído para cada usuário do AVA. A construção de cada modelo é um processo que ocorre em quatro etapas, sob coordenação do administrador do sistema.

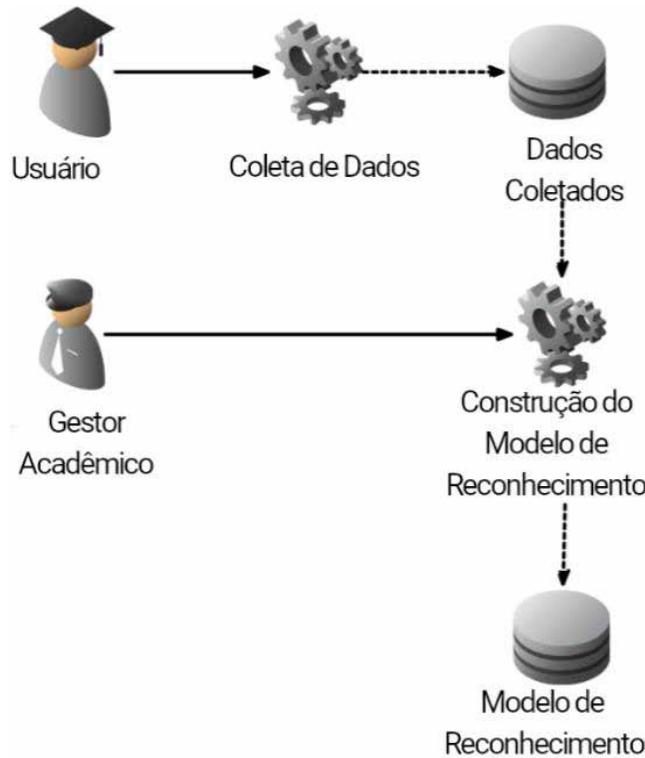
Uma vez escolhido um usuário do AVA, a primeira etapa do processo de construção do modelo de reconhecimento é a extração de características da digitação (*keystrokes*, tempo de pressionamento das teclas e o tempo de latência entre o pressionamento sequencial de duas teclas) presente em cada amostra de texto.

Na segunda etapa, é feita a construção de atributos, em que tais características dão origem a novos atributos com informações consolidadas. Tais

atributos são: a média e o desvio padrão do tempo de pressionamento das teclas e da latência entre as teclas.

Na etapa seguinte, os atributos consolidados são normalizados, colocando-os na mesma ordem de grandeza para efeito de comparação e melhor aplicação no algoritmo responsável pelo treinamento.

Na última etapa, o Administrador do Sistema aplica diversos algoritmos de aprendizado de máquina a fim de selecionar qual o mais indicado para o usuário em questão. A comparação entre os algoritmos é feita por meio de um processo de validação cruzada em  $k$ -folds, sendo a acurácia, a métrica de avaliação escolhida. O critério quem guiou esta escolha foi o de que a acurácia pode compreender a precisão e a abrangência como uma métrica balanceada de distribuição de dados [24]. O algoritmo com o melhor desempenho médio na validação cruzada é considerado o vencedor e armazenado em uma base de conhecimento de forma a ser utilizado pelo módulo de aplicação do modelo de reconhecimento, sempre que for necessária a autenticação do usuário correspondente.

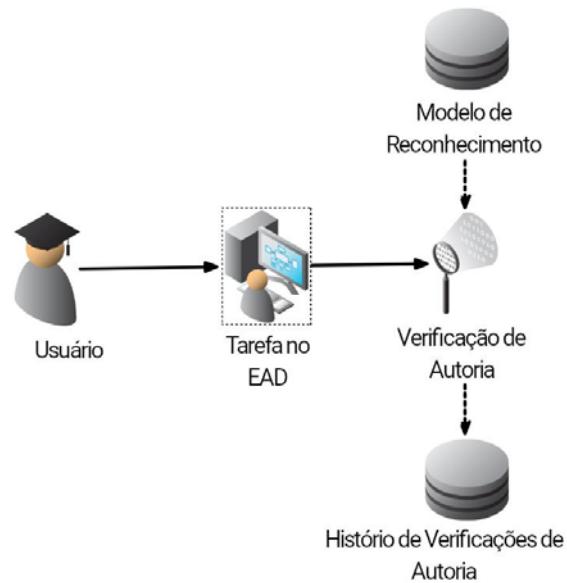


**Fig. 2** – Primeira fase do mecanismo de autenticação periódica - Coleta de dados e construção do modelo de reconhecimento do usuário. Fonte: elaboração própria.

### 4.3 Verificação de autoria

Uma vez que o modelo de reconhecimento de um usuário tenha sido construído e armazenado na base de conhecimento, sempre que tal usuário acessar uma funcionalidade do AVA que esteja associada ao mecanismo proposto, o módulo de Verificação de Autoria é acionado (**figura 3**). Note que a funcionalidade do AVA não faz parte do mecanismo proposto, devendo ser ajustada para acionar o módulo de Verificação de Autoria.

O processamento deste módulo ocorre em três etapas. Durante a primeira etapa, os registros de digitação de cada tecla são coletados de forma transparente ao usuário, de forma análoga ao processo realizado pelo módulo de Coleta de Dados.



**Fig. 3** - Segunda Fase do Mecanismo Proposto: Verificação de Autoria. Fonte: elaboração própria.

Após o usuário concluir a digitação e os dados brutos serem salvos, a segunda etapa do módulo de Aplicação do Modelo de Reconhecimento é iniciada. De forma análoga ao descrito no módulo de Construção do Modelo Preditivo, nesta etapa, são calculados o tempo de pressionamento das teclas e o tempo de latência entre teclas. Em seguida é gerada a média e o desvio padrão de cada uma dessas características e por último os atributos são normalizados.

Na última etapa, o modelo de reconhecimento do usuário que está interagindo com o AVA é recuperado da base de conhecimento e aplicado sobre os dados processados na etapa anterior, a fim de verificar se o usuário em questão foi, de fato, o autor dos dados recém-digitados. Os resultados possíveis desta etapa são: autoria confirmada (classe positiva) ou autoria suspeita (classe negativa). O resultado obtido é armazenado de forma vinculada aos dados digitados e pode ser consultado pelo módulo de Análise de Autorias da terceira fase de operação do mecanismo proposto.

#### 4.4 Análise de autorias

Na terceira e última fase de operação do mecanismo proposto, gestores acadêmicos podem acessar os resultados das verificações de autoria realizadas durante o período em que os usuários desenvolveram suas atividades no AVA. Isto é feito por meio do módulo de Análise de Autorias, representado na **figura 4**. Este módulo provê dois tipos de visão sobre os resultados: visão sintética e visão detalhada. Na visão sintética, o gestor acadêmico pode consultar os usuários do AVA pelos percentuais de autorias suspeitas e confirmadas dentro de um intervalo de tempo. Na visão detalhada, o gestor tem acesso às informações vinculadas a cada resultado, podendo visualizar, por exemplo, que tipo de funcionalidade foi acessada, qual o texto digitado pelo usuário, a data e a hora da digitação, dentre outras.



**Fig. 4** - Terceira Fase do Mecanismo Proposto: Análise de Autorias.  
Fonte: elaboração própria.

<sup>1</sup> <http://www.yahoo.com.br>

O módulo de Análise de Autorias permite realizar diferentes análises longitudinais quanto à evolução dos percentuais de autorias suspeitas dos usuários. A decisão sobre como proceder junto a cada usuário deve ser norteada pela política pedagógica adotada em cada instituição/curso. Por exemplo, gestores acadêmicos podem optar por apenas acompanhar (sem nenhum contato), em novas atividades, usuários que tenham apresentado uma elevação pontual e isolada do percentual de autorias suspeitas em uma determinada atividade. Usuários com recorrentes e elevados percentuais de autoria suspeita podem ser contatados pelos gestores acadêmicos a fim que estes busquem um melhor diagnóstico das causas do problema e, em função dele, decidam como atuar em cada caso.

Outra questão importante que pode ser considerada sob o ponto de vista pedagógico nas análises é quanto à natureza das atividades e dos conteúdos associados a percentuais de autoria suspeita mais elevados. Atividades e conteúdos com elevada incidência de autorias suspeitas junto a diferentes usuários podem ser consequência do fato de que os recursos pedagógicos disponíveis sobre os respectivos assuntos no AVA estejam se mostrando inadequados e os usuários estejam recorrendo a apoio externo indevido. Diante deste cenário, uma revisão voltada ao aprimoramento de tais recursos pode ser uma intervenção recomendável.

Algoritmos devem ter a linha numerada e as palavras-chave devem estar em negrito.

### 5. Protótipo

A fim de demonstrar a viabilidade do mecanismo proposto neste artigo, optou-se por desenvolver um protótipo e integrá-lo a um AVA de código livre. Em função de sua popularidade, o AVA escolhido foi o Moodle.

Para extrair informações da digitação foi criada uma função de captura de dados em *javascript* (usando o YUI - *Yahoo! User Interface* (YUI, 2017))<sup>1</sup>.

Esta função observa, com precisão de milissegundo, os eventos de quando o usuário aperta a tecla e de quando ele a solta. Esta função é utilizada nos módulos de coleta de dados e verificação de autoria. Cabe ressaltar ainda que tal função não sofre influência da latência da rede, pois opera em memória, na máquina do usuário. Isso diminui as chances de ocorrerem interferências no padrão de digitação do usuário.

Para processamento dos dados foram implementados serviços web em Python 3.5.2<sup>2</sup> com auxílio do micro *framework* flask 0.11<sup>3</sup>. Outrossim, foi utilizado a API *scikit-learn* versão 0.18 [54] para criar os modelos de reconhecimento. Para o armazenamento dos dados foi utilizado o sistema gerenciador de bancos de dados relacionais MySQL 5.7.14<sup>4</sup>.

## 5.1 Coleta de dados

A **figura 5** apresenta uma visão parcial da interface do módulo de coleta de dados. Cabe destacar que algumas respostas são solicitadas mais de uma vez, conforme recomendado em vários trabalhos relacionados à dinâmica da digitação [20], [21], [55].

A função de captura de dados foi vinculada a cada um dos campos a serem preenchidos pelo usuário. Os dados brutos coletados são em seguida, enviados para o servidor para serem armazenados no banco de dados.

Por força das características peculiares da topologia do mapa de rotas, o protocolo DD, um protocolo de roteamento multiponto, apresentou um desempenho, no que se refere à probabilidade de entrega apresentada na **tabela 2**, correspondente ao gráfico mostrado na **figura 2**.

### Coleta de Dados

O formulário de coleta de dados, intitulado 'Coleta de Dados', contém os seguintes campos:

- Informe o nome (completo) da sua mãe ou pai\* (campo com placeholder)
- Informe o nome (completo) da sua mãe ou pai\* (campo com placeholder)
- Informe o nome (completo) da sua mãe ou pai\* (campo com placeholder)
- Informe uma música, banda ou artista que você gosta\* (campo com placeholder)
- Informe a mesma banda, artista ou música novamente\* (campo com placeholder)
- Informe a mesma banda, artista ou música novamente\* (campo com placeholder)
- Você será capaz de sacudir o mundo, tente outra vez (campo com placeholder)
- Digite o texto acima\* (campo com placeholder)
- Digite o texto acima novamente\* (campo com placeholder)
- Digite o texto acima novamente\* (campo com placeholder)

Botão 'Salvar mudanças' no lado direito.

**Fig 5** - Formulário de Coleta de Dados. Fonte: elaboração própria.

## 5.2 Construção do modelo de reconhecimento

Para implementar o módulo de Construção do Modelo de Reconhecimento foram desenvolvidos dois subprogramas: o pré-processamento, que prepara os dados para serem utilizados pelos classificadores, e a construção do modelo do usuário, que compara diversos algoritmos de classificação com o intuito de selecionar o melhor modelo para o usuário.

Cumulativamente as funções descritas na Seção 4.2, o pré-processamento do subprograma implementou a extração de características (tempo de latências e pressionamento), a construção de atributos (média, variância e desvio padrão) e a normalização linear dos dados [56]. Os resultados foram gravados em um banco de dados, conforme ilustrado na **tabela 2**.

<sup>2</sup> <http://www.python.org>

<sup>3</sup> <http://www.flask.pocoo.org>

<sup>4</sup> <http://www.mysql.com>

**Tab. 2** – Atributos Normalizados

id u	id pa	$\mu$ p	$\mu$ l	$\sigma^2$ p	$\sigma^2$ l	$\sigma$ l	$\sigma$ p
122	540	0.174	0.115	0.788	0.151	0.121	0.091
122	541	0.083	0.269	0.004	0.919	0.086	0.086
122	542	0.109	0.073	0.22	0.004	0.104	0.094
122	543	0.114	0.23	0.261	0.691	0.107	0.137
122	544	0.086	0.097	0.034	0.086	0.137	0.143

**Legenda:** **id** são os identificadores, **u** é o usuário e **pa** o texto utilizado,  **$\mu$**  é a média,  **$\sigma^2$**  a variância e  **$\sigma$**  o desvio padrão. **l** representa a latência e **p** o tempo de pressionamento.

No protótipo desenvolvido, o programa de construção do modelo do usuário não foi integrado ao Moodle, contudo o mesmo pode ser incluído em um produto final.

Os serviços foram codificados em linguagem Python e combinam funções disponíveis na biblioteca scikit-learn para executar a validação cruzada com os vários algoritmos apresentados na Seção 2.2 e identificar o melhor modelo de classificação gerado. Três saídas são produzidas, uma planilha com as acuráncias dos modelos produzidos, um arquivo contendo o melhor modelo de classificação gerado para o usuário analisado e um registro de dados que é inserido em uma tabela do banco de dados denominada “modelo do usuário” que possui três campos, ID do usuário, algoritmo selecionado e diretório contendo o modelo do usuário.

### 5.3 Verificação de autoria

A funcionalidade do Moodle escolhida para ser integrada ao protótipo do mecanismo proposto foi o Fórum. Sua escolha se deve basicamente ao fato de ser um dos recursos mais usados do ambiente e que permite a obtenção de amostras de texto de tamanho e conteúdo variáveis. A função de captura de dados foi vinculada aos campos assunto e mensagem do formulário de criação de tópico de discussão mostradas na **figura 6** e também ao campo de postagem de respostas aos tópicos de discussão.

### Novo tópico de discussão

**Fig 6** - Formulário de Postagem de Assuntos do Fórum – os conteúdos dos campos assunto e mensagem são coletados pelo protótipo e submetidos ao reconhecimento de usuário. Fonte: elaboração própria.

Assim sendo, sempre que um usuário digita algum conteúdo em um desses campos, o padrão de digitação é coletado e armazenado. Depois disso, um programa em Python é usado para habilitar a autenticação do usuário. Primeiro, é recuperado o modelo de classificação estabelecido para o usuário em questão, depois este é aplicado no texto selecionado e o mesmo é classificado em confirmado ou como tendo autoria suspeita. Finalmente, os resultados são salvos em uma tabela intitulada “histórico de verificação de autoria”.

Cabe ressaltar que não foi necessário realizar nenhuma mudança nas interfaces originais do Moodle, sendo transparente para o usuário final. Desta forma, o uso do mecanismo proposto se comporta de forma não intrusiva durante seu processamento.

### 5.4 Análise de autoria

O propósito deste módulo consiste basicamente da geração de relatórios extraídos a partir de consultas realizadas sobre os resultados das verificações de autoria previamente executadas. As **figuras 7 e 8** ilustram dois desses relatórios. O relatório da **figura 7** apresenta os usuários em ordem decrescente de autorias suspeitas detectadas pelo sistema. Caso o gestor acadêmico deseje ver os detalhes dessas autorias, o relatório da **figura 8** pode ser consultado.

**Gestor Acadêmico:** Gestor Teste

**Data do relatório:** 31/07/2016

**Período consultado:** 1/07/2016 até 31/07/2016

Usuário	% de Autorias Certificadas	% de Autorias Suspeitas
B	50%	50%
C	90%	10%
A	99%	1%

**Fig 7** - Exemplo de Relatório – Distribuição dos Resultados de Verificação de Autoria. Fonte: o autor.

Usuário: B			
% de autenticações suspeitas: 50%			
Funcionalidade	Referência	Data e Hora	Texto Digitado
Fórum - Novo tópico de discussão	Título	13/07/2016 : 12:32	Inteligência Artificial
Fórum - Novo tópico de discussão	Conteúdo	13/07/2016 : 12:32	Inteligência Artificial é uma área do conhecimento que estuda ...
Fórum - Resposta	Conteúdo	14/07/2016 : 13:00	As Redes Neurais podem ter várias camadas intermédias e ...

**Fig 8** - Exemplo de Relatório – Detalhamento das Autenticações Suspeitas Associadas a um Usuário. Fonte: elaboração própria.

## 6. Estudo de caso

Este estudo avaliou a viabilidade e qualidade do sistema de autenticação periódica proposto. Ele foi realizado em uma instituição que utiliza o Moodle como suporte a atividades pedagógicas. Foram realizadas coletas de 307 usuários, sendo 2 professores e 305 estudantes. O estudo realizado foi do estilo duplo-cego, ou seja, nem os participantes e aplicadores sabiam do processo de coleta envolvido.

Foram coletados um total de 3219 palavras e armazenados mais de 1,6 milhões de registros de teclas pressionadas e liberadas. A coleta foi realizada no mês de Julho de 2017.

Depois de coletados os dados, sete algoritmos de classificação (descritos na sessão 2.2) foram aplicados aos dados. Foram eles: K-NN, Nearest Centroid, SVM, Naive Bayes, Decision Tree, Random Forest and Artificial Neural Networks. A **tabela 3** apresenta as configurações utilizadas nos algorítimos.

**Tab. 3 – Algoritmos de Classificação**

Algorithm	Configuration
K-NN	K=3; Distance = Euclidean
Nearest Centroid	Distance = Manhattan
SVM	Kernel = RBF; error penalty rate = 100;
Naive Bayes	NA
Decision Tree	split quality index = gini; split strategy = best split
Random Forest	number of trees = 13
Multi-Layer Perceptron	1 hidden layer with 200 units; lbgfs; epochs = 10,000

Todas as árvores de decisão foram produzidas com o algoritmo ACR<sup>5</sup>.

Para cada usuário, cada algoritmo foi avaliado em um processo de validação cruzada com 3 divisões. O modelo de reconhecimento com a maior acurácia para cada usuário foi escolhido para realizar a validação dos seus textos futuros. Assim, este estudo de caso produziu 6447 modelos de reconhecimento (307 usuários x 7 algoritmos x 3 folds) e foi selecionado um por usuário.

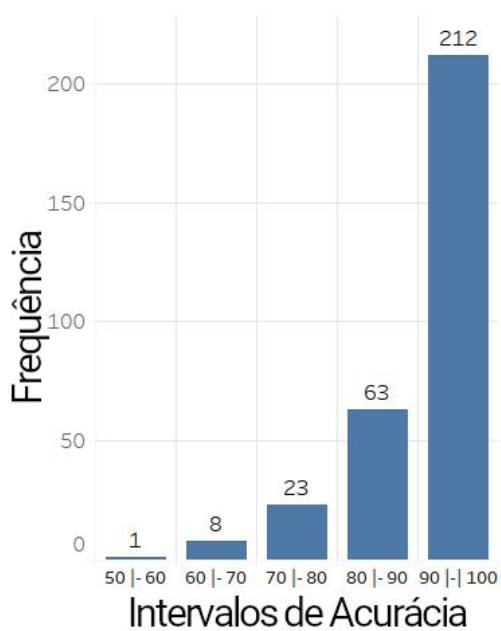
A **tabela 4** mostra a média de performance no processo de validação cruzada de cada algoritmo em dez usuários selecionados aleatoriamente. As melhores acurácia estão em negrito e indicam o modelo que foi escolhido para o usuário na linha em questão, a acurácia gera valores de 0 a 100, esses valores podem ser considerados como percentuais de acerto da classe verdadeira, 100 seria um acerto total de todas as previsões. A **figura 9** sumariza a distribuição de frequências de performances de cada modelos de reconhecimento selecionado.

**Tab. 4 – Acurácia média de cada algoritmo em uma amostra de 10 usuários**

Usuários	K-NN	Centroid	Dec. Tree	SVM	Bayes	R. Forest	MLP
6	75,00	50,00	<b>80,00</b>	55,00	75,00	70,00	60,00
51	83,33	85,19	81,48	<b>53,70</b>	<b>90,74</b>	87,04	81,48
60	59,62	32,69	38,46	46,15	<b>63,46</b>	55,77	50,00
65	78,00	52,00	<b>88,00</b>	52,00	74,00	80,00	62,00
77	95,45	95,45	<b>100,00</b>	95,45	95,45	95,45	95,45
83	<b>94,23</b>	67,31	80,77	65,38	80,77	78,85	86,54
123	<b>78,13</b>	71,88	75,00	68,75	56,25	75,00	59,38
134	56,25	54,17	85,42	66,67	75,00	<b>87,50</b>	70,83
242	92,86	82,14	96,43	60,71	67,86	<b>100,00</b>	92,86
247	91,67	91,67	<b>100,00</b>	91,67	95,83	91,67	75,00

Legenda: MLP – Rede Neural Multi-layer Perceptron

<sup>5</sup> Algoritmo de classificação e regressão de árvores de decisão



**Fig 9** - Distribuição de frequências para a acurácia dos modelos de reconhecimento de usuários. Fonte: elaboração própria.

A **figura 9** mostra que 212 modelos de reconhecimento apresentaram acurácia entre 90% e 100%. Aproximadamente, 89% de todos os modelos apresentaram acurácia acima de 80%, indicando que o mecanismo permaneceu eficaz na identificação de autoria suspeita de textos e que pode ser uma ferramenta valiosa para apoiar decisões de gerenciamento acadêmico sobre má conduta.

Depois da construção do modelo, a fase de verificação de Autoria (seção 4.3) iniciou. A coleta foi feita em agosto de 2017 e foram inseridas mais de 1600 palavras. O mecanismo de autenticação proposto verificou a autenticidade de cada texto inserido pelo usuário. Dois professores acessaram o módulo para verificar os resultados de verificação de autoria.

A **figura 10** mostra, de forma ilustrativa, uma visão sintética de alguns resultados. É observado que altas ou baixas porcentagens de autorias suspeitas refletem o padrão geral dos usuários. Como não haveria razão para supor que outros usuários estivessem utilizando o sistema no lugar dos autenticados, pois a coleta foi controlada, propositalmente quatro usuários deixaram que outras pessoas usassem suas contas

(ids **36, 173, 187 e 28**). Sendo esperado dessa forma que os resultados para esses usuários fossem de alta porcentagem de autoria suspeita.

Usuário	% Certificadas	% Suspeitas
36	1.62	98.38
173	10.70	89.33
187	17.24	82.76
28	18.60	81.40
171	66.67	33.33
72	67.86	32.14
60	69.23	30.77
129	69.23	30.77
264	69.23	30.77
291	69.23	30.77
106	70.83	29.17
103	71.43	28.57
219	71.43	28.57
154	73.33	26.67
165	73.33	26.67
235	73.33	26.67

1 2 3 4 5 ... \*

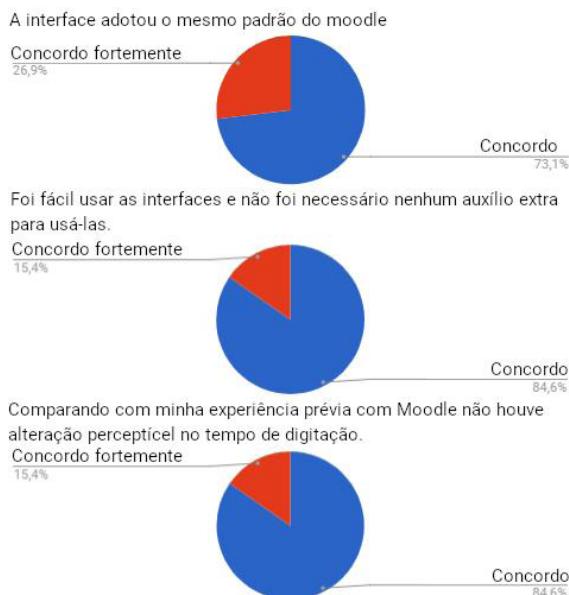
**Fig 10** - Exemplo de relatório - Distribuição do Resultado da Verificação de Autoria. Fonte: elaboração própria.

Com o objetivo de avaliar as usabilidades das interfaces e os potenciais usos pedagógicos da ferramenta, duas análises foram feitas, baseadas em uma pesquisa qualitativa realizada com os usuários após usarem o AVA. As questões nesta pesquisa foram baseadas na heurística de usabilidade da interface proposta, considerando as experiências anteriores em Moodle pelo público alvo. O questionário foi composto de questões fechadas com três alternativas cada, de acordo com a escala de *likert*<sup>6</sup>.

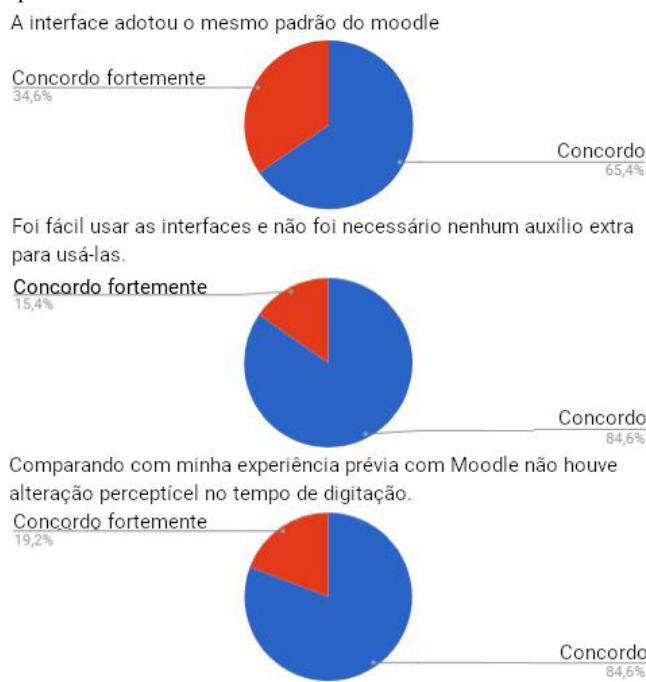
Quase todos os usuários responderam questões sobre a ferramenta de verificação de autoria, apenas dois usuários responderam sobre a ferramenta de análise de autoria. Deve-se notar que, embora o módulo de verificação de autoria não seja acessado diretamente pelos usuários, ele foi incluído na enquete porque foi integrado ao Fórum (funcionalidade

<sup>6</sup> é um tipo de escala de resposta psicométrica usada habitualmente em questionários.

Moodle usada no estudo de caso). Deve-se notar também que, no caso do módulo de análise de autoria, questões abertas foram adicionadas à enquete de modo a permitir que os professores expressassem suas opiniões sobre o protótipo e as possibilidades de ações pedagógicas oferecidas pelo módulo.



**Fig 11** - Análise da Interface de Coleta de Dados. Fonte: elaboração própria.



**Fig 12** - Análise da interface de verificação de autoria. Fonte: elaboração própria.

Todos os usuários concordaram que as interfaces dos módulos de coleta de dados e verificação de autoria seguiram o mesmo padrão do Moodle. De fato, a compatibilidade das interfaces do protótipo com o AVA foi uma das premissas adotadas na implementação. Da mesma forma, os entrevistados afirmaram que era fácil entender como usar os módulos. E, por fim, os usuários não notaram diferença no tempo de resposta entre o uso das interfaces com a verificação de autoria e as interfaces originais do Moodle.

Em relação às respostas dos professores sobre as questões abertas, ambos concordaram que o módulo de Análise de Autoria apresenta capacidade para identificar possíveis problemas de autenticidade. Em sua opinião, o protótipo do módulo não é suficiente para sustentar a viabilidade de uma política pedagógica de combate à fraude relacionada à autoria de atividades a distância. Segundo eles, para poder suportar tal política, novas características devem ser desenvolvidas. Um exemplo interessante citado por um corpo docente foi a implementação de um canal de comunicação entre gestores acadêmicos e usuários de AVA para lidar com questões relacionadas à autoria de atividades on-line desenvolvidas na plataforma. Por meio do uso desse canal, uma memória das interações entre gerentes e usuários, além de registros sobre as ações realizadas em cada caso, seria construída. No futuro, essa memória pode ser usada para aprimorar os modelos de reconhecimento de usuários do AVA.

Outra sugestão importante foi a introdução dos conceitos de certificação automática de autoria e certificação manual de autoria. O primeiro seria utilizado para as certificações realizadas automaticamente pelo sistema, enquanto o segundo seria informado pelos gestores acadêmicos como consequência de seus contatos com os usuários. Esse tipo de informação também pode oferecer suporte futuro para melhorar os modelos de reconhecimento do sistema.

## 7. Conclusão

Um dos maiores desafios da educação à distância é a autenticidade do usuário durante o período de

atividade em um AVA. A autenticação em AVAs são geralmente restritas ao momento em que o usuário informa uma senha para se conectar ao ambiente. O problema com essa abordagem é que os usuários não credenciados, após a autenticação inicial, podem assumir o papel de usuários credenciados, o que pode levar a vários problemas de segurança e pedagógicos. Embora a autenticação periódica seja uma alternativa para atenuar esses problemas, técnicas biométricas, como reconhecimentos facial, de voz e de íris, que acabam sendo soluções muito intrusivas.

Neste contexto, um mecanismo que realiza autenticação periódica não intrusiva em AVAs foi proposto pela primeira vez por [1]. Ele usa técnicas de aprendizado de máquina para construir modelos de reconhecimento com base na dinâmica de pressionamento de tecla dos usuários e pode ser integrado em diferentes plataformas de AVA existentes. Embora este motor tenha apresentado bons resultados preliminares, foi avaliado em um cenário com apenas 17 usuários. Assim, a fim de demonstrar a viabilidade prática do motor em um cenário real com mais usuários e dados, este artigo relatou um estudo de caso no qual o mecanismo foi integrado ao Moodle e aplicado a um grupo de 307 usuários que produziram 4.829 palavras avaliadas

pelos modelos de reconhecimento. Mais de 1,6 milhão de toques foram coletados e processados. A ferramenta gerou modelos com precisão superior a 80% para 89% dos usuários. Uma pesquisa qualitativa confirmou que a usabilidade da interface do protótipo era adequada. O estudo de caso apresentou evidências práticas de que o mecanismo de autenticação pode ser uma ferramenta valiosa para apoiar decisões de gerenciamento acadêmico sobre má conduta mesmo em cenários com muitos usuários e dados.

São exemplos de possíveis ações a serem tomadas: ofertas de reforço pedagógico direcionado aos conteúdos das atividades associadas às autorias suspeitas, possivelmente incluindo novas atividades a serem desenvolvidas, revisão técnica voltada ao ajuste ou mesmo à substituição do modelo de reconhecimento de usuário, notificação formal ao usuário quanto à necessidade de lisura do processo acadêmico.

Como trabalho futuro, pretendemos investigar como melhorar o desempenho dos modelos de reconhecimento. Além disso, planejamos adicionar novos recursos ao módulo de análise de autoria para que ele possa suportar as decisões dos gerentes acadêmicos e refinar o protótipo para fornecer um plug-in de código aberto para o Moodle.

## Referências Bibliográficas

- [1] M. A. S. Cruz, J. C. Duarte, e R. R. Goldschmidt, “Keystroke Dynamics Applied to Periodic Authentication in Virtual Learning Environments”, *Brazilian J. Comput. Educ.*, 2017.
- [2] R. C. Clark e R. E. Mayer, *E-learning and the science of instruction: Proven guidelines for consumers and designers of multimedia learning*. John Wiley & Sons, 2016.
- [3] “Censo da Educação Superior, Notas Estatísticas”. 2014.
- [4] M. Mandaji, “O processo de colaboração nos trabalhos de coautoria em ambientes virtuais de aprendizagem”, *Rev. Bras. Informática na Educ.*, vol. 20, no 1, p. 50, 2012.
- [5] F. P. Galafassi, J. C. Gluz, e C. Galafassi, “Análise crítica das pesquisas recentes sobre as tecnologias de objetos de aprendizagem e ambientes virtuais de aprendizagem”, *Rev. Bras. Informática na Educ.*, vol. 21, no 3, p. 41–52, 2013.
- [6] M. A. M. Bucci e P. da Silva Meneghel, “Tecnologias e ferramentas gratuitas da Internet e sua aplicação aos programas de aprimoramento profissional à distância de equipes em bibliotecas universitárias”, *RBBD. Rev. Bras. Bibliotecon. e Doc.*, vol. 4, no 2, p. 52–63, maio 2009.
- [7] A. M. Poersch, N. S. Santos, e M. A. V Nelson, “Estudo quantitativo da manutenção evolutiva em dois sistemas de código aberto”, in *II Workshop de Manutenção de Software Moderno*, 2006.
- [8] D. L. King e C. J. Case, “E-Cheating: Incidence and trends among college students.”, *Issues Inf. Syst.*, vol. 15, no 1, 2014.
- [9] J. Moten Jr, A. Fitterer, E. Brazier, J. Leonard, e A. Brown, “Examining Online College Cyber Cheating Metho-

- ds and Prevention Measures.”, *Electron. J. E-learning*, vol. 11, no 2, p. 139–146, 2013.
- [10] K. Rabuzin, M. Baca, e M. Sajko, “E-learning: Biometrics as a Security Factor”, in 2006 International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology - (ICCGI'06), 2006, p. 64.
- [11] E. Marais, D. Argles, e B. von Solms, “Security Issues Specific to e-Assessments”, 8th Annu. Conf. WWW Appl., 2006.
- [12] A. Moini e A. M. Madni, “Leveraging Biometrics for User Authentication in Online Learning: A Systems Perspective”, *IEEE Syst. J.*, vol. 3, no 4, p. 469–476, 2009.
- [13] G. E. Violettas, T. L. Theodorou, e G. C. Stephanides, “E-Learning Software Security: Tested for Security Vulnerabilities & Issues”, in 2013 Fourth International Conference on e-Learning “Best Practices in Management, Design and Development of e-Courses: Standards of Excellence and Creativity”, 2013, p. 233–240.
- [14] L. O’Gorman, “Comparing passwords, tokens, and biometrics for user authentication”, *Proc. IEEE*, vol. 91, no 12, p. 2021–2040, dez. 2003.
- [15] A. K. Jain, K. Nandakumar, e A. Ross, “50 years of biometric research: Accomplishments, challenges, and opportunities”, *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 79, p. 80–105, ago. 2016.
- [16] A. Alsultan e K. Warwick, “Keystroke dynamics authentication: a survey of free-text methods”, *Int. J. Comput. Sci. Issues*, vol. 10, no 4, p. 1–10, 2013.
- [17] E. Ecmascript, “Language Specification”. 2015.
- [18] S. P. Banerjee e D. Woodard, “Biometric Authentication and Identification Using Keystroke Dynamics: A Survey”, *J. Pattern Recognit. Res.*, vol. 7, no 1, p. 116–139, 2012.
- [19] G. C. Boechat, J. C. Ferreira, e E. C. B. Carvalho Filho, “Authentication personal”, in 2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), 2007, p. 254–256.
- [20] C. Costa, G. F. Yared, R. N. Rodrigues, J. B. Yabu-Uti, F. Violaro, e L. L. Ling, “Autenticação Biométrica via Dinâmica da Digitação em Teclados Numéricos”, in XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações--SBrT'05, 2005, p. 4–8.
- [21] G. Cavalcanti, “Composição de biometria para sistemas multimodais de verificação de identidade pessoal”, Universidade Federal de Pernambuco, 2005.
- [22] L. C. F. Araújo, L. H. R. Sucupira, M. G. Lizarraga, L. L. Ling, e J. B. T. Yabu-Uti, “User authentication through typing biometrics features”, *IEEE Trans. signal Process.*, vol. 53, no 2, p. 851–855, 2005.
- [23] R. Goldschmidt, E. Bezerra, e E. Passos, *Data Mining: Conceitos, técnicas, algoritmos, orientações e aplicações*. Elsevier, Rio de Janeiro, 2015.
- [24] K. Faceli, A. C. Lorena, J. Gama, e A. Carvalho, *Inteligência Artificial: Uma abordagem de aprendizado de máquina*. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [25] S. Bhatt e T. Santhanam, “Keystroke dynamics for biometric authentication—A survey”, in *Pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering (PRIME)*, 2013 International Conference on, 2013, p. 17–23.
- [26] F. Monrose e A. D. Rubin, “Keystroke dynamics as a biometric for authentication”, *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 16, no 4, p. 351–359, fev. 2000.
- [27] P. S. Teh, A. B. J. Teoh, e S. Yue, “A Survey of Keystroke Dynamics Biometrics”, *Sci. World J.*, vol. 2013, no 4, p. 1–24, nov. 2013.
- [28] R. Tibshirani, T. Hastie, B. Narasimhan, e G. Chu, “Diagnosis of multiple cancer types by shrunken centroids of gene expression”, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 99, no 10, p. 6567–6572, maio 2002.
- [29] J. R. Quinlan, *C4. 5: programs for machine learning*. Elsevier, 2014.
- [30] U. M. Fayyad e K. B. Irani, “The attribute selection problem in decision tree generation”, in *AAAI*, 1992, p. 104–110.
- [31] J. R. Quinlan, “Induction of decision trees”, *Mach. Learn.*, vol. 1, no 1, p. 81–106, 1986.
- [32] J. R. Quinlan, *C4.5: Programs for Machine Learning*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993.
- [33] L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen, e C. J. Stone, “Classification and regression trees (CART) Wadsworth International Group”, Belmont, CA, USA, 1984.
- [34] L. Breiman, “Random forests”, *Mach. Learn.*, vol. 45, no 1, p. 5–32, 2001.
- [35] C. Cortes e V. Vapnik, “Support-vector networks”, *Mach. Learn.*, vol. 20, no 3, p. 273–297, 1995.
- [36] P. Langley, W. Iba, e K. Thompson, “An analysis of Bayesian classifiers”, *AAAI*, 1992.
- [37] F. Rosenblatt, “Principles of neurodynamics”, 1962.
- [38] T. Kohonen, “An introduction to neural computing”, *Neural Networks*, vol. 1, no 1, p. 3–16, 1988.

- [39] R. Kohavi e others, “A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection”, in Ijcai, 1995, vol. 14, no 2, p. 1137–1145.
- [40] J. Daugman, “How Iris Recognition Works”, IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., vol. 14, no 1, p. 21–30, jan. 2004.
- [41] O. M. Parkhi, A. Vedaldi, e A. Zisserman, “Deep Face Recognition.”, BMVC, 2015.
- [42] R. Jafri e H. R. Arabnia, “A survey of face recognition techniques.”, Jips, vol. 5, no 2, p. 41–68, 2009.
- [43] J. Padmanabhan e M. J. J. Premkumar, “Machine Learning in Automatic Speech Recognition: A Survey”, IETE Tech. Rev., vol. 32, no 4, p. 240–251, fev. 2015.
- [44] M. M. H. Ali, V. H. Mahale, P. Yannawar, e A. T. Gaikwad, “Overview of fingerprint recognition system”, in 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 2016, p. 1334–1338.
- [45] D. Maio, D. Maltoni, R. Cappelli, J. L. Wayman, e A. K. Jain, “FVC2000: Fingerprint verification competition”, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 24, no 3, p. 402–412, 2002.
- [46] Y. Zhong e Y. Deng, “A survey on keystroke dynamics biometrics: approaches, advances, and evaluations”, Recent Adv. User Authentication Using Keystroke Dyn. Biometrics. Sci. Gate Publ., p. 1–22, 2015.
- [47] P. S. Dowland, S. M. Furnell, e M. Papadaki, “Keystroke Analysis as a Method of Advanced User Authentication and Response”, in Security in the Information Society, Boston, MA: Springer US, 2002, p. 215–226.
- [48] D. Gunetti e C. Picardi, “Keystroke analysis of free text”, ACM Trans. Inf. Syst. Secur., vol. 8, no 3, p. 312–347, ago. 2005.
- [49] M. Curtin et al., “Keystroke biometric recognition on long-text input: A feasibility study”, Proc. Int. MultiConf. Eng. Comput. Sci., 2006.
- [50] F. A. Diniz, F. M. M. Neto, F. das Chagas Lima Júnior, e L. M. de O Fontes, “RedFace: Um Sistema de Reconhecimento Facial para Identificação de Estudantes em um Ambiente Virtual de Aprendizagem”, RENOTE, vol. 10, no 3, dez. 2012.
- [51] B. E. Penteado e A. N. Marana, “Autenticação biométrica on-line de usuários em aplicações web de Ensino a distância”, in Companion the XIV Brazilian Symposium, 2008, p. 53.
- [52] A. L. Rolim e E. P. Bezerra, “Um sistema de identificação automática de faces para um ambiente virtual de ensino e aprendizagem”, in Companion the XIV Brazilian Symposium, 2008, p. 129.
- [53] M. K. Dehnavi, S. M. Sharafi, e N. Nematbakhsh, “DEVELOPING A E-LEARNING MODEL FOR TRACKING THE CONTINUOUS ATTENDANCE OF THE STUDENTS.”, J. Theor. Appl. Inf. Technol., vol. 24, no 1, 2011.
- [54] F. Pedregosa et al., “Scikit-learn: Machine Learning in {P}ython”, J. Mach. Learn. Res., vol. 12, p. 2825–2830, 2011.
- [55] A. Darabseh e A. S. Namin, “The accuracy of user authentication through keystroke features using the most frequent words”, in the 9th Annual Cyber and Information Security Research Conference, 2014, p. 85–88.
- [56] J. Han, J. Pei, e M. Kamber, Data mining: concepts and techniques. Elsevier, 2011.

# Arquitetura de um sistema de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas para operações em Defesa

Erick M. Moreira<sup>\*a</sup>, Nicolas Souza de Melo Miranda de Oliveira<sup>a</sup>, Fábio Luiz Jr<sup>a</sup>, Leandro Moreira<sup>a</sup>, Jauvane Cavalcante de Oliveira<sup>b</sup> e Paulo Fernando Ferreira Rosa<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270

Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>b</sup> Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC)

\*emenezes@ime.eb.br

**RESUMO:** O uso de múltiplos veículos autônomos em operações de Defesa tem aumentado rapidamente. Seu emprego como uma extensão das equipes de segurança pública garante maior flexibilidade, alcance e consciência situacional durante as operações. No entanto, quando nos afastamos do desenvolvimento das capacidades técnicas em direção às aplicações práticas, percebemos que as demandas operacionais nem sempre se encontram com as capacidades técnicas disponíveis. Assim, visando reduzir esse hiato, apresentamos uma arquitetura robótica para um sistema de múltiplas aeronaves remotamente pilotadas. Ela traduz as demandas operacionais em táticas e ações para cada membro do sistema de maneira estruturada e reutilizável. Para validá-la, realizamos um estudo de caso onde múltiplas aeronaves devem perseguir um líder e, no evento de baixa energética, realizar a substituição por aeronaves reservas. A arquitetura se mostrou extremamente flexível e adequada ao estudo realizado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aeronave remotamente pilotada. ARP. Arquitetura robótica.

**ABSTRACT:** The use of multiple autonomous vehicles in defense operations has been increasing rapidly. Their use as an extension of public safety teams ensures greater flexibility, reach and situational awareness during operations. However, as we move away from developing technical capabilities toward practical applications, we realize that operational demands do not always meet the available technical capabilities. Thus, in order to reduce this gap, we present a robotic architecture for a system of multiple remotely piloted aircrafts. It translates operational demands into tactics and actions for each system member in a structured and reusable way. In order to validate the architecture we conducted a case study, where multiple aircraft must pursue a leader and, in the event of low energy, perform replacement by reserve aircraft. The results obtained in the case of study showed that the proposed architecture is extremely flexible and appropriate.

**KEYWORDS:** Remotely piloted aircrafts. RPA. Unmanned aerial vehicle. UAV. Robot architecture.

## 1. Introdução

A sociedade moderna vem, desde a Revolução Industrial, empregando sistemas automatizados para melhorar sua vida e a sua eficiência produtiva. Nos dias atuais, robôs têm substituído humanos na realização de tarefas enfadonhas, repetitivas ou perigosas, poupando vidas e garantindo um mundo melhor para se viver. As pesquisas em inteligência artificial têm permitido a criação de máquinas que podem, cada vez mais, interagir com humanos, com o mundo que os cerca e com outras máquinas. Com isso, na relação humano-máquina, a

espécie humana tem deixado de desempenhar o papel de operador e passado ao papel de cooperador, ou seja, aquele que tem a função de estar junto do robô, não para controlá-lo, mas para coordená-lo, sugestionando-o e corrigindo-o, tal como uma criança que precisa de orientação durante o aprendizado.

Em operações de Defesa não é diferente. Sistemas robóticos melhoram a eficiência das tropas coletando informações, fornecendo proteção e aumentando a capacidade combativa individual e coletiva. Em especial, veículos não tripulados (terrestres, aéreos, aquáticos e subaquáticos), atingem locais antes considerados inalcançáveis, onde o corpo humano sofre com o excesso de pressão, com a falta de oxigênio e com a presença de substâncias nocivas.

Nesses contextos, as demandas têm sido tantas, tão exigentes e tão diferentes, que desenhar máquinas que exerçam todos esses papéis tende à impossibilidade. A solução tem sido criar robôs mais simples, heterogêneos, limitados, que cooperem uns com os outros em um sistema de aeronaves remotamente pilotadas (SARP ou RPAS, do inglês *Remotely Piloted Aircraft System*) para exceder essas limitações, demonstrando unicidade de vontade (objetivo comum) e praticando o coletivismo, a partir do autoconhecimento e da comunicação com seus vizinhos. Em um SARP, cada elemento é chamado aeronave remotamente pilotada (ARP).

Um dos grandes desafios da atualidade nas áreas de Robótica e Inteligência Artificial é a coordenação de múltiplos robôs. Dentre as inúmeras aplicações para um SARP que pode beneficiar a sociedade, pode-se citar a agricultura de precisão [1-5], o monitoramento remoto ecológico e meteorológico [6-7] e a inspeção de linhas de transmissão de energia, dutos e obras de arte de engenharia civil [8-11]. Outra grande oportunidade de emprego, civil e militar, que aumenta o desejo por essa tecnologia e motiva essa pesquisa, são as atividades de busca, resgate, identificação e acompanhamento de alvos [12-17] e de sensoriamento remoto de áreas suspeitas de vazamento (ou ataque) químico, biológico e nuclear [18-19]. Essas são algumas das aplicações em Defesa que motivam o estudo acerca da cooperação entre agentes robóticos em um SARP.

Quando humanos cooperam, cada indivíduo toma ciência do objetivo coletivo e executa os planos traçados, por si próprio ou por outrem, para cumprir tarefas parciais que se somam até a conclusão do objetivo final. Quando robôs cooperam não é diferente: seus planos precisam ser desenhados antecipadamente e, cientes de suas capacidades e limitações, cada um deles deverá cumprir sua tarefa. Portanto, antes de extrair conclusões, é preciso refletir sobre o nível de cognição, coordenação visual e coordenação motora necessárias para o cumprimento de tais planos. Um ser humano consegue facilmente desviar de obstáculos enquanto se desloca para um objetivo qualquer, consegue evitar a colisão com seus colegas de empreitada e, durante a execução da tarefa, sabe se manter próximo do grupo de trabalho para ouvir as orientações dos demais

integrantes. O desenvolvimento dessas *capacidades primitivas* para os elementos do SARP é o que motiva essa pesquisa. A fim de estabelecer uma arquitetura comum a todos os projetos que permeiam o grupo de pesquisa do Laboratório de Robótica e Inteligência Artificial do Instituto Militar de Engenharia, propomos uma **arquitetura robótica para SARP**. Ela descreve os componentes lógicos e físicos de um agente pertencente ao SARP. Sua essência foi inspirada pelas premissas apresentadas em DARPA [20] tendo em seu topo as demandas operacionais para um SARP e, na base, o hardware necessário para uma ARP funcionar. Seu propósito é traduzir demandas operacionais humanas em tarefas para cada aeronave, lidando com problemas coletivos e individuais como coordenar a execução de tarefas, realizar voo coordenado, estabelecer rede de comunicação, seguir uma lista de *waypoints* e detectar, mapear e evitar a colisão com obstáculos. Além disso, a arquitetura prevê em seu cerne (inteligência do robô) a interação de diversos submódulos corresponsáveis pelo funcionamento da ARP com o modelo *belief-desire-intention* (BDI) para agentes inteligentes [21]. Tal modelo preconiza a existência de crenças que guiam as decisões do agente, enquanto ele assume papéis e realiza ações a fim de cumprir os objetivos estabelecidos por cada tarefa. A arquitetura foi validada com estudos de caso.

O restante do artigo está organizado do seguinte modo: a Seção 2 faz um resumo de alguns trabalhos relacionados; a Seção 3 descreve a arquitetura proposta; a validação da arquitetura por meio de um estudo de caso é apresentada na Seção 4; e a Seção 5 apresenta as conclusões.

## 2. Trabalhos relacionados

Gomes *et al.* [22] apresentaram uma arquitetura baseada em modelos, dos mais simples para os mais complexos, representando o SARP como um sistema de sistemas. Sua abordagem comprehende desde as atividades desempenhadas pela torre de controle (Centro C2) até os subsistemas necessários para o guiamento do veículo. Alguns dos sistemas listados são: mapeamento global, controle manual da aeronave, meteorologia, comunicações, desvio de

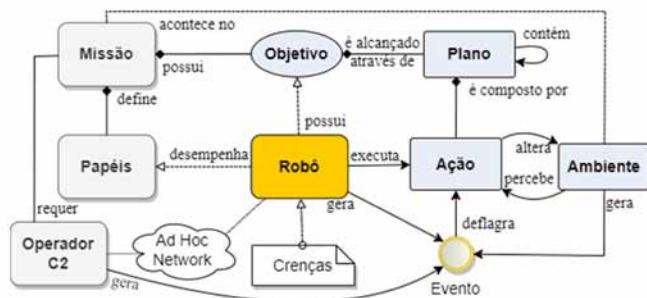
obstáculos, diagnóstico e manutenção, gerenciamento de voo, estimativa da posição, energia e planejamento de trajetória. De forma muito similar, Brooks *et al.* [23] também descreveram uma arquitetura para veículo aéreo baseada em sistemas e subsistemas. Seu trabalho acrescenta a noção de hierarquia de controle inteligente, tendo no topo da hierarquia o nível decisor (centro C2) que determina os objetivos, seguido pelos níveis de controle de missão, de coordenação e de execução que, de acordo com os autores, varia gradativamente dos pontos de vista mais humanos no topo para assuntos mais técnicos na base.

Marconato *et al.* [24] produziram um modelo arquitetural chamado LARISSA. Ele também é um modelo que representa um sistema complexo criado da composição de sistemas mais simples. Seu enfoque foi mais voltado para os subsistemas de hardware e abstrações de software de supervisão do sistema operacional.

Em 2017, a agência de projetos de pesquisa de Defesa DARPA (Defense Advanced Research Project Agency), publicou a chamada pública OFFSET, do inglês Offensive Swarm Enabled Tactics, para a promoção e desenvolvimento de táticas militares que incorporam sistemas de enxame robótico (SRS, do inglês Swarm of Robotic Systems) [20]. O objetivo é o aumento da capacidade combativa das tropas por meio da integração de enxames não-tripulados às fileiras de pequenas frações. O documento deixa clara a intenção de criar táticas ofensivas com tropas heterogêneas (militares e veículos não-tripulados) e deixa indicado também que tais táticas devem ser possíveis através da execução de primitivas de enxame (swarm primitives). O documento dita que as capacidades de um sistema desse tipo dependem dos vetores: comunicação, autonomia, percepção, interação humano-enxame e logística. Além disso, ele ressalta que muitas tecnologias desenvolvidas na área são órfãs de emprego tático e, por isso, propõe que os estudos sejam promovidos na seguinte sequência: (i) definição das necessidades de combate, (ii) planejamento das táticas de emprego para atender à necessidade demandada,

(iii) seleção ou definição das primitivas necessárias para o enxame executar as táticas e (iv) seleção ou desenvolvimento dos algoritmos que compõem as primitivas selecionadas.

Peres, Rosa e Choren [25] apresentaram um modelo conceitual para condução de missões com SRS. Seu modelo foi concebido para implementação em uma arquitetura multiagente, onde ações descentralizadas são executadas baseadas em planos e a partir das crenças programadas em cada agente de software. A **figura 1** ilustra os principais aspectos do modelo. Nela, um operador C2 pode demandar missões, que transcorrerão em um dado ambiente, e transmitir tarefas para os robôs. Essas missões possuem objetivos e definem papéis a serem desempenhados. Para cumprir os objetivos, são traçados planos, cujas ações serão executadas por aqueles robôs, a partir de suas crenças. Por fim, essas ações alteram ou percebem o ambiente, permitindo a observação dos resultados e o registro de novos eventos no sistema.



**Fig. 1** – Modelo conceitual adaptado de Peres, Rosa e Choren[25].

### 3. Arquitetura proposta

Problemas complexos e que envolvem múltiplos agentes requerem soluções robustas. Assim, antes de tratar do problema enunciado, é preciso preparar o ambiente para receber a solução concebida. A literatura possui um vácuo sobre o assunto, tendo sido um dos tópicos incluídos em programas de pesquisa relacionados de alto nível como DARPA [20]. Neste artigo, propomos uma arquitetura orientada a agentes

móveis para um robô integrante de enxame robótico, que deverá cumprir missões através da coordenação e do emprego tático de seus elementos.

A partir do modelo conceitual da **figura 1** e das revisões de literatura, conjecturamos que uma missão com múltiplos robôs deve possuir a estrutura ilustrada pela **figura 2** é descrita a seguir:

- (i) Um controlador de missão responsável por tomar as decisões. Poderão existir outros controladores para fins de resiliência do processo, mantendo apenas um deles selecionado por meio de eleição;
- (ii) Múltiplas plataformas robóticas, conforme necessário para cada missão. Cada robô deve ser capaz de processar dois grupos de mensagens diferentes:
  - (a) Mensagens de inteligência de enxame provenientes do controlador de missão ou de outros robôs;
  - (b) Mensagens de inteligência do robô provenientes dos módulos internos controladores do robô.



**Fig. 2** – Estrutura arquitetural de uma missão com múltiplos robôs.

Cada um dos elementos arquiteturais citados são complexos por si só. A seguir, eles serão descritos com maiores detalhes.

### 3.1 Controlador de missão

Em missões com SARP, é comum a presença de uma ou mais estações de controle de solo (GCS). A GCS tem por atribuição monitorar e controlar a mecânica de voo da aeronave. Normalmente, ela fica junto ao decisor da tarefa, que poderá atuar nas aeronaves quando lhe for conveniente. O modelo que propomos sugere a adição do controlador de missão à GCS.

A função do controlador de missão é monitorar e coordenar a execução da missão atribuída ao grupo de robôs. Além disso, quando for o caso,

os resultados parciais coletados ou gerados serão entregues a ele, permitindo a tomada de decisões preliminares com informações parciais.

Outra atribuição do controlador de missão é coordenar a execução de recursos externos ao sistema. É muito comum que os recursos computacionais necessários para executar alguns algoritmos não estejam disponíveis no robô. Nestes casos, podemos recorrer a métodos de computação assistida, resolvendo os algoritmos em ambiente externo e devolvendo-os ao robô.

Por fim, o controlador de missão pode conter ainda uma parte da solução de inteligência de enxame. Diversos algoritmos precisam ser executados com o conhecimento global, isto é, com o máximo possível de informações sobre as ARPs que pertencem ao sistema, fazendo do controlador de missão um ambiente favorável para executar tais algoritmos, pois ele e a GCS possuem dados monitorados das aeronaves e da missão.

### 3.2 Arquitetura do robô

A plataforma do robô compreende um largo espectro de funcionalidades, desde o hardware disponível e seus drivers, passando pelos algoritmos que lhe confere capacidades, até a inteligência que rege a plataforma.

A partir de agora, usaremos o termo “emprego tático”, que pode gerar dúvidas interpretativas. Aqui, denotamos o sentido mais amplo da tática que é um método ou uma habilidade de obter bons resultados em uma determinada situação. Essa denominação visa distinguir os algoritmos técnicos dos algoritmos operacionais. O primeiro grupo de algoritmos resolve problemas como visão computacional, planejamento de trajetória, e localização e mapeamento simultâneos (SLAM); enquanto o segundo grupo de algoritmos busca solução para problemas práticos como patrulhar uma área, acompanhar um alvo e executar busca visual.

A **figura 3** apresenta a organização da hierarquia da arquitetura do robô, que é composta

pelas camadas: plataforma, algoritmos, primitivas e inteligência do robô. A seguir, apresentaremos a descrição da funcionalidade de cada uma delas.

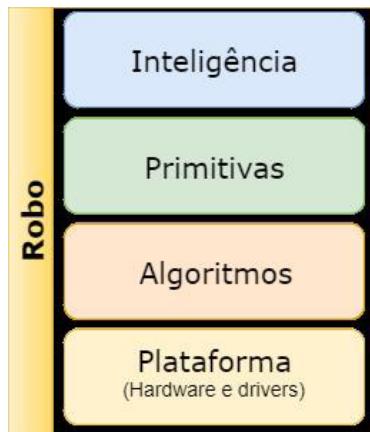


Fig. 3 - Arquitetura em camadas de um robô pertencente a um SARP.

- (i) **Plataforma Robótica:** Esse grupo de recursos é composto dos itens de hardware da plataforma e.g., sensores (GPS, câmera, ultrassom, telêmetro, LIDAR, microfone), atuadores (motores, alto-falante), subsistemas complexos (rádio RF, INS - Inertial Navigation System) e outros *payloads* diversos que podem ser acoplados à plataforma;
- (ii) **Algoritmos do Robô:** À categoria de algoritmos pertencem técnicas clássicas como o SLAM, fusão de sensores para navegação, odometria visual, desvio de obstáculos e detecção visual de objetos, assim como outras que podem ser criadas, como os algoritmos de pontaria de armas embarcadas e de detecção de sinal de rádio frequência. Nesta categoria, os recursos definem capacidades do robô que, geralmente, não possuem emprego tático;
- (iii) **Primitivas do Robô:** São consideradas primitivas os recursos que permitem uma ação com emprego tático. Elas usualmente farão uso de um ou mais algoritmos e técnicas conhecidas pelo robô. São exemplos de primitivas: realizar disparo em alvo por arma embarcada, acompanhar alvo detectado visualmente, realizar patrulhamento, transmitir comunicado em massa, executar busca visual ou de sinal e monitorar região de interesse para inteligência (RIPI) ou área de objetivo de interesse (AOI);

(iv) **Inteligência do Robô:** Diversos módulos independentes geram eventos, que devem ser levados em consideração nas tomadas de decisão da entidade robótica. A inteligência do robô é responsável por concentrar e ponderar esses eventos, para decidir como melhor agir em prol da missão e conservação própria. A quantidade de módulos envolvidos requer a apresentação desta camada em uma seção separada.

### 3.3 Inteligência do robô

As decisões tomadas pelo robô, sua lógica de comportamento e a gestão de subsistemas independentes são atividades categorizadas como inteligência do robô. De acordo com o modelo conceitual, o agente é uma entidade de software que possui crenças, objetivos e papéis. A partir desses conceitos, ele executa ações que podem modificar o ambiente e gerar eventos para o SRS. No contexto desta proposta, ainda soma-se à consciência individual outro grande subsistema, a inteligência de enxame, que possui formulação e subcategorias próprias. Abaixo, foram listados alguns dos principais sistemas necessários para o funcionamento de um robô, conforme ilustrado na figura 4.

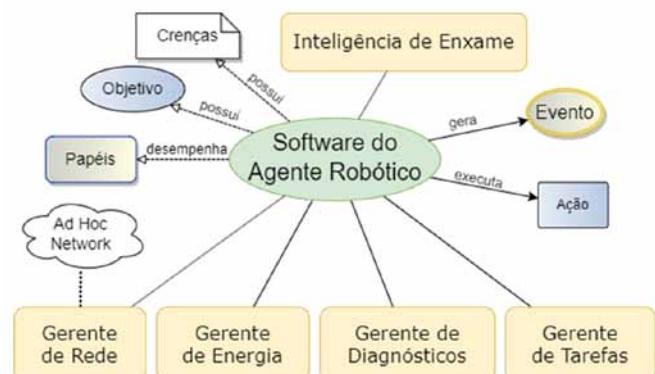


Fig. 4 - Módulos que compõem a inteligência do robô, permitindo a reação a eventos e a tomada acertada de decisões.

- (i) **Gerente de Rede:** É o subsistema independente responsável pela gestão de mensagens e manutenção da conectividade;
- (ii) **Gerente de Energia:** É o subsistema independente responsável por monitorar a capacidade energética, ou seja, seu consumo e geração (quando for o caso) e

gerar análises (eventos) sobre tempo restante de voo, influência na potência de transmissão, capacidade de acionamento de payload e demais fatores que possam afetar o funcionamento do sistema;

- (iii) Gerente de Diagnósticos: É o subsistema independente responsável por monitorar o funcionamento dos subsistemas, criando um registro de atividades executadas na plataforma. Ele, sempre que possível, gerará eventos relacionados a possíveis panes para o software decisor;
- (iv) Gerente de Tarefas: É o subsistema independente responsável por controlar a execução das tarefas da plataforma e coordená-la com a execução de outros elementos;
- (v) Inteligência de Enxame: É o subsistema independente com a incumbência de prover comportamento coletivo ao enxame. Devido a sua complexidade, ela será abordada em sua própria seção.

### 3.4 Inteligência de enxame

Este subsistema independente é responsável pelo comportamento de grupo. Nele, será observada a delegação de missão ao enxame, a criação de planos táticos para sua execução a partir das primitivas disponíveis e a execução das tarefas de maneira coordenada. A **figura 5** apresenta a organização da hierarquia da inteligência de enxame, que é composta pelas camadas: missão do enxame, táticas de enxame, primitivas de enxame e algoritmos de enxame. A seguir, apresentaremos a descrição da funcionalidade de cada uma delas.



**Fig. 5** – Arquitetura em camadas da inteligência de enxame de um robô pertencente a um SARP.

- (i) Missão do Enxame: Esse nível de cognição tenta

capturar a intenção humana, i.e., as demandas descritas como objetivos operacionais em alto nível para o grupo. Verbos como vigiar, reconhecer e defender deverão ser empregados para transmitir a intenção do decisor ao enxame. O uso de uma gramática bem definida de interação humano-enxame beneficiaria sobremaneira o funcionamento de uma equipe mista, pois definiria claramente uma interface reutilizável de comandos para controlar o robô;

- (ii) Táticas de Enxame: São programas onde a intenção da missão deve ser traduzida em planos, designando elementos ou grupos do enxame, juntos ou não com humanos, para conduzir ações (primitivas) que busquem a consecução da missão dada. Essa é a camada de raciocínio onde o grupo deve avaliar a situação e gerar em consenso o plano de ação que será utilizado;
- (iii) Primitivas de Enxame: Determinam habilidades com propósito de emprego tático bem definido como, por exemplo, identificar pontos de entrada em um edifício, definir um perímetro, mapear uma estrutura ou região em 2D/3D, identificar alvos por imagem, comunicar-se através de rede ad hoc, localizar fontes de sinal e realizar base de fogos. Nesta etapa, serão mapeados os atores necessários para a execução de cada ação que compõe a primitiva;
- (iv) Algoritmos de Enxame: Compõem as capacidades coletivas que podem ser executadas, tais como estabelecer consenso entre si, realizar tarefas coordenadamente, voar e manobrar em grupo, estabelecer enlaces ponto a ponto, transmitir dados através de múltiplos saltos e determinar a posição de um sinal por triangulação. Esta categoria de recursos define o conjunto de habilidades do grupo.

Na **figura 6** podemos observar diversos exemplos para todas as camadas que descrevemos anteriormente. No nível de missão de enxame temos tarefas típicas de Defesa, como realizar segurança de flanco e de retaguarda, reconhecer cabeça de ponte e vias de acesso, adquirir alvos e vigiar área; e outras tarefas mais modernas como estabelecer uma rede de comando e controle, e apoiar a execução de operações psicológicas. Essas missões nem sempre poderão ser completamente

realizadas por falta de capacidade técnica do robô, como o reconhecimento de pontes, de rios e a defesa de fato do flanco e da retaguarda. Embora elas não possam ser executadas como uma equipe em solo as executaria, ao menos essas tarefas servirão de apoio e coleta às demais equipes humanas envolvidas. No nível de táticas do enxame temos duas ilustrações que mostram como os robôs foram distribuídos na tarefa para conquistar o objetivo desejado. A ilustração de tática da esquerda mostra que as ARPs se posicionarão na frente do objetivo a fim de criar uma distração, enquanto uma equipe humana faz a abordagem pelo flanco direito e pela retaguarda. A ilustração de tática da direita mostra o padrão de busca a ser executado na área definida pela missão. A camada de tática do enxame vai sempre variar de acordo com o tipo de missão e com a criatividade do decisor da operação. As primitivas de enxame apresentam ações táticas reusáveis como construir imagem 3D a partir de múltiplas imagens, observar a execução de fogos e identificar pontos de entrada em um edifício. Algumas dessas ações táticas podem ser consideradas pequenas missões. No entanto, elas foram

classificadas como primitivas por serem comumente utilizadas em operações. A camada de **algoritmos de enxame**, por sua vez, possui as técnicas necessárias para o funcionamento dos robôs em grupo. Recursos como estabelecer consenso, executar tarefas coordenadamente e voar em grupo sem colisão capacitam o SARP a operar em missões coletivas corretamente.

As camadas **Primitivas do robô** e **Algoritmos do robô** da arquitetura do robô possuem forte paralelo com as respectivas camadas da arquitetura de inteligência do enxame, exceto pelo contexto de funcionamento que é individual. A camada **Hardware** do robô é a camada que representa os componentes embarcados na plataforma robótica, que determinam sua capacidade de interagir com o ambiente, tais como GPS, alto-falante e microfone. E, por fim, há ainda a camada de **Inteligência do robô**, que merece destaque pois é responsável por coordenar todas as atividades, inclusive a integração com a Inteligência de Enxame. Nela, encontramos todos os gestores de áreas de importância da ARP como rede, energia, diagnósticos internos, além da inteligência de enxame.

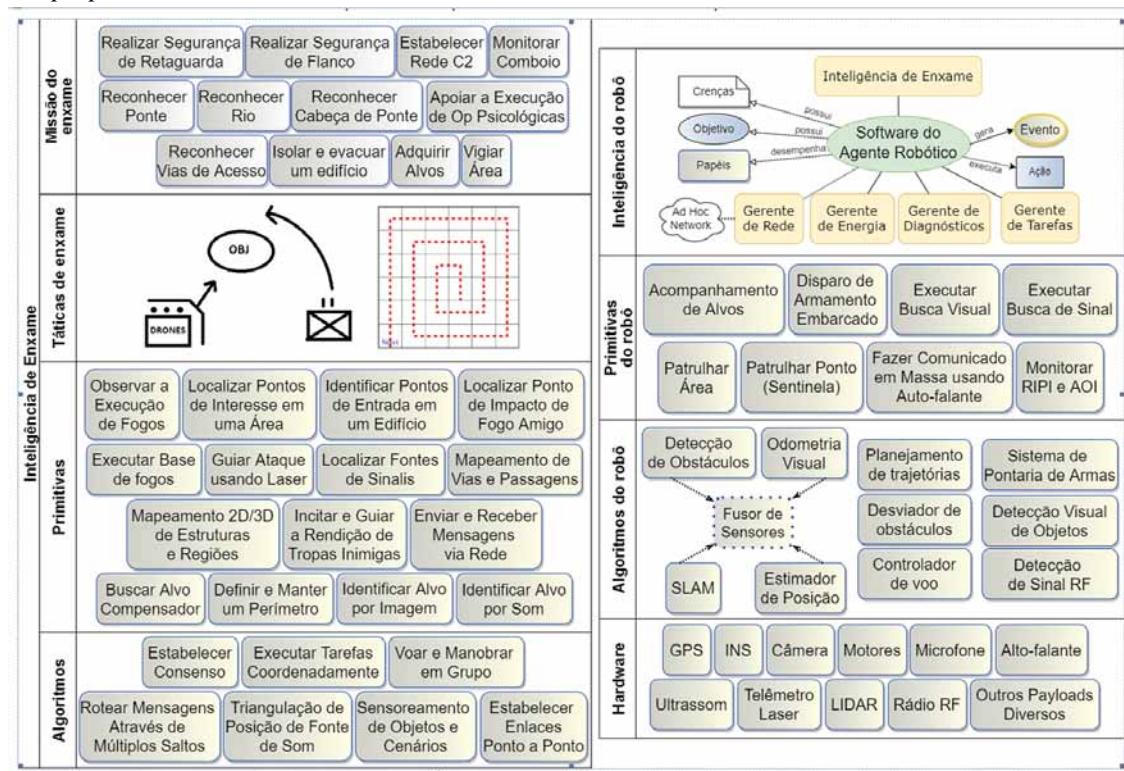


Fig. 6 - Expansão das **figuras 3 e 5**, com exemplos. À esquerda, a arquitetura em camadas da inteligência de enxame de um robô e, à direita, a arquitetura do robô pertencente ao SARP.

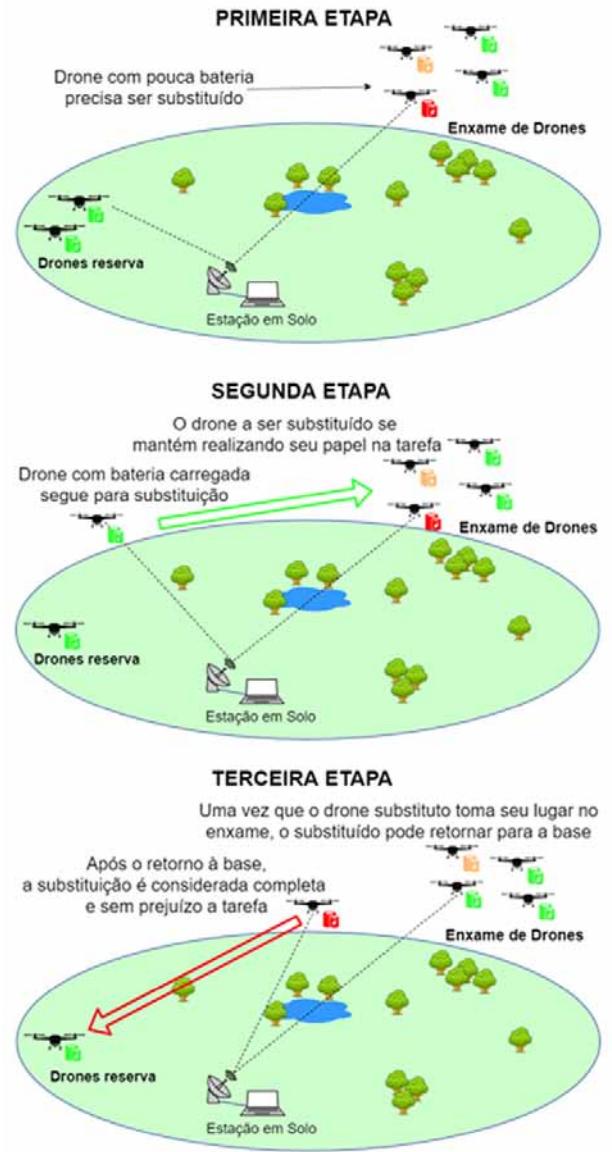
## 4. Estudo de caso

Como se observou até o presente momento, o conceito arquitetural apresentado é extremamente amplo. Por isso, este estudo não ambicionou a criação de uma biblioteca que conte com todas as possibilidades listadas. A seguir, apresentamos um estudo de caso onde testamos uma fração da capacidade deste modelo, a fim de verificar sua viabilidade técnica.

### 4.1 Implementação do algoritmo PSO para controle de múltiplas ARPs executando tarefa de perseguição continuada

Um grupo de múltiplas plataformas robóticas atuando em conjunto pode empregar seus elementos de maneira independente ou conjunta. Por exemplo, pode-se enviar uma ARP para realizar um reconhecimento por imagens de uma dada localidade ou despachar um grupo para realizar uma reconstrução 2D/3D a partir de múltiplas imagens. Quando atuam em conjunto, independente da tarefa a ser desempenhada, é imperiosa a capacidade de se mover em grupo, realizando um voo coordenado. Por isso, desenvolvemos o trabalho relatado em Oliveira, Moreira e Rosa[26]. Neste estudo de caso, não descreveremos todo o desenvolvimento do trabalho: nosso foco será apresentar o seu enquadramento no modelo arquitetural proposto, destacando a interação entre as camadas e módulos do modelo e do trabalho.

Complementando o intuito de realizar o voo coordenado, adicionamos as seguintes restrições: (i) o voo deve ser realizado no modelo líder-seguidor, sendo um líder e  $n$  seguidores; (ii) a posição dos seguidores não deve ser prefixada, ou seja, não há uma posição exata para cada seguidor ocupar em relação ao líder; e (iii) durante a tarefa, ao menos um robô deverá ser substituído. A **figura 7** ilustra o cenário vislumbrado para o trabalho.



**Fig. 7** – Enxame sendo controlado autonomamente, executando uma tarefa sem interrupção.

O estudo foi realizado em simulador. Utilizamos uma versão modificada do algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) [27] para determinar as posições das ARPs seguidoras, evitar colisões e seguir o líder, aplicando a técnica de campos potenciais [28]; o software *DroneKit* [29] como biblioteca de envio de comandos para as aeronaves; e programas de desenvolvimento próprio para monitorar e controlar toda a operação.

No nível de missão do enxame, o operador humano do SARP, decisor da operação, determina que seja realizado um voo coordenado do tipo líder-seguidor e passa o plano de voo a ser realizado pelo líder.

A tática da missão é organizada pelo controlador de missão, que determina quem será a ARP líder, as ARPs seguidoras e as ARPs que permanecerão em reserva. Após a atribuição das funções, o controlador de missão carregará para cada papel as informações necessárias para o cumprimento da tarefa, tais como a rota do líder, o número de aeronaves e os parâmetros de execução do PSO. Quando finalizados os preparativos, o controlador inicia a missão.

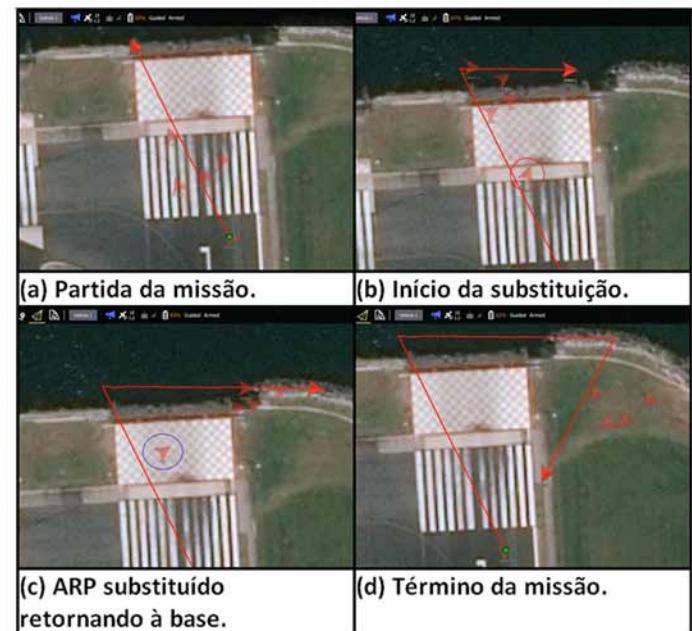
Embora no futuro o voo coordenado possa ser considerado um algoritmo de enxame, como pode ser observado na **figura 6**, nesse momento de desenvolvimento o consideramos como a missão a ser realizada. Portanto, não selecionaremos primitivas ou algoritmos de enxame. Note que, neste caso, a inteligência de enxame pode ser executada junto ao controlador de missão ou a partir de uma ARP qualquer da missão, contanto que os cálculos sejam feitos de maneira centralizada como relatado no artigo [26].

Dotada do planejamento de enxame, a inteligência do robô determinará seu objetivo, seus planos e, a partir das suas crenças, executará o voo que foi determinado para si. Novamente, por ser uma tarefa de pouca complexidade, não será necessário utilizar primitivas do robô, apenas os algoritmos relacionados à navegação, tais como o controlador de voo, o desviador de obstáculos e o fusor de sensores.

Durante a execução do voo coordenado, o gerente de energia monitora o estado da bateria e mantém estimativas de capacidade de voo e da necessidade energética para o retorno a salvo da ARP. No contexto dessa tarefa, forçamos o esgotamento precoce de uma aeronave, para que houvesse o emprego de uma ARP em reserva. Assim que é sinalizada a necessidade de substituição, a inteligência do robô comunica ao controlador da missão o problema, usando o gerente de rede. Em consequência, nesta implementação, a ARP é substituída por outra caso haja disponibilidade, caso contrário ela tem o retorno ordenado. Na **figura 8** podemos ver ilustrações da tarefa sendo executada no simulador. A simulação completa pode ser vista em <https://youtu.be/rwKOMDeT24I>.

## 5. Conclusão

Como se pôde observar, o modelo arquitetural proposto tem foco na tradução de demandas operacionais em ações e planos exequíveis pelos robôs.



**Fig. 8** – Resumo da tarefa realizada no estudo de caso. Em (a) podemos ver o líder sendo seguido. Na sequência (b) a ARP reserva parte para substituição da ARP com baixa energia. Após a substituição (c) a ARP substituída retorna à base para recarga. E, por fim, (d) a ARP líder termina seu trajeto e todos retornam à base.

Outra característica notável é a amplitude do modelo. Apesar de possuir uma estrutura vertical em camadas, elas não se restringem em usar e servir as camadas imediatamente inferior e superior, respectivamente.

Como sugestão para o futuro desta arquitetura, seria interessante a implementação de uma biblioteca capaz de integrar os inúmeros módulos em tempo real, seja embarcado no robô ou em um ambiente remoto. Seria ainda uma melhoria notável, se o algoritmo de cálculo das posições do voo coordenado pudesse ser distribuído, fazendo uso de dispositivos de rede.

## Agradecimentos

Ao maior de engenharia Daniel Ramos Lemos, do Exército Brasileiro, pelas inúmeras correspondências trocadas no intuito de esclarecer e enriquecer as discussões sobre operações de Defesa.

## Referências Bibliográficas

- [1] Gevaert, C. M.; Tang, J.; García-Haro, F. J.; Suomalainen, J.; Kooistra, L. Combining hyperspectral uav and multispectral formosat-2 imagery for precision agriculture applications. In: Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). Switzerland: IEEE, 2014. p. 1–4.
- [2] Pham, T. H.; Bestaqui, Y.; Mammar, S. Aerial robot coverage path planning approach with concave obstacles in precision agriculture. In: 2017 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS). Sweden: IEEE, 2017. p. 43–48.
- [3] Murugan, D.; Garg, A.; Singh, D. Development of an adaptive approach for precision agriculture monitoring with drone and satellite data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 10, n. 12, p. 5322–5328, Dec 2017. ISSN 1939-1404.
- [4] Popović, M.; Vidal-Calleja, T.; Hitz, G.; Sa, I.; Siegwart, R.; Nieto, J. Multiresolution mapping and informative path planning for uav-based terrain monitoring. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Canada: IEEE, 2017. p. 1382–1388.
- [5] Flores, D. A.; Saito, C.; Paredes, J. A.; Trujillano, F. Multispectral imaging of crops in the peruvian highlands through a fixed-wing uav system. In: IEEE International Conference on Mechatronics (ICM). Australia: IEEE, 2017. p. 399–403.
- [6] Kato, A.; Wakabayashi, H.; Hayakawa, Y.; Bradford, M.; Watanabe, M.; Yamaguchi, Y. Tropical forest disaster monitoring with multi-scale sensors from terrestrial laser, uav, to satellite radar. In: 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). [S.l.: s.n.], 2017. p. 2883–2886.
- [7] Tiwari, K.; Jeong, S.; Chong, N. Y. Multi-uav resource constrained online monitoring of large-scale spatio-temporal environment with homing guarantee. In: IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.: s.n.], 2017. p. 5893–5900.
- [8] Yu, H.; Yang, W.; Zhang, H.; He, W. A uav-based crack inspection system for concrete bridge monitoring. In: 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). [S.l.: s.n.], 2017. p. 3305–3308.
- [9] Ikeda, T.; Yasui, S.; Fujihara, M.; Ohara, K.; Ashizawa, S.; Ichikawa, A.; Okino, A.; Oomichi, T.; Fukuda, T. Wall contact by octo-rotor uav with one dof manipulator for bridge inspection. In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). [S.l.: s.n.], 2017. p. 5122–5127.
- [10] Li, Z.; Mu, S.; Li, J.; Wang, W.; Liu, Y. Transmission line intelligent inspection central control and mass data processing system and application based on uav. In: 2016 4th International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI). [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5.
- [11] Shukla, A.; Karki, H. Teleoperation of a uav by a 6-dof parallel manipulator with hybrid mapping for inspection of industrial structures. In: 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). [S.l.: s.n.], 2017. p. 883–888.
- [12] Šulák, V.; Kotuliak, I.; Čičák, P. Search using a swarm of unmanned aerial vehicles. 2017 15th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA), v. 1, p. 1–6, Oct 2017.
- [13] Saska, M.; Chudoba, J.; Precil, L.; Thomas, J.; Loianno, G.; Tresnak, A.; Vonasek, V.; Kumar, V. Autonomous deployment of swarms of micro-aerial vehicles in cooperative surveillance. 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2014 - Conference Proceedings, v. 1, p. 584–595, 2014.
- [14] Orol, D.; Das, J.; Vacek, L.; Orr, I.; Paret, M.; Taylor, C. J.; Kumar, V. An aerial phytobiopsy system: Design, evaluation, and lessons learned. In: 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). [S.l.]: IEEE, 2017. p. 188–195. ISBN 978-1-5090-4495-5.
- [15] Vacek, L.; Atter, E.; Rizo, P.; Nam, B.; Kortvelesy, R.; Kaufman, D.; Das, J.; Kumar, V. SUAS for deployment and recovery of an environmental sensor probe. 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2017, v. 1, p. 1022–1029, 2017.
- [16] Kumar, S. A.; Vanualailai, J. A Lagrangian UAV swarm formation suitable for monitoring exclusive economic zone and for search and rescue. In: 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). [S.l.]: IEEE, 2017. p. 1874–1879. ISBN 978-1-5090-2182-6.
- [17] Paula, P. de S.; Castro, M. F. de; Paillard, G. A. L.; Sarmento, W. W. F. A swarm solution for a cooperative and self-organized team of uavs to search targets. 2016 8th Euro American Conference on Telematics and Information Systems (EATIS), v. 1, p. 1–8, April 2016.
- [18] Hartman, J.; Barzilov, A.; Novikov, I. Remote sensing of neutron and gamma radiation using aerial unmanned

- autonomous system. 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, NSS/MIC 2015, v. 1, p. 1–4, 2016.
- [19] Micconi, G.; Aleotti, J.; Caselli, S.; Benassi, G.; Zambelli, N.; Zappettini, A. Haptic guided uav for detection of radiation sources in outdoor environments. In: 2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS). Mexico: IEEE, 2015. p. 265–271.
- [20] DARPA. OFFensive Swarm Enabled Tactics (OFFSET). 2017. Disponível em: <<https://www.fbo.gov/utils/view?id=015bda98560d82d7568501376efaebdf>>. Acesso em: 02 de dezembro de 2017.
- [21] Bratman, M. Intention, plans, and practical reason. Cambridge, MA:Harvard University Press, 1987. ISBN 9780674458185.
- [22] Gomes, R.; Straub, J.; Jones, A.; Morgan, J.; Tipparac, S.; Sletten, A.; Kim, K. W.; Loegering, D.; Feikema, N.; Dayananda, K.; Miryala, G.; Gass, A.; Setterstrom, K.; Mischel, J.; Shipman, D.; Nazzaro, C. An interconnected network of UAS as a system-of-systems. In: 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC). [S.I.]: IEEE, 2017. p. 1–7. ISBN 978-1-5386-0365-9.
- [23] Brooks, R.; Buehler, C. J.; Williamson, M. M.; Joseph, M.; William, A. Multi-sensor autonomous control of unmanned aerial vehicles. 2015. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US8355834B2>>. Acesso em: 23 de janeiro de 2018.
- [24] Marconato, E. A.; Pigatto, D. F.; Branco, K. R.; Branco, L. H. C. IEEE 802.11n vs. IEEE 802.15.4: A Study on Communication QoS to Provide Safe FANETs. In: 2016 46th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshop (DSN-W). [S.I.]: IEEE, 2016. p. 184–191. ISBN 978-1-5090-3688-2.
- Peres, J.; Rosa, P. F. F.; Choren, R. A multi-agent architecture for swarm robotics systems. In: IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS). Canada: IEEE, 2017. p. 130–135.
- [25] Oliveira, N.; Moreira, E. M.; Rosa, P. F. F. Particle swarm optimization algorithm implementation for multiple drones control in continuous task simulation. In: 16th IEEE Latin American Robotics Symposium (SBR-LARS 2019). Rio Grande, Brazil: IEEE, 2019.
- [26] Eberhart, R.; Kennedy, J. S. A new optimizer using particle swarm theory. MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and HumanScience, p. 39–43, 1995.
- [27] Khatib, O. The potential field approach and operational space formulation in robot control. In: Adaptive and Learning Systems: Theory and Applications. Boston, MA: Springer US, 1986. p. 367–377. ISBN 978-1-4757-1895-9.
- [28] DroneKit. Disponível em: <<https://dronekit.io/>>. Acesso em: 22 de maio de 2019.

# Identificação de sistemas lineares multivariáveis por ajuste das respostas freqüenciais baseada nas respostas temporais ao degrau unitário

Tatiane C. Ramalho\*, Paulo C. Pellanda, Roberto Ades, Marcelo A. Oliveira

Instituto Militar de Engenharia

Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP 29.270-030

\* tati.tramalho@gmail.com

**RESUMO:** Este trabalho apresenta um método para identificar modelos lineares multivariáveis no domínio da freqüência, baseado nas respostas temporais ao degrau unitário e no ajuste ótimo das respostas em freqüência medidas. Os coeficientes da matriz função de transferência são calculados analiticamente de modo a minimizar uma função custo com base em norma quadrática. Este novo método possibilita a obtenção de melhores ajustes dos modelos identificados tanto nas respostas freqüenciais como nas respostas temporais em regime permanente. São utilizados três exemplos numéricos para explicitar algumas vantagens relativas do método proposto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Identificação de Sistemas Multivariáveis. Sistemas de Controle. Resposta em Frequência.

**ABSTRACT:** This work presents a method to identify multivariable linear models in the frequency domain based on unit step responses and the optimal tuning of their measured frequency responses. Transfer function matrix polynomials coefficients are analytically computed to minimize a cost function based on a square norm. Better model tunings can be obtained by using this new method in terms of both frequency and steady-state time responses. Three numerical examples are used to evidence some relative advantages of the proposed method.

**KEYWORDS:** Multivariable Systems Identification. Control Systems. Frequency Response.

## 1. Introdução

A identificação de sistemas busca técnicas alternativas à modelagem matemática convencional que, em muitos casos, pode ser inviável devido à complexidade de alguns sistemas. A partir da observação de dados de entrada e saída do sistema, a identificação é capaz de fornecer um modelo numérico que reproduza o comportamento dinâmico real do sistema, de modo satisfatório e sem envolver uma complexidade matemática elevada.

O aprofundamento das técnicas utilizadas para a identificação de sistemas lineares é encontrado em vários trabalhos, como [1], [2], [3] e [4], onde são detalhadas as etapas necessárias para aplicação das técnicas. Já uma visão geral das técnicas de identificação pode ser encontrada em [5], incluindo a abordagem clássica de métodos paramétricos, bem

como métodos clássicos não paramétricos.

Essencialmente, o processo de identificação pode ser realizado no domínio do tempo ou da freqüência. Ambas as formas apresentam resultados eficientes, porém em [6] os autores expõem algumas características da identificação no domínio da freqüência não encontradas no domínio do tempo, que podem ser consideradas vantajosas, tais como: facilidade no tratamento do ruído, redução no volume de dados, desconsideração do estado inicial do sistema e facilidade na combinação de dados de diferentes experimentos, favorecendo a validação do modelo. Por um longo período, ambas as abordagens foram consideradas como métodos competitivos [7], apesar de resolverem o mesmo problema que consiste em encontrar um modelo que represente a dinâmica de um sistema linear invariante no tempo. No entanto, a decisão de escolha pelo domínio do tempo ou da

frequência pode ser relacionada com a facilidade de acesso às informações em cada domínio para o sistema analisado.

Percebe-se que, em várias técnicas de identificação, há o interesse em obter soluções analíticas, o que só é possível, geralmente, em alguns problemas que apresentam convexidade em relação às variáveis de ajustes. Em [8], é apresentado e discutido um método para o problema de identificação no domínio da frequência, cuja solução ótima é analítica, denominado N2CACGO. Esse método é vantajoso em alguns aspectos em relação a outras técnicas, conforme explicitado pelos autores. O método soluciona um problema de otimização convexo, de forma analítica e ótima, baseado em um critério de norma quadrática especificado no domínio da frequência, que resulta na identificação de uma matriz função de transferência. O critério de ajuste adotado pelo método utiliza a norma quadrática do erro entre a resposta em frequência do sistema original e a do modelo identificado. No entanto, como mencionado em [9], na utilização do método em alguns casos, o modelo identificado poderá ser instável ou de fase não-mínima, não sendo apropriado em certas aplicações de controle ou análise. Além disso, outro aspecto não satisfatório observado é que, eventualmente, as respostas temporais dos modelos identificados apresentam erro de estado estacionário em relação à resposta do sistema original. Para contornar essas adversidades, uma melhoria no método para sistemas monovariáveis é apresentada em [9], visando a eliminar o erro de regime permanente da resposta, bem como reduzir a quantidade de modelos instáveis ou de fase não-mínima identificados, mantendo a essência do método.

Neste trabalho, é discutida uma extensão na melhoria do método N2CACGO [9] para sistemas multivariáveis, mantendo os objetivos propostos no caso de sistemas monovariáveis: eliminação dos erros de regime permanente das respostas temporais e redução da quantidade de modelos instáveis ou de fase não-mínima identificados, sem modificar a essência do método. Além disso, como em sistemas multivariáveis surge a necessidade de compor a modelagem de

diversos canais simultaneamente, propõe-se também a introdução de coeficientes de ponderação para a realização de um melhor ajuste do modelo.

## 2. Fundamentação Teórica

### 2.1 Formulação do problema

O problema abordado consiste em ajustar um modelo multivariável  $G_e(s)$  para um dado sistema  $G(s)$  sob a forma de Matriz Função de Transferência (MFT), a partir de medições experimentais de suas respostas em frequência sob uma faixa de frequência de interesse. Assume-se que as funções de transferência (FT) dos canais a serem identificados, sejam racionais de ordem  $n$  e apresentem o mesmo polinômio característico, isto é, compartilhem o mesmo conjunto de polos, podendo ser representadas pela seguinte expansão:

$$G_{e,\lambda}(\underline{\omega},s) = \frac{N(\underline{\alpha}^\lambda, s)}{D(\underline{\beta}, s)} = \frac{\alpha_0^\lambda s^n + \alpha_1^\lambda s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1}^\lambda s + \alpha_n^\lambda}{s^n + \beta_1 s^{n-1} + \dots + \beta_{n-1} s + \beta_n} \quad (1)$$

em que  $\underline{\alpha}^\lambda$  e  $\underline{\beta}$  são, respectivamente, os vetores de coeficientes reais dos numeradores e do denominador comum de  $G_{e,\lambda}^n(s)$ ;  $N(\underline{\alpha}^\lambda, s)$  e  $D(\underline{\beta}, s)$  são, respectivamente, os polinômios em  $s$  do numerador e do denominador em (1). O índice  $\lambda$  representa o canal específico dentre todas as combinações possíveis entre as  $p$  entradas e as  $q$  saídas do sistema sob análise, ou seja,

$$\lambda \in \Lambda = \{ij \mid i, j \in \mathbb{N}; i = 1, 2, \dots, q; j = 1, 2, \dots, p\} \quad (2)$$

O modelo estimado é ajustado por meio de um critério de erro  $J(\theta)$  baseado em norma quadrática:

$$J(\theta) \triangleq \sum_{\lambda} \left\| D(\underline{\beta}, j\underline{\omega}) \star G_{\lambda}(j\underline{\omega}) - N(\underline{\alpha}^\lambda, j\underline{\omega}) \right\|_2^2 \quad (3)$$

no qual  $\underline{\theta} = \left[ \underline{\alpha}^\lambda^T \quad \underline{\beta}^T \right]^T \in \mathbb{R}^{(n+1)pq+n}$  é o vetor de parâmetros a serem determinados;  $N(\underline{\alpha}^\lambda, j\underline{\omega})$  e  $D(\underline{\beta}, j\underline{\omega})$  são, respectivamente, as respostas em frequência dos numeradores e do denominador comum de  $G_{e,\lambda}^n(s)$ ;  $\underline{\omega} = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \dots \quad \omega_m]$  é um vetor contendo  $m$  valores

de frequências escolhidas na faixa de interesse; e o operador  $\star$  é o Produto de *Hadamard* ou a multiplicação entre os elementos correspondentes de dois vetores (ou matrizes) de mesma dimensão.

Além disso, informações referentes aos valores em regime permanente quando aplicados sinais do tipo degrau unitário nas entradas do sistema são inseridas no problema, com a finalidade de ajustar possíveis erros de regime permanente nas respostas temporais. A formulação deste ajuste será detalhada na Seção 3.

## 2.2 Método N2CACGO

O método N2CACGO [8] busca estimar um conjunto de modelos racionais e próprios, conforme definido em (1), de ordem  $n$  previamente estabelecida, por meio da formulação de um problema de identificação convexo. A escolha do modelo é determinada pelo melhor ajuste dos dados de resposta em frequência  $G_\lambda(j\omega)$  medidos, a partir da minimização do critério de erro definido em (3).

Assim, estabelece-se o seguinte problema de otimização:

$$\min_{\underline{\theta}} J(\underline{\theta}) = \min_{\underline{\theta}} \sum_{\lambda} \left\| D(\underline{\beta}, j\omega) \star G_\lambda(j\omega) - N(\underline{a}^\lambda, j\omega) \right\|_2^2 \quad (4)$$

O método calcula analiticamente os polos e os zeros de maneira ótima, minimizando o custo  $J(\underline{\theta})$  pela solução de um sistema de equações lineares.

## 3. Método Proposto

O método proposto neste artigo representa uma melhoria em relação ao método exposto na Seção 2.2, sendo uma extensão do apresentado em [9] para o caso de sistemas multivariáveis. Nesta melhoria, o problema é formulado incluindo as informações referentes aos valores em regime permanente das respostas temporais do sistema multivariável quando aplicados sinais do tipo degrau unitário em suas entradas. Para a aplicação do método proposto, parte-se da resposta em frequência do sistema sob estudo em um conjunto de valores de frequências, numa faixa de interesse, e das respostas em regime permanente

de cada canal em função da aplicação de sinais do tipo degrau. Diversos modelos podem ser ajustados, conforme as ordens dos mesmos escolhidas a priori. O modelo selecionado será aquele que melhor atenda o compromisso entre um baixo erro de ajuste aos dados fornecidos e a menor ordem possível entre os modelos calculados (parcimônia).

Com relação ao ajuste em baixas frequências, considere o resultado expresso pelo Teorema do Valor Final [10], que estabelece que a resposta  $y(t)$  em regime permanente, caso exista, pode ser determinada por:

$$y(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) \quad (5)$$

O valor de regime permanente  $K_\lambda$  da saída do sistema para cada canal  $\lambda$  quando aplicada uma entrada do tipo degrau unitário, pode ser calculado utilizando-se a propriedade demonstrada em (5):

$$K_\lambda = \lim_{s \rightarrow 0} sG_\lambda(s)U(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sG_\lambda(s) \frac{1}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} G_\lambda(s) \quad (6)$$

Nos casos em que os modelos são identificados a partir de sistemas físicos reais, o valor de  $K_\lambda$  pode ser obtido pela medição dos valores de saída do sistema, em regime permanente, a partir das excitações das entradas com sinais do tipo degrau. Logicamente, é necessário que o sistema sob análise possa ser excitado pelas entradas mencionadas. Quando a técnica proposta é aplicada diretamente a modelos previamente conhecidos, por exemplo em aplicações de redução de ordem de modelos, o valor de  $K_\lambda$  pode ser calculado por:

$$K_\lambda = \frac{a_n^\lambda}{b_n^\lambda}$$

onde  $a_n^\lambda$  e  $b_n^\lambda$  são, respectivamente, os coeficientes independentes de  $s$  nos polinômios do numerador e no denominador da FT de cada canal  $\lambda$ . Para que os modelos identificados respondam da mesma maneira, a seguinte condição deve ser utilizada:

$$a_n^\lambda = K_\lambda \beta_n \quad (7)$$

Assim, os parâmetros  $\alpha_n^\lambda$  deixam de ser variáveis no problema e passam a ser determinados a partir dos valores calculados de  $\beta_n$ . Consequentemente, os modelos passam a contar com um parâmetro a menos de ajuste.

Para o cálculo de modelos próprios, as FT estimadas dos canais do sistema multivariável são representadas de acordo com a seguinte formulação:

$$G_{e, \lambda}(\underline{\theta}, s) = \frac{\alpha_0^\lambda s^n + \alpha_1^\lambda s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1}^\lambda s + K_\lambda \beta_n}{s^n + \beta_1 s^{n-1} + \dots + \beta_{n-1} s + \beta_n} \quad (8)$$

em que:

$$\begin{aligned} \underline{\alpha}^\lambda &= [\alpha_0^\lambda \ \alpha_1^\lambda \ \dots \ \alpha_{n-1}^\lambda]^T \in \mathbb{R}^n \\ \underline{\beta} &= [\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_n]^T \in \mathbb{R}^n \\ \underline{\theta} &= [\underline{\alpha}^\lambda \ \underline{\beta}^T]^T \in \mathbb{R}^{(p,q+1)n} \end{aligned} \quad (9)$$

com o índice  $\lambda \in \Lambda$  representando o canal específico conforme (2).

Assim como apresentado em (3), um critério de erro  $J(\underline{\theta})$  é estabelecido:

$$J(\underline{\theta}) \triangleq \sum_{\lambda} \gamma_{\lambda} \| D(\underline{\beta}, j\underline{\omega}) \star G_{\lambda}(j\underline{\omega}) - N(\underline{\alpha}^\lambda, \beta_n, j\underline{\omega}) \|_2^2 \quad (10)$$

em que  $\gamma_{\lambda}$  representa os coeficientes de ponderação, utilizados para compensar as discrepâncias de valores nas normas dos canais.

A função  $J(\underline{\theta})$  é convexa em relação aos parâmetros estimados em (10). A demonstração é realizada no Lema 1.

**Lema 1:** Seja  $G_{e, \lambda}^n(s)$  as FT a serem estimadas na forma de (8) para cada canal da planta e  $S$  um conjunto convexo, tal que  $\underline{\theta} \in S \subset \mathbb{R}^{(p,q+1)n}$  é o vetor de parâmetros a ser projetado, então  $J(\underline{\theta}) : \mathbb{R}^{(p,q+1)n} \rightarrow \mathbb{R}$  em (10) é uma função convexa.

**Demonstração:** Dado que  $J(\underline{\theta})$  possui um conjunto convexo como domínio, é necessário apenas mostrar que  $\forall \underline{\theta}_a, \underline{\theta}_b \in \mathbb{R}^{(p,q+1)n}$  e  $\forall \delta \in [0,1]$  :

$$J(\delta \underline{\theta}_a + (1 - \delta) \underline{\theta}_b) \leq \delta J(\underline{\theta}_a) + (1 - \delta) J(\underline{\theta}_b)$$

Para simplificar a notação, o argumento  $j\underline{\omega}$  em  $G_{\lambda}$  é omitido e a variável  $s$  é mantida no lugar de  $j\underline{\omega}$ . Assim, verifica-se que:

$$\begin{aligned} & J(\delta \underline{\theta}_a + (1 - \delta) \underline{\theta}_b) = \\ &= \sum_{\lambda} \gamma_{\lambda} \| D(\delta \underline{\beta}_a + (1 - \delta) \underline{\beta}_b) \star G_{\lambda} - N(\delta \underline{\alpha}_a^\lambda + (1 - \delta) \underline{\alpha}_b^\lambda) \|_2^2 \\ &= \sum_{\lambda} \gamma_{\lambda} \| (s^n + (\delta \beta_{a_1} + (1 - \delta) \beta_{b_1}) s^{n-1} + \dots) \star G_{\lambda} + \\ & \quad - [(\delta \alpha_{a_0}^\lambda + (1 - \delta) \alpha_{b_0}^\lambda) s^n + \\ & \quad + \dots + K_{\lambda} (\delta \beta_{a_n} + (1 - \delta) \beta_{b_n})] \|_2^2 \\ &= \sum_{\lambda} \gamma_{\lambda} \| \delta [ (s^n + \beta_{a_1} s^{n-1} + \dots + \beta_{a_n}) \star G_{\lambda} + \\ & \quad - (\alpha_{a_0}^\lambda s^n + \alpha_{a_1}^\lambda s^{n-1} + \dots + K_{\lambda} \beta_{a_n})] + \\ & \quad + (1 - \delta) [ (s^n + \beta_{b_1} s^{n-1} + \dots + \beta_{b_n}) \star G_{\lambda} + \\ & \quad - (\alpha_{b_0}^\lambda s^n + \alpha_{b_1}^\lambda s^{n-1} + \dots + K_{\lambda} \beta_{b_n})] \|_2^2 \\ &\leq \delta \sum_{\lambda} \gamma_{\lambda} \| D(\underline{\beta}_a) \star G_{\lambda} - N(\underline{\alpha}_a^\lambda) \|_2^2 + \\ & \quad + (1 - \delta) \sum_{\lambda} \gamma_{\lambda} \| D(\underline{\beta}_b) \star G_{\lambda} - N(\underline{\alpha}_b^\lambda) \|_2^2 \\ &= \delta J(\underline{\theta}_a) + (1 - \delta) J(\underline{\theta}_b). \end{aligned}$$

□

Como a função  $J(\underline{\theta})$  em (10) é convexa, é possível estabelecer um problema de otimização, o qual possuirá uma única solução que, caso possa ser determinada, representará o seu mínimo global. O Teorema 1 apresenta o problema de otimização proposto e uma forma de cálculo para solucioná-lo.

**Teorema 1:** Considere as respostas em frequência  $G_{\lambda}(j\underline{\omega})$  dos canais  $\lambda$  de um sistema multivariável  $G(s)$ . Um modelo para o sistema poderá ser obtido a partir da solução do seguinte problema de identificação:

$$\min_{\underline{\theta}} J(\underline{\theta}) = \min_{\underline{\theta}} \sum_{\lambda} \gamma_{\lambda} \| D(\underline{\beta}, j\underline{\omega}) \star G_{\lambda}(j\underline{\omega}) - N(\underline{\alpha}^\lambda, \beta_n, j\underline{\omega}) \|_2^2 \quad (11)$$

em que  $\gamma_\lambda$  com  $\lambda \in \Lambda$  são os coeficientes de ponderação das normas, previamente escolhidos e,  $\underline{\theta}$  é o vetor de parâmetros do modelo a ser identificado, isto é:

$$\underline{\theta} = (\alpha_0^{11}, \alpha_1^{11}, \dots, \alpha_{n-1}^{11}, \alpha_0^{21}, \dots, \alpha_{n-1}^{qp}, \beta_1, \dots, \beta_n)^T$$

A solução ótima do problema convexo em (11) pode ser determinada resolvendo-se o seguinte sistema de equações lineares:

$$\underline{Q}\underline{\theta} = \begin{bmatrix} \underline{Q}_1 & \underline{0} & \cdots & \underline{0} & \underline{Q}_2^{11} \\ \underline{0} & \underline{Q}_1 & \cdots & \underline{0} & \underline{Q}_2^{21} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \underline{0} & \underline{0} & \cdots & \underline{Q}_1 & \underline{Q}_2^{qp} \\ \underline{Q}_3^{11} & \underline{Q}_3^{21} & \cdots & \underline{Q}_3^{qp} & \underline{Q}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\alpha}^{11} \\ \underline{\alpha}^{21} \\ \vdots \\ \underline{\alpha}^{qp} \\ \underline{\beta} \end{bmatrix} = \underline{Y} \quad (12)$$

onde as submatrizes  $\underline{Q}_j$  com  $j \in \{1,4\}$ ,  $\underline{Q}_k^\lambda$  com  $k \in \{2,3\}$  e os vetores  $\underline{Y}_\alpha^\lambda$  e  $\underline{Y}_\beta$ , são dados por:

$$\begin{aligned} \underline{Q}_1 &= \sum_{i=1}^m Re \left\{ \begin{bmatrix} R_n \\ R_{n-1} \\ \vdots \\ R_1 \end{bmatrix} [R_n^* \ R_{n-1}^* \ \cdots \ R_1^*] \right\} \\ \underline{Q}_2^\lambda &= \sum_{i=1}^m Re \left\{ \begin{bmatrix} R_n \\ R_{n-1} \\ \vdots \\ R_1 \end{bmatrix} (K_\lambda [0 \ \cdots \ 0 \ R_0^*] - G_\lambda^* [R_{n-1}^* \ R_{n-2}^* \ \cdots \ R_0^*]) \right\} \\ \underline{Q}_3^\lambda &= \gamma_\lambda \sum_{i=1}^m Re \left\{ \begin{bmatrix} R_{n-1} \\ R_{n-2} \\ \vdots \\ R_0 \end{bmatrix} \left( G_\lambda - K_\lambda \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \right) [R_n^* \ R_{n-1}^* \ \cdots \ R_1^*] \right\} \\ \underline{Q}_4 &= \sum_{i=1}^m Re \left\{ \begin{bmatrix} R_{n-1} \\ R_{n-2} \\ \vdots \\ R_0 \end{bmatrix} \left[ \sum_\lambda \gamma_\lambda G_\lambda G_\lambda^* \right] + \right. \\ &\quad \left. - \left[ \sum_\lambda \gamma_\lambda K_\lambda \right] \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} [R_{n-1}^* \ \cdots \ R_0^*] + \right. \\ &\quad \left. - \left[ \sum_\lambda \gamma_\lambda K_\lambda \right] \begin{bmatrix} R_{n-1} \\ R_{n-2} \\ \vdots \\ R_0 \end{bmatrix} \left[ 0 \ \cdots \ R_0^* \left( \sum_\lambda [G_\lambda^* - K_\lambda] \right) \right] \right\} \\ \underline{Y}_\alpha^\lambda &= \sum_{i=1}^m Re \left\{ \begin{bmatrix} R_n \\ R_{n-1} \\ \vdots \\ R_1 \end{bmatrix} G_\lambda^* R_n^* \right\} \\ \underline{Y}_\beta &= \sum_{i=1}^m Re \left\{ \begin{bmatrix} R_{n-1} \\ R_{n-2} \\ \vdots \\ R_0 \end{bmatrix} \left[ \sum_\lambda \gamma_\lambda G_\lambda \right] + \right. \end{aligned}$$

$$- \left[ \sum_\lambda \gamma_\lambda K_\lambda \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ R_0 \end{bmatrix} \right] \left[ \sum_\lambda \gamma_\lambda G_\lambda^* \right] R_n^* \right\}$$

em que  $R_n(j\omega_i) \triangleq (j\omega_i)^n$ ,  $Re\{\cdot\}$ , representa a parte real do argumento e as submatrizes “ $\underline{Q}_1$ ” e “ $0$ ” em (12) apresentam as mesmas dimensões.

Demonstração: Considere a expansão do somatório da função custo apresentada em (10):

$$\begin{aligned} J(\underline{\theta}) &= \gamma_{11} \|D(\underline{\beta}, j\underline{\omega}) * G_{11}(j\underline{\omega}) - N(\underline{\alpha}^{11}, \beta_n, j\underline{\omega})\|_2^2 \\ &\quad + \gamma_{21} \|D(\underline{\beta}, j\underline{\omega}) * G_{21}(j\underline{\omega}) - N(\underline{\alpha}^{21}, \beta_n, j\underline{\omega})\|_2^2 \\ &\quad + \cdots + \gamma_{qp} \|D(\underline{\beta}, j\underline{\omega}) * G_{qp}(j\underline{\omega}) - N(\underline{\alpha}^{qp}, \beta_n, j\underline{\omega})\|_2^2 \\ &= \sum_{i=1}^m \gamma_{11} |D(\underline{\beta}, j\omega_i) G_{11}(j\omega_i) - N(\underline{\alpha}^{11}, \beta_n, j\omega_i)|^2 + \\ &\quad + \sum_{i=1}^m \gamma_{21} |D(\underline{\beta}, j\omega_i) G_{21}(j\omega_i) - N(\underline{\alpha}^{21}, \beta_n, j\omega_i)|^2 + \\ &\quad + \cdots + \sum_{i=1}^m \gamma_{qp} |D(\underline{\beta}, j\omega_i) G_{qp}(j\omega_i) - N(\underline{\alpha}^{qp}, \beta_n, j\omega_i)|^2 \\ &= \sum_{i=1}^m \gamma_{11} \psi_{11}(j\omega_i) \psi_{11}^*(j\omega_i) + \sum_{i=1}^m \gamma_{21} \psi_{21}(j\omega_i) \psi_{21}^*(j\omega_i) + \\ &\quad + \cdots + \sum_{i=1}^m \gamma_{qp} \psi_{qp}(j\omega_i) \psi_{qp}^*(j\omega_i) \\ &= \sum_{i=1}^m [\gamma_{11} \psi_{11}(j\omega_i) \psi_{11}^*(j\omega_i) + \gamma_{21} \psi_{21}(j\omega_i) \psi_{21}^*(j\omega_i) + \\ &\quad + \cdots + \gamma_{qp} \psi_{qp}(j\omega_i) \psi_{qp}^*(j\omega_i)] \\ J(\underline{\theta}) &= \sum_{i=1}^m \left\{ \sum_\lambda \gamma_{qp} [\psi_\lambda(j\omega_i) \psi_\lambda^*(j\omega_i)] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

com  $\psi_\lambda(j\omega_i) = D(\underline{\beta}, j\omega_i)G_\lambda(j\omega_i) - N(\underline{\alpha}^\lambda, \underline{\beta}_n, j\omega_i)$ .

Como esse problema é convexo nas variáveis  $\underline{\alpha}^\lambda$  e  $\underline{\beta}$ , uma condição necessária de otimalidade para a solução é igualar a zero as equações das seguintes derivadas:

$$\nabla J(\underline{\theta}) = \left( \frac{\partial J}{\partial \alpha_0^{11}} \frac{\partial J}{\partial \alpha_1^{11}}, \dots, \frac{\partial J}{\partial \alpha_{n-1}^{qp}} \frac{\partial J}{\partial \beta_1} \frac{\partial J}{\partial \beta_2}, \dots, \frac{\partial J}{\partial \beta_n} \right)^T = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

Derivando parcialmente (13) em relação às componentes de  $\underline{\theta}$ , obtém-se:

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_k} = \sum_{i=1}^m \left( \sum_{\lambda} \gamma_{\lambda} \left[ \frac{\partial \psi_{\lambda}(j\omega_i)}{\partial \theta_k} \psi_{\lambda}^*(j\omega_i) + \psi_{\lambda}(j\omega_i) \frac{\partial \psi_{\lambda}^*(j\omega_i)}{\partial \theta_k} \right] \right)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_k} = \sum_{i=1}^m \left( \sum_{\lambda} 2\gamma_{\lambda} \operatorname{Re} \left\{ \frac{\partial \psi_{\lambda}(j\omega_i)}{\partial \theta_k} \psi_{\lambda}^*(j\omega_i) \right\} \right)$$

O argumento em  $j\omega_i$  é omitido para simplificar a notação.

Fazendo

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha_k} = 0 \quad \text{para } k \in \{0, 1, \dots, n-1\} \quad \text{e } \lambda \in \Lambda,$$

após algumas manipulações algébricas chega-se a:

$$\sum_{i=1}^m \operatorname{Re} \left\{ R_{n-k} [R_n^* \ R_{n-1}^* \ \dots \ R_1^* \ -R_{n-1}^* G_{\lambda}^* \ \dots \ -R_1^* G_{\lambda}^* \ -R_0^* (G_{\lambda} - K_{\lambda})] \right\} \underline{\theta} = \sum_{i=1}^m \operatorname{Re} \left\{ R_{n-k} R_n^* G_{\lambda}^* \right\} \quad (14)$$

De modo semelhante para as variáveis  $\beta_k$  com  $k \in \{1, 2, \dots, n-1\}$ , obtém-se:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m \operatorname{Re} \left\{ R_{n-k} \left[ \sum_{\lambda} \gamma_{\lambda} G_{\lambda} \right] [R_n^* \ R_{n-1}^* \ \dots \ R_1^* \ -R_{n-1}^* G_{\lambda}^* \ \dots \ -R_1^* G_{\lambda}^* \ -R_0^* (G_{\lambda} - K_{\lambda})] \right\} \underline{\theta} = \\ & = \sum_{i=1}^m \operatorname{Re} \left\{ R_{n-k} \left[ \sum_{\lambda} \gamma_{\lambda} G_{\lambda} G_{\lambda}^* \right] R_n^* \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

e por fim para  $\beta_n$ , tem-se que:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m \operatorname{Re} \left\{ R_0 \left[ \sum_{\lambda} \gamma_{\lambda} (G_{\lambda} - K_{\lambda}) \right] [R_n^* \ R_{n-1}^* \ \dots \ R_1^* \ -R_{n-1}^* G_{\lambda}^* \ \dots \ -R_1^* G_{\lambda}^* \ -R_0^* (G_{\lambda} - K_{\lambda})] \right\} \underline{\theta} = \\ & = \sum_{i=1}^m \operatorname{Re} \left\{ R_0 \left[ \sum_{\lambda} \gamma_{\lambda} (G_{\lambda} - K_{\lambda}) G_{\lambda}^* \right] R_n^* \right\} \quad (16) \end{aligned}$$

Agrupando-se as  $n_{qp}$  equações em (14), as  $(n-1)$  equações em (15) e a equação em (16), obtém-se o sistema de equações lineares em (12).  $\square$

## 4. Aplicações numéricas

Nesta seção, são apresentados três exemplos que explicitam algumas vantagens da modificação proposta para sistemas multivariáveis. Algumas análises comparativas são realizadas entre os modelos identificados pela aplicação do método N2CACGO na sua forma original e pelo Método Proposto (MP). Nos exemplos, consideraram-se todos os coeficientes de ponderação iguais a 1. A notação para o canal  $y:u$  utilizada, refere-se à combinação formada pela saída  $y$  e a entrada  $u$  de um sistema com  $p$  entradas e  $q$  saídas sob análise.

Para avaliar os modelos identificados foram utilizados dois índices. No primeiro índice, foi considerado o erro de ajuste das respostas em frequência, baseado em norma quadrática, entre os modelos original  $G(s)$  e o identificado  $G_e^n(s)$ :

$$I_{RF} = \sum_{\lambda} \|G_{\lambda}(j\omega) - G_{e,\lambda}^n(j\omega)\|_2 \quad (17)$$

em um conjunto  $\underline{\omega} = [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_m]$  contendo  $m$  valores de frequências escolhidas na faixa de interesse.

No segundo índice, foi considerado o erro entre as respostas ao degrau  $y_{\lambda}(t)$  do sistema analisado em relação às dos modelos identificados  $y_{e,\lambda}(t)$ , sendo definido pela integral do erro quadrático, conforme:

$$I_{ISE} = \sum_{\lambda} \int_0^{\infty} [y_{\lambda}(t) - y_{e,\lambda}(t)]^2 dt \quad (18)$$

onde o limite é ajustado em cada exemplo para um tempo finito, considerando que tenha sido atingida a resposta em regime permanente.

O critério utilizado para a escolha da ordem dos modelos dos exemplos foi baseado nos índices  $I_{RF}$  e  $I_{ISE}$  encontrados para cada ordem  $n$ , selecionando-se o modelo que apresenta os índices com os menores valores mas observando-se também um compromisso com o critério da parcimônia, conforme já mencionado no início da Seção 3, ou seja, um compromisso entre um baixo erro de ajuste aos dados fornecidos e a menor ordem possível do modelo ajustado.

É importante ressaltar que, apesar de os índices (17) e (18) terem sido considerados para avaliação dos modelos obtidos, esses foram ajustados de maneira ótima pelo critério em (3), mas não por (17). Caso o índice em (17) fosse empregado na metodologia proposta, o problema se tornaria não convexo em relação aos parâmetros a serem determinados.

## 4.1 Exemplo I

Neste exemplo, realiza-se uma análise comparativa entre dois modelos identificados de oitava ordem para um sistema SIMO (*Single Input Multiple Output*) com uma entrada e duas saídas. Os dados de resposta em frequência foram obtidos a partir de uma MFT gerada aleatoriamente por uma rotina computacional, com as seguintes características: décima segunda ordem, estável e de fase mínima. Os coeficientes dos numeradores e denominadores da MFT original estão apresentados na **tabela A.1** do Apêndice.

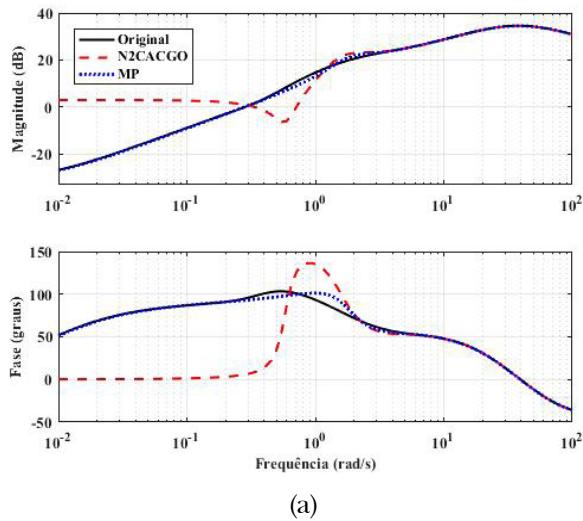
A **figura 1** apresenta os diagramas de resposta em frequência dos modelos original e dos identificados de ordem 8 pelos métodos N2CACGO e proposto. Observa-se que ao comparar as respostas em frequência dos modelos identificados, o modelo obtido pelo método N2CACGO não apresentou um bom ajuste na faixa de baixas frequências.

As respostas em frequência da MFT original apresentam diferenças relativas entre os valores em módulo nas faixas de baixas e altas frequências.

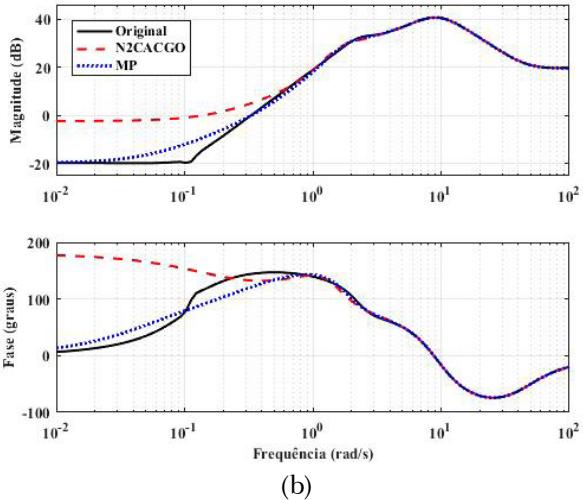
Como o método N2CACGO é baseado na otimização do custo de ajuste entre as respostas em frequência do sistema original e do modelo identificado sem realizar a normalização desses valores, o ajuste na faixa de altas frequências foi priorizado pela metodologia, visto que possui valores mais significativos, prejudicando o ajuste em baixas frequências. Isso foi apresentado na **figura 2**, que representa os erros entre as respostas em frequência dos modelos identificados quando comparadas com as do modelo original. Quando a modificação proposta é aplicada, observa-se que o ajuste em baixa frequência passa a ser satisfatório, uma vez que garante que os valores dos coeficientes independentes de  $s$  do modelo original e do identificado sejam definidos por uma mesma razão numérica, tratando o problema existente no método N2CACGO na sua forma original para a ordem considerada do sistema.

A **figura 3** mostra os detalhes das respostas ao degrau unitário do modelo original e dos identificados pelos dois métodos. Verifica-se que o modelo identificado pelo método N2CACGO na sua forma original apresenta erro estacionário, em regime permanente, nas respostas ao degrau unitário em relação às respostas do modelo original. O modelo identificado pelo método proposto e original convergem para o mesmo valor, em virtude de as razões entre os coeficientes independentes de  $s$  nos modelos original e identificado pela abordagem proposta serem idênticas.

Na **tabela 1**, encontram-se os erros de ajuste dos modelos identificados, levando em consideração os índices definidos em (17) e (18). Consideraram-se 100 valores de frequência espaçados de forma logarítmica na faixa estabelecida entre  $10^{-2}$  e  $10^2$  rad/s para o cálculo do índice  $I_{RF}$ . Utilizou-se um intervalo de tempo 15s para o cálculo do índice  $I_{ISE}$ . Observa-se que os erros de ajuste encontrados quando aplicado o método proposto são bem menores do que os erros com a aplicação do N2CACGO original, especialmente para o índice  $I_{ISE}$ , que apresenta uma considerável queda nos valores.



(a)

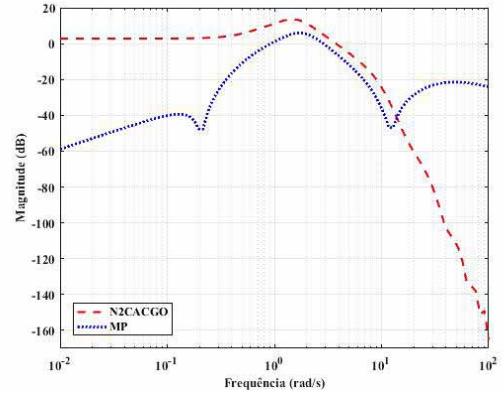


(b)

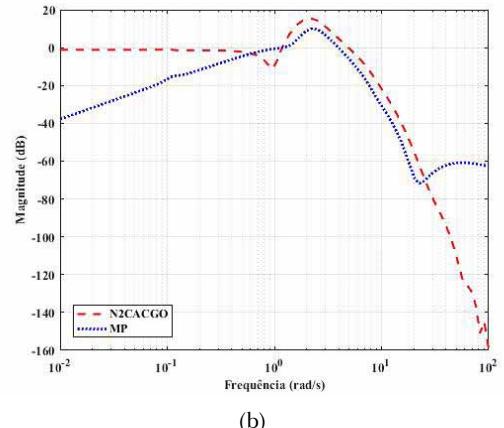
**Fig. 1** – Respostas em frequência do sistema original e dos modelos identificados de ordem 8 pelos métodos N2CACGO e proposto (MP), para o **exemplo I**: (a) Canal 1:1; (b) Canal 2:1.

Percebe-se também que o modelo obtido pelo método proposto é estável e de fase mínima, no entanto, o modelo estimado pelo método N2CACGO na sua forma original é estável, mas de fase não-mínima (apresentou um zero no semiplano  $s$  direito no canal 2:1 do sistema) para esse caso. Os zeros e os polos dos modelos identificados são apresentados na **tabela A.2** do Apêndice. Para obter melhores ajustes na aplicação de métodos de identificação, de maneira geral, aumenta-se a ordem do modelo estimado. Imediatamente, o efeito resultante ao modelo estimado é uma maior complexidade matemática. No

entanto, quando o método N2CACGO na sua forma original é utilizado, deve-se considerar a possibilidade de que o modelo obtido possa ser instável ou de fase



(a)



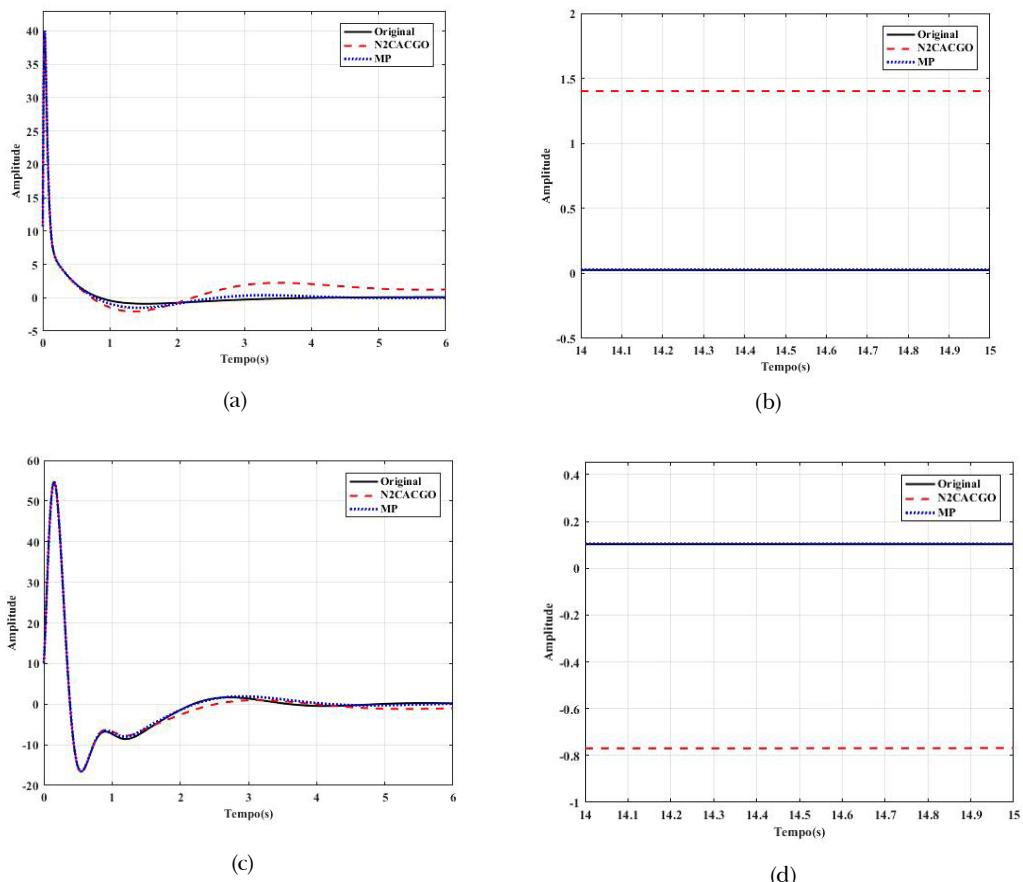
(b)

**Fig. 2** – Erro nas respostas em frequência entre o modelo original e os identificados de ordem 8 pelos métodos N2CACGO e proposto (MP), para o **exemplo I**: (a) Canal 1:1; (b) Canal 2:1.

não-mínima, em razão da eventual escolha para o modelo de ordem superior à necessária para a reprodução adequada do comportamento dinâmico.

**Tab. 1** – Erros de ajuste dos modelos identificados (**exemplo I**).

Método	N2CACGO	MP
$I_{RF}/\text{Canal } (I_{RF})$	1:1	17,8483
	2:1	15,8982
$I_{RF} \text{ total } (I_{RF} = \sum I_{RF_{\lambda}})$		33,7465
$I_{ISE}/\text{Canal } (I_{ISE})$	1:1	28,7753
	2:1	11,3898
$I_{ISE} \text{ total } (I_{ISE} = \sum I_{ISE_{\lambda}})$		40,1651
		2,0023



**Fig. 3** – Detalhes das respostas ao degrau unitário dos modelos original e identificados de ordem 8 pelos métodos N2CACGO e proposto (MP), para o **exemplo I**: (a) Canal 1:1 de 0 a 6 s; (b) Canal 1:1 de 14 a 15 s; (c) Canal 2:1 de 0 a 6 s; e (d) Canal 2:1 de 14 a 15 s.

## 4.2 Exemplo II

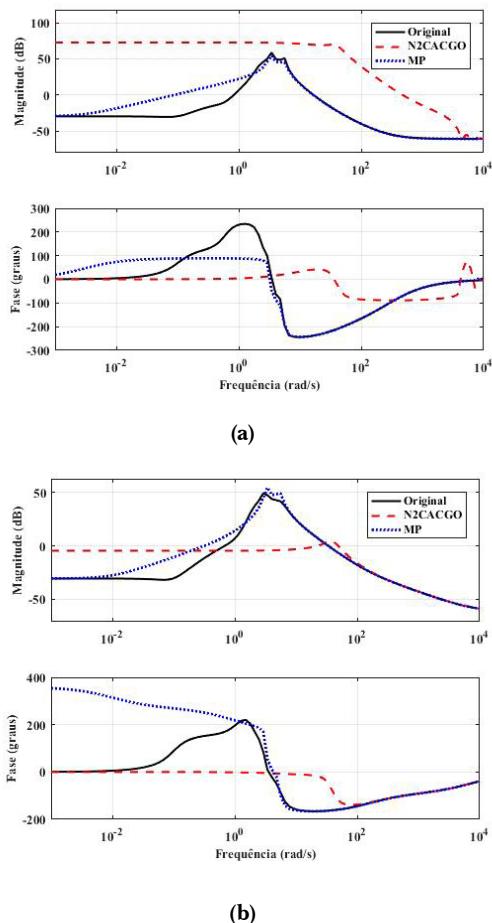
O **exemplo II** tem o objetivo de analisar comparativamente os modelos identificados evidenciando suas vantagens e limitações do MP, além de mostrar a importância de selecionar uma faixa de frequência adequada para o processo de identificação. Os dados de resposta em frequência foram obtidos a partir de uma MFT gerada aleatoriamente por uma rotina computacional com as seguintes características: décima ordem, estável, de fase mínima, e com uma entrada e duas saídas. Os coeficientes dos numeradores e denominadores da MFT original estão apresentados na **tabela A.3** do Apêndice.

Com base no comportamento das respostas em frequência do modelo original, adotou-se uma ampla faixa de frequência para o processo de identificação,

estabelecida entre  $10^{-3}$  a  $10^4$  rad/s. Para essa faixa de frequência, os modelos de décima ordem, identificados pelos métodos N2CACGO e MP, além de não apresentarem um ajuste satisfatório das respostas em frequência foram instáveis e de fase não-mínima. Na **figura 4**, estão representados os diagramas de resposta em frequência do modelo original e dos identificados de ordem 10, aplicando os dois métodos considerando a faixa de frequência de  $10^{-3}$  a  $10^4$  rad/s.

Especificando uma faixa de frequência mais restrita, como a definida entre  $10^{-1}$  a  $10^{1.5}$  rad/s, os resultados são significativamente melhorados, uma vez ter sido priorizado o intervalo onde o comportamento dinâmico apresentava mais relevância. Com essa faixa de frequência, foi possível identificar modelos estáveis e com erros de ajuste relativamente menores. No entanto, o método N2CACGO na sua forma original

identificou um modelo de fase não-mínima, com dois zeros no semiplano  $s$  direito para ambos os canais do sistema, ao contrário do modelo estimado pela abordagem proposta, que apresentou fase mínima. Na **tabela A.4** do Apêndice, encontram-se os valores numéricos dos zeros e polos dos modelos identificados. Assim como no **exemplo I**, verifica-se que o modelo identificado pelo MP apresentou um ajuste melhor na faixa de baixas frequências, como pode ser visto nos diagramas de respostas em frequência da **figura 5**.



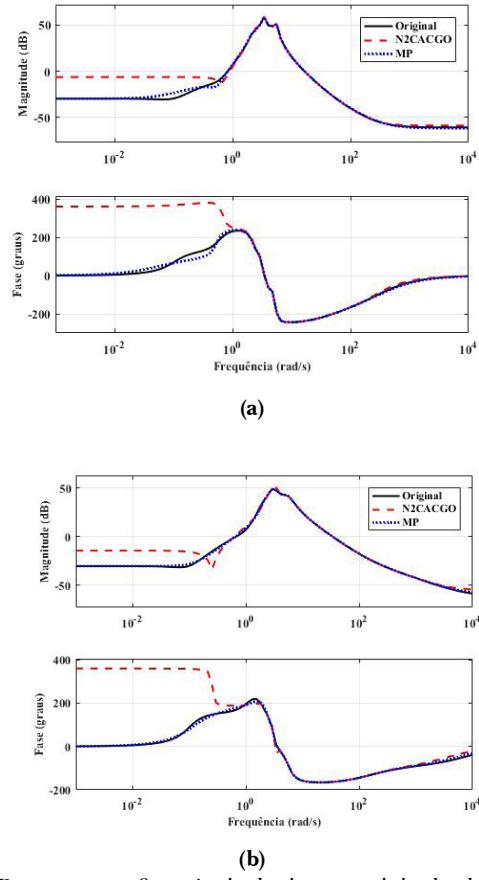
**Fig. 4** – Respostas em frequência do sistema original e dos modelos identificados de ordem 10 na faixa de frequência de  $10^{-3}$  a  $10^4$  rad/s pelos métodos N2CACGO e proposto (MP), para o **exemplo II**: (a) Canal 1:1; (b) Canal 2:1.

A **tabela 2** apresenta os erros de ajuste dos modelos identificados, levando em consideração o índice definido em (17). Consideraram-se 100 valores de frequência espaçados de forma logarítmica na faixa estabelecida entre  $10^{-1}$  a  $10^{1.5}$  rad/s para o cálculo do

índice  $I_{RF}$ . Assim como no **exemplo I**, observa-se que os erros de ajuste encontrados quando aplicado o método proposto são inferiores aos erros obtidos a partir da aplicação do N2CACGO original, especialmente na faixa de baixas frequências. Isso se deve à garantia do novo método em manter a mesma razão numérica entre os valores dos coeficientes independentes de  $s$  do modelo original e do identificado, o que também pode ser visto na **figura 6**, que apresenta os erros entre as respostas em frequência dos dois modelos identificados de ordem 10 quando comparadas às do modelo do sistema original.

**Tab. 2** – Erros de ajuste dos modelos identificados (**exemplo II**).

Método	N2CACGO	MP
$I_{RF}/\text{Canal}$ ( $I_{RF}$ )	1:1	109,6130
	2:1	239,7275
$I_{RF}$ total ( $I_{RF} = \sum I_{RF_A}$ )	349,3404	71,4032



**Fig. 5** – Respostas em frequência do sistema original e dos modelos identificados de ordem 10 na faixa de frequência de  $10^{-1}$  a  $10^{1.5}$  rad/s pelos métodos N2CACGO e proposto (MP), para o **exemplo II**: (a) Canal 1:1; (b) Canal 2:1.

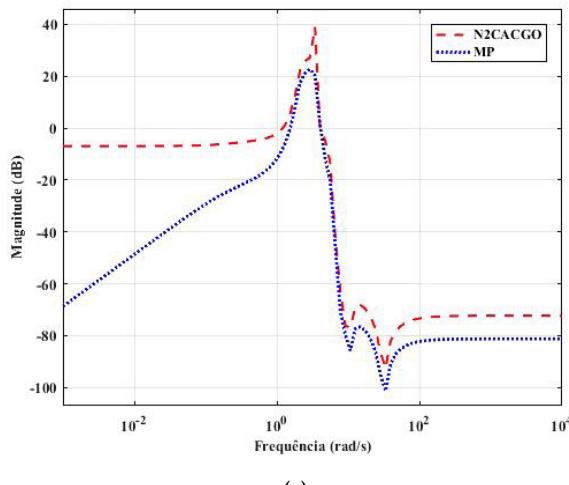
### 4.3 Exemplo III

O propósito deste exemplo é simular o MP em sistemas industriais e comparar os resultados com os do método N2CACGO original. O modelo utilizado possui duas entradas e duas saídas e é representado pela seguinte MFT [11]:

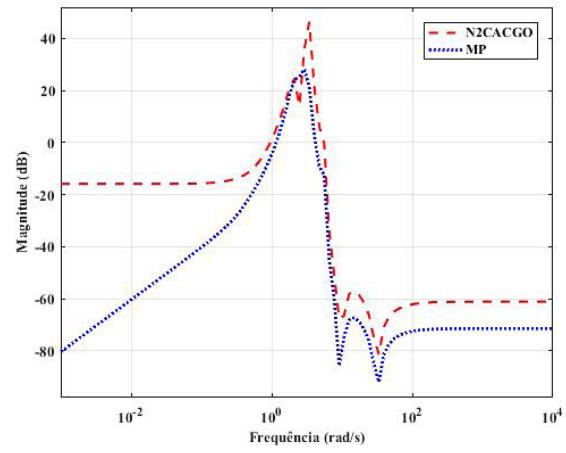
$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(s+1)^5} & \frac{1-1,4s}{(s+1)^3} \\ 2(0,5s+1)e^{-0,1s} & \frac{1}{(s+1)(4s+1)} \\ \frac{1}{(2s+1)^4} & \end{bmatrix} \quad (19)$$

A FT  $G_{21}(s)$  em (19) apresenta um atraso representado por  $e^{-0,1s}$ . Um modelo de um sistema com atraso pode apresentar complexidade de manipulação, uma vez que a FT envolvida não é uma razão de polinômios em  $s$ . Para solucionar tal problema, são utilizadas técnicas de aproximação [12] para representar o termo referente ao atraso por uma função racional por meio de uma expansão em série. Foi utilizada a aproximação de Padé de primeira ordem para representar o atraso contido na FT  $G_{21}(s)$ .

Neste exemplo, foram escolhidos modelos de ordem 6, uma vez que apresentaram bons ajustes. Nas **tabelas 3 e 4**, estão representados os erros de ajuste dos modelos identificados levando em consideração os índices definidos, respectivamente, em (17) e (18). Consideraram-se 100 valores de frequência espaçados



(a)



(b)

**Fig. 6** – Erro nas respostas em frequência entre o modelo original e os identificados de ordem 10 na faixa de frequência de  $10^{-2}$  a  $10^{1,5}$  rad/s pelos métodos N2CACGO e proposto (MP), para o **exemplo II**: (a) Canal 1:1; (b) Canal 2:1.

de forma logarítmica na faixa estabelecida entre  $10^{-2}$  a  $10^1$  rad/s para o cálculo do índice  $I_{RF}$ . Para o cálculo de índice  $I_{ISE}$ , foi utilizado um intervalo de tempo 45 s.

**Tab. 3** – Erros de ajuste dos modelos identificados (**exemplo III**):  $I_{RF}$ .

Método	N2CACGO	MP
1:1	1,8955	0,6552
2:1	0,3217	0,0988
$I_{RF}/\text{Canal } (I_{RF})$	0,3255	0,2856
2:2	1,7477	0,6508
$I_{RF} \text{ total } (I_{RF} = \sum I_{RF_i})$	4,2904	1,6904

**Tab. 4** – Erros de ajuste dos modelos identificados (**exemplo III**):  $I_{ISE}$ .

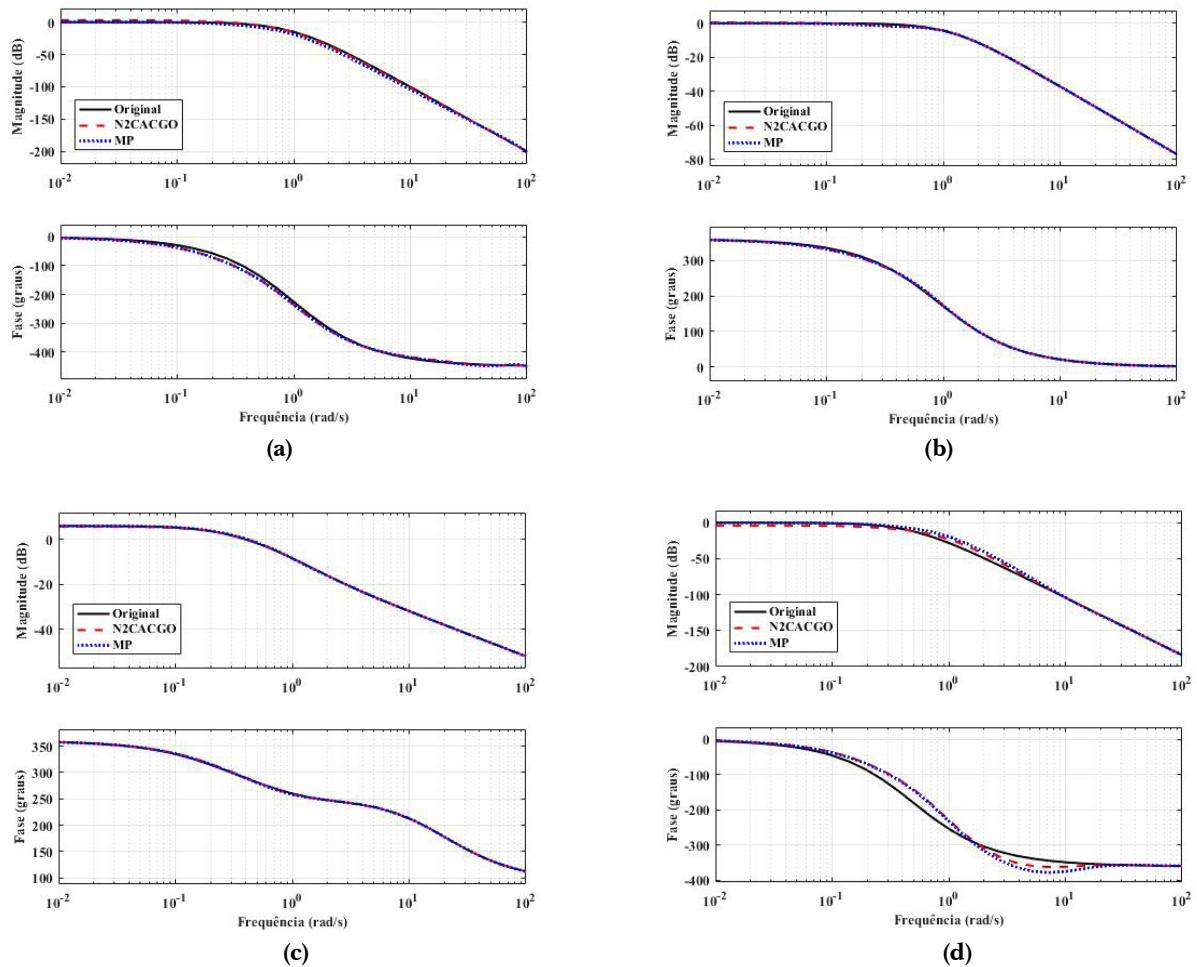
Método	N2CACGO	MP
1:1	5,2422	0,2124
2:1	0,1402	0,0049
$I_{ISE}/\text{Canal } (I_{ISE})$	0,0746	0,0390
2:2	4,2445	0,1872
$I_{ISE} \text{ total } (I_{ISE} = \sum I_{ISE_i})$	9,7015	0,4435

Na **figura 7**, são apresentados os diagramas de resposta em frequência do modelo original e dos identificados de ordem 6, aplicando o método N2CACGO na sua forma original e o método

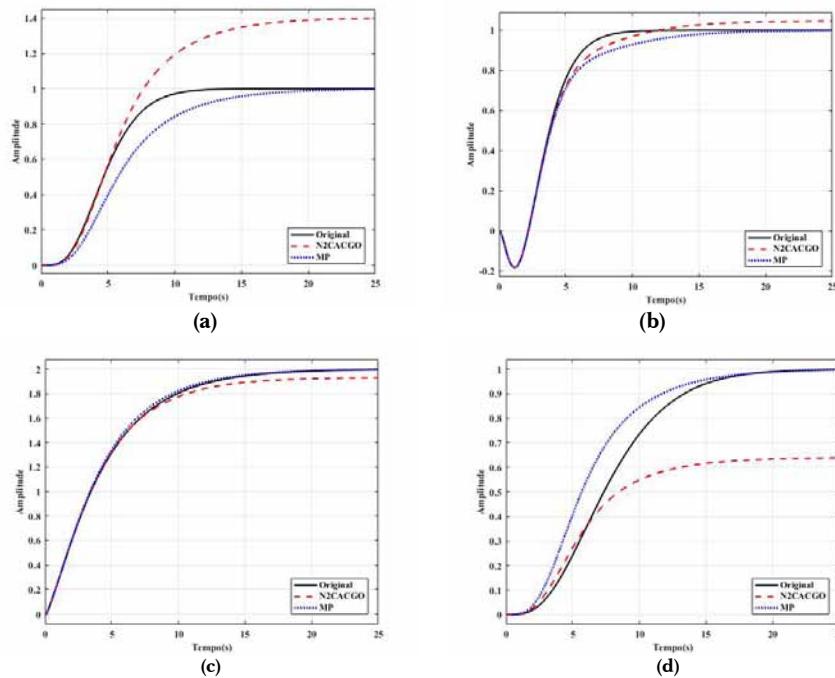
proposto. Percebe-se que o ajuste das respostas em frequência é satisfatório para ambos os métodos. No entanto, os erros de ajuste dos modelos identificados pelo método proposto são bem menores do que os erros obtidos pelo método N2CACGO na sua forma original, principalmente em relação aos índices  $I_{ISE}$ , que são significativamente reduzidos.

Nas **figuras 8 e 9**, podem-se observar os detalhes das respostas ao degrau unitário do modelo original e dos identificados pelos dois métodos. Constatase-

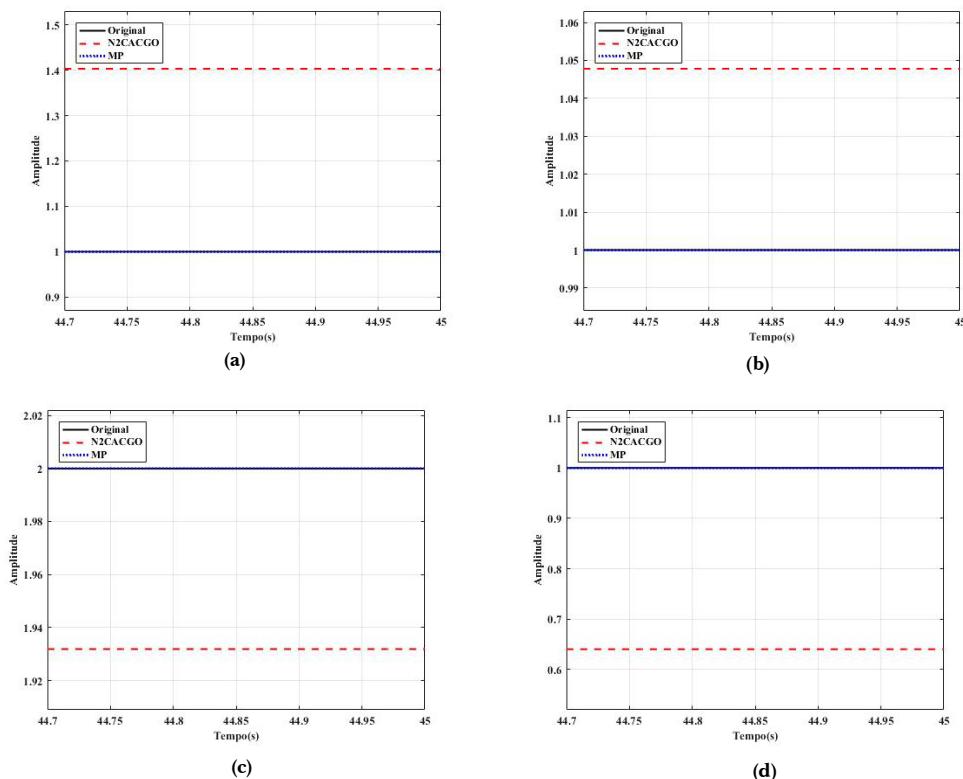
que o modelo identificado pelo método N2CACGO na sua forma original apresenta erro estacionário, em regime permanente, nas respostas ao degrau unitário em relação às respostas do modelo original. Como os coeficientes independentes de  $s$  nas FT do modelo identificado pelo MP se igualaram aos correspondentes do modelo original, os valores de regime permanente nos gráficos das respostas ao degrau de cada canal desses modelos também acabaram por coincidir.



**Fig. 7** – Respostas em frequência do sistema original e dos modelos identificados de ordem 6 pelos métodos N2CACGO e proposto (MP), para o **exemplo III**: (a) Canal 1:1; (b) Canal 1:2; (c) Canal 2:1; e (d) Canal 2:2.



**Fig. 8** – Detalhes das respostas ao degrau unitário dos modelos original e identificados de ordem 6 pelos métodos N2CACGO e proposto (MP) de 0 a 25 s, para o **exemplo III**: (a) Canal 1:1; (b) Canal 1:2; (c) Canal 2:1; e (d) Canal 2:2.



**Fig. 9** - Detalhes das respostas ao degrau unitário dos modelos original e identificados de ordem 6 pelos métodos N2CACGO e proposto (MP) de 44,7 a 45 s, para o **exemplo III**: (a) Canal 1:1; (b) Canal 1:2; (c) Canal 2:1; e (d) Canal 2:2.

## 5. Análise dos resultados

O método proposto foi testado em três exemplos de sistemas multivariáveis, sendo também comparado ao método N2CACGO multivariável na sua forma original conforme apresentado em [8]. Os modelos identificados pelo método proposto obtiveram um melhor ajuste, de acordo com os critérios estabelecidos, em todos os exemplos analisados. O método proposto neste artigo permitiu a identificação de modelos estáveis. Nos exemplos I e III, as respostas temporais a uma entrada do tipo degrau unitário não apresentaram erro de estado estacionário. Nos exemplos I e II, a abordagem proposta possibilitou também a identificação de modelos de fase mínima. Além disso, o método proposto ainda manteve a característica presente no método N2CACGO multivariável [8], identificando modelos com o mesmo polinômio característico para todos os canais considerados. Dessa forma, reduziu-se significativamente o número de parâmetros estimados e diminuiu-se o tempo de processamento computacional, facilitando o cálculo de realizações da matriz função de transferência com ordens provavelmente mínimas. Ao considerar que os modelos compartilham o mesmo polinômio característico também surgem algumas limitações, como no caso de sistemas que possuem dinâmicas muito diferentes em cada canal, por exemplo, em processos petroquímicos. Nesses casos, a identificação de cada canal separadamente seria mais adequada para evitar sobre-parametrização de coeficientes de numeradores com inserção desnecessária de zeros. Por outro lado, haverá um aumento no número de parâmetros a serem calculados nos denominadores das FT, já que cada canal apresentará um polinômio

característico diferente. Uma das vantagens de utilizar um denominador comum é a possibilidade de se conseguir uma realização mímina ou quase mímina.

Quanto ao ajuste dos coeficientes de ponderação das normas dos canais, as dificuldades encontradas são em relação a identificar quais os canais do sistema requerem essa ponderação, para que um canal não seja ponderado desnecessariamente. Uma análise mais detalhada a respeito das ponderações das normas dos canais será realizada futuramente.

## 6. Conclusão

Neste artigo, foi proposta uma melhoria no método de identificação no domínio da frequência N2CACGO para sistemas multivariáveis, sendo uma extensão do método apresentado em [9]. O método proposto considera as informações referentes aos valores em regime permanente das respostas temporais do sistema multivariável a entradas do tipo degrau unitário, com a finalidade de reduzir os erros entre as respostas do sistema e as do modelo identificado. Os exemplos utilizados explicitaram algumas vantagens relativas do novo método. Conforme analisado, o método proposto foi capaz de identificar modelos estáveis e de fase mínima, sendo uma alternativa complementar ao método apresentado em [8] para a obtenção de modelos multivariáveis com essas características.

## Agradecimentos

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

## Referências Bibliográficas

- [1] Pintelon, R. and Schoukens, J. System Identification: A Frequency Domain Approach, Second edition, 2012.
- [2] Ljung, L. System identification: theory for the user, Second edition, Prentice Hall, 1997.
- [3] Keesman, K. J. System identification: an introduction, Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, Springer, 2011.
- [4] Aguirre, L. A. Introdução à identificação de sistemas. Editora UFMG, 2007, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- [5] Ljung, L. Some classical and some new ideas for identification of linear systems. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, vol. 24, pp. 3-10, 2013.
- [6] Pintelon, R., Guillaume, P., Rolain, Y., Schoukens, J. e Van Hamme, H. Parametric identification of transfer functions in frequency domain – a survey. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 39, pp. 2245-2260, nr. 11, 1994.
- [7] Schoukens, J., Pintelon, R. and Rolain Y., Time domain identification, frequency domain identification. Equivalencies! Diferences?, Proceedings of the 2004 American Control Conference, pp. 661-666, 2004.
- [8] Oliveira, M. A., Pellanda, P. C., Ades, R. and Silveira, B. P., Time data-based iterative method for frequency-domain multivariable systems identification by optimized expansion of rational functions. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, vol. 30, pp. 666-676, 2019.
- [9] Oliveira, M. A., Ades, R. e Pellanda, P. C., Identificação de sistemas lineares com base na resposta temporal ao degrau unitário e por ajuste ótimo da resposta em frequência, Revista Militar de Ciência e Tecnologia, vol. 35, pp. 45-53, 2018.
- [10] Rasof, B. The initial- and final-value theorems in Laplace transform theory. Journal of the Franklin Institute, vol. 273, nr. 3, pp. 165-177, set. 1962.
- [11] Oliveira, M. A., Ades, R. e Pellanda, P. C., Método iterativo de identificação de modelos dinâmicos multivariáveis no domínio da frequência a partir de sinais temporais, XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI, 2017.
- [12] Piché, R. Low-order rational all-pass approximations to . IFAC Proceedings Volumes, vol. 23, nr. 8, pp. 183-186, 1990.

## Apêndices

**Tab. A.1** – Coeficientes dos numeradores e denominadores da MFT original do **exemplo I**.

Grau em s	1:1		2:1	
	num	den	num	den
$s^{12}$	10,63	1,00	10,00	1,00
$s^{11}$	3893,00	80,04	641,90	35,25
$s^{10}$	44090,00	2099,00	25010,00	480,50
$s^9$	185900,00	14400,00	148000,00	4258,00
$s^8$	418800,00	49310,00	492500,00	19780,00
$s^7$	578300,00	101500,00	942700,00	58980,00
$s^6$	521500,00	136200,00	1017000,00	119300,00
$s^5$	315900,00	123700,00	603100,00	157700,00
$s^4$	128800,00	76980,00	184900,00	127800,00
$s^3$	34430,00	32430,00	28030,00	58090,00
$s^2$	5546,00	8880,00	3344,00	12500,00
$s^1$	420,30	1436,00	235,80	950,80
$s^0$	2,975	104,60	12,13	116,90

**Tab. A.2** – Zeros e polos dos modelos identificados de ordem 8 para o **exemplo I**.

N2CACGO			
Zeros		Polos	
1:1	2:1		
-354,70+j0,00	-28,90+j35,69	-35,896+j13,741	
-18,69+j0,00	-28,90-j35,69	-35,896-j13,741	
-13,93+j0,00	-35,86+j13,74	-18,970+j0,000	
-4,55+j8,32	-35,86-j13,74	-13,249+j0,000	
-4,55-j8,32	-12,38+j0,00	-4,473+j8,323	
-3,89+j0,00	-0,74+j0,68	-4,473-j8,323	
-0,09+j0,58	-0,74-j0,68	-0,657+j1,441	
-0,09-j0,58	0,17+j0,00	-0,657-j1,441	

MP			
Zeros		Polos	
1:1	2:1		
-353,95+j0,00	-28,89+j35,69	-35,900+j13,740	
-19,57+j0,00	-28,89-j35,69	-35,900-j13,740	
-4,46+j8,30	-35,91+j13,72	-19,467+j0,000	
-4,46-j8,30	-35,91-j13,72	-4,455+j8,282	
-6,42+j0,00	-2,48+j0,86	-4,455-j8,282	
-1,35+j1,12	-2,48-j0,86	-4,247+j0,000	
-1,35-j1,12	-0,38+j0,00	-0,799+j1,659	
-0,01+j0,00	-0,05+j0,00	-0,799-j1,659	

**Tab. A.3** – Coeficientes dos numeradores e denominadores da MFT original do **exemplo II**.

Grau em s	1:1		2:1	
	num	den	num	den
$s^{10}$	0,000915	1,000	0,0009165	1,000
$s^9$	0,596	4,295	7,279	6,319
$s^8$	108,100	53,600	1105,000	60,330
$s^7$	3915,000	182,100	4617,000	216,200
$s^6$	11040,000	818,000	9037,000	810,900
$s^5$	13280,000	2010,000	10760,000	1799,000
$s^4$	9255,000	4090,000	7941,000	3174,000
$s^3$	4133,000	5976,000	3327,000	3824,000
$s^2$	1018,000	4649,000	691,300	2607,000
$s^1$	102,500	1620,000	61,730	895,400
$s^0$	6,090	184,400	3,604	120,300

**Tab. A.4:** Zeros e polos dos modelos identificados de ordem 10 para o **exemplo II**.

N2CACGO		
Zeros		Polos
1:1	2:1	
-233,81+j131,29	-3890,63+j0,00	-1,237+j5,486
-233,81-j131,29	-153,80+j0,00	-1,237-j5,486
-43,19+j0,00	-0,24+j5,40	-0,243+j5,404
-1,23+j5,49	-0,24-j5,40	-0,243-j5,404
-1,23-j5,49	-0,07+j3,55	-0,146+j3,427
-0,25+j3,36	-0,07-j3,55	-0,146-j3,427
-0,25-j3,36	-0,97+j1,95	-0,327+j3,313
0,09+j068	-0,97-j1,95	-0,327-j3,313
0,09-j0,68	0,01+j0,26	-0,359+j2,281
-0,52+j0,00	0,01-j0,26	-0,359-j2,281

MP		
Zeros		Polos
1:1	2:1	
-457,25+j0,00	-5988,92+j0,00	-1,221+j5,489
-215,61+j0,00	-151,44+j0,00	-1,221-j5,489
-44,09+j0,00	-0,24+j5,40	-0,243+j5,403
-1,22+j5,49	-0,24-j5,40	-0,243-j5,403
-1,22-j5,49	-0,21+j3,42	-0,198+j3,394
-0,46+j3,05	-0,21-j3,42	-0,198-j3,394
-0,46-j3,05	-0,91+j1,46	-0,416+j3,065
-0,11+j0,52	-0,91-j1,46	-0,416-j3,065
-0,11-j0,52	-0,09+j0,08	-0,407+j2,181
-0,05+j0,00	-0,09-j0,08	-0,407-j2,181

# ATLAS-DET: um código para o cálculo de propriedades termodinâmicas de explosivos

Paulo Couceiro\*

MAXAM

Avenida del Partenón, 16, 28042, Madri, Espanha.

paulocouceiro@gmail.com\*

**RESUMO:** As características termodinâmicas de explosivos industriais podem ser quantificadas ao calcular o equilíbrio químico do sistema à elevadas pressões e densidades. Uma vez que a maioria dos códigos termodinâmicos são propriedades de organizações públicas ou privadas, o desenvolvimento de uma alternativa independente torna-se necessária para atender uma crescente necessidade quanto à modelagem de explosivos em diversos setores da indústria. Assim, o objetivo deste artigo é a elaboração de um código de cálculo termodinâmico ideal, chamado ATLAS-DET, fundamentado na minimização da energia livre do sistema e nas equações de estado BKW e JCZ, para a caracterização do estado de detonação Chapman-Jouguet de explosivos industriais. Os resultados foram validados para um grupo de explosivos conhecidos como CHNO, apresentando variabilidades compatíveis com a faixa de comportamento encontrados por outros autores e códigos similares.

**PALAVRAS-CHAVE:** Explosivos. Detonação. BKW. JCZ.

**ABSTRACT:** The thermodynamic characteristics of industrial explosives can be quantified by calculating the chemical equilibrium of the system at high pressures and densities. Since most thermodynamic codes belong to public or private organizations, the development of an independent alternative becomes necessary to attend a growing demand for explosive modelling in various sectors of the industry. Thus, the objective of this paper is the elaboration of an ideal thermodynamic calculation code, called ATLAS-DET, based on the free-energy minimization of the system and on the BKW and JCZ equations of state, for the characterization of the Chapman-Jouguet detonation state of industrial explosives. The results were validated for a group of explosives known as CHNO and have presented variabilities within the range of behaviour found by other authors and similar codes.

**KEYWORDS:** Explosives. Detonation. BKW. JCZ

## 1. Introdução

As primeiras incursões no processo de combustão e detonação de materiais energéticos surgiram no final do século XIX com investigações conduzidas por Berthelot & Vieille [1, 2] e por Mallard & Le Chatelier [3] sobre a propagação de chamas. Em seguida, na virada do século, os elementos básicos da teoria da detonação unidimensional foram formulados por Chapman [4] e Jouguet [5, 6], dando origem a teoria Chapman-Jouguet (CJ) de detonação. Um avanço fundamental ocorreu quase simultaneamente, e de forma independente, por Zeldovich [7] na Rússia, von Neumann [8] nos Estados Unidos e Doering

[9] na Alemanha. Como resultado, surgiu o modelo ZND de detonação. A partir da segunda metade do século XX, impulsionados principalmente pela corrida armamentista e espacial, um grande avanço no entendimento do fenômeno da detonação foi observado.

Diversos programas e códigos termodinâmicos foram elaborados nas últimas décadas com o intuito de realizar cálculos relativos ao equilíbrio químico e estados de detonação de materiais energéticos. Muitos desses códigos são propriedades de entidades, organizações ou companhias individuais como os códigos IDeX, IPX, VIXEN, W-DETCOM, entre outros, ou estão sujeitas a restrições estratégicas devido sua relevância em temas de defesa e segurança

nacionais, como o TIGER ou CARTE [10]. O RUBY [11] e FORTRAN BKW [12] foram os primeiros de uma série de códigos termodinâmicos [13]. Em 1973, uma versão melhorada do TIGER [14], em uma versão para o Windows, foi publicada com o nome de TIGER-WIN [15]. Contudo, um dos códigos mais confiáveis e completos foi o CHEETAH [16, 17, 18, 19], que incorpora condições de estado e cinéticas das reações. Na década de 80, foi desenvolvido na Espanha o DETCOM [20], logo melhorada em 1991, com a versão W-DETCOM [21]. Muitos outros códigos termodinâmicos foram desenvolvidos nos últimos anos, tais como BLAKE [22], WINEX [23], CLARK [24], EXPLO5 [25], VIXEN [26], entre outros.

Uma vez que a maioria dos códigos termodinâmicos são proprietários, tem-se a necessidade de escrever um código termodinâmico ideal para quantificar, de forma independente, os parâmetros termodinâmicos que descrevem os estados de detonação de materiais energéticos de interesse para a indústria. No presente trabalho, o estado de detonação ideal é aquele em que se assume um fluxo unidimensional, de choque plano e diâmetro infinito, apresentando uma zona de reação muito fina, tendo toda a energia liberada no plano CJ [27, 28]. Portanto, este artigo visa o desenvolvimento e validação de um código termodinâmico ideal, chamado ATLAS-DET, para o cálculo das propriedades CJ de explosivos. Este código permitirá descrever as propriedades termodinâmicas resultantes de uma determinada formulação química e densidade, em uma estrutura de cálculo baseada em duas equações de estados, BKW e JCZ.

## 2. Fundamentação teórica

### 2.1 A detonação ideal

O entendimento ordinário sobre uma detonação ideal, segundo Sanchidrián & Muñiz [29], é aquele idealizado, onde a detonação é plana, unidimensional e estacionária, em que a reação se produz de forma instantânea durante a passagem da onda de choque. Idealmente, a onda de choque gerada por uma detonação é suportada pela energia química liberada

na frente de onda de reação ou próxima a ela, sendo a detonação um fluxo auto-suportado onde a propagação ocorre a uma velocidade de reação constante [30]. Neste caso, a frente de reação da detonação é bem definida, como um choque, uma descontinuidade, que se propaga a uma velocidade constante de reação conhecida por velocidade de detonação. Esta descontinuidade separa a região do explosivo ainda intacto, ainda não reagido, da região dos produtos de reação, que são predominantemente gasosos [29]. Portanto, o estado de detonação ideal pode ser entendido como aquele de um fluxo unidimensional plano (curvatura  $\kappa = 0$ ) e diâmetro de carga infinito, onde todas as reações químicas e a energia liberada ocorrem no plano CJ de detonação [28].

### 2.2 Funções termodinâmicas fundamentais

A realização de cálculos termodinâmicos requer o conhecimento das propriedades termodinâmicas básicas dos componentes que formam o explosivo e dos produtos resultantes da detonação. Sanchidrián et al. [31] apresentam as variáveis termodinâmicas fundamentais para o cálculo de um estado de detonação, tais como a energia interna, entalpia, entropia, calor específico, potencial químico, energia livre, entre outros. Informações sobre a energia de formação dos principais ingredientes estão disponíveis na literatura, como *Kohler & Mayer* [32], por exemplo.

Os programas de cálculo termodinâmicos requerem uma rápida solução das equações que constituem o equilíbrio químico do problema. Esta tarefa requer, entre outros parâmetros, informações termodinâmicas, para uma determinada temperatura, de todas as espécies envolvidas no processo de cálculo. Os parâmetros molares principais, como a entalpia, calor específico e entropia, são dados tanto na forma de modelos polinomiais, em função da temperatura, a exemplo das correlações publicadas pela NASA [33], como em tabelas termodinâmicas JANAF [34].

Neste trabalho, optou-se por usar correlações polinomiais de 9-constantes desenvolvidas pela *NASA Glenn Research Center*, o qual mantém um banco de dados com mais de 2000 espécies. Os coeficientes dos

polinômios foram obtidos por ajustes de mínimos quadrados sobre valores experimentais ou calculados através de funções termodinâmicas, tanto para espécies condensadas como gasosas [33, 35].

## 2.3 Equilíbrio químico

O cálculo do equilíbrio químico talvez seja uma das etapas mais importantes no processo de cálculo termodinâmico da combustão de um explosivo [36, 20, 27, 13]. Métodos distintos podem ser usados para determinar o equilíbrio de um sistema, tal como o balanço dos potenciais químicos ou minimização da energia livre. No caso da minimização da energia livre, por se tratar de um processo de minimização não-linear de elevada dimensão – com múltiplos equilíbrios químicos, devido a combinação dos inúmeros produtos resultantes da reação –, sujeita ao balanço de matéria (massa e não negatividade), o método de resolução deve ser robusto o suficiente para permitir a obtenção do mínimo global do sistema. Como exemplos de soluções, White et al. [36] desenvolveram uma solução usando a técnica steepest descent. Sanchidrián [20], por sua vez, propôs uma solução aplicando o método dos multiplicadores de Lagrange. Borg et al. [27], em contraste, expôs soluções em base a métodos de máxima pendente e probabilístico. Recentemente, Lopez [13] propôs um método de minimização baseado no gradiente projetado.

No presente trabalho, a função objetivo  $f(x)$  a minimizar será a energia livre resultante do equilíbrio químico dos produtos resultantes da detonação. Para um dado sistema de  $s$  componentes, a energia livre de Gibbs,  $G(n)$ , ou Helmholtz,  $A(n)$ , é mínima quanto o sistema se encontra em equilíbrio. Assim, a estratégia se baseia em obter, como consequência do processo de minimização, uma composição de equilíbrio  $n_i$  sujeita a umas restrições de balanço de massa e não negatividade. Portanto, tem-se que

$$\min_{n_i} G(n_i) \text{ ou } A(n_i) \quad (1)$$

onde a solução,  $n_i$ , deve verificar as seguintes condições

$$b_j = \sum_{i=1}^{n_p} a_{ij} n_i \quad ; \quad j = 1, 2 \dots n_e \quad (2)$$

onde  $b_j$  representa os números de mols por kg de cada elemento presente;  $a_{ij}$  é a matriz de coeficientes do elemento  $j$  no produto  $i$ ;  $n_e$  é o número de elementos;  $n_p$  é o número de produtos de detonação;  $n_i$  é a composição de equilíbrio da espécie  $i$ .

O método do ponto interior ou da barreira, desenvolvido na década de 1960, é o escolhido para a realização dos cálculos de minimização da energia livre do sistema no presente trabalho. Experimentos numéricos indicam que o método do ponto interior é normalmente mais rápido que métodos do tipo SQP, para problemas longos, particularmente quando a quantidade de variáveis livres é grande [37], o que parece adequado para o caso do equilíbrio químico de elevadas dimensões. Este método tem sido usado com êxito para a resolução de importantes problemas de otimização não-linear [37].

## 2.4 Equações de estado

No campo descritivo da termodinâmica de materiais energéticos, uma equação de estado deve ser capaz de comportar-se adequadamente em condições de altíssimas pressões e densidades. A capacidade de prever os parâmetros termodinâmicos de um explosivo, em um determinado estado de detonação, assim como a composição de equilíbrio correspondente, é largamente governada pela equação de estado selecionada para descrever os diferentes produtos e fases da detonação [38]. No presente artigo, estuda-se-ão duas equações de estado para descrever os produtos gasosos, a BKW e JCZ, e uma para os condensados.

### 2.4.1 Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW)

A equação de estado Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW) tem sido amplamente usada para determinar as propriedades e os estados de detonação de inúmeros explosivos [20, 12]. Sua primeira versão data de 1921, introduzida por Becker e desenvolvida anos depois por Kistiakowsky & Wilson [39] e Cowan & Fickett [40]. A forma final da equação de estado BKW é

$$\frac{Pv_g}{RT} = (1 + Xe^{\beta X}) \quad (3)$$

onde os parâmetros usados no modelo BKW são  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\kappa$ ,  $\theta$ ;  $R$  é a constante universal dos gases,  $P$  é a pressão e  $T$ , a temperatura;  $v_g$  é o volume molar.

O fator de imperfeição BKW vem dada por

$$F = 1 + Xe^{\beta X} \quad (5)$$

onde  $X$  é definido como

$$X = \frac{K}{v_g(T + \theta)^\alpha} \quad (6)$$

onde  $K$  é um covolume, definido como

$$K = \kappa \sum_{i=1} x_i k_i \quad (4)$$

onde  $x_i = n_i / n_g$  é a fração molar;  $k_i$  é covolume de cada espécie gasosa  $i$ ;  $n_g$  é número de moles gasosos por unidade de massa;  $n_i$  é composição de uma mistura (moles do composto  $i$  por unidade de massa).

**Tab. 1** – Principais conjuntos de parâmetros para a equação de estado BKW [13].

Parâmetros	$\alpha$	$\beta$	$\theta$	$\kappa$	Referência
BKW-R	0.5	0.18	1850	11.8	[43]
BKW-S'	0.5	0.17	5160	11.85	[44]
BKW-S	0.5	0.298	6620	10.5	[41]
BKW-C	0.5	0.403	5441	10.86	[42]

**Tab. 2** – Covolumes BKW-S

Composto	Estado	Covolume
C	Condensado	250
CH <sub>4</sub>	Gás	493
CO	Gás	614
CO <sub>2</sub>	Gás	663
H	Gás	69
H <sub>2</sub>	Gás	153
H <sub>2</sub> O	Gás	376
NH <sub>3</sub>	Gás	418
NO	Gás	394
NO <sub>2</sub>	Gás	626
N <sub>2</sub>	Gás	376
N <sub>2</sub> O	Gás	812
OH	Gás	372
O <sub>2</sub>	Gás	316

A equação de estado BKW é estritamente empírica. Seus coeficientes ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\kappa$  e  $\theta$ ) e covolumes têm sido alvo de constantes reparametrizações e calibrações (**tabela 1**) com o intuito de se conseguir uma boa aproximação aos valores experimentais das velocidades e pressões de detonação, sendo as últimas constantes publicadas por Hobbs & Baer [41] e Fried & Souers [42], conhecidas como BKW-S e BKW-C respectivamente. Entretanto, ainda que a última parametrização importante seja a BKS-C, a versão mais amplamente usada é a BKW-S, devido a que se dispõe de uma mais ampla base de dados de produtos [13].

O conjunto de parâmetros adotado no presente trabalho é o BKW-S, publicado por Hobbs & Baer [41], que é o mesmo usado pelos códigos termodinâmicos CHEETAH e W-DETCOM [13]. Os covolumes correspondentes a esse jogo de parâmetros podem ser observados na **tabela 2** [44].

## 2.4.2 Jacobs-Cowperthwaite-Zwisler (JCZ)

A equação de estado JCZ foi apresentada por Cowperthwaite & Zwisler [45] como uma expansão da equação de estado desenvolvida por Jacobs [46, 47], ao introduzir regras de misturas para  $n$  moles de  $s$  espécies de produtos, em uma dada relação termodinâmica entre a pressão, temperatura e volume. A JCZ se baseia na mecânica estatística ao utilizar os potenciais intermoleculares para descrever o comportamento termodinâmico dos produtos resultantes da detonação de materiais energéticos [45].

Quando apropriadamente parametrizada, a equação de estado JCZ oferece uma melhora substancial frente a BKW não somente quanto a capacidade preditiva das pressões e velocidades, mas também da temperatura, composição de equilíbrio e expansões isentrópicas [48]. Neste sentido, um substancial esforço foi dedicado nas últimas quatro décadas ao desenvolvimento das parametrizações mais apropriadas para a JCZ [45, 48, 49, 50, 51, 52]. A limitada disponibilidade de espécies gasosas nos primeiros anos de aplicação da JCZ foi superada nos anos 90 com a introdução do banco de dados proposto por Hobbs et al. [53]. Este banco de dados, apresentado parcialmente na **tabela 3**, conhecido por

JCZ-S, em referência ao laboratório de Sandia, USA, incorporou 56 elementos, 747 gases e mais de 400 produtos condensados [52].

**Tab. 3** – Conjunto de Parâmetros JCZ-S [53]

Composto	Estado	$r^*$	$\epsilon/k$
C	Condensado	3,70	71,4
CH <sub>4</sub>	Gás	4,23	154
CO	Gás	3,88	98
CO <sub>2</sub>	Gás	4,22	244
H	Gás	2,00	145
H <sub>2</sub>	Gás	2,85	38
H <sub>2</sub> O	Gás	3,06	356
NH <sub>3</sub>	Gás	3,33	481
NO	Gás	4,15	117
NO <sub>2</sub>	Gás	4,77	349
N <sub>2</sub>	Gás	4,00	102
N <sub>2</sub> O	Gás	4,30	232
OH	Gás	3,29	80
O <sub>2</sub>	Gás	3,86	125

A definição da equação de estado JCZ, formulada por Cowperthwaite & Zwisler [45], é

$$P = \frac{nRT}{V} G(V, T) + p_o(V) \quad (7)$$

onde  $P$ ,  $n$ ,  $R$ ,  $T$  e  $V$  representam a pressão, número de mols, constante universal dos gases, temperatura e o volume específico respectivamente. Sendo

$$n = \sum_{i=1}^s n_i \quad (8)$$

onde  $s$  é o número total de espécies gasosas.

Ademais, a JCZ incorpora duas funções:  $G(V, T)$  e  $p_o(V)$ . A primeira função introduz a contribuição termal das pressões geradas pelas forças intermoleculares enquanto a segunda trata de captar a pressão reticular ao longo da isotermia em zero grau. Para gases ideais, se aproxima a 1 e  $p_o(V)$  a zero. Essas funções dependem do potencial intermolecular, e sua dependência não é trivial [52].

A função  $p_o(V)$ , definida com base na estatística termodinâmica, foi proposta por Jacobs [47] como

$$p_o(V) = -\frac{dE_o}{dV} \quad (9)$$

onde  $E_o$  é o volume potencial, definida como uma função dos componentes adimensionais de repulsão e atração  $\varphi_R$  e  $\varphi_A$  respectivamente, tal que

$$E_o = \frac{e_o ml}{2(l-m)} (\varphi_R - \varphi_A) \quad (10)$$

onde  $l$  e  $m$  são os expoentes repulsivos e atrativos, respectivamente, e  $e_o$  a profundidade do vale do potencial na distância de equilíbrio  $r^*$ .

As funções de repulsão e atração,  $\varphi_R$  e  $\varphi_A$ , são definidas, de acordo com Cowperthwaite & Zwisler [45], como

$$\varphi_R = \frac{B_l}{l} \exp \left[ l - l \left( \frac{V^*}{V} \right)^{-1/3} \right] \quad (11)$$

$$\varphi_A = \frac{B_m}{m} \left( \frac{V^*}{V} \right)^{m/3} \quad (12)$$

onde  $B_l$  e  $B_m$  são as constantes de Madelung para o caso de sistemas cristalinos cúbicos de face centrada. Os valores de  $e_o$  e  $V^*$  são calculados através de regras específicas de misturas de distintas espécies.

A seleção do par de funções que representam os potenciais intermoleculares é extremamente importante. Normalmente, o termo de atração,  $m$ , é assumido como 6. Por outro lado, o termo repulsivo,  $l$ , pode assumir distintos valores dependendo do tipo de par de potenciais elegido. Quando selecionado o par de potenciais 6-12, o valor de  $l$  é, consequentemente, 12, e a equação de estado chama-se JCZ-2. Da mesma forma, quando o par de potenciais é do tipo 13,5-6, o valor de termo repulsivo,  $l$ , é fixado como 13,5 e a equação se passa a chamar JCZ-3 [54]. A equação de estado JCZ-3, ademais, emprega uma função de repulsão do tipo exponencial 6 (EXP 6).

### 2.4.3 Equação de estado para condensados

Nem todos os produtos resultantes de uma detonação são gasosos. Frequentemente se encontram

produtos condensados em estado líquido e/ou sólido, principalmente quando o explosivo é muito deficitário em oxigênio [13]. Entre os mais comuns, encontram-se o grafite e a alumina. Sanchidrián [20] utiliza uma estratégia em base à aplicação de coeficientes de compressibilidade isotérmica  $x_t$  e dilatação isobárica constantes  $\alpha_p$ , definidas como

$$x_t = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_T \quad (13)$$

$$\alpha_p = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \quad (14)$$

para quantificar o efeito dos produtos condensados no processo de detonação. Entretanto, alguns códigos termodinâmicos assumem que os produtos condensados se mantenham incompressíveis durante todo o processo de detonação.

Aplicando o conceito de compressibilidade isotérmica e dilatação isobárica, Sanchidrián [20] define uma equação adequada para contabilizar a variação da densidade (ou volume específico) de acordo com as variações das pressões e temperatura, em um determinado estado de equilíbrio químico do sistema. Esta equação é dada por

$$\rho = \rho_o \frac{1 + \frac{x_t}{2}(P - P_o) - \frac{3}{2}\alpha_p(T - T_o)}{1 - \frac{x_t}{2}(P - P_o) + \frac{3}{2}\alpha_p(T - T_o)} \quad (15)$$

onde  $\rho$  e  $\rho_o$  representam a densidade e densidade inicial; é o subíndice que denota o estado inicial do explosivo.

A equação (15) pode ser usada para estimar o volume total dos produtos condensados, tendo em conta a quantidade em massa de tais produtos. De posse deste valor, o volume total dos produtos de detonação pode ser avaliado e, como consequência, o volume realmente ocupado pelos gases [13].

## 2.5 Estratégia de cálculo

A **figura 1** apresenta a estrutura geral do código ATLAS-DET. Constitui-se, pois, de um conjunto

de funções termodinâmicas e demais informações químicas dos elementos que compõem o explosivo estudado, com rotinas de cálculos específicos. A estratégia de cálculo adotada é similar àquelas aplicadas por Mader [12], Sanchidrián [20] e Borg et al. [27]. Trata-se de um processo interativo, onde determinadas relações devem ser atendidas para que as condições de equilíbrio químico e estado de detonação se cumpram.

Primeiramente, calcula-se a energia interna do explosivo em base a sua formulação química. Em seguida, forma-se um grupo de possíveis produtos de detonação, como consequência da combinação dos elementos químicos presentes na formulação do explosivo, que serão a base da mistura das espécies nos cálculos seguintes.

O processo interativo se inicia ao assumir uma temperatura  $T$  (normalmente 3000 K) e um volume específico  $v$  iniciais. Logo, calculam-se as funções termodinâmicas fundamentais (energia interna, entalpia, entropia, entre outros) e a pressão,  $P$ , correspondentes a essa temperatura. Com esse conjunto de parâmetros, procede-se ao cálculo do equilíbrio químico através da minimização da energia livre de Gibbs ou Helmholtz. Uma vez em equilíbrio, reavaliam-se um novo volume específico e, consequentemente, uma nova pressão. Contudo, os parâmetros termodinâmicos resultantes desta nova composição de equilíbrio,  $n$ , não estão necessariamente sobre a curva de Hugoniot, que é a curva que define todos os choques possíveis do material. Assim, a equação da energia

$$E - E_o = \frac{1}{2}(P + P_o)(v_o - v) \quad (16)$$

deve ser resolvida para uma nova temperatura,  $T$ , uma vez que as equações de estado são funções da temperatura. Como consequência, a composição de equilíbrio anterior deixa de ser válida, sendo necessário um novo cálculo da composição de equilíbrio, em um processo interativo sobre a temperatura, até que se atinja o nível de tolerância desejado.

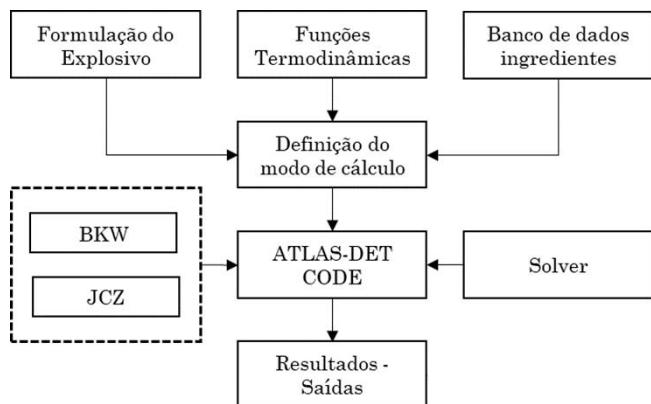


Fig. 1 – Estrutura do código ATLAS-DET.

Concluídas as interações sobre a temperatura, os valores remanescentes do problema cumprem os critérios para estar sobre a curva de Hugoniot. Entretanto, o volume específico resultante não corresponde necessariamente ao estado de detonação CJ. Para tanto, deve-se observar o cumprimento da condição Chapman-Jouguet, que é aquela em que a inclinação da reta de Rayleigh é igual a tangente da curva de Hugoniot, o que significar dizer que

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{P - P_o}{v - v_o}\right) \quad (17)$$

A **equação 17** fornece os mecanismos necessários para que se realizem as interações necessárias sobre o volume específico, de tal modo que se cumpra a condição CJ. Uma vez que o volume específico é recalculado, a temperatura e composição de equilíbrio anterior deixam de ser válidas. Assim, realizam-se novos cálculos do equilíbrio químico, da pressão e da temperatura, iniciando o processo interativo novamente até que as tolerâncias numéricas sobre a temperatura e o volume específico no plano CJ sejam atingidas.

Concluído o processo interativo, os valores remanentes nas variáveis do problema, tais como a pressão, temperatura, volume específico, composição de equilíbrio, entre outros, correspondem ao do estado de detonação Chapman-Jouguet. Finalmente, calculam-se os demais parâmetros que descrevem a detonação, tais como: velocidade de detonação,

$D$ , calor de detonação,  $Q_d$ , calor de explosão,  $Q_v$ , volume de gases, coeficiente adiabático, velocidade de partícula, entre outros.

### 3. Validação e discussão de resultados

Um código termodinâmico de cálculo, denominado ATLAS-DET, foi programado em MATLAB a fim de estudar as propriedades resultantes dos produtos de detonação de explosivos. Baseado na teoria Chapman-Jouguet, o código ATLAS-DET incorpora tanto a equação de estado BKW como a JCZ, o que permite caracterizar o estado de detonação ideal mais provável de um dado explosivo.

Portanto, a fim de validar a correta implementação deste código, e das respectivas equações de estado, distintos explosivos foram selecionados, tais como a nitropenta (PETN), trinitrotolueno (TNT), nitroglicerina (NG) e hexogênio (RDX). Esta seleção permite comparar materiais energéticos com características moleculares e balanços de oxigênio distintos. Os resultados obtidos com o ATLAS-DET foram comparados com resultados provenientes de ensaios experimentais e de outros códigos termodinâmicos, tais como o W-DETCOM, BKW, TIGER, AMRL, ETARC e CHEETAH, entre outros. Os parâmetros mais importantes de um estado de detonação, tais como a pressão de detonação, temperatura e velocidade de detonação, resultantes do estado CJ de detonação, foram avaliados.

#### 3.1 Explosivos CHNO

A validação do código ATLAS-DET foi realizada para um grupo de explosivos considerados ideais, também denominados de altos explosivos. Classificados como explosivos secundários, por requererem uma ignição mais intensa quando comparados com os explosivos primários, os explosivos selecionados são bastante usados na prática, seja do ponto de vista militar como também no âmbito civil. As características desses explosivos, tais como sua formulação química, energia de formação e balanço de oxigênio são apresentadas na **tabela 4**. Estes materiais

– normalmente monomoleculares – formam parte de um grupo de substâncias explosivas conhecidas como CHNO.

**Tab. 4 – Formulações de Referência.**

Explosivo	Fórmula Química	Energia de Formação à 298K	Balanço de Oxigênio
RDX	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	417 kJ/kg	-21,608 %
PETN	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> N <sub>4</sub> O <sub>12</sub>	-1590 kJ/kg	-10,122 %
TNT	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub>	-185 kJ/kg	-73,962 %
NG	C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>9</sub>	-1547 kJ/kg	3,523 %

Como se pode observar, procurou-se incluir explosivos fortemente deficitários em oxigênio, uma vez que formam uma grande quantidade de carbono sólido entre os produtos de detonação [13], assim como outros materiais energéticos que apresentam um melhor balanço de oxigênio. Tais valores de balanço de oxigênio, combinadas com distintas densidades, permitem realizar uma justa avaliação do código ATLAS-DET quanto a sua capacidade de descrever as propriedades termodinâmicas de explosivos, para ambas as equações de estado, BKW e JCZ.

### 3.2 Equação de estado BKW

Primeiramente, comparou-se a performance do código ATLAS-DET, para a equação de estado BKW-S, com resultados publicados por distintos autores e códigos termodinâmicos, tais como o W-DETCOM [13], CHEETAH [43], SDA [27], BKW [12] e EXPLO5 [55], juntamente com resultados experimentais [51]. O objetivo é assegurar a correta implementação da equação BKW no código ATLAS-DET. Entretanto, as comparações com os códigos SDA, BKW e EXPLO5 se apresentam a título informativo, pois eles utilizaram distintos conjuntos de parâmetros de calibração. Como consequência, a comparação do código ATLAS-DET, a título de implementação, se realizou somente contra os códigos W-DETCOM e CHEETAH.

**Tab. 5 – Resultados para PETN com BKW**

PETN (g/cm <sup>3</sup> )	ATLAS-DET (BKW-S)			Outros Códigos (BKW)			Ref
	P (GPa)	D (m/s)	T (K)	P (GPa)	D (m/s)	T (K)	
1,76	31,1	8846	4420				
	-8,4%	6,5%	-	33,7 <sup>1</sup>	8270 <sup>1</sup>	-	[51]
	-0,3%	5,6%	0,7%	31,2 <sup>2</sup>	8351 <sup>2</sup>	4387 <sup>2</sup>	[13]
	-0,3%	2,0%	3,2%	31,2 <sup>3</sup>	8670 <sup>3</sup>	4280 <sup>3</sup>	[43]
	-2,3%	4,8%	35,9%	31,8 <sup>5</sup>	8421 <sup>5</sup>	2833 <sup>5</sup>	[12]
	0,0%	2,1%	1,6%	31,1 <sup>6</sup>	8660 <sup>6</sup>	4349 <sup>6</sup>	[55]
1,67	27,7	8488	4486				
	-5,4%	6,3%	-	29,2 <sup>1</sup>	7957 <sup>1</sup>	-	[51]
	-0,7%	5,5%	32,8%	27,9 <sup>4</sup>	8024 <sup>4</sup>	3014 <sup>4</sup>	[27]
	-1,1%	5,1%	32,7%	28 <sup>5</sup>	8056 <sup>5</sup>	3018 <sup>5</sup>	[12]
1,00	9,01	5767	4821				
	25,6%	13,3%	-	6,7 <sup>1</sup>	5000 <sup>1</sup>	-	[51]
	-11,0%	-3,9%	3,8%	10 <sup>3</sup>	5990 <sup>3</sup>	4640 <sup>3</sup>	[43]
	-8,5%	-2,8%	17,9%	9,78 <sup>4</sup>	5929 <sup>4</sup>	3958 <sup>4</sup>	[27]
	-12,1%	-3,1%	17,7%	10,1 <sup>5</sup>	5947 <sup>5</sup>	3970 <sup>5</sup>	[12]
0,50	2,65	4058	4960				
	-1,9%	8,6%	-	2,7 <sup>1</sup>	3711 <sup>1</sup>	-	[51]
	-9,1%	-6,2%	7,3%	2,89 <sup>4</sup>	4308 <sup>4</sup>	4599 <sup>4</sup>	[27]
	-14,3%	-6,3%	9,4%	3,03 <sup>5</sup>	4313 <sup>5</sup>	4493 <sup>5</sup>	[12]

<sup>1</sup> Experimental; <sup>2</sup> W-DETCOM; <sup>3</sup> CHEETAH; <sup>4</sup> SDA; <sup>5</sup> BKW; <sup>6</sup> EXPLO5.

A **tabela 5** apresenta os resultados obtidos para o caso da PETN, para massas específicas que variam entre 0,50 g/cm<sup>3</sup> e 1,76 g/cm<sup>3</sup>. Para altas massas específicas, os resultados entre os códigos foram excelentes, com diferenças na pressão de detonação de apenas -0,3%, quando comparado com os códigos W-DETCOM e CHEETAH a uma massa específica de 1,76 g/cm<sup>3</sup>. A título informativo, a descrição completa dos parâmetros termodinâmicos CJ, incluindo a composição de equilíbrio, resultantes da detonação da PETN a 1,76 g/cm<sup>3</sup>, pode ser observada na **tabela 6**. Por outro lado, ainda que uma maior diferença tenha sido observada para a massa específica de 1,00 g/cm<sup>3</sup>,

com diferenças nas pressões de -11% quando comparadas com o CHEETAH, o resultado obtido com o ATLAS-DET foi o que melhor se aproximou aos valores experimentais.

**Tab. 6** – PETN a uma massa específica de 1,76 g/cm<sup>3</sup>

Código ATLAS-DET	
Cálculo de equilíbrio químico	Ponto interior
Equação de estado	BKW-S
Nome do Explosivo	PETN_1760
Composição da Fórmula do Explosivo	
C5H8N4O12	100 %
Massa específica do Explosivo	1760 kg/m <sup>3</sup>
Energia de Formação à 298K	-1590 kJ/kg
Balanço de Oxigênio	-10,122 %
Número de produtos gasosos	13
Número de produtos condensados	1
ESTADO DE DETONAÇÃO CJ Ideal	
Temperatura	4419,963 K
Pressão	31,1107 GPa
Velocidade de Detonação	8846 m/s
Velocidade de Partícula	1998 m/s
Volume de Gás em condições normais	694,31 L/kg
Volume relativo v/v0	0,7741
Coeficiente adiabático	3,4272
Composição dos Produtos de Detonação	
Produto	mol/kg
CH <sub>4</sub>	0,626
CO	0,001
CO <sub>2</sub>	15,189
H	0,000
H <sub>2</sub>	0,003
H <sub>2</sub> O	7,575
NH <sub>3</sub>	2,549
NO	0,001
NO <sub>2</sub>	0,000
N <sub>2</sub>	5,051
N <sub>2</sub> O	0,000
OH	0,002
O <sub>2</sub>	0,000
C_S	0,000
Número de Moles gasosos	30,9958 mol/kg
Outros parâmetros termodinâmicos	
Calor de Detonação	6288,95 kJ/kg
Calor de Explosão	6376,83 kJ/kg
Entropia	6922,65 J/(mol*K)
Energia Livre	-3945,76 kJ/kg

No caso do RDX, as variações com relação à pressão

de detonação foram maiores quando comparado com o CHEETAH, tal como se pode apreciar na **tabela 7**, obtendo uma diferença de -7,4% para o caso da massa específica de 1,82 g/cm<sup>3</sup>. Para esta massa específica, a diferença com o W-DETCOM foi menor, obtendo uma pressão -4,5% inferior. Já para uma massa específica de 1,80 g/cm<sup>3</sup>, a diferença observada com o CHEETAH foi de apenas -2,1%. Por outro lado, maiores variações foram observadas para o caso de 1,00 g/cm<sup>3</sup>. Entretanto, o código ATLAS-DET foi o que mais se aproximou ao valor experimental da pressão de detonação à 1,00 g/cm<sup>3</sup>, apresentando uma diferença de 2,2%. As velocidades de detonação apresentaram melhores resultados, com variações entre 1,6% e -8,6% dentre todos os códigos e densidades estudados.

**Tab. 7** – Resultados para RDX com BKW

RDX (g/cm <sup>3</sup> )	ATLAS-DET (BKW-S)			Outros Códigos (BKW)			Ref
	P (GPa)	D (m/s)	T (K)	P (GPa)	D (m/s)	T (K)	
1,82	33,6	9186	4232				
	-4,5%	-4,4%	2,1%	35,1 <sup>2</sup>	9591 <sup>2</sup>	4145 <sup>2</sup>	[13]
	-7,4%	3,3%	-2,2%	36,1 <sup>3</sup>	8885 <sup>3</sup>	4323 <sup>3</sup>	[43]
1,80	32,7	9103	425 <sup>1</sup>				
	-4,3%	3,9%		34,1 <sup>1</sup>	8750 <sup>1</sup>	-	[51]
	-2,1%	1,6%	2,6%	33,4 <sup>3</sup>	8960 <sup>3</sup>	4140 <sup>3</sup>	[43]
	-5,5%	4,3%	39,1%	34,5 <sup>4</sup>	8711 <sup>4</sup>	2588 <sup>4</sup>	[27]
	-6,1%	3,8%	39,1%	34,7 <sup>5</sup>	8754 <sup>5</sup>	2587 <sup>5</sup>	[12]
	-5,5%	2,0%	-2,4%	34,5 <sup>6</sup>	8920 <sup>6</sup>	4354 <sup>6</sup>	[55]
1,00	9,1	5811	4632				
	2,2%	-5,0%	0,7%	8,9 <sup>1</sup>	6100 <sup>1</sup>	4600 <sup>1</sup>	[51]
	-20,9%	-6,9%	3,1%	11,0 <sup>3</sup>	6210 <sup>3</sup>	4490 <sup>3</sup>	[43]
	-18,7%	-5,5%	22,3%	10,8 <sup>5</sup>	6128 <sup>5</sup>	3600 <sup>5</sup>	[12]
	-17,6%	-8,6%	5,2%	10,7 <sup>6</sup>	6310 <sup>6</sup>	4389 <sup>6</sup>	[55]

<sup>1</sup> Experimental; <sup>2</sup> W-DETCOM; <sup>3</sup> CHEETAH; <sup>4</sup> SDA; <sup>5</sup> BKW; <sup>6</sup> EXPLO5.

**Tab. 8** – Resultados para TNT com BKW

TNT (g/cm <sup>3</sup> )	ATLAS-DET (BKW-S)			Outros Códigos (BKW)			Ref
	P (GPa)	D (m/s)	T (K)	P (GPa)	D (m/s)	T (K)	
1,64	18,1	7355	3724				
	-3,9%	5,8%	-	18,8 <sup>1</sup>	6932 <sup>1</sup>	-	[51]
	-12,2%	2,2%	0,1%	20,3 <sup>3</sup>	7190 <sup>3</sup>	3720 <sup>3</sup>	[43]
	-17,7%	2,5%	24,1%	21,3 <sup>4</sup>	7168 <sup>4</sup>	2825 <sup>4</sup>	[27]
	-17,7%	2,1%	24,0%	21,3 <sup>5</sup>	7197 <sup>5</sup>	2829 <sup>5</sup>	[12]
	-11,6%	2,8%	-0,5%	20,2 <sup>6</sup>	7150 <sup>6</sup>	3744 <sup>6</sup>	[55]

<sup>1</sup> Experimental; <sup>2</sup> W-DETCOM; <sup>3</sup> CHEETAH; <sup>4</sup> SDA; <sup>5</sup> BKW; <sup>6</sup> EXPLO<sup>5</sup>.

A **tabela 8** reúne os resultados obtidos para o caso do TNT. Observam-se pressões sistematicamente mais baixas quando comparadas com o CHEETAH, onde as diferenças chegaram a -12,2% e -12,5% para altas massas específicas, e 30,5% para 1,0 g/cm<sup>3</sup>. Entretanto, a diferença com relação à pressão de detonação experimental foi de apenas -3,9%. Quando comparadas as velocidades de detonação oriundas do CHEETAH, observam-se diferenças de 2,2% e 1,0% para as massas específicas de 1,65 g/cm<sup>3</sup> e 1,45 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. A velocidade de detonação experimental, a uma massa específica de 1,0 g/cm<sup>3</sup>, é mais próxima ao valor calculado pelo código ATLAS-DET, com uma diferença de -3,7%.

As pressões de detonação calculadas para a NG apresentaram excelentes concordâncias entre os distintos códigos avaliados. As diferenças, para uma massa específica de 1,60 g/cm<sup>3</sup>, entre o ATLAS-DET e o CHEETAH foram de -0,4% enquanto para a velocidade de detonação foi de apenas 1,6% (**tabela 9**).

**Tab. 9** – Resultados para NG com BKW

NG (g/cm <sup>3</sup> )	ATLAS-DET (BKW-S)			Outros Códigos (BKW)			Ref
	P (GPa)	D (m/s)	T (K)	P (GPa)	D (m/s)	T (K)	
1,60	24,9	8140	4682				
	-1,6%	5,4%	9,0%	25,3 <sup>1</sup>	7700 <sup>1</sup>	4260 <sup>1</sup>	[51]
	-0,4%	1,6%	2,8%	25 <sup>3</sup>	8010 <sup>3</sup>	4550 <sup>3</sup>	[43]
	1,2%	5,4%	31,3%	24,6 <sup>5</sup>	7700 <sup>5</sup>	3216 <sup>5</sup>	[12]
	4,4%	4,5%	1,8%	23,8 <sup>6</sup>	7770 <sup>6</sup>	4596 <sup>6</sup>	[55]

<sup>1</sup> Experimental; <sup>2</sup> W-DETCOM; <sup>3</sup> CHEETAH; <sup>4</sup> SDA; <sup>5</sup> BKW; <sup>6</sup> EXPLO<sup>5</sup>.

### 3.3 Equação de estado JCZ

Uma segunda fase de validação foi realizada a fim de verificar a capacidade preditiva da equação de estado JCZ-S. As **tabelas 10 a 13** apresentam os resultados comparativos entre o código ATLAS-DET e outras referências. Como se pode observar, existe uma variabilidade considerável nos resultados apresentados entre os diversos códigos e autores estudados. Essas diferenças se devem provavelmente às diferentes estratégias de cálculo, distintos parâmetros e forças intermoleculares, assim como distintos métodos de cálculo da composição de equilíbrio. Por exemplo, o rango de variação observado entre todos os autores estudados, com relação à pressão de detonação do RDX, a uma massa específica de 1,80 g/cm<sup>3</sup>, foi de até 12,7%, com variações de 30,8 GPa a 34,7 GPa, enquanto para a PETN, a diferença foi da ordem de 17,9%, variando de 28 GPa a 33 GPa, para uma massa específica de 1,77 g/cm<sup>3</sup>. Estas diferenças evidenciam a variabilidade existente quanto à quantificação das propriedades termodinâmicas de explosivos com o uso da equação de estado JCZ.

Entretanto, os resultados alcançados no presente trabalho se aproximaram razoavelmente bem dos valores experimentais do RDX e da PETN, tal como podem ser observadas nas **tabelas 10 e 11**, respectivamente. O erro obtido no cálculo da pressão de detonação para o RDX foi de -1,2% enquanto para a PETN foi de -7,6%, para massas específicas de 1,80 g/cm<sup>3</sup> e 1,77 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Por outro lado, para essas mesmas densidades, as velocidades de

detonação calculadas para o RDX foram ligeiramente superiores a todas as demais referências, com um erro de 4,1% frente ao valor experimental, enquanto para a PETN, o erro foi de apenas 1,9%.

**Tab. 10** – Resultados para RDX com JCZ

RDX	ATLAS-DET (JCZS)			Outros Códigos (JCZ)			Ref
	P (g/cm <sup>3</sup> )	D (GPa)	T (m/s)	P (GPa)	D (m/s)	T (K)	
1,80	33,7	9109	4153				
	-1,2%	4,1%	-	34,1 <sup>1</sup>	8750 <sup>1</sup>	-	[51]
	8,4%	4,2%	0,2%	31,1	874 <sup>1</sup>	414 <sup>5</sup>	[27]
	-2,9%	3,7%	-	34,7	878 <sup>9</sup>	-	[51]
	4,7%	3,4%	3,5%	32,2	880 <sup>6</sup>	401 <sup>2</sup>	[56]
	-1,7%	3,4%	-	34,3	881 <sup>3</sup>	-	[57]
	9,4%	5,1%	-	30,8	867 <sup>9</sup>	-	[58]
	0,6%	1,9%	3,1%	33,5	8940	4028	[59]
1 Experimental.							

**Tab. 11** – Resultados para PETN com JCZ

PETN	ATLAS-DET (JCZS)			Outros Códigos (JCZ)			Ref
	P (g/cm <sup>3</sup> )	D (GPa)	T (m/s)	P (GPa)	D (m/s)	T (K)	
1,77	30,5	8561	4416				
	-7,6%	1,9%	-	33,0 <sup>1</sup>	8405 <sup>1</sup>	-	[51]
	8,5%	4,1%	-4,3%	28,1	8220	461 <sup>5</sup>	[27]
	5,8%	4,3%	4,2%	28,8	8210	423 <sup>7</sup>	[41]
	8,9%	4,4%	-	28,0	8200	-	[58]
	7,3%	3,4%	2,2%	28,4	8280	4319	[59]
1,60	24,8	7882	4521				
	-6,8%	1,7%	2,7%	26,6 <sup>1</sup>	7750 <sup>1</sup>	4400	[51]
	5,9%	1,7%	3,3%	23,4	7750	437 <sup>8</sup>	[51]
1,00	8,9	5543	4719				
	33,1%	10,9%	-	6,7 <sup>1</sup>	5000 <sup>1</sup>	-	[51]
	7,5%	0,1%	-5,1%	8,3	553 <sup>9</sup>	497 <sup>4</sup>	[62]
	27,4%	9,5%	-	7,0	5060	-	[51]
	0,2%	-3,6%	-	8,9	5750	-	[58]
1 Experimental.							

No caso da NG, que apresenta um balanço de oxigênio positivo, a diferença entre a pressão de detonação calculada neste trabalho e seu valor experimental foi de -6,4%, enquanto para a velocidade de detonação foi de apenas -0,4%. Os resultados comparativos aos demais códigos e autores podem ser apreciados na **tabela 12**. O TNT, por outro lado, produz uma grande quantidade de carbono sólido, devido ao seu grande déficit de oxigênio, expondo a importância de tratar os produtos condensados com equações de estado apropriadas. As diferenças para massas específicas de 1,64 g/cm<sup>3</sup> e 1,00 g/cm<sup>3</sup>, entre os valores experimentais e calculados, no que se refere à pressão de detonação, foram de -15,4% e -0,1%, enquanto para as velocidades de detonação foram de 2,7% e -0,4% respectivamente.

Análises similares podem ser realizadas para as demais massas específicas e explosivos. Entretanto, as diferenças entre as temperaturas, velocidades e pressões de detonação, obtidas com o código ATLAS-DET, variam dentro da faixa de comportamento encontrados por outros autores. Ainda que não existam muitos dados experimentais disponíveis para a temperatura de detonação, os resultados obtidos neste trabalho apresentam uma razoável correlação com aqueles obtidos por outros códigos e autores.

**Tab. 12** – Resultados para NG com JCZ

NG	ATLAS-DET (JCZS)			Outros Códigos (JCZ)			Ref
	P (g/cm <sup>3</sup> )	D (GPa)	T (m/s)	P (GPa)	D (m/s)	T (K)	
1,60	23,7	7670	4665				
	-6,4%	-0,4%	9,5%	25,31	77001	42601	[51]
	3,0%	-0,6%	-5,3%	23,0	7715	4927	[27]
	7,2%	0,4%	2,0%	22,1	7640	4575	[51]
	9,2%	1,8%	4,9%	21,7	7535	4445	[60]
	2,1%	-0,3%	2,2%	23,2	7690	4563	[59]
1,59	23,4	7627	4671				
	9,1%	1,7%	4,4%	21,4	7500	4476	[63]
1 Experimental.							

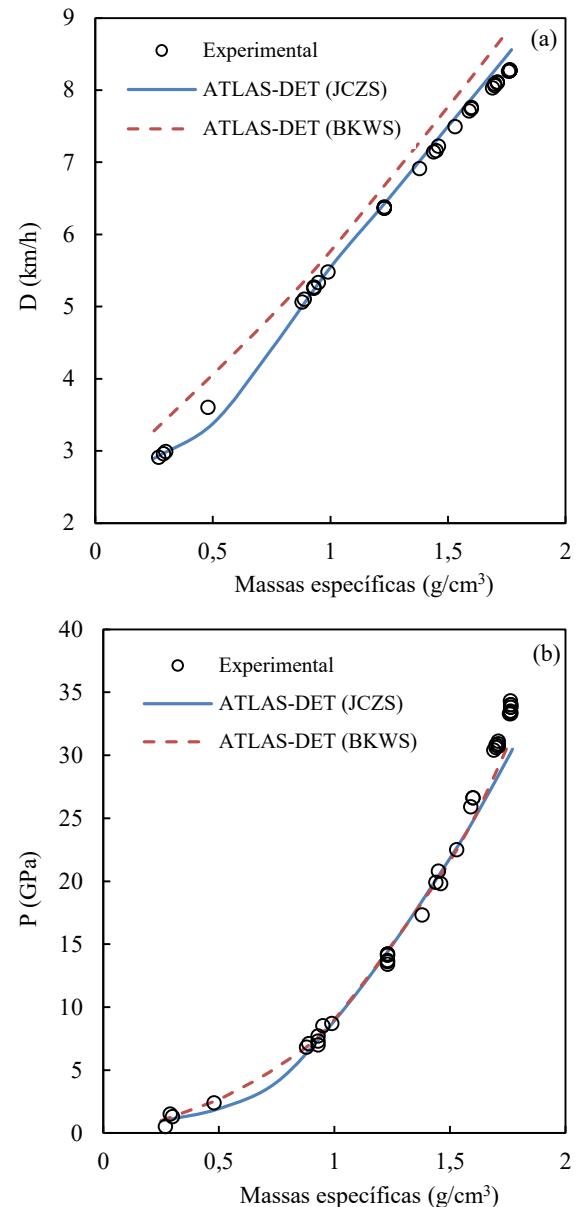
<sup>1</sup> Experimental.

**Tab. 13** – Resultados para TNT com JCZ

TNT	ATLAS-DET (JCZS)			Outros Códigos (JCZ)			Ref.
	(g/cm <sup>3</sup> )	P (GPa)	D (m/s)	T (K)	P (GPa)	D (m/s)	
1,64	17,8	7114	3709				
	-15,4%	2,7%	-	21,0 <sup>1</sup>	6930 <sup>1</sup>	-	[51]
	0,9%	4,8%	-2,4%	17,6	6786	3799	[27]
	-8,9%	1,2%	-	19,5	7030	-	[51]
	-4,0%	4,1%	5,2%	18,5	6833	3525	[63]
	-1,9%	4,8%	5,9%	18,1	6790	3501	[41]
	-6,5%	2,9%	1,7%	19,0	6912	3647	[60]
	0,3%	2,9%	0,5%	17,7	6911	3692	[61]
	-5,5%	3,0%	-	18,8	6910	-	[58]
	-4,0%	4,2%	0,3%	18,5	6830	3699	[59]
1 Experimental.							

### 3.4 Comparação entre as equações de estado BKW e JCZ para o caso da PETN

Os resultados obtidos com o ATLAS-DET, usando ambas as equações de estados, BKW-S e JCZ-S, juntamente com dados experimentais [64, 60] da PETN, são apresentados na figura 2. Comparativamente, a curva  $\rho_o - D$  obtida com a JCZ-S é mais precisa que aquela obtida através da BKW-S, que por sua vez tende a sobreestimar a velocidade de detonação,  $D$ , sistematicamente. Por outro lado, as pressões de detonação estimadas por ambas as equações de estado na faixa central de massas específicas estão bem próximas aos valores experimentais enquanto ambas subestimam as pressões para massas específicas superiores a 1,50 g/cm<sup>3</sup>. Outrossim, a BKW-S tende a apresentar um melhor comportamento em rangos de baixas densidades, como mostra a curva  $\rho_o - P$ .



**Fig. 2** – Velocidades (a) e Pressões (b) de detonação Chapman-Jouguet experimentais [64, 60] e calculadas (BKWS e JCZS) com ATLAS-DET para a PETN.

## 5. Conclusões

O código ATLAS-DET incorpora um método de cálculo termodinâmico ideal do estado de detonação Chapman-Jouguet, especificamente para as equações de estado BKW e JCZ. Baseando-se nos trabalhos

desenvolvidos por Mader [12], Sanchidrián [20], Lopez [13] e Borg et al. [27], o código ATLAS-DET logrou obter resultados satisfatórios na maioria dos exemplos analisados. Os resultados obtidos foram contrastados com resultados experimentais e oriundos de outros códigos termodinâmicos para uma ampla faixa de explosivos, tais como o RDX, PETN, TNT e NG.

Em geral, as diferenças observadas entre os parâmetros termodinâmicos que descrevem o estado de detonação CJ foram provavelmente devidos às diferenças entre funções termodinâmicas fundamentais, estratégia de cálculo e o método de minimização não-linear adotado. Entretanto, pôde-se concluir que o código ATLAS-DET é equivalente ao W-DETCOM devido as semelhanças na estrutura de cálculo e estratégias de quantificação termodinâmica adotadas, ainda que existam diferenças quanto à algumas equações de estado e métodos numéricos adotados. Por outro lado, códigos termodinâmicos como o CHEETAH ou IDeX, por exemplo, ainda

detém uma certa superioridade frente aos demais códigos, por contar com equações de estado mais robustas, e como consequência, a obtenção de resultados mais consistentes.

No entanto, o método de otimização empregado para o cálculo do equilíbrio químico no código ATLAS-DET mostrou-se especialmente sensível à solução inicial adotada. Neste sentido, um estudo mais detalhado quanto à seleção da solução inicial deverá ser empreendido, com o fim de incrementar as chances de se conseguir um mínimo global da energia livre. Adicionalmente, pretende-se implementar equações de estado teoricamente mais robustas, como a WCA (Weeks-Chandler-Anderson) e a THEOSTAR, fundamentadas na estatística mecânica, baseada em esferas pesadas ou variacionais, que não necessitam de fatores ou parâmetros de ajuste empíricos, dependendo inteiramente dos potenciais intermoleculares dos produtos de detonação, permitindo obter resultados mais precisos nos cálculos termodinâmicos ideais.

## Referências Bibliográficas

- [1] Berthelot, M.; Vieille, P; On the velocity of detonation of explosives processes in gases; C.R. Hebd. Sceances Acad. Sci., 1881, 93, 18.
- [2] Berthelot, M.; Vieille, P; On Explosives Waves; C.R. Hebd. Sceances Acad. Sci., 1882, 94, 129.
- [3] Mallard, E.; Le Chatelier, H.; On the Propagation Velocity of Burning in Gaseous Explosive Mixtures; C.R. Hbd. Sceances Acad. Sci., 1881, 93, 145.
- [4] Chapman, D. L.; On the Rate of Explosive in Gases; Philos. Mag., 1899, 47, 90.
- [5] Jouguet, E.; On the Propagation of Chemical Reactions in Gases; J. de Mathematiques Pures et Appliques, 1905, 1, 347.
- [6] Jouguet, E.; Mecanique des Explosifs; Paris: Octave Doin et Fils, 1917.
- [7] Zeldovich, Y. B.; On the Theory of the Propagation of Detonation in Gaseous Systems; Zh. Eksp. Teor. Fiz., 1940, 10, 542.
- [8] Von Neumann, J.; Theory of Detonation Waves; John von Neumann, Collected Works. Vol. 6, ed. A. J. Toud. New York: Macmillan, 1942.
- [9] Doering, W.; On Detonation Processes in Gases; Ann. Phys., 1943, 43, 421.
- [10] Braithwaite, M.; Ideal detonation reaction concepts for blasting engineers; Proceedings of the 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (FRAGBLAST 10), India, 2013.
- [11] Levine, H. B.; Sharples, R. E.; Operator's Manual for Ruby; Lawrence Radiation Laboratory. Livermore, California, 1962.
- [12] Mader, C. L.; Numerical Modeling of Explosives and Propellants; Second Edition, CRC Press: Boca Raton, Florida, 2005.
- [13] Lopez, L. M.; Evaluación de la Energía de los Explosivos Mediante Modelos Termodinámicos de Detonación; Tese de Doutorado, Universidad politécnica de Madrid, Espanha, 2003.
- [14] Cowperthwaite, M.; Zwisler, W. H.; Tiger Computer Program Documentation", Standford Research Institute

- publication nºZ106, Menlo Park, California, 1973.
- [15] BAI; TIGERWIN: Tiger for Windows Version 4.0. Instalation & User's Guide; Blasting Analysis International, Inc, Allentown, Pennsylvania, USA, 1996.
- [16] Souers, P.; Kury, J.; Comparison of Cylinder Data and Code Calculations for Homogeneous Explosives; Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1993, 18, 175.
- [17] Fried, L.; Howard, W.; Souers, P.; Cheetha 2.0 User's Manual; Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, 1998.
- [18] Souers, P.; Forbes, J.; Fried, L.; Howard, W.; Anderson, S.; Dawson, S.; Vitello, P.; Garza, R.; Detonation energies from the cylinder test and cheetah V3.0; Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2001, 26, 180.
- [19] Lu, J. P.; Evaluation of the Thermocchemical Code Cheetah 2.0 for Modelling Explosives Performance; Technical Report DSTO-TR-1199. Defence Science and Technology Organisation, Weapons System Division, Edinburgh, Australia, 2001.
- [20] Sanchidrián, J. A.; Desarrollo de un Método para el Cálculo de las Características de los Explosivos; Tese de Doutorado, Universidad Politécnica de Madrid, Espanha, 1986.
- [21] Sanchidrián, J. A.; López, J.; DETCOM: Código para el cálculo de características de explosivos y propulsantes. Manual de usuario; UEE-Dirección de Investigación y Desarrollo, Unión Española de Explosivos, 1992.
- [22] Freedman, E.; Blake - A Thermodynamics Code Based on Tiger: Users' Guide and Manual; Technical report ARBRL-TR-02411, Ballistic Research Laboratory, Maryland, 1982.
- [23] UNE; Cálculo de las principales características teóricas de los explosivos; Norma UNE 31 002 94, 1994.
- [24] Clark, G.; Industrial High Explosives: Composition and Calculations for Engineers; Colorado School of Mines Quarterly, Jan, 1-47, 1980.
- [25] Sućeska, M.; EXPLO5 – Computer Program for Calculation of Detonation Parameters; Proceedings of the 32nd International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, 2001.
- [26] Cunningham, C.; Operational handbook for the Vixen-n: using Vixen-non-ideal detonation code; Internal Report, African Explosives Limited, South Africa, 2003.
- [27] Borg, R. A. J.; Kemister, G.; Jones, D. A.; Chemical Equilibrium Calculations for Detonation Products; Department of Defence. DSTO. Aeronautical and Maritime Research Laboratory. AUS, 1995.
- [28] Sanchidrián, J. A.; López, L. M.; Calculation of the Energy of Explosives with a Partial Reaction Model. Comparison with Cylinder Test Data; Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2006, 31, 25.
- [29] Sanchidrián, J. A.; Muñiz, E.; Curso de Tecnología de Explosivos; Ed. Fundación Gómez Pardo: Madrid, 2000.
- [30] Davis, W.; Shock Waves; Rarefaction Waves; Equation of State; Explosive Effects and Applications; Zucar & Walters, eds., Springer, New York, 1997. ch 3.
- [31] Sanchidrián, J. A.; Mencacci, S.; Fiederling; Verbeek, H. N.; A Comparison of methods for thermodynamic calculation of explosives used in Europe; Explosives & Blasting Technique, Balkema, Rotterdam, 2000.
- [32] Köhler, J.; Meyer, R.; Explosives; Edition 4. Publisher VCH. University of California, 1993.
- [33] Zehe, M. J.; Gordon, S.; McBride, B. J.; CAP: A Computer Code for Generating Tabular Thermodynamic Functions from NASA Lewis Coefficients; NASA/TP—2001-210959/REV1, 2002.
- [34] Stull, R. D.; Prophet, H.; JANAF Thermochemical Tables; 2nd ed. Washington: National Bureau of Standards, 1971.
- [35] McBride, B. J.; Gordon, S.; Computer Program for Calculating and Fitting Thermodynamic Functions; NASA RP-1271, 1992.
- [36] White, W. B.; Johnson, S. M.; Dantzing, G. B.; Chemical Equilibrium in Complex Mixtures; The Rand Corporation. Santa Monica, California. USA, 1956.
- [37] Nocedal, J.; Wright, S. J.; Numerical Optimization; Springer Science & Business Media – Mathematics: New York, 2006.
- [38] Braithwaite, M.; Byers Brown, W.; Minchinton, A.; The use of ideal detonation computer codes in blast modelling; Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (FRAGBLAST 5), Montreal, 1996.
- [39] Kistiakowski, G. B.; Wilson, E. B.; Report on the Prediction of Detonation Velocity of Solid Explosives; Office of Sci Res and Dev Rep # OSRD-69, 1941.
- [40] Cowan, R. D.; Fickett, W.; Calculation of the Detonation Properties of Solid Explosives with the Kistiakowsky-Wilson Equation of State; J. Chem. Phys., 1956, 24, 932.
- [41] Finger, M.; Lee, E. H. F.; Hayes, B.; Horning, H.; McGuire, R.; Kahara, M.; Guidry, M.; The Effect of Elemental

- Composition on the Detonation Behavior of Explosives; Proceedings of the Sixth Symposium (International) on Detonation, Coronado, USA, 1976.
- [42] Hobbs, M. L.; Baer, M. R.; Nonideal Thermochemical Calculations Using a Large Product Species Data Base; Sandia Report SAND92-0482, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1992.
- [43] Hobbs, M. L.; Baer, M. R.; Calibration of the BKW-EOS with a Large Product Species Data Base, Measured CJ Properties; Proceedings of the 10th International Detonation Symposium, Boston, 1993.
- [44] Fried, L.; Souers, P.; BKWC: An Empirical BKW Parametrization Based on Cylinder Test Data; Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1996, 21, 215.
- [45] Cowperthwaite, M.; Zwisler, W. H.; The JCZ Equations of State for Detonation Products and their Incorporation into the TIGER Code; Proceedings of the 6th Symposium (International) on Detonation, White Oak, USA, 1976.
- [46] Jacobs, S. J.; On the Equation of State of Compressed Liquids and Solids; NOL Tech. Rept. NOLTR-68-214, 1963.
- [47] Jacobs, S. J.; On the Equation of State for Detonation Products at High Density; Proceedings of the 12th Symposium (International) on Combustion, Maryland, USA, 1969.
- [48] Guidry, M. R.; McGuire, R. R.; Lee, E. L.; Parametrization of the BKW and JCZ Equations of State for Explosives; FJSRL Technical Report 78-003. Frank J. Seiler Research Laboratory, 1978.
- [49] Stiel, L. I.; Gold, V. M.; Baker, E. L.; Analysis of Hugoniots and Detonation Properties of Explosives with JCZ3 Equation of State; Proceedings of the 10th International Detonation Symposium. Massachusetts, USA, 1993.
- [50] Stiel, L. I.; Rotondi, P.; Baker, E. L.; Optimization of parameters for JCZ3 equation of state; Proceedings of the AIP Conference 370, Washington, USA, 1996.
- [51] McGee, B. C.; Hobbs, M. L.; Baer, M. R.; Exponential 6 Parameterization for the JCZ3-EOS; SANDIA REPORT - SAND98-1191, 1998.
- [52] Hobbs, M. L.; Brundage, A. L.; Yarrington, C. D.; JCZS2i: An Improved JCZ Database for EOS Calculations at High Temperature and Pressure; SAND2014-15321C, 2014.
- [53] Hobbs, M. L.; Baer, M. R.; McGee, B. C.; Extension of the JCZ Product Species Database; SAND-97-1938C. CONF-980803, 1998.
- [54] Wang, S. Y.; Barry Butler, P.; Krier, H.; Non-Ideal Equation of State for Combusting and Detonation Explosives; Pro. Energy Combus., 1985, 11, 311.
- [55] Sućeska, M.; Calculation of Detonation Parameters by EXPLO5 Computer Program; Materials Science Forum, 2004, 465-466, 325.
- [56] Cowperthwaite, M.; Personal communication with Borg et al. 1995; 1995.
- [57] Chirat, R.; Pittion-Rossillon, G.; Detonation Properties of Condensed Explosives calculated with an Equation of State based on Intermolecular Potentials; UCRL-51319, 1974.
- [58] Hardesty, D.; Kennedy, J. E.; Thermochemical Estimation of Explosive Energy Output; Combustion and Flame, 1977, 28, 45.
- [59] Hoseinian, A.; Mazaheri, K.; Determination the CJ parameters using JCZ3 Equation of State; Journal of Energetic Material, 2012, 6, 45.
- [60] Chirat, R.; Pittion-Rossillon, G.; A new equation of state for detonation products; J. Chem. Phys. 1981, 74, 15.
- [61] Feng, K. K.; Chung, W. K.; Lu, B. Y.; Calculation of Detonation Products by means of the CS Hard-Sphere Equation of State; Proceedings of the 8th Symposium (International) on Detonation, Albuquerque, USA, 1985.
- [62] Persson, P.; Holmberg, R.; Lee, J.; Rock Blasting and Explosives Engineering; CRC Press: Boca Raton, 1994.
- [63] Sentman, L. H.; Strehlow, R. A.; Haeffele, B.; Eckstein, A.; Development of a Single Species Equation of State for Detonation Products suitable for Hydrocode Calculations; Proceedings of the 7th Symposium (International) on Detonation, Annapolis, USA, 1981.
- [64] Hornig, H. C.; Lee, E. L.; Finger, M.; Kurrie, J. E.; Equation of State of Detonation Products; Proceeding of the 5th International Symposium on Detonation, Washington, USA, 1970.

# Energia elétrica via fusão termonuclear controlada

Filipe Wiltgen

Programa de Mestrado em Engenharia, Universidade de Taubaté.

Taubaté, Brasil.

filipe.wiltgen@unitau.br

**RESUMO:** Os seres humanos precisam de muita eletricidade em suas vidas diárias. Mas a maioria de nossas fontes tradicionais de eletricidade ainda são inefficientes e escassas, e muitas vezes dependem do "humor" da própria natureza. A tecnologia de fusão termonuclear nascida nas décadas de 1930 e 1940 é independente da vontade da natureza, eficiente e abundante. Porém, e como tudo na natureza, tem vantagens e desvantagens. A raça humana amadureceu a tecnologia nuclear do passado, mas prefere investir em um processo físico mais seguro e eficiente como a fusão nuclear. O fato é que o futuro a cada dia da energia elétrica parece estar entrelaçado e dependente de resultados científicos e técnicos obtidos com os avanços da fusão termonuclear controlada. Este artigo discute sua importância, suas máquinas, suas dificuldades científicas, bem como os benefícios e cuidados necessários para o uso consciente dessa tecnologia. O fato de existirem diferentes tecnologias para a obtenção da reação de fusão explica como a fusão nuclear é um importante mecanismo para a energia do futuro, localizando desenvolvimentos no passado, presente e futuro na obtenção de eletricidade. Mostra como a reação de fusão nuclear é capaz de gerar muita energia e, portanto, produzir muita eletricidade por meio do processo náucleo-eletrica de forma eficiente e segura. Discute os tipos promissores de confinamentos magnéticos para produção de fusão e suas respectivas máquinas em operação no mundo. Finalmente, ele apresenta e discute o caminho que a humanidade traçou para implementar a engenharia de fusão termonuclear controlada para obter o primeiro reator de fusão nuclear da história até o ano 2025 com uma máquina Tokamak.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia. Eletricidade. Fusão Termonuclear Controlada. Confinamento Magnético. Reatores. Fusão Nuclear. Tokamak.

## 1. Introdução

**E**m um planeta no qual os recursos naturais conhecidos parecem se exaurir mais rápido do que o esperado, e há necessidade constante de energia elétrica abundante para o desenvolvimento humano no futuro [1], a alternativa da fusão termonuclear nunca foi tão importante. A pouca eficiência na conversão útil de energia elétrica obtida das fontes renováveis, somada à gradativa diminuição do uso, exploração e das reservas de

**ABSTRACT:** Human beings need a lot of electricity in their daily lives. But most of our traditional sources of electricity are still inefficient and scarce, and often dependent on the "mood" of nature itself. Thermonuclear fusion technology born in the 1930s and 1940s is independent of nature's will, efficient and abundant. However, and like everything in nature has advantages and disadvantages. The human race has matured nuclear technology of past, but prefers to invest in a safer and more efficient physical process like nuclear fusion. The fact is that every day future of electric power seems to be intertwined and dependent on scientific and technical results obtained with advances of controlled thermonuclear fusion. This article discusses its importance, its machines, its scientific difficulties, as well as benefits and care necessary for conscious use of this technology. The fact that there are different technologies for obtaining the fusion reaction explains how nuclear fusion is an important mechanism for energy of the future, locating developments in past, present and for future in obtaining electricity. It shows how nuclear fusion reaction is capable of generating a lot of energy, and thus, producing a lot of electricity through nuclear-electrical process efficiently and safely. Discusses the promising types of magnetic confinements for production of fusion and their respective machines in operation in world. Finally, it presents and discusses path that humanity has traced to implement controlled thermonuclear fusion engineering to obtain the first nuclear fusion reactor in history by year 2025 with a Tokamak machine.

**KEYWORDS:** Energy. Electricity. Controlled Thermonuclear Fusion. Magnetic Confinement. Reactors. Nuclear Fusion. Tokamak.

combustíveis fósseis [2] e [3] põe em destaque as pesquisas tecnológicas dos futuros reatores a fusão nuclear.

As primeiras pesquisas envolvendo energia nuclear amplamente divulgadas ao público em geral foram relacionadas a dispositivos bélicos de destruição em massa na época. Este fato foi uma anti-propaganda de todos os benefícios que a energia nuclear possui para humanidade. A sombra de cogumelos radioativos das bombas lançadas no final da Segunda Guerra Mundial sobre o Japão, parece estar muito presente ainda hoje

mais de 70 (setenta) anos depois. A visão da humanidade a respeito da utilização nuclear sempre foi marcada pelos acidentes e a constante ameaça de nações nuclearmente militarizadas [4], [5] e [6].

Os benefícios da utilização nuclear na exploração espacial, na medicina, na engenharia e na conversão para produção de eletricidade, ficam à margem das notícias e das opções no desenvolvimento humano [5], [6] e [7]. As condições de vida da raça humana no planeta estão cada vez mais entrelaçadas com a constante abundância na disposição e no fornecimento de energia elétrica. Os equipamentos e dispositivos eletrônicos e eletromecânicos nunca foram tão importantes como neste período histórico da recente história da humanidade [1]. A relação dos seres humanos e a eletricidade é tão profundamente enraizada que até mesmo os registros dos menores níveis de mortalidade infantil, assim como, maior longevidade e melhor educação, correspondem diretamente com os países mais desenvolvidos, e que por sua vez disponibilizam, e consomem, cada vez mais energia elétrica por habitante [8], [9] e [10].

O primeiro reator a fissão nuclear surgiu na *Universidade de Chicago* [11], pouco tempo depois do término da Segunda Guerra Mundial e com o fim do *Projeto Manhattan* [12] e [13], responsável por abrigar algumas das melhores mentes científicas do mundo na época, com a finalidade de desenvolver, construir e testar as primeiras armas nucleares para frear o avanço dos nazistas. Entretanto, como é conhecido, as armas nucleares ficaram prontas após a derrota dos nazistas na Europa, o que levou os EUA utilizar estas armas contra o Império Japonês e aterrorizar todo o planeta.

A opção da energia elétrica nuclear não descarta de forma alguma a contribuição de todas as outras fontes de energia elétrica tradicionais, muito pelo contrário, pois ao que tudo indica a crise energética de eletricidade vai se agravar, e isso ocorrerá muito rápido ainda nesta década [3]. As fontes renováveis de energia apesar de pouco eficientes, serão também muito úteis e necessárias. Entretanto, deve-se ter a consciência de que qualquer uma destas fontes atuais de energia elétrica, e mesmo todas juntas, nunca vão ser o suficiente para suprir as necessidades humanas no ritmo atual de consumo elétrico. A opção mais racional, e que foi amplamente

discutida entre os anos de 1990 e 2000 foi a nuclear, incluindo a opinião do renomado pesquisador e criador da *Hipótese de Gaia, Lovelock* [14]. Em seus estudos *Lovelock* [14] observou a necessidade de desenvolver as tecnologias para o uso seguro da energia núcleo-elétrica como a principal opção energética mundial.

Atualmente, as novas gerações de reatores a fissão permitem minimizar os problemas apesar de os resíduos nucleares ainda existirem e que são um inconveniente intrínseco e perigoso a ser contido. Espera-se que, com o tempo, os atuais reatores a fissão nuclear venham a ser substituídos em breve pelo tão esperado reator a fusão nuclear. Os futuros reatores a fusão nuclear devem tornar a operação núcleo-elétrica intrinsecamente segura, abundante e muito eficiente.

A partir de agora, este artigo apresentará de forma objetiva e sintética a reação de fusão nuclear, suas máquinas e dispositivos conversores de energia, suas características e operações, vantagens e desvantagens de cada tecnologia e o que esperar, e escolher, para o futuro da energia elétrica para a humanidade.

## 2. Reação de fusão nuclear

Dentre os processos físicos nucleares utilizados pela própria natureza para transformar energia, a fissão e a fusão nuclear são os de maior eficiência [7]. O processo mais comum de produção de energia no cosmos é o de fusão nuclear, que é o processo utilizado pelas estrelas para transformar seu combustível em energia. Em uma estrela o processo de fusão nuclear produz hélio a partir de hidrogênio, no qual dois prótons se fundem em uma partícula alfa (um núcleo de hélio), liberando dois pósitrons, dois neutrinos e uma enorme quantidade de energia. Entretanto, aqui no planeta Terra o processo de fusão nuclear é muito difícil de ser obtido, enquanto que o processo de fissão nuclear é bem mais fácil de ser obtido [5], [7], [8], [9] e [10].

Na fusão nuclear, como o próprio nome sugere, dois átomos são unidos. Apesar de parecer simples, e de que a natureza utilize este processo rotineiramente, a fusão nuclear no planeta Terra impõe aos pesquisadores dificuldades tecnológicas muito grandes [15].

O maior problema de obter a fusão nuclear na

Terra está relacionado a baixa gravidade terrestre, isso faz com que as temperaturas necessárias para haver o ambiente de colisão para a fusão nuclear seja alguns milhares de graus Celsius maior do que a temperatura do Sol ( $\sim 100$  milhões de graus Celsius). Isso porque os átomos possuem uma barreira eletrostática muito forte, chamada de *Barreira de Coulomb*. Sem romper esta barreira não é possível fundir dois átomos para formar um novo átomo fundido [16], [17], [18] e [19].

Para romper a barreira eletrostática, os átomos devem estar com um alto grau de agitação térmica, além de estarem dissociados em elétrons e íons o que permite grande movimentação cinética, o que só pode ser obtida com as elevadas temperaturas em estado físico de plasma [17]. Entretanto, isto não é tudo. É necessário também manter esta condição de alta temperatura em um tempo mínimo, e com uma densidade mínima para que as reações nucleares possam ocorrer. Isto é conhecido na física como as três condições de simultaneidade para a obtenção da fusão nuclear (temperatura, densidade e tempo de confinamento) [20].

A esta temperatura, o estado físico da matéria é o plasma (4º estado físico da matéria, que são no total atual cinco estados físicos conhecidos), e nenhum material na Terra pode entrar em contato físico direto com este estado de alta temperatura [17], [18], [21] e [22]. A forma de manter o confinamento deste ambiente de alta temperatura e no estado físico de plasma, pode ser obtido através da aplicação de intensos campos magnéticos, ou através das micro-implosões de *pellets* com laser de alta potência.

Quando ocorre o processo de fusão nuclear, dois átomos bem leves como Deutério e/ou Trídio se colidem a uma grande velocidade e com muita energia cinética. Energia suficiente para romper a barreira eletrostática de *Coulomb* presente em cada um dos átomos ionizados (dissociados em elétrons e íons) e assim se fundirem em um novo átomo de hélio. Durante este processo tem-se a emissão de um nêutron e o desprendimento de uma quantidade gigantesca de energia [5], [23] e [24].

Em um reator a fusão nuclear o processo deverá ser similar ao de um reator de fissão nuclear no que diz respeito a troca de calor para a conversão em energia elétrica, ou seja, o calor produzido na reação será

extraído por trocadores de calor produzindo o vapor que vai acionar uma turbina conectada a um gerador elétrico convencional e produzir eletricidade [5].

Dessa forma, o aparato tradicional de uma central nuclear a fissão no que diz respeito a produção de eletricidade, será similar ao reator a fusão, porém um reator a fusão nuclear não consegue se descontrolar durante a reação e produzir uma reação nuclear em cadeia. Isto porque, fora do ambiente de alta temperatura, densidade e de confinamento magnético, a reação se extingue naturalmente, ou seja, o processo é intrinsecamente seguro sob este aspecto [5], [6] e [20].

### 3. Dispositivos de investigação científica para obter a fusão nuclear

Os reatores nucleares são dispositivos científicos que comprovadamente foram sedimentados com bons resultados em pesquisas científicas, que podem e devem ser comercializados, pois seu amadurecimento e maturidade tecnológica permitem seu uso contínuo, prolongado e frequente [25]. Em geral são equipamentos e máquinas que possuem elevado nível de TRL (TRL 9 - *Technology Readiness Levels*).

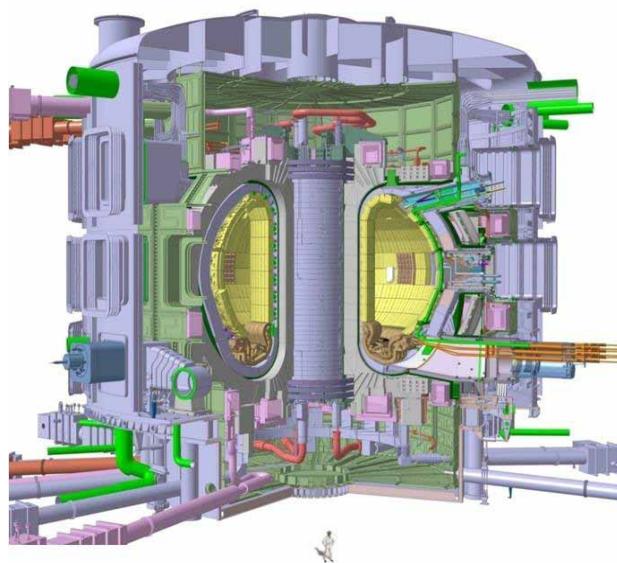
O órgão mais importante referente a assuntos nucleares é a Agência Internacional de Energia Atômica (*IAEA - International Atomic Energy Agency - www.iaea.org*) com sua sede localizada em Viena na Áustria. A IAEA é a agência regulatória mundial para a cooperação no campo nuclear, promovendo o uso seguro e pacífico da tecnologia nuclear.

No processo de fusão nuclear, os dispositivos científicos ainda estão sendo testados. Muitos laboratórios espalhados pelo mundo, incluindo o Brasil (*INPE, USP e UNICAMP*) realizam pesquisas em máquinas de fusão nuclear para conseguir obter avanços científicos para um reator [6], [26], [27] e [28].

O reator a fusão nuclear como todo dispositivo de conversão de energia, deve ser capaz de devolver mais energia do que toda a energia consumida em seu funcionamento. Este ponto no qual um dispositivo de investigação científica passa a ser um reator é conhecido como *Break Even Point* (Ponto de Equilíbrio ou de Virada). Acredita-se que uma máquina de confinamento

magnético do plasma chamada de *Tokamak* ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor* - [www.iter.org](http://www.iter.org)) venha a ser o primeiro a alcançar o ponto de virada dos experimentos a fusão nuclear, abrindo o caminho para a construção do primeiro reator a fusão nuclear do tipo *Tokamak* que é chamado de DEMO. isso a partir de 2025.

O ITER [29] é um consórcio internacional que une os esforços de múltiplos países que pesquisam e financiam juntos o desafio de obter a fusão nuclear na Terra. A máquina do tipo *Tokamak* é de origem Russa remonta a década de 30. Na **figura 1**, é possível ver uma ilustração de como será o *Tokamak* ITER quando estiver pronto.



**Fig. 1** – Tokamak ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Fonte: [29].

Como se sabe, ainda não existem reatores a fusão nuclear, o mundo todo busca pelo reator a fusão nuclear em laboratórios de física de plasmas desde a década de 30. Esta busca é motivada principalmente pela enorme eficiência na conversão de massa em energia calculada de uma reação termonuclear controlada. Durante este período muitas máquinas foram testadas e algumas se mostraram promissoras no caminho para a fusão nuclear. Atualmente, existem basicamente dois caminhos que são seguidos para se obter a fusão nuclear.

O primeiro caminho que surgiu com as pesquisas nos laboratórios foi o de confinamento magnético,

isso porque, como o ambiente é muito quente (estado físico de plasma), o plasma não pode ficar em contato com nenhum material do planeta Terra. O plasma por estar ionizado, ou seja, dissociado em íons e elétrons é possível ser contido com campos eletromagnéticos, permitindo inclusive o movimento das partículas dentro do confinamento. Estes campos magnéticos permitem confinar o plasma para que ele fique restrito apenas na região de interesse da pesquisa científica.

Na *Técnica de Confinamento Dinâmico*, usando campos magnéticos, existem dois dispositivos com diferentes princípios de funcionamento no foco das investigações, os *Tokamaks* e os *Stellarators*.

Um outro caminho para a fusão nuclear que tem sido investigado nos últimos 20 anos é o do confinamento inercial. O confinamento inercial, como o nome diz, é obtido com um pequeno objeto estático no formato de uma esfera (*Pellet*) que é preenchido com átomos de Deutério. Para obter a fusão nuclear com o confinamento inercial, utiliza-se potentes fontes de laser disparadas simultaneamente na microesfera criando uma microimplosão que comprimem o Deutério até que a pressão, a temperatura e a densidade sejam tais, que os átomos de Deutério dentro da microesfera possibilitem ocorrer a reação de fusão nuclear.

Na *Técnica de Confinamento Inercial*, usando potentes lasers, existem dois dispositivos com diferentes princípios de funcionamento no foco das investigações, os com *Laser Direto* e os com *Laser Indireto*.

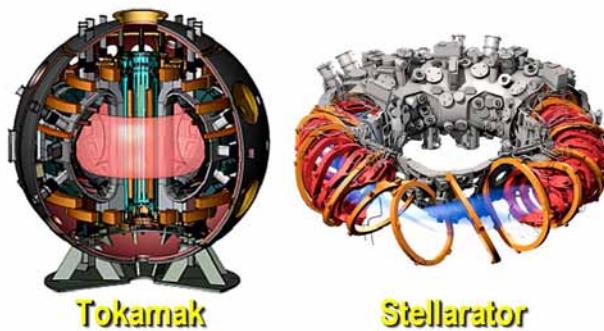
#### 4. Fusão nuclear por confinamento dinâmico (confinamento magnético)

O confinamento dinâmico para a fusão nuclear é uma forma elegante de conseguir conter uma determinada quantidade de matéria em um ambiente de alta temperatura, no qual uma coluna de plasma em movimento circula dentro de uma câmara de vácuo no formato toroidal que permite a circulação contínua. Os dois dispositivos experimentais que fazem isso são os *Tokamaks* e os *Stellarators*.

Os *Tokamaks* são dispositivos discretos (pulsados), ou seja, produzem uma coluna de plasma a cada disparo de fontes de energia elétrica sobre suas bobinas magnéticas; algumas bobinas servem para produzir o plasma e outras para

confinar a coluna no local desejado. Entretanto, no *Tokamak* a coluna de plasma é envolta por um campo magnético helicoidal, devido a composição de campos toroidais e poloidais, que circunda a coluna de plasma como se estivesse amarrando-a. A cada disparo do *Tokamak* uma nova coluna de plasma se forma dentro do dispositivo. Observe a **figura 2**, a coluna de plasma dentro da câmara de vácuo do *Tokamak* [5], [16], [20], [29], [30] e [31].

Os *Stellarators* são dispositivos contínuos, ou seja, produzem uma coluna de plasma torcida durante um determinado período de tempo muito longo. Suas bobinas são muito diferentes das bobinas de um *Tokamak*; elas possuem a forma geométrica dos campos magnéticos permitindo desta forma manter a coluna de plasma torcida por longos períodos de tempo circulando na câmara de vácuo. A complexidade construtiva de um *Stellarator* é muito maior do que de um *Tokamak*. É possível notar na **figura 2** que cada bobina do *Stellarator* possui uma forma geométrica diferente da outra e assim, compõe um campo magnético estável que permite manter a coluna de plasma na região de interesse durante um longo período de tempo [8], [9], [10], [32] e [33].



**Fig. 2** – complexidade dos dispositivos de investigação científica para fusão nuclear por confinamento magnético do plasma (Tokamak e Stellarator). Fonte: [8].

## 5. Fusão nuclear por confinamento inercial (confinamento por micro-implosão)

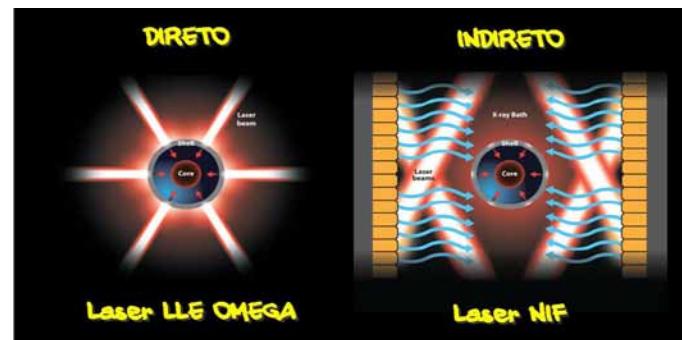
O confinamento inercial é a forma encontrada por pesquisadores para tentar obter a fusão nuclear através da aplicação massiva de diversos feixes de laser disparados simultaneamente sobre uma microesfera preenchida em seu

interior com Deutério. A intenção é comprimir a microesfera realizando uma microimplosão que fará com que os átomos de Deutério dentro da microesfera venham a realizar o processo de fusão nuclear e gerar grandes quantidades de energia como nos experimentos a confinamento dinâmico do plasma [34].

Existem dois experimentos nos EUA que utilizam a técnica de Confinamento Inercial, o *Laser LLE OMEGA* [34] e [35] que possui múltiplos disparos de laser de forma direta sobre a microesfera de Deutério e a comprimem para obter a fusão nuclear, e o experimento *Laser NIF* [36], [37] e [38] que utiliza múltiplos feixes de laser disparados simultaneamente mas de forma indireta possibilitando maior uniformidade na compressão esférica do *pellet* (microesfera) de Deutério.

Na **figura 3** é possível observar uma ilustração dos dois processos de confinamento inercial a laser.

Esses experimentos têm obtidos avanços significativos na compressão do *pellet* nos últimos anos, mas ainda não obtiveram o sucesso esperado.



**Fig. 3** – Dispositivos de investigação científica para fusão nuclear por confinamento inercial a micro-implosões de pellets a laser (LLE OMEGA e NIF). Fonte: [9].

## 6. Reator de fusão termonuclear controlado

### 6.1 Processo físico de conversão núcleo-elétrica

A conversão núcleo-elétrica é baseada na utilização do calor gerado pelo processo nuclear, quer seja fissão ou fusão. Esta fonte de energia primária térmica é utilizada na forma de calor transferido para circuitos trocadores de calor. Dependendo da necessidade de segurança no funcionamento podem ser utilizados vários circuitos trocadores de calor, ou seja muitos estágios, além de

inúmeros tipos de fluidos transportadores de calor [5].

Nem todo o calor gerado no processo nuclear consegue ser extraído; parte é transferido para circuitos de refrigeração do núcleo do reator no caso da fissão nuclear. No caso da fusão nuclear, acredita-se que se a produção não for contínua, como é o caso das máquinas do tipo *Tokamak*, pulsada com disparos. É prevista uma camada externa no dispositivo que permanecerá aquecida durante muito tempo (cobertor de Lítio), permitindo que os trocadores de calor possam ficar em funcionando transportando o calor por longos períodos após cada disparo; isso acontece porque não existe um núcleo em um futuro reator a fusão [5], [23] e [24].

Quando o calor chegar ao último estágio de troca de calor é produzido vapor que será entregue a uma turbina a vapor que estará conectada a um gerador elétrico capaz de produzir eletricidade. O controle seguro de uma central núcleo-elétrica é de extrema importância para seu funcionamento [39].

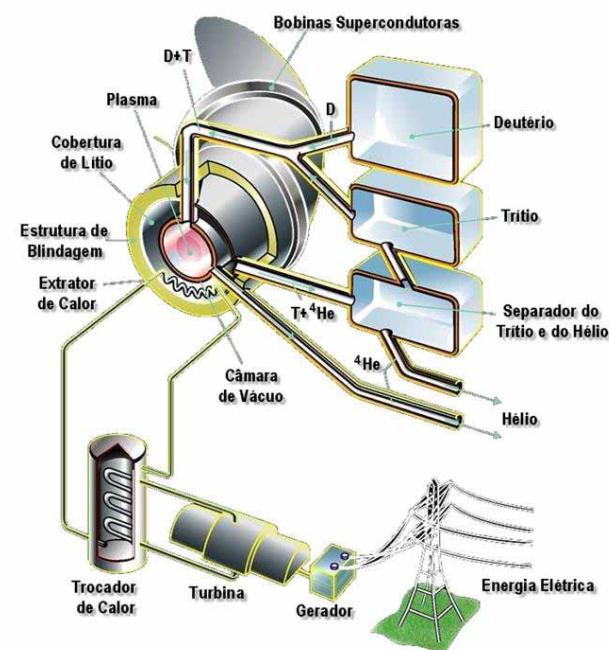
É em uma sala de controle similar a essa que as decisões a respeito do aquecimento do núcleo e da eficiência da central são constantemente avaliadas pelos operadores a fim de evitar algum tipo de incidente ou acidente operacional.

Para reatores a fusão nuclear o processo tecnológico é um pouco mais complicado devido às necessidades de produzir o próprio combustível nas reações termonucleares a fusão conhecidas como interação D-T (*Deutério-Trítio*) antes de ser possível operar com a interação D-D (*Deutério-Deutério*). Essa última é ainda mais difícil de ser obtida devido às altíssimas temperaturas necessárias, muito acima da interação D-T [6] e [20].

Em um futuro reator a fusão nuclear, ao que tudo indica, será baseada na tecnologia de Confinamento Magnético do Plasma em máquinas do tipo *Tokamak*. Durante os muitos anos de pesquisa científica neste tipo de máquina, um experimento do tipo *Tokamak* foi o primeiro a obter fusão nuclear no planeta Terra [5], [6], [27], [40] e [41].

O experimento do Reino Unido em 2018 possui no Laboratório de Culham (Culham Centre for Fusion Energy - [www.culham.org.uk](http://www.culham.org.uk)) chamado de JET (Joint European Torus - [www.euro-fusion.org](http://www.euro-fusion.org)) possui até os dias de hoje a maior quantidade de energia termonuclear produzida por fusão, acima de 16 MWth (térmico) em 22 de setembro de 1997 [5]. Na figura 4, observa-se uma das propostas para o

arranjo esperado em um reator a fusão nuclear.



**Fig. 4** – Funcionamento de uma central a fusão termonuclear controlada. fonte: [6] e [7].

Observa-se na figura 4 a operação de um reator a fusão nuclear com interação do tipo D-T, no qual é extraído do cobertor de Lítio, além do calor armazenado, a produção de Trítio que fará parte do combustível utilizado para o processo de fusão nuclear. Veja que também é extraído do reator todo o hélio produzido durante o processo da fusão nuclear do D-T.

Uma vez cessada a operação de disparo do reator a fusão nuclear, a coluna de plasma toroidal, no interior da câmara de vácuo, responsável por fornecer o ambiente para ocorrer a fusão nuclear se apaga. Com a extinção do plasma todo o processo é interrompido, e resta apenas o calor gerado da reação nuclear contido no cobertor de Lítio envolto da câmara de vácuo da máquina [5] e [20].

Na figura 4, é possível observar uma câmara chamada de blindagem. Esta blindagem é necessária para conter os nêutrons de alta energia que eventualmente possam atravessar o cobertor de Lítio. Uma complexa sala de controle será necessária para a

utilização desta máquina.

Diferentemente de um reator a fissão, o reator a fusão necessita de inúmeros subsistemas para operar. Sua complexa tecnologia, faz desta máquina uma das mais complicadas inventadas pelo homem. O local destinado a um reator desse tipo, vai necessitar de um grande complexo de edificações para seu funcionamento. A qualidade do plasma será fundamental para que a máquina seja eficiente. Desta forma, uma grande quantidade de diagnósticos do plasma será necessário, similar ao que se tem hoje nos laboratórios de pesquisa de fusão [6].

A máquina destinada a ser o reator propriamente dito, apesar de grande, ficará escondida por diversos subsistemas interligados a ela, além é claro, de uma grande quantidade de circuitos elétricos e bobinas magnéticas necessárias para gerar os campos magnéticos para o confinamento do plasma para a fusão.

## 6.2 Comparativo da eficiência de energia elétrica gerada

Apesar dos vários protestos realizados contra novas centrais de energia elétrica, seja ela qual for, vir de uma sociedade que faz uso constante e sistemático de telefones móveis, redes sociais, computadores, internet e outras inúmeras máquinas elétricas, a necessidade de energia elétrica, mesmo para essas pessoas críticas, é considerada uma prioridade para a espécie humana [5] e [19].

De fato somos seres consumidores vorazes de energia elétrica [3]. Durante as últimas décadas a humanidade tem desenvolvido tecnologias que permitem transformar outras fontes energia em energia elétrica. As chamadas fontes renováveis modernas, todas possuem a promessa de que no futuro possam ser eficientes e importantes.

O emprego de novas fontes de energia elétricas, como a dos sistemas fotovoltaicos, possibilitam gerar eletricidade em residências, comércio e empresas. Além de reduzir a necessidade de grandes centrais interligadas a matriz energética de um país, possibilita algo que é de extrema importância para a geração de

energia elétrica mundial, que é a diversidade de fontes e a difusão capilar de minicentrais distribuídas [8].

Infelizmente estas fontes de energia renováveis tradicionais são limitadas ao “humor” da natureza deste planeta. Isto porque, os ventos, a água, a iluminação solar, todos dependem do clima. A energia nuclear é imune ao clima normal (não considerando os acidentes naturais catastróficos).

A obtenção de energia elétrica de forma contínua e não intermitente, faz do emprego de energia nucleoelétrica, a opção mais robusta e eficiente [5] e [8]. A energia nuclear é sem dúvida a fonte de energia mais eficiente disponível para a humanidade. Veja a **figura 5**, com uma comparação entre as eficiências das fontes de energia para a produção de 1GW elétrico.

**Comparação da Quantidade de Combustível para Produzir 1 GW de Energia**



**Fig. 5** – Comparativo das eficiências dos combustíveis utilizados para gerar eletricidade. Fonte: [6] e [7].

Observe na **figura 5**, a diferença da quantidade de combustível para produzir 1GW ( $1 \times 10^9$  Watt) de energia elétrica com Fusão Nuclear (500 quilos) e o com o Carvão ( $\sim 2$  milhões de toneladas). Isto sem contabilizar a quantidade de dióxido de carbono liberado na atmosfera durante a queima de todo este volume de carvão em uma central termelétrica.

## 7. O futuro da energia elétrica por fusão nuclear

Gerar energia elétrica parece que será sempre algo importante para o futuro da humanidade. Além disto, será necessário fazê-la de forma sustentável e eficiente, para que possa ser solução e não um novo problema.

Novas fontes de energia, como solar, eólica,

hídrica, energia das marés e energia geotérmica serão uma importante contribuição [2]. Entretanto, é um fato inegável que estas novas fontes de energias serão fundamentais e tão somente apenas a uma parcela auxiliar de energia elétrica necessária, não podendo vir a substituir os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural).

No entanto, uma central nuclear baseada na reação de fissão gera resíduos radioativos que são difíceis de armazenar; e ainda depende de reservas de urânio que demandam enriquecimento para serem utilizados nos reatores [42] e [43]. Além disso é clara a dificuldade de mineração e refino da matéria-prima [7] e [25].

Resta a maior esperança do mundo com a fusão termonuclear controlada. Com reservas praticamente inesgotáveis e enorme eficiência energética, quando forem finalmente estabelecidos os parâmetros necessários para a fusão nuclear na Terra, a humanidade passará a uma nova fase de desenvolvimento sem precedentes devido a abundância de disponibilidade de eletricidade.

Desde a década de 1950, a energia nuclear [25] tem estado na arena energética mundial e tem se mostrado promissora. Com o pouco combustível consumido, pode-se obter enormes quantidades de energia com o processo de fusão nuclear, conforme pode ser visto na **figura 5**, mostrando o comparativo das eficiências dos combustíveis utilizados para gerar eletricidade.

Em 2016 o Tokamak dos EUA, *Alcatel C-Mod do MIT (Massachusetts Institute of Technology - www.mit.edu)* produziu um recorde mundial com a pressão do plasma no dispositivo que atingiu 2,05 atmosferas, com uma temperatura correspondente de 35 milhões de graus Celsius, cerca de duas vezes a temperatura do núcleo do Sol.

No ano de 2017, um Tokamak Chinês chamado EAST (*Experimental Advanced Superconducting Tokamak - Tokamak Experimento Avançado Supercondutor*) do Instituto de Pesquisa de Hefei (Hefei - english.ipp.ac.cn), conseguiu manter uma coluna de plasma em um confinamento de alta energia por 101,2 (cento e um vírgula dois) segundos no dia 03 de julho de 2017. Feito muito importante para conseguir a fusão nuclear, atendendo uma parte das três condições de simultaneidade ao longo do tempo de confinamento. Havendo, nesse caso,

necessidade de superação da densidade da temperatura.

A máquina Chinesa novamente se mostrou um excelente experimento de fusão termonuclear controlada. Em 13 de novembro deste ano de 2018, o EAST [44] conseguiu uma proeza, atendendo mais um dos requisitos das três condições de simultaneidade, agora a temperatura. Nesse dia, o Tokamak EAST conseguiu exceder os 100 milhões de graus Celsius durante o tempo de confinamento de 101,9 segundos, cerca de sete vezes a temperatura do Sol, que é de aproximadamente 15 milhões de graus Celsius. No exemplo foi atendido o requisito de temperatura esperado para se obter um reator a fusão.

Dessa forma, ficou pendente nesse projeto apenas o aumento da densidade do plasma. Atualmente o EAST tem se dedicado a esse desafio para que se consiga realizar o teste definitivo, utilizando ao mesmo tempo os três parâmetros de simultaneidade. Se a máquina for capaz disso, ela será a primeira a atingir o *Break Even Point*, antes mesmo do ITER. A nação Chinesa poderá ficar com o recorde de conseguir atingir individualmente e em conjunto as três condições de simultaneidade para a fusão nuclear. Se isto ocorrer, a China também, obterá o primeiro *Break Even Point* em um Tokamak. Sendo o primeiro país a ter um reator termonuclear controlado do tipo Tokamak.

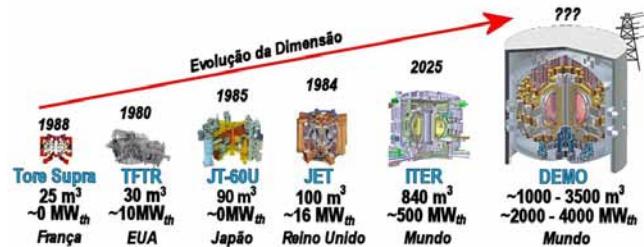
Os EUA apostam que seus experimentos com Confinamento Inercial com Micro Implosões de Pellets a Laser consigam obter um resultado satisfatório para prosseguir nas investigações científicas e quem sabe se tornar um produto comercializável. A Alemanha conduz também, seus próprios experimentos voltados a máquinas do tipo *Stellarator* que utilizam campo magnético para funcionamento contínuo, e que tem progredido em seus resultados. Sua principal máquina é a W7-X (Wendelstein 7-X - www.ipp.mpg.de/w7x), no Instituto de Física de Plasma Max Planck (IPP). A Rússia e Europa estão juntas no consórcio ITER, tendo que dividir a tecnologia com a própria China, EUA, Índia, Japão, Coreia do Sul, entre outros países com menor participação.

A constante, mas lenta evolução das máquinas do tipo Tokamak para a obtenção de um reator a fusão, envolve muitos países. Desde seu surgimento na antiga União Soviética, os experimentos têm sido conduzidos

em muitos laboratórios pelo mundo, em sua grande maioria com máquinas pequenas e médias. Os resultados com máquinas pequenas propiciaram muitos avanços tecnológicos em diagnósticos de plasma e sistemas de apoio importantes, tais como: controle operacional, controle de posição do plasma, circuitos elétricos e eletrônicos, construção e testes de bobinas supercondutoras. Dessa forma tem sido desenvolvido todo um conhecimento inédito na área de engenharia de fusão termonuclear controlada [26].

Entretanto, sabe-se que para obter a fusão nuclear é preciso construir máquinas grandes, tanto pelo volume do plasma quanto pela superfície da coluna de plasma toroidal. Por isso, vários países construíram com financiamento próprio durante ao longo das décadas diversas máquinas grandes do tipo Tokamak. Dentre estas máquinas grandes destacam-se quatro: Tore Supra (Centro de Pesquisas Nucleares em Cadarache) Francês, TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor* - PPPL – Laboratório de Física de Plasmas em Princeton) dos EUA, JT-60U (Japan Torus – JAERI – Instituto de Pesquisa em Energia Atômica do Japão) Japonês e o JET (*Joint European Torus* – Centro de Energia de Fusão em Culham) no Reino Unido.

Na **figura 6**, é possível observar os parâmetros de volume de plasma, quantidade de energia gerada por fusão nuclear, ano de operação e país financiador. A **figura 6** mostra a evolução do tamanho do plasma e a energia térmica gerada por fusão nuclear, ou esperada para os dispositivos que ainda não estão operacionais, como o ITER e o DEMO.



**Fig. 6** – Evolução dos dispositivos Tokamaks para reatores a fusão. Fonte: [8].

Os pesquisadores de fusão nuclear aguardam ansiosos os resultados que são esperados para os próximos anos, pois finalmente a tecnologia evoluiu o suficiente para ajudar nas pesquisas científicas de fusão nuclear,

permitindo avanços significativos obtidos nesses últimos 20 anos, que superam todos os alcançados nos últimos 70 anos. A iniciativa de construção do ITER tem sido uma promessa e um grande incentivo para a comunidade científica [29]. A possibilidade de gerar energia elétrica com a abundância sempre esperada, com um reator seguro e eficiente, será sem dúvida uma das maiores conquistas humanas.

Isso abrirá novas perspectivas para a humanidade, tanto no seu desenvolvimento socioeconômico, modificando a forma como produzimos bens de consumo, quanto ao valor agregado da energia para a fabricação de produtos e serviços. Outra mudança radical será presenciada na mobilidade urbana de uma forma jamais vista. A possibilidade de utilizar todos os veículos movidos a energia elétrica permitirá grandes deslocamentos a custos irrisórios. Permitindo inclusive explorar os oceanos como nunca foi feito, e finalmente colonizar outros planetas no espaço. Durante alguns anos após a construção e a operação de reatores a fusão nuclear, o custo da energia elétrica ainda será elevado, mas a tendência é de uma redução drástica no seu valor devido a grande oferta de energia elétrica [7].

## 8. Discussão e conclusão

No presente artigo foi apresentado o panorama atual da energia de fusão termonuclear no mundo, perspectivas, tecnologias, os atuais desenvolvimentos e resultados de experimentos científicos para a fusão nuclear e as expectativas quanto aos testes futuros das novas máquinas de investigação científicas pelo mundo.

É certo que esta tecnologia é hoje um trunfo da humanidade, mas para ser efetiva, ainda existe um longo caminho a ser percorrido pelos governos, agências, engenheiros e pesquisadores.

São dois os caminhos vislumbrados: o caminho da tecnologia, que permitirá aproveitar ao máximo os benefícios de se utilizar a energia nuclear para obter a energia elétrica, e o caminho da responsabilidade, com o compromisso de fazê-lo de forma coerente, segura e normatizada, com o apoio de políticas de segurança mundial e fiscalização comprometida

com a segurança nas fases de desenvolvimento, projeto e construção das novas centrais eletro nucleares.

Acredita-se que no futuro próximo as centrais de Fusão Termonucleares Controladas sejam uma

realidade corriqueira, elevando a qualidade de vida da raça humana, e ampliando em muito nosso conhecimento, permitindo a exploração efetiva no universo possibilitando levar os seres humanos para morar em outros planetas e no fundo dos oceanos.

## Referências Bibliográficas

- [1] K. R. Smith et al., Energy and Human Health, *Annu. Rev. Public Health* 2013. v.34:159–88, 2013.
- [2] E. Polymeneas, H. Tai, A. Wagn, Less Carbon Means More Flexibility: Recognizing The Rise of New Resources in The Electricity Mix, *McKinsey & Company*, 2018.
- [3] C. Tryggestad, et al., Global Energy Perspective 2019: Reference Case (January), *Energy Insights McKinsey*, 2019.
- [4] R. Biasi, A Energia Nuclear no Brasil, *Biblioteca do Exército – Editora*, Rio de Janeiro, 1979.
- [5] F. Wiltgen, (L.F.W. Barbosa), Sistema Elétrico Pulsado com Controle Digital do Tokamak ETE (Experimento Tokamak Esférico), *Dissertação de Mestrado*, ITA, 1998.
- [6] F. Wiltgen, (L.F.W. Barbosa), Desenvolvimento de um Sistema Inteligente em Tempo Real para Controlar o Deslocamento do Plasma no tokamak ETE (Experimento Tokamak Esférico), *Tese de Doutorado*, ITA, 2003.
- [7] F. Wiltgen, Sistemas Inteligentes para o Controle de Plasma em Máquinas do Tipo Tokamak – Aplicação de Sistemas de Controle com Inteligência Artificial, *Novas Edições Acadêmicas*, 2018.
- [8] F. Wiltgen, Energia Eletronuclear: Fusão e Fissão, Seminário apresentado na Semana de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté no dia 18 de setembro, 2017.
- [9] F. Wiltgen, Energia Nuclear Produzindo Eletricidade, Seminário apresentado no VII CICTED - Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento da Universidade de Taubaté no dia 19 de setembro, 2018.
- [10] F. Wiltgen, Energia Elétrica do Futuro, Seminário apresentado no VIII CICTED Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento da Universidade de Taubaté no dia 23 de outubro, 2019.
- [11] S. T. Brewer, 40th Anniversary The First Reactor, *U.S. Department of Energy (DOE/NE-0046)*, 1982.
- [12] V. C. Jones, Manhattan: The Army and The Atomic Bomb, *Center of Military History United States Army Washington, D.C.*, 1985.
- [13] F. G. Gosling, The Manhattan Project: Making The Atomic Bomb, *U. S. Department of Energy (DOE/MA-0001-01/99)*, 1999.
- [14] J. Lovelock, Gaia - Cura Para Um Planeta Doente, *Ed. Cultrix*, 2006.
- [15] E. Teller, *Fusion Magnétic Confinement*, Academic Press, New York, 1981.
- [16] L. A. Artisimovich, Tokamak Devices, *Nuclear Fusion*, 12: 215-252, 1972.
- [17] F. I. Boyle, *Plasmas en el Laboratorio y en el Cosmos*, México, Reverté Mexicana, 1968.
- [18] F. F. Chen, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, Plenum Press, New York, 1974.
- [19] R. W. Conn, The Engineering of Magnetic Fusion Reactors, *Scientific American*, 249(4), 1983.
- [20] J. Wesson, *Tokamaks*, Oxford, Clarendon Press, 1987.
- [21] Y. Eliezer, S. Eliezer, *The Fourth State of Matter - an Introduction to the Physics of Plasma*, Bristol and Philadelphia, Adam Hilger, 1989.
- [22] R. Herman, *Fusion - The Search for Endless Energy*, University Cambridge, USA, 1990.
- [23] F. Wiltgen (L.F.W. Barbosa), Relatório de Atividades da Área de Engenharia Elétrica e Eletrônica do Tokamak ETE (Experimento Tokamak Esférico), São José dos Campos, Inpe, 1996. (INPE - 5994 – PRP/195)
- [24] F. Wiltgen (L.F.W. Barbosa), et al. Sistema Elétrico Pulsado com Controle Digital do Tokamak ETE (Experimento Tokamak Esférico) Primeiro Relatório, São José dos Campos, Inpe, 1997. (INPE - 6137 – PRP/200)
- [25] L. A. A. Terremoto, Apostila de Pós-Graduação Disciplina TNR5764 – Fundamentos de Tecnologia Nuclear Reatores, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), 2004.
- [26] F. Wiltgen (L.F.W. Barbosa), et al. Pulsed electric system for production and confinement of plasma in ETE (Spherical Experiment Tokamak), 13th IEEE International Pulse Power Conference - PPC and 28th IEEE In-

- ternational Conference on Plasma Science - ICOPS, Las Vegas, USA, 17-22, June, 2001.
- [27] G. O. Ludwig, Anteprojeto de Engenharia do Tokamak ETE, São José dos Campos, Inpe, 1993. (Inpe - 5529 – PRE/1796)
- [28] A. C. L.Chian et al., Programa Nacional de Física de Plasmas e Fusão Termonuclear Controlada, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física, São Paulo, 1979.
- [29] J. Pámela, CHATELIER, M., Des Premiers Tokamaks au Projet ITER, La Recherche, 299: 61-66, 1997.
- [30] H. P. Furth, Tokamak Research, Nuclear Fusion 15: 487-534, 1975.
- [31] GA - Technologies - Fusion Power Research - Annual Report, California, 1990.
- [32] C. D. Beidler et al., Stellarator Fusion Reactors – An Overview, Toki Conf. ITC12, Dec., 2001.
- [33] A. H. Boozer, What is a Stellarator?, Physics of Plasmas, 5 (5): 1647-1655 , 1998.
- [34] L. H. Gresh, Inertial Confinement Fusion: An Introduction the Energy of the Stars, The University of Rochester Laboratory for Laser Energetics, NY 14623-1299, (585) 275-5101, 2009.
- [35] P. B. Radha et al., Inertial Confinement Fusion Using the OMEGA Laser System, IEEE Transactions on Plasma Science, v. 39(04), 2011.
- [36] J. Badziak, Laser Nuclear Fusion: Current Status, Challenges and Prospect, Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences, v. 60, n. 4, 2012.
- [37] W. Goldstein, R. Rosner, Lawrence Livermore National Laboratory, Workshop on the Science of Fusion Ignition on NIF, May 22-24, 2012.
- [38] E. I. Moses, Ignition and Inertial Confinement Fusion at The National Ignition Facility, Journal of Physics: Conference Series, 2010.
- [39] F. Wiltgen (L.F.W. Barbosa), Nascimento JR, C. L., Ludwig, G. O., Estudo de um Controlador Neural para o Experimento de Fusão Termonuclear Controlada - Tokamak – ETE, Congresso Brasileiro de Automática - XV CBA, Gramado, 2004.
- [40] G. O. Ludwig, Relatório de atividades de 2002 da linha de pesquisa e desenvolvimento em fusão termonuclear controlada – Fusão, do Laboratório Associado de Plasma – LAP, São José dos Campos, Inpe, 2003. (INPE-9613- NTC/353)
- [41] R. M. O. Pauletti, Projeto Estrutural de Reatores à Fusão - Passado, Presente e Futuro (Tese de Doutorado) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1994.
- [42] IAEA, Nuclear Power Reactors in the World – Edition 2017, Viena, 2017. (IAEA-RDS-2/37)
- [43] R. L. Murray, Nuclear Energy, Pergamon Press, Oxford, 1993.
- [44] Y. Wan, Road Map of Chinese Fusion Research and the First Chinese Fusion Reactor - CFETR, Germany, 531st Wilhelm and Else Heraeus Seminar on 3D versus 2D in Hot Plasmas, 30th April – 2nd May Physikzentrum Bad Honnef, 2013.

# Biblioteca do Exército

Tradição e qualidade em publicações



Biblioteca do Exército (BIBLIE) – Casa do Barão de Loreto é uma centenária instituição cultural do Exército Brasileiro que contribui para o provimento, a edição e a difusão de meios bibliográficos necessários ao desenvolvimento e aperfeiçoamento da cultura profissional-militar e geral.

## SEJA NOSSO ASSINANTE

e receba em sua residência nossos livros publicados.



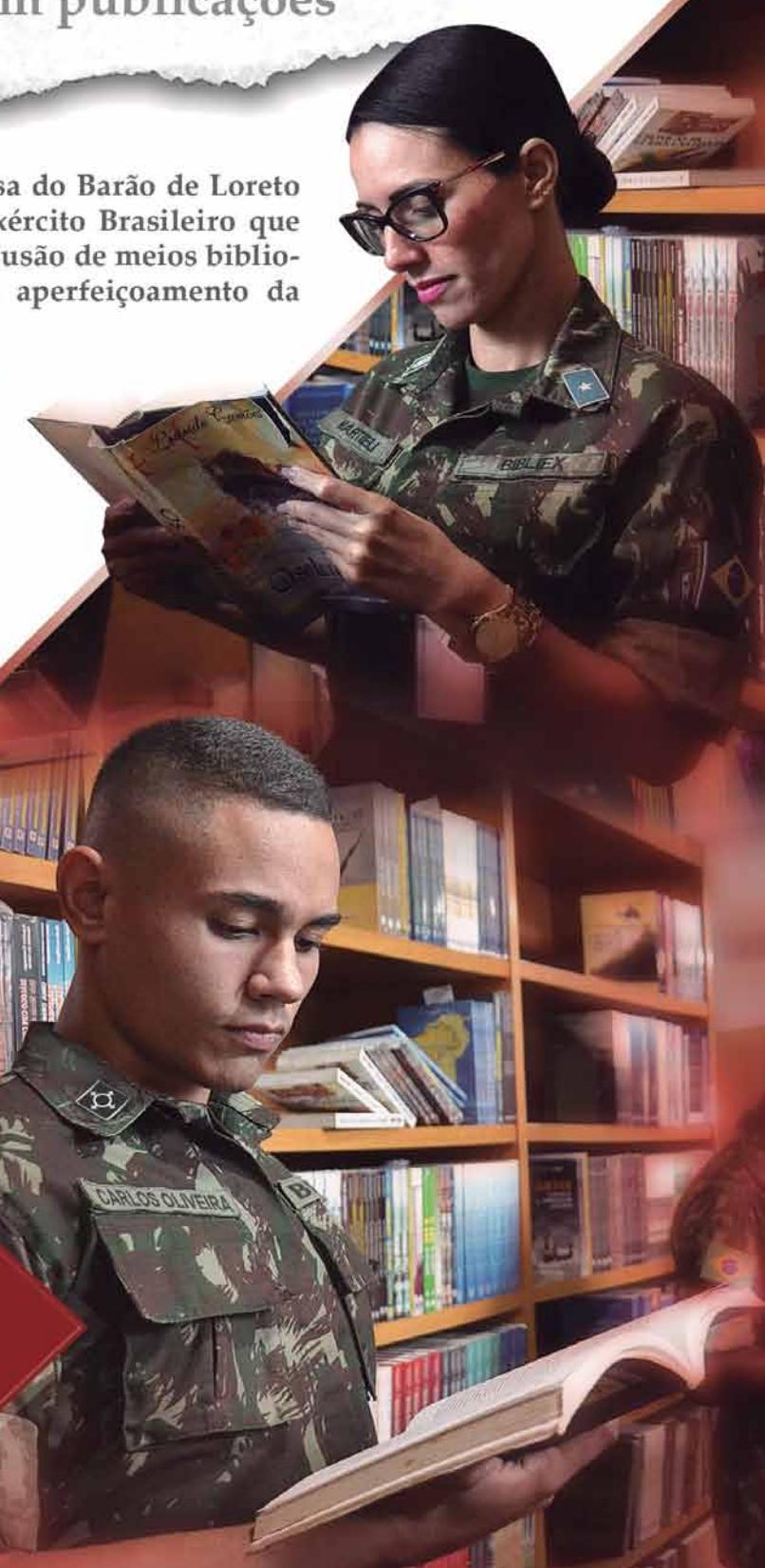
Tel.: (21) 2519-5707

Praça Duque de Caxias, nº 25  
Palácio Duque de Caxias  
Ala Marcílio Dias – 3º Andar  
Centro – CEP 20.221-260  
Rio de Janeiro – RJ



Acesse:

[www.bibliex.eb.mil.br](http://www.bibliex.eb.mil.br)



# Agora, você tem mais facilidade em suas mãos.

Acesse. Simule. Contrate.

Subjeto a alteração sem aviso prévio.  
Consulte as normas e condições vigentes.

Correção pela  
**TR**, pelo **IPCA**  
ou juros  
**Prefixados**

Juros ainda  
menores

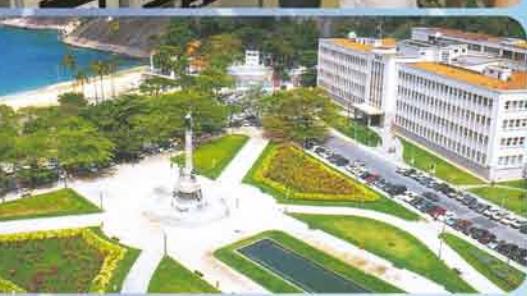


#fiqueemcasa

**FHE** **POUPEX**

[www.poupex.com.br](http://www.poupex.com.br)

0800 61 3040



## 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:



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)