

Implementação de um controle preditivo baseado em modelo adaptativo na otimização da trajetória de um veículo militar

Marcelo Andrés Acuña*, Gustavo Simão Rodrigues, Elias Dias Rossi Lopes

Instituto Militar de Engenharia

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270

Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*marceloacuna@gmail.com

RESUMO: Este artigo apresenta uma técnica de otimização não linear, a fim de determinar a trajetória de um veículo militar durante o teste da manobra evasiva dupla, do inglês Double Lane Change Maneuver (DLCM) da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN). O veículo modelado é um caminhão de três eixos, sendo somente o primeiro eixo com rodas esterçantes. Este artigo também traz o modelo da dinâmica lateral durante a desaceleração longitudinal. O esquema da modelagem apresentado neste trabalho leva em consideração a estrutura de otimização do Controle Preditivo Baseado em Modelo Adaptativo (CPBMA), composto pela planta com mudanças dinâmicas, a trajetória de referência e a atualização da planta, todos integrados pelo controlador, aplicado para determinar o ângulo de esterçamentos das rodas diretrizes. O presente algoritmo é um método amplamente estudado e empregado nos projetos atuais de veículos autônomos, visando modelar o comportamento do motorista ao dirigir o veículo durante uma manobra exigente.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização. Veículo Autônomo. Desaceleração. DLCM. CPBMA.

ABSTRACT: This article presents a non-linear optimization technique in order to determine the trajectory of a military vehicle during the Double Lane Change Maneuver (DLCM) of the North Atlantic Treaty Organization (NATO). The modeled vehicle is a three-axle truck, the first one with steering wheels. This article also presents the model of lateral dynamics during longitudinal deceleration. The modeling scheme presented in this work takes into account the optimization structure of Adaptive Model Predictive Control (AMPC), composed of the plant with dynamic changes, reference trajectory and plant update, all integrated by the controller, applied to determine the steering wheel angle. The present algorithm is a method widely studied and used in the current design of autonomous vehicles. The method aims to model the driver's behavior when driving the vehicle during a demanding maneuver.

KEYWORDS: DTN. Optimization. Autonomous Vehicle. Deceleration. DLCM. AMPC.

1. Introdução

Mais da metade das baixas na guerra ocorre quando os soldados entregam combustível, alimentos ou outros suprimentos em zonas de combate [1]. Os veículos autônomos militares vêm sendo recentemente o foco das pesquisas como solução ao problema sem por em risco as vidas dos soldados. Eles também são amplamente utilizados para outros fins, tanto industriais como pessoais. Esta máquina deve ser capaz de perceber o ambiente ao seu redor e navegar em conformidade, bem como usar sistemas de controle avançados e interpretar informações sensoriais para determinar rotas de navegação, além

de obstáculos e sinalização relevante. A proposta neste trabalho consiste na implementação de um controle preditivo baseado em modelo adaptativo (CPBMA), que faz com que o veículo percorra uma trajetória desejada, com um ângulo de guinada desejado, com variação da velocidade longitudinal, com restrições das variáveis físicas compostas pelo ângulo de esterçamento das rodas, pela velocidade de esterçamento das rodas e do deslocamento lateral, num determinado intervalo de valores. Para tornar isso possível, um algoritmo para otimizar a trajetória em cada tempo de amostragem é usado baseado no teste específico para viaturas militares de *Double Lane Change Maneuver* (DLCM) da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) [2]-

[4]. Os resultados obtidos do comportamento dinâmico modelados no ambiente de MATLAB/Simulink® são comparados com o mesmo veículo configurado no programa truckSIM®.

2. Fundamentação teórica

A dinâmica veicular normalmente é dividida em três partes para seu estudo: dinâmica longitudinal, lateral e vertical. Muitos modelos matemáticos simplificados foram desenvolvidos para se aproximarem do comportamento de um veículo real nestas áreas, sem necessitar desenvolver o modelo completo em 3D. Entre muitas alternativas diferentes para modelar a dinâmica e a cinemática lateral do veículo, a abordagem do modelo da bicicleta com três rodas foi usada neste trabalho. O modelo plano de veículo rígido e sua interação com um CPBMA são empregados [5]-[13].

2.1 Dinâmica planar

Para este estudo, o veículo é representado pelo modelo da bicicleta com três rodas e 3 graus de liberdade (GDL) (**figura 1**). As forças longitudinal, F_x , e F_y lateral, são aplicadas nas rodas dianteira, intermediária e traseira. A velocidade longitudinal da roda esterçante dianteira, v_d , forma o ângulo de deslizamento, β_d , com o eixo longitudinal do veículo, x . São estabelecidos três sistemas de coordenadas, o primeiro para a roda em relação ao

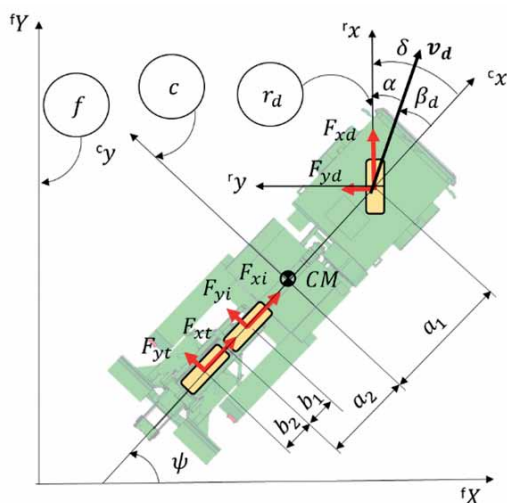


Fig. 1 – Modelo da bicicleta aplicado.

veículo, r_d , o segundo para o veículo, c , em relação ao último sistema que é o referencial global fixo, f . Assim a rotação do veículo no centro de massa (CM) no referencial fixo é chamada de ângulo de guinada, ψ e o ângulo entre a direção longitudinal da roda e o referencial do veículo é chamado de ângulo de esterçamento da roda, δ . Resultando entre na diferença de β_d e δ , chamado ângulo de desvio do pneu, α .

Para determinar a força lateral, F_y , no referencial da roda, quando ela é girada sob uma carga vertical, F_z , é considerado o ângulo de desvio, α , proporcional à força lateral, segundo a **equação 1**

$$F_y = -C_\alpha \alpha ; \alpha \leq 5^\circ \quad (1)$$

Onde C_α é a rigidez lateral do pneu (do inglês *cornering stiffness*). A rotação do eixo dianteiro está modelada usando a geometria Ackerman [3], pela **equação 2**.

$$\cot(\delta_{int}) - \cot(\delta_{ext}) = \frac{b_w}{L} \quad (2)$$

Onde δ_{int} e δ_{ext} são os ângulos de esterçamento da roda interna à curva e externa, respectivamente, b_w é a bitola e L a base de rodas (distância entre eixo dianteiro e o centro de ancoragem dos eixos traseiros).

Para a **figura 1** é aplicada a formulação segundo Newton-Euler no referencial da viatura no CM, obtendo-se as **equações 3**.

$$\begin{cases} \sum {}^c F_x = m_v \dot{v}_x - m_v v_y \dot{\psi} \\ \sum {}^c F_y = m_v \dot{v}_y + m_v v_x \dot{\psi} \\ \sum {}^c M_z = I_{zz} \ddot{\psi} \end{cases} \quad (3)$$

Onde m_v é a massa do veículo, I_{zz} é o momento de inércia do veículo no eixo vertical-z.

2.2 Trajetória desejada

A manobra evasiva dupla do tipo OTAN é essencialmente uma versão semelhante à especificada

na ISO 3888-1 [6]. O veículo deve poder se mover lateralmente pelo menos 3,5 m e depois retornar à sua rota original. A distância da largura de entrada e saída de teste permanece constante, enquanto a ISO 3888-1 apresenta essa distância reduzida. A prova da OTAN visa refletir o esforço máximo de manobra de alta velocidade para veículos maiores e, por tanto, é proporcionalmente mais longo. Neste teste, o veículo entra na zona de provas com uma certa velocidade inicial e em seguida, o acelerador é liberado.

Segundo Blundell [7], o equacionamento da trajetória lateral numa manobra evasiva dupla para veículos militares [2] corresponde a uma função cosseno duplo, **equação 4**.

$${}^f Y_{d(f_x)} = \frac{3,5 m}{2} [1 - \cos({}^f X \pi / (24 m + LG))] \quad (4)$$

Onde ${}^f Y_{(f_x)}$ é a posição lateral do CM do veículo no referencial fixo, ${}^f X$ a posição longitudinal do CM do veículo no referencial fixo e L é o comprimento do veículo. Os parâmetros geométricos de largura e comprimento da pista de prova estão em função do comprimento e largura do veículo [2].

Outra referência é o ângulo de guinada desejado, ψ_d , definido pela seguinte equação **equação 5** [8].

$$\psi_{d(f_x)} = L \kappa_{(f_x)} = L \frac{{}^f \ddot{Y}_{(f_x)}}{[{}^f \dot{Y}_{(f_x)} + 1]^{2/3}} \quad (5)$$

Onde ${}^f \ddot{Y}_{(f_x)}$ e ${}^f \dot{Y}_{(f_x)}$ são, respectivamente, a segunda e primeira derivada da equação da trajetória do veículo, o arco da curva e L a base de rodas.

Para determinar as velocidades longitudinal e lateral das rodas no modelo de seis rodas é empregado o Teorema de Chasles para transformar as velocidades do sistema referencial do veículo às rodas em função do vetor posição da roda com origem no CM do veículo e extremo no centro de rotação da roda, r_n , sendo n o n.º de roda de 1-6 (**equação 6**). De esta maneira, pode-se determinar a posição de cada roda

no referencial fixo.

$$\{v_n^{fn}\} = \{v_{CM}^f\} + \dot{\psi} \times r_n \quad (6)$$

3. Controle preditivo baseado em modelo adaptativo (CPBMA)

Na literatura existem muitos modelos de controle desenvolvidos para estabelecer o ângulo de esterçamento das rodas diretrizes no teste da DLCM, mas eles baseiam-se normalmente no veículo com velocidade longitudinal constante. Porém, o primeiro problema de planejamento do comportamento do motorista no esterçamento das rodas foi abordado na necessidade de atualizar permanentemente a formulação da trajetória desejada, o ângulo de guinada desejado e as equações da dinâmica planar em função da variação da velocidade em cada instante durante a desaceleração. No trabalho de [9] é apresentada a abordagem de emprego de um CPBMA para um robô manipulador de duas rodas com diferentes massas, o problema correspondente à seleção e colocação de objetos ou carga de um lugar para outro controlando a localização do CM de variação rápida do ângulo de gravidade do sistema modelado que não é linear.

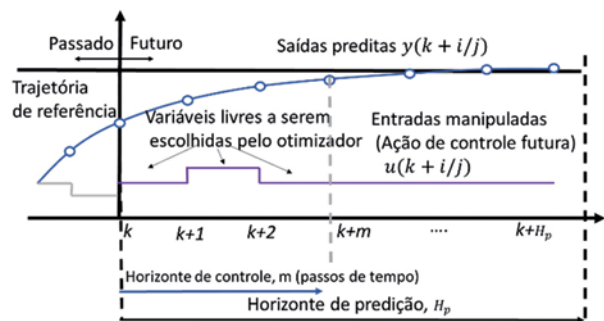


Fig. 2 – Esquema representativo de um controlador preditivo.

No presente trabalho, é utilizado um CPBMA, amplamente usado no setor de controle de processos. Ele depende da dinâmica do processo do sistema e leva o tempo atual em consideração, mantendo a otimização

em intervalos de tempo futuros, k (**figura 2**). Este é um método de otimização de horizonte temporal, p , iterativo e finito. O controlador alcança a previsão dos estados futuros do modelo linear invariável no tempo (MLIT) da planta não linear, em torno de pontos de equilíbrio específicos. Na prática, a previsão dos estados futuros permite a predição de erros futuros, u_k . O CPBMA usa a mudança de pontos operacionais para atualizar o modelo de previsão [10], [11].

Em relação à formulação é empregada a estratégia de espaços de estados:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A x(k) + B u(k) + d \\ y &= C x(k) + D u(k) + v \end{aligned} \quad (7)$$

Onde x representa os estados, A , B , C e D são as matrizes de estado de entrada e saída, $u(k)$ a entrada da planta, y a saída da planta, d o ruído do processo representado pelos erros da modelagem, v a saída do ruído representado pela medição dos erros.

A predição e a função custo para o modelo do CPBMA é proposta e desenvolvida por Bemporad [12], transformada em um problema de otimização quadrático (PQ), escrevendo-se da seguinte forma:

$$\min_x (f^T x + \frac{1}{2} x^T H z) \quad , \quad Ax \leq b \quad (8)$$

Onde $x^T = [z^T \epsilon]$. Esta última equação representa as chamadas decisões do modelo, onde H é a matriz Hessiana, A é a matriz das restrições dos coeficientes lineares, b e f são vetores. Este procedimento pode ser empregado para funções dinâmicas da planta de sistemas não lineares. Devido à mudança dos parâmetros da planta, emprega-se o filtro Kalman para ajustar os ganhos das funções a serem linearizadas. As equações que representam o emprego de filtro são as seguintes [9]-[12]:

$$L_k = (A_k P_{k|k-1} C_{m,k}^T + N)(C_{m,k} P_{k|k-1} C_{m,k}^T + R)^{-1} \quad (9)$$

$$M_k = P_{k|k-1} (C_{m,k} P_{k|k-1} C_{m,k}^T + R)^{-1} \quad (10)$$

$$P_{k|k-1} = A_k P_{k|k-1} C_{m,k}^T - (A_k P_{k|k-1} C_{m,k}^T + N) L_k^T + Q \quad (11)$$

Onde L_k e M_k são as matrizes de ganho para cada intervalo para manter consistência com os valores atualizados do modelo da planta, Q , R e N são as matrizes de covariância constante, A_k e $C_{m,k}$ são matrizes do espaço de estado da entrada do controlador de estado, $P_{k|k-1}$ é o valor do estado estimado do erro da matriz de covariância no instante k , baseado na informação disponível no instante $k-1$.

O modelo da planta (veículo) está modelado partindo das **equações 3** e são:

$$\begin{bmatrix} \dot{c}y \\ \dot{\psi} \\ \dot{\psi} \\ \dot{f}Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} & 0 \\ 1 & v_x & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\dot{y} \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ fY \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_\alpha}{m_v} \\ 0 \\ \frac{2C_\alpha a_1}{I_{zz}} \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (12)$$

Onde:

$$a_{11} = -\frac{6C_\alpha}{m_v v_x} \quad (13)$$

$$a_{13} = -v_x - \frac{2C_\alpha [a_1 - (a_2 - b_1) - (a_2 + b_2)]}{m_v v_x} \quad (14)$$

$$a_{31} = -\frac{2C_\alpha [a_1 - (a_2 - b_1) - (a_2 + b_2)]}{I_{zz} v_x} \quad (15)$$

$$a_{33} = -\frac{2C_\alpha [a_1^2 + (a_2 - b_1)^2 + (a_2 + b_2)^2]}{I_{zz} v_x} \quad (16)$$

Nota-se que todos os pneus por serem iguais apresentam o mesmo valor de rigidez lateral, (**equação 1**).

4. Aplicação do CPBMA

A modelagem do comportamento do motorista leva em consideração a ação de tirar o pé do acelerador no início da pista de prova partindo de uma velocidade inicial de 10 m/s (36,6 km/h) e esterçar as rodas para evadir os obstáculos.

O esquema computacional desenvolvido em ambiente MATLAB/Simulink®, mediante diagramas de blocos, é

ilustrado na **figura 3**. Os elementos essenciais são a planta com mudança dinâmica (**equação 12**), a trajetória de referência (**equações 4 e 5**), o bloco atualização com as matrizes, A , B , C e D , atualizadas com a velocidade no instante de amostragem e o bloco CPBMA do controlador (sem ruído).

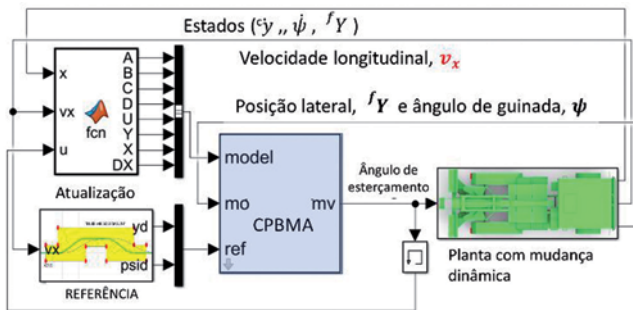


Fig. 3 – Diagrama de blocos do CPBMA no Simulink® [13].

As entradas do controlador são o deslocamento lateral desejado, fY_d , e o ângulo de guinada desejado, ψ_d , sendo a saída o ângulo de esterçamento, δ . No caso da planta, a entrada é o ângulo de esterçamento, δ , fornecido pelo controlador e suas saídas são a posição lateral, fY , e o ângulo de guinada, ψ . Para o caso em estudo, empregam-se restrições de variáveis físicas, com valores máximos e mínimos do ângulo de esterçamento da roda, δ , da velocidade de esterçamento das rodas, $\dot{\delta}$, e do deslocamento lateral, fY . No presente estudo é considerada uma relação de direção (1:1).

Os dados empregados para o controlador são apresentados na **tabela 1**.

Tab. 1 – Parâmetros do controlador

Parâmetros	Símbolo	Valor	Grandeza
Tempo de amostragem	T_s	0,015	s
Horizonte de predição	H_p	10	-
Horizonte de controle	m	2	-
Esterçamento volante mín.	δ_{min}	-30	º
Esterçamento volante máx.	δ_{max}	30	º
Vel. esterçamento volante mín.	$\dot{\delta}_{min}$	-0,5	º/s
Vel. esterçamento volante máx.	$\dot{\delta}_{max}$	0,5	º/s
Deslocam. lateral mín.	fY_{min}	-1,918	m
Deslocam. lateral máx.	fY_{max}	5,744	m
Ângulo de guinada mín.	ψ_{min}	-11,45	º
Ângulo de guinada máx.	ψ_{max}	11,45	º

5. Resultados

Como resultado parcial, a simulação alcançou uma trajetória do CM de veículo ótima; o deslocamento lateral tem um desvio de $\pm 0,15$ m da referência, ou seja, praticamente a mesma trajetória do truckSIM®. Considera-se que a simulação desenvolvida do veículo executando o teste da manobra evasiva dupla do tipo OTAN foi aprovada, passando todas as rodas dentro do limite, como mostra a **figura 4**.

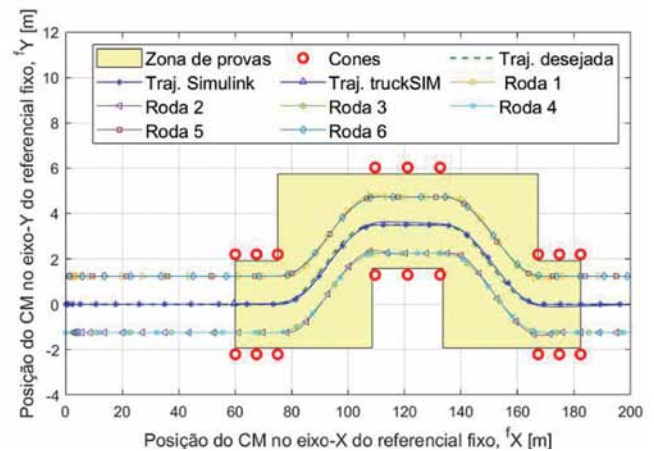


Fig. 4 – Trajetória otimizada.

A curva do ângulo de guinada, resultado da simulação, é bem próxima à referência, ($\pm 0,1$ º), sendo os valores picos de $+9,37$ º e $-9,29$ º. Em comparação com os valores obtidos do truckSIM®, ele atinge valores de $8,57$ º e $-8,45$ º, como é mostrado na **figura 5**.

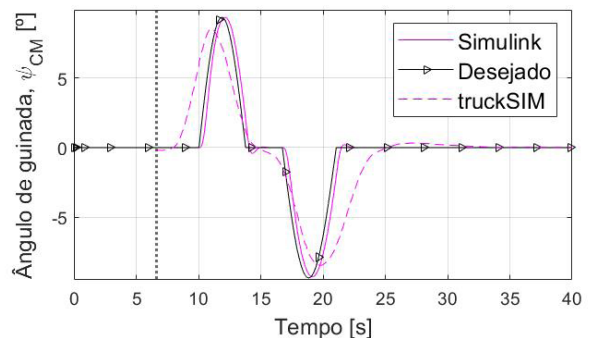


Fig. 5 – Comparação dos ângulos de guinada.

6. Conclusão

Pode-se concluir que o objetivo do presente

trabalho foi alcançado, obtendo-se a trajetória para o teste segundo a OTAN da manobra evasiva dupla para uma velocidade inicial de 10 m/s.

A implementação do Controle Preditivo Baseado em Modelo Adaptativo (CPBMA) demonstrou ser uma ferramenta confiável e eficiente na otimização da trajetória para o problema militar proposto, convergindo em resultados dentro dos valores admissíveis. Fica como principal sugestão para

trabalhos futuros a integração com um processador de imagens que detecte as linhas da estrada para transformá-las em entradas de referência do controlador.

Agradecimentos

Os autores agradecem a *VirtualCAE*, *Mechanical simulation™* e à Seção de Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia.

Referências Bibliográficas

- [1] Pérez, H.; Xataka; <http://xataka.com>, acessada em março de 2020.
- [2] NATO; Performance – dynamic stability, International Staff Defense Support Division, AVTP 03-160W: Bruxelas, 1991, p. 1-11.
- [3] Acuña, M.A.; Simão Rodrigues, G.; Queiroz, R.V.G.; Lopes E.D.R.; Modeling and dynamic analysis of a 6 x 6 heavy military truck by adaptive model predictive control with application to NATO lane change test course, *Journal of Automobile Engineering*, SAGE Publication. 2020. <https://doi.org/10.1177/0954407020924156>.
- [4] Reinaldo, I.L.; Lopes, E.D.R.; Silva, R.R.R.M.; Montenegro, D.P.; Rodrigues, G.S.; Otimização de Parâmetros da Suspensão com base em Requisitos de Conforto e Estabilidade, XXVII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva. São Paulo, Blucher. 2019, p. 418-433. ISSN 2357-7592, doi 10.5151/simea2019-PAP36.
- [5] Jazar, R.N.; *Vehicle Dynamics Theory: and Application*, 2nd ed., Springer Science: New York, 2014, cap 2,10.
- [6] ISO 3888-1; Passenger cars – test track for severe lane-change maneuver – part I: Double lane-change, ISO: Genebra, 2002.
- [7] Blundell, M.; Harty, D.; *Multibody systems approach to vehicle dynamics*, [S.l.], Elsevier, 2004.
- [8] Jalali, K.; Uchida, T.; McPhee, J.; Steve, J; Steve, L.; Development of an advanced fuzzy active steering controller and a novel method to tune the fuzzy controller; SAE International. 2013, 245.
- [9] Önkol, M.; Kasnakoğlu, C.; Adaptive model predictive control of a two-wheeled robot manipulator with varying mass; *Measurement and Control*, SAGE Publications. 2018, v. 51, n. 1-2, p. 38–56.
- [10] MATLAB; Understanding Model Predictive Control, Part 1: Why Use MPC?; 06 mai. 2018; <https://www.youtube.com/watch?v=8U0xiOkDcmw>, acessada em fevereiro de 2020.
- [11] MATLAB; Understanding Model Predictive Control, Part 2: What is MPC?; 06 mai. 2018; <https://www.youtube.com/watch?v=cEWnixjNdzs&t=1s>, acessada em fevereiro de 2020.
- [12] Bemporad, A.; Morari, M.; Ricker, N. L.; *Model predictive control toolbox user's guide*. The mathworks, EUA, 2010.
- [13] MATLAB; Understanding Model Predictive Control, Part 6: How to Design an MPC Controller with Simulink; 06 mai. 2018; <https://www.youtube.com/watch?v=cEWnixjNdzs&t=1s>, acessada em fevereiro de 2020.