

Controle de Cruzeiro para Veículo Autônomo de Escala Reduzida

Acarcio Gomes de Almeida Junior¹, Abel Guilhermino da Silva Filho¹,

¹Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil

Emails: {agaj, agsf}@cin.ufpe.br

Abstract—A indústria do transporte tem enfrentado desafios significativos nos últimos anos, como o grande número de acidentes de trânsito. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), os acidentes rodoviários são uma das principais causas de morte de pessoas. É importante ressaltar que a maioria dos acidentes de trânsito é causada por erros humanos, como imprudência, uso de álcool ou tempo de reação do condutor. Dessa forma, surge a necessidade de automatizar a condução para torná-la mais eficaz e segura. Este estudo concentra-se na automatização da condução longitudinal, visando controlar a aceleração de um veículo de escala reduzida. Para alcançar o objetivo, é realizado a identificação do modelo longitudinal do veículo por meio de técnicas de identificação de sistemas em caixa preta, e realizado o projeto de um controlador PID baseado na metodologia de Ziegler-Nichols. O controlador apresentou um bom desempenho temporal, com tempo de acomodação inferior a 1s e com tempo de pico de 0.3s, apesar de apresentar um sobressinal de 17.85%. Os resultados demonstraram que o controlador foi capaz de controlar o veículo, eliminando o erro de regime permanente e apresentando ótimos tempos de resposta para a aplicação.

Index Terms—Controle de Cruzeiro, PID, Veículo Autônomo.

I. INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS) [1], os acidentes rodoviários são uma das principais causas de morte de pessoas com idade entre 5 e 29 anos e a 12^a causa entre pessoas de todas as idades. De acordo com o Relatório Global de Status sobre Segurança no Trânsito de 2023 da OMS, cerca de 1,19 milhão de pessoas morrem anualmente em todo o mundo devido a acidentes de trânsito, sendo que cerca de um terço são ocupantes de veículos automotores [1].

No Brasil, em 2023, a Confederação Nacional do Transporte (CNT), registrou 67.620 acidentes nas rodovias federais, com 56.666 dos acidentes tendo vítimas (mortos ou feridos) resultando em 5.605 vidas perdidas [2]. Quando comparado com o ano de 2022, o Brasil teve um aumento de 4.8% no número total de acidentes e de 3.1% no número de mortes.

Neste contexto, os fabricantes de automóveis têm instalado sistemas de apoio à condução longitudinal e transversal com o objetivo de minimizar os impactos negativos dos acidentes de trânsito e garantir um maior conforto para os passageiros, proporcionando um tráfego mais seguro e eficiente nas estradas e nas cidades, como é o caso do Controle de Cruzeiro, do inglês *Cruise Control* (CC).

O CC é um sistema de assistência à condução longitudinal baseado em um sistema de controle em malha fechada, como pode ser observado na Figura 1. Popularmente conhecido como piloto automático, o CC compara a velocidade atual

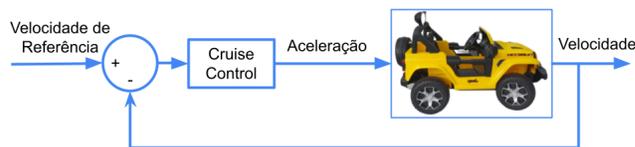


Fig. 1. Diagrama de blocos do CC

do veículo com a velocidade de referência definida, calculando assim o erro no sistema. Caso o erro seja maior que zero, o sistema acelera o veículo; caso seja menor que zero, o sistema desacelera o veículo. Este sistema é frequentemente instalado em veículos de passageiros.

Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um controlador de cruzeiro capaz de acelerar e desacelerar um veículo de escala reduzida visando garantir uma maior segurança e conforto aos passageiros de veículos.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Em [3] é projetado um *cruise control* do tipo Proporcional-Integral (PI), considerando um modelo de dinâmica longitudinal linearizado para a condição de velocidade constante. A utilização do controlador PI apresentou uma resposta temporal dentro dos parâmetros de projeto, tendo erro de regime permanente zero e tempo de acomodação de 45 segundos.

Em [4], é apresentado um estudo sobre um controlador de aceleração para veículos em escala reduzida. Nesse estudo, foi realizada uma comparação entre os controladores P, PI, PD e PID, sendo que o controlador PID apresentou os melhores indicadores de desempenho, especialmente em relação aos tempos de reação e ao erro de regime permanente.

Em [5], é implementado um *cruise control* baseado em lógica *fuzzy*. O controlador utiliza como entradas o erro e a derivada do erro entre a velocidade desejada e a velocidade atual do veículo. O sistema foi desenvolvido e validado por meio de simulações no Matlab/Simulink.

III. METODOLOGIA

O fluxo de trabalho, apresentado na figura 2, é composto por quatro etapas: geração do *dataset*, função de transferência, sintonização por Ziegler-Nichols e análise temporal. Na primeira etapa, é descrito o sistema experimental utilizado para a coleta dos dados. Na segunda etapa, é realizado um levantamento para encontrar a função de transferência do

sistema. Na terceira etapa, é implementado o método de Ziegler-Nichols para encontrar os parâmetros do controlador PID. Por fim, é realizada uma análise da resposta temporal do sistema a uma entrada degrau.

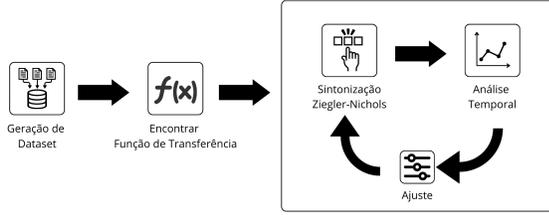


Fig. 2. Metodologia proposta

A. Dataset

O veículo de escala reduzida, apresentado na Figura 3, é utilizado para gerar o *dataset*. O veículo um modelo Jeep Bandeirantes Wrangler, possui tração traseira nas rodas e permite o esterçamento do volante para ambos os lados.

Em [6] é apresentado a arquitetura de sensoriamento para o veículo de escala reduzida apresentado na Figura 3. A tração do veículo é realizada pelas duas rodas traseiras, por meio de dois motores elétricos acionados por módulos de potência do modelo BTS7069. O veículo conta com uma Unidade de Controle Eletrônico (Electronic Control Unit - ECU) para o controle longitudinal, responsável pela aceleração e frenagem do veículo. A câmera ZED2i, instalada no veículo, é um sensor estereoscópico 3D, que permite a medição de distâncias por meio do mapa de profundidade gerado. Além disso, a ZED2i possui outros sensores integrados, como giroscópio, acelerômetro e magnetômetro, possibilitando a medição de variáveis dinâmicas do veículo, como a velocidade longitudinal.

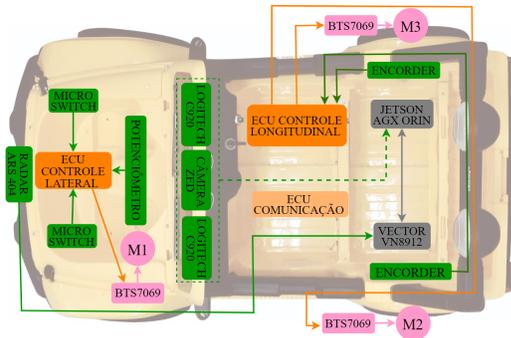


Fig. 3. Arquitetura de sensoriamento do Veículo de Escala Reduzida

O conjunto de dados utilizado é composto por 7674 amostras coletadas a uma frequência de 122Hz. A variável de controle empregada é o valor do Controle por Modulação de Pulso (PWM) aplicado aos motores elétricos responsáveis pela força de tração do veículo. O sinal PWM varia de 0 a 255, representando 0 a 5V, respectivamente. A Figura 4 apresenta os valores do PWM. Como saída, temos a velocidade longitudinal do veículo apresentada em m/s. A Figura 4 apresenta os valores coletados do veículo. Os valores de velocidade foram obtidos baseado nos dados coletados pela IMU da câmera ZED2i.

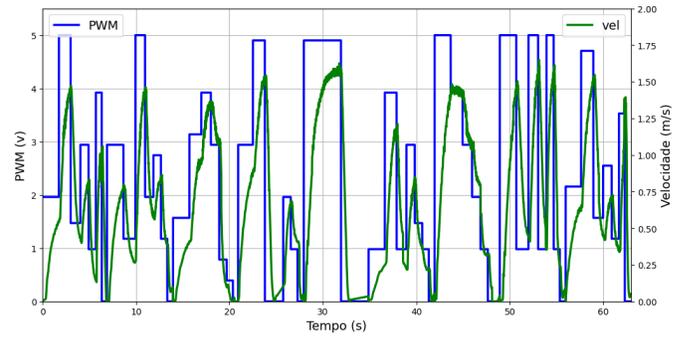


Fig. 4. Dados de entrada e saída do *dataset*

B. Função de Transferência

A identificação de sistemas por modelos computacionais é possível devido as diversas ferramentas computacionais oferecidas atualmente, como o *system identification* do Matlab. A *Toolbox System Identification* do MATLAB é uma ferramenta que permite identificar e modelar sistemas dinâmicos usando dados de entrada e saída. O usuário coleta medições e seleciona um modelo, como uma função de transferência. A toolbox aplica algoritmos para estimar os parâmetros do modelo, otimizando-o para que ele represente adequadamente o comportamento do sistema. Além disso, oferece recursos para validar o modelo, assegurando que ele se ajuste bem aos dados coletados. Essa abordagem é útil em diversas áreas da engenharia e ciências aplicadas.

C. Sintonização por Ziegler-Nichols

O controlador utilizado é do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo), pois apresenta um bom desempenho na regulação de sistemas dinâmicos, sendo capaz de ajustar rapidamente a aceleração e minimizar o erro de regime permanente. As regras de sintonização de Ziegler-Nichols utilizam o controlador PID no formato apresentado na eq. Onde, K_p é o ganho proporcional, T_i é o tempo integral e T_d é o tempo derivativo. O método consiste em encontrar os valores de K_p , T_i e T_d que proporcionam uma operação estável do sistema.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1)$$

Segundo [7] o método de sintonização por Ziegler-Nichols é composto pelas seguintes etapas:

- Inicialmente, define-se que $T_i = \infty$ e $T_d = 0$.
- Considerando apenas a ação de controle proporcional, deve se encontrar o valor de K_p que irá exibir na saída do sistema uma oscilação sustentada, tal qual o sistema marginalmente estável. Esse valor será considerado o ganho crítico K_{cr} .
- Com base na resposta do sistema, pode-se determinar o período de oscilação P_{cr} conforme a Figura 5.
- Com os valores de K_{cr} e P_{cr} definidos, é determinado os valores de K_p , T_i e T_d de acordo com a Tabela I.

Uma das dificuldades na implementação do controle PID, é a sintonização experimental dos valores dos ganhos proporcional,

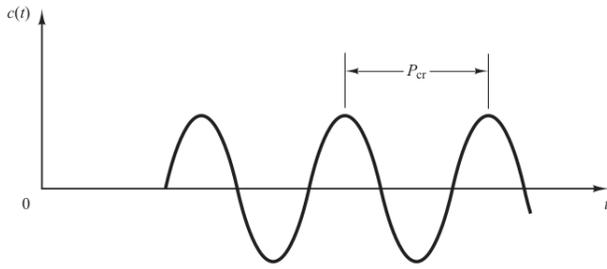


Fig. 5. Oscilação sustentada com período P_{cr}

TABLE I
SINTONIZAÇÃO ZIEGLER-NICHOLS

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

integral e derivativo. Apesar da maioria dos processos serem intrinsecamente não-lineares, o uso deste tipo de controlador se baseia na consideração de que, em torno do ponto típico de operação, o sistema se comporta de maneira aproximadamente linear. Esta premissa funciona bem na maioria dos processos, para uma determinada janela de tempo e operação, a partir da qual normalmente se faz necessária uma resintonia do controlador por meio de pequenos ajustes nos ganhos.

D. Análise Temporal

De acordo com [7] as características de desempenho de um sistema de controle são especificadas em termos de resposta transitória a uma entrada em degrau unitário. A resposta transitória apresenta, frequentemente, oscilações amortecidas. Assim, é possível definir algumas características da resposta do sistema, que são definidas a seguir e podem ser visualizadas na Figura 6.

- 1) Tempo de atraso (t_r): trata-se do tempo requerido para que a resposta alcance metade de seu valor final pela primeira vez.
- 2) Tempo de subida (t_d): é o tempo requerido para que a resposta passe de 10 a 90%, ou de 5% a 95%, ou de 0% a 100% do valor final. Para sistemas de segunda ordem subamortecidos, o tempo de subida de 0% a 100% é o normalmente utilizado.
- 3) Tempo de pico (t_p): é o tempo para que a resposta atinja o primeiro pico de sobressinal.
- 4) Máximo sobressinal (M_p): é o valor máximo de pico da curva de resposta, medido a partir da unidade. Se o valor final da resposta em regime permanente diferir da unidade, então é comum utilizar porcentagem máxima de sobressinal, definida por:

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} * 100\% \quad (2)$$

- 5) Tempo de acomodação (t_s): é o tempo necessário para que a curva de resposta alcance valores em uma faixa

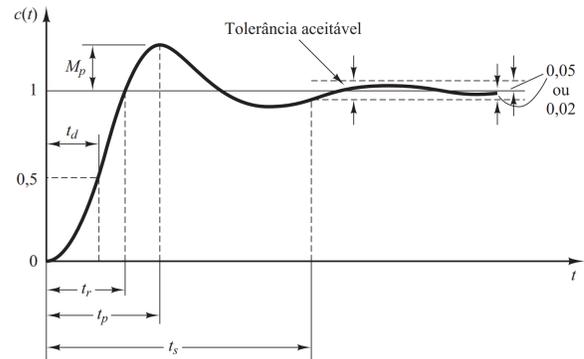


Fig. 6. Curva de resposta em degrau unitário

(geralmente de 2% ou 5%) em torno do valor final, aí permanecendo indefinidamente. O tempo de acomodação está relacionado à maior constante de tempo do sistema de controle.

IV. RESULTADOS

A. Função de Transferência

Para obter o modelo em caixa preta do sistema, considerando a função de transferência, foi utilizada a *toolbox System Identification* do Matlab. Foi realizado um estudo sobre o número de polos e zeros contidos no modelo, o modelo que apresenta o melhor ajuste aos dados é o modelo com quatro polos e dois zeros, com um fit de 68.74%. A função de transferência identificada para esse modelo, é apresentada na Eq. 3.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{-0.1433s^2 + 3.175s + 0.04697}{s^4 + 17.12s^3 + 268.2s^2 + 481.8s + 7.317} \quad (3)$$

B. Projeto do Controlador

O projeto do controlador foi desenvolvido por meio da plataforma Matlab/Simulink. Inicialmente, é encontrado o valor de $K_{cr} = 733$ que leva o sistema a um ponto de oscilação sustentada, conforme mostra a Figura 7. Após analisar a resposta do sistema em oscilação sustentada, é encontrado o valor do período de oscilação, $P_{cr} = 0.5$. Conhecendo os dois valores, é possível encontrar os ganhos do controlador PID por meio das regras de sintonização de Ziegler-Nichols, os valores encontrado dos ganhos do controlador são apresentados na Tabela II.

TABLE II
SINTONIZAÇÃO ZIEGLER-NICHOLS - Cruise Control

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	439.5	0.25	0.0625

Com o controlador sintonizado por meio das regras de Ziegler-Nichols, é possível avaliar o controlador quando o sistema é submetido a uma entrada do tipo degrau. A Figura 8 apresenta a curva de resposta do sistema para o controlador sintonizado.

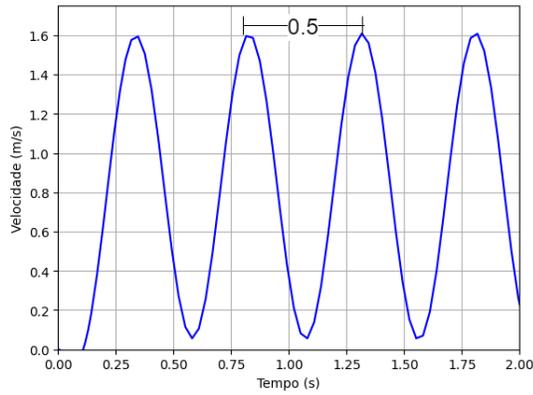


Fig. 7. Resposta do Sistema para um $K_{cr} = 733$

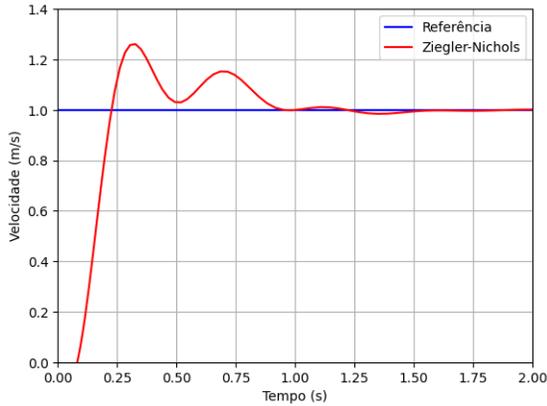


Fig. 8. Resposta ao degrau para o controlador sintonizado por Ziegler-Nichols

TABLE III
SINTONIZAÇÃO ZIEGLER-NICHOLS AJUSTADA

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	423.4	0.2739	0.0685

Devido à natureza experimental dos controladores sintonizados pelo método de Ziegler-Nichols, é necessário realizar um ajuste fino nos ganhos, com o objetivo de melhorar a resposta do sistema. Dessa forma, na Tabela III são apresentados os novos ganhos do controlador.

A Figura 9 apresenta a resposta a uma entrada degrau do sistema com o controlador ajustado. É possível observar que, com o ajuste, o sistema passou a apresentar um menor overshoot e um menor tempo de pico. Entretanto, a mudança não altera os tempos de atraso, de subida e de acomodação do sistema.

O sistema foi avaliado de acordo com as métricas apresentadas na tabela IV. Para o tempo de subida, foi considerado o valor de 0% a 100% que é normalmente utilizado para sistemas subamortecidos. Para o tempo de acomodação foi utilizado o critério de oscilação de 5% em torno do valor final. É possível observar que o controlador apresenta valores de resposta temporal que garantem um bom tempo de resposta do sistema, apesar de apresentar um overshoot de 17.85%.

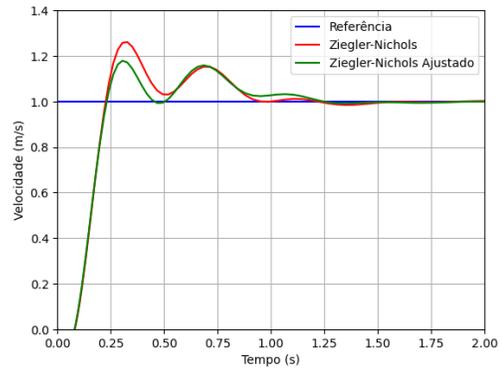


Fig. 9. Resposta ao degrau para o controlador ajustado

TABLE IV
DESEMPENHO DOS CONTROLADORES PID

	PID	PID (Ajustado)
Tempo de atraso (T_d)	0.15	0.15
Tempo de subida (T_r)	0.23	0.23
Tempo de pico (T_p)	0.33	0.30
Sobresinal (M_p)	26.03%	17.85%
Tempo de acomodação (T_s)	0.84	0.84

V. CONCLUSÕES

Este trabalho propõe um controlador de cruzeiro simples, aplicado a um veículo de escala reduzida, com o objetivo de oferecer mais conforto e segurança para os passageiros. O controlador foi sintonizado pelo método de Ziegler-Nichols e apresentou ótimo desempenho temporal. Ele foi capaz de realizar o controle, zerando o erro de regime permanente e apresentando tempos de resposta inferiores a 1 segundo. Por fim, para aumentar a segurança do veículo, o controlador deve ser utilizado em conjunto com outras estratégias de controle, como o ACC (Controle de Cruzeiro Adaptativo), para gerenciar a distância entre veículos.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FUNDEP Programa Mover - Linha V, pelo incentivo financeiro aos projetos SegurAuto (ANP:27192*11) e SEGCOM (27192*80), também à FINEP (01.22.0157.00 - REF. 1157/21), assim como ao CNPq (304391/2021-2) e FACEPE (1661-1.03/24, APQ-0071-1.03/22).

REFERENCES

- [1] W. OMS, "Oms.(2023) global status report on road safety 2023," 2023.
- [2] C. N. d. T. CNT, "Painel cnt de consultas dinâmicas de acidentes rodoviários 2023," 2023.
- [3] G. A. Ulsoy, H. Peng, and M. Çakmakci, *Automotive Control Systems*. New York, NY-USA: Cambridge University Press, 1 ed., 2012.
- [4] J. V. C. Duarte and P. H. L. Figueiredo, "Desenvolvimento de arquitetura eletroeletrônica para veículos de pequena escala," 2022.
- [5] F. A. C. Restivo, "Controlador difuso para veículos em platooning," mestrado em engenharia eletrotécnica e de computadores, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022.
- [6] A. F. Coelho, "Savips - uma infraestrutura veicular autônoma em pequena escala para platoon," mestrado em ciência da computação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil, 2023.
- [7] K. Ogata, *Engenharia de Controle Moderno*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 5 ed., 2011.