

Sintonia Iterativa Baseada em Dados da Malha Fechada de Trajetória de um AGV Utilizando Margens de Ganho e de Fase ^{*}

José Adeilmo Nunes Barbosa Junior ^{*} Rafael Bezerra Correia Lima ^{**}
Péricles Rezende Barros ^{**}

^{*} Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, (e-mail: jose.adeilmo@ee.ufcg.edu.br)

^{**} Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, (e-mail: [rafael.lima, prbarros]@dee.ufcg.edu.br)

Abstract: In this article, a iterative tuning of the PI trajectory controller of an AGV is performed using as performance parameters the gain and phase margins of the closed loop system. Three case studies are analyzed, with different specifications of margins for the same system. The AGV system it is a naturally unstable system, it is not possible to use methods that require open-loop information. For this reason, closed loop relay methods were used to estimate system margins. The results achieved validate the tuning method used. The performance criteria provided fast convergence and kept the system stable.

Resumo: Neste artigo, é realizada a sintonia iterativa do controlador PI de trajetória de um AGV utilizando como parâmetros de desempenho as margens de ganho e fase do sistema em malha fechada. São analisados três estudos de casos, com diferentes especificações de margens para o mesmo sistema. O AGV é um sistema naturalmente instável, não sendo possível utilizar métodos que necessitem de informações da malha aberta. Por este motivo foram empregados os métodos de relé em malha fechada para estimar as margens do sistema. Os resultados alcançados validam o método de sintonia utilizado. Os critérios de desempenho proporcionaram uma rápida convergência e mantiveram o sistema estável.

Keywords: AGV; Line Follower; Data Driven Control; PI Tuning

Palavras-chaves: AGV; Seguidor de Trilha; Controle Baseado em Dados; Sintonia de PI

1. INTRODUÇÃO

Os veículos autoguiados (AGVs - *Automated Guided Vehicle*) possuem a capacidade de se locomoverem de forma autônoma. Esta forma de locomoção pode ocorrer em percursos fixos ou livres (Long e Zhang, 2012). A movimentação livre permite uma maior flexibilidade nas rotas, entretanto expõe os operadores a um maior grau de risco, especialmente se tratando de ambientes industriais (Moshayedi et al., 2019). Já o percurso fixo restringe a capacidade de movimentação dos AGVs a trilhas pré definidas e marcadas fisicamente no ambiente, tornando sua locomoção mais previsível e limitada a uma determinada área, garantindo uma maior segurança em sua operação (Moshayedi et al., 2019). AGVs de curso fixo podem utilizar sensores magnéticos, sensores óticos ou câmeras para auxiliar a navegação no ambiente (Li et al., 2015). Dentre as opções a navegação, as guias magnéticas possuem um desempenho imune a alteração da iluminação ou sujeira e um baixo custo de instalação e manutenção (Lee e Yang, 2012).

Na maioria das aplicações dos seguidores de trilha, é utilizada lógica de controle On-Off, onde sensores discretos

são aplicados verificando a existência ou não da trilha para que os comandos de manobra sejam executados. Pode ser empregando apenas um sensor (Saini et al., 2021) ou uma matriz (Pakdaman e Sanaatiyan, 2009). Porém essas abordagens descontínuas podem gerar variações bruscas de velocidade podendo danificar a carga transportada por um AGV. Abordagens com controladores contínuos utilizam-se de Heurística ou otimização. Em Pakdaman e Sanaatiyan (2009) foi desenvolvido um controlador Fuzzy proporcional-derivativo (PD) empregado em um simulador de robô móvel. Em Saadatmand et al. (2020) o controlador multivariável foi sintonizado utilizando o método Q-learning. Porém estas abordagens são sub ótimas e não garantem a estabilidade em malha fechada.

As técnicas clássicas de controle como o método de Ziegler-Nichols são aplicados na sintonia do controlador proporcional-integral-derivativo (PID) com as informações da resposta do sistema no tempo ou na frequência por meio de experimentos (Åström e Hägglund, 1995).

Para sistemas instáveis em malha aberta, abordagens de sintonia em malha fechada são necessárias. O método do relé, inicialmente proposto por Åström e Hägglund (1984), em sua forma original, possibilita extrair informações como o ganho crítico e a frequência crítica do sistema ao

^{*} Este trabalho foi apoiado pela CAPES - Brasil.

submete-lo a condições específicas. Em Arruda e Barros (2003a) é apresentado um método de sintonia iterativa de controladores PI utilizando o método do relé em malha fechada a partir de especificações de margem de ganho e margem de fase.

Neste trabalho foi aplicado o método sugerido em Arruda e Barros (2003a) para a sintonia do controlador PI de trajetória de um AGV guiado por trilha magnética utilizando um sensor contínuo. São analisados três estudos de casos, com diferentes especificações de margens para o mesmo sistema. O objetivo principal é validar a estratégia de sintonia com base em critérios objetivos de margem de ganho e margem de fase.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. Na seção 2 é apresentada a plataforma utilizada nos experimentos. Na seção 3 é realizada a modelagem de um robô móvel de tração diferencial. Na seção 4 é apresentado um método para sintonia iterativa baseado nos experimentos do relé em malha fechada. Na seção 5 são mostrados os resultados obtidos nos 3 casos propostos. Por fim, na seção 6 encontra-se a conclusão do trabalho.

2. PLATAFORMA DE EXPERIMENTOS

Um veículo autoguiado foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Trata-se de um robô móvel com tração diferencial (*Differential Drive Wheeled Mobile Robot - DDWMR*) equipado com um sensor de trilha magnética, LiDAR (*Light Detection And Ranging*) e uma câmera. É acionado por 2 motores de corrente contínua sem escova (*brushless DC - BLDC*). Sua arquitetura pode ser observada na Figura 1.

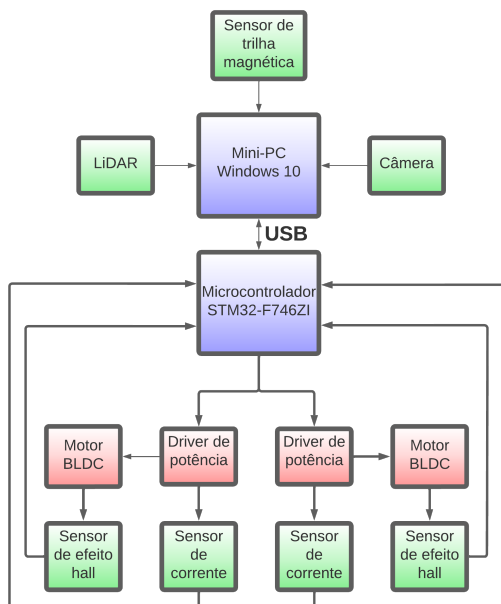


Figura 1. Arquitetura do AGV desenvolvido pelo LIEC.

O AGV desenvolvido tem como finalidade ser uma plataforma de ensino, permitindo a implementação de diferentes estratégias de controle. Sua arquitetura flexível, baseada em um mini-PC e um microcontrolador possibilita rodar

malhas de controle regulatório, com rígidas exigências temporais, assim como implementar estratégias de controle avançadas para as malhas de mais alto nível.

Em Dias et al. (2020) foi realizado o primeiro projeto de controle da plataforma, porém, o controlador de trajetória tinha desempenho semelhante a um on-off. Isso motivou o reprojeto proposto nesse trabalho, cujo procedimento segue critérios quantitativos de Margem de ganho e Margem de fase.

O AGV do LIEC utiliza a arquitetura de controle descrita pelo diagrama da Fig. 2, com: controle de corrente com frequência de $5kHz$; controle de velocidade com frequência de $1kHz$ e controle de trajetória a uma frequência de $20Hz$.

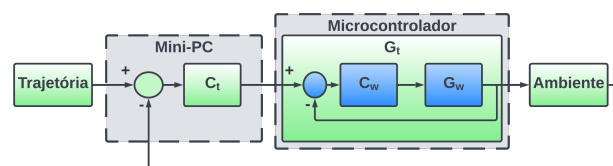


Figura 2. Diagrama de blocos representando a arquitetura de controle do AGV.

3. MODELAGEM DO AGV

A modelagem do AGV foi realizada com base no trabalho de Dhaouadi e Hatab (2013). A representação do sistema pode ser observada na Fig. 3.

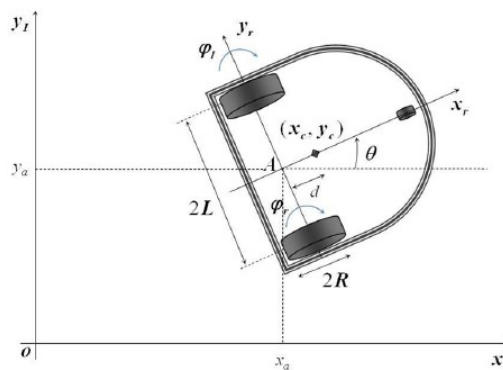


Figura 3. Diagrama de corpo livre

onde:

- O - referencial inercial;
- A - referencial local, posicionado no centro do eixo dos motores;
- R - raio das rodas;
- L - distância da roda até o ponto A ;
- d - distância do ponto A até o centro de massa do DDWMR;
- θ - ângulo de rotação do veículo em relação ao referencial inercial;
- $\dot{\varphi}_R$ e $\dot{\varphi}_L$ - velocidade angular da roda direita e esquerda, respectivamente.

O DDWMR possui 2 sistemas de coordenadas. O primeiro é um sistema inercial global fixo no plano onde o robô se

movimenta, de eixos $\{x_I, y_I\}$ e o segundo é o sistema de coordenadas local fixado no robô, de eixos $\{x_r, y_r\}$.

Para a obtenção do modelo cinemático são consideradas as seguintes restrições:

- Não há derrapamento: a velocidade na direção do eixo transversal é nula:

$$\dot{y}_a^r = 0, \quad (1)$$

não existindo movimento lateral do veículo;

- Rolamento puro: todas as rodas mantêm um ponto de contato com o chão, sem haver escorregamento das mesmas, onde a velocidade linear de cada roda é calculada da seguinte forma:

$$\begin{cases} v_R = R\dot{\varphi}_R \\ v_L = R\dot{\varphi}_L \end{cases} \quad (2)$$

A velocidade linear do DDWMR pode ser calculada como a velocidade linear média das rodas e sua velocidade angular será a diferença das velocidades lineares de suas rodas dividido pela distância entre elas, obtendo-se:

$$v = \frac{v_R + v_L}{2} = R \frac{(\dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L)}{2} \quad (3)$$

e

$$\omega = \frac{v_R - v_L}{2L} = R \frac{(\dot{\varphi}_R - \dot{\varphi}_L)}{2L}. \quad (4)$$

ou, em sua forma matricial:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_L \end{bmatrix}. \quad (5)$$

De (5) é possível deixar as velocidades angulares de cada roda $\dot{\varphi}_R$ e $\dot{\varphi}_L$ em função das velocidades linear e angular do DDWMR, da forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & \frac{L}{R} \\ \frac{1}{R} & -\frac{L}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (6)$$

4. SINTONIA INTERATIVA UTILIZANDO MÉTODO DO RELÉ EM MALHA FECHADA

Considere o sistema em malha fechada mostrado na Fig. 4. A função de transferência do processo é dada por $G(s)$, e $C(s)$ é a função de transferência do controlador.

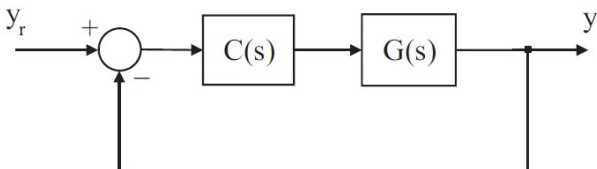


Figura 4. Representação de um sistema em malha fechada.

A função de sensibilidade complementar é definida como,

$$\frac{Y(s)}{Y_r(s)} = T(s) = \frac{G(s)C(s)}{1 + G(s)C(s)}. \quad (7)$$

sendo $Y_r(s)$ e $Y(s)$ a resposta em frequência do sinal de referência e da saída, respectivamente. Dado $T(s)$, a função de transferência de malha fechada $L(s) = G(s)C(s)$ pode ser calculada por,

$$L(s) = \frac{T(s)}{1 - T(s)}. \quad (8)$$

Para realizar a estimação da margem de ganho do sistema foi utilizado a estrutura mostrada na Fig. 5. É demonstrado em Åström e Hägglund (1995), pelo método de funções descritivas, que o ciclo limite obtido nesta realimentação ocorre na frequência crítica da malha fechada.

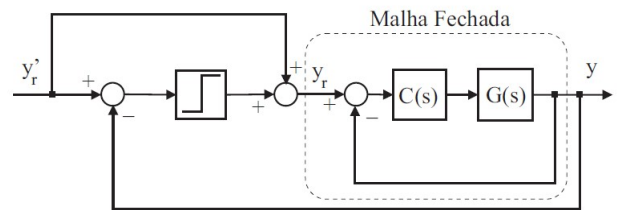


Figura 5. Estrutura do método do relé para estimação de margem de ganho.

Em Arruda e Barros (2003b) é demonstrado que a margem de ganho ao utilizar este método é calculada como:

$$GM = \frac{4d}{\pi a_{cl}} + 1, \quad (9)$$

onde d é a amplitude do relé, a_{cl} é a amplitude da oscilação na saída e a frequência crítica $\hat{\omega}_c$ é calculada a partir da frequência da oscilação de saída.

Para a estimação da margem de fase foi utilizada a estrutura mostrada na Fig. 6 onde o sistema irá oscilar na frequência de cruzamento do ganho ω_g , (Arruda e Barros, 2003b).

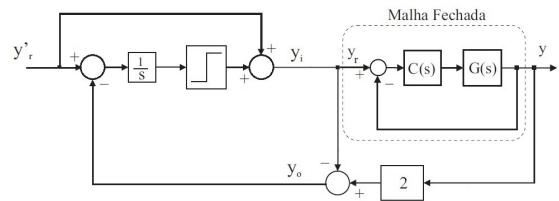


Figura 6. Estrutura do método do relé para estimação de margem de fase.

Então a margem de fase do sistema em malha fechada será obtida por:

$$PM = \pi + \angle \hat{L}(e^{j\hat{\omega}_g}), \quad (10)$$

A sintonia iterativa do sistema é realizada afim de alcançar as especificações de margem de ganho A_m e fase ϕ_m , onde $A_m > 1$ e $\phi_m > 0^\circ$.

Para alcançar as especificações é necessário que as seguintes equações sejam satisfeitas:

$$\begin{aligned} \angle G(j\omega_c) C(j\omega_c) &= -\pi \\ |G(j\omega_c) C(j\omega_c)| &= \frac{1}{A_m} \\ |G(j\omega_g) C(j\omega_g)| &= 1 \\ \angle G(j\omega_g) C(j\omega_g) &= -\pi + \phi_m \end{aligned} \quad (11)$$

O cálculo dos parâmetros do controlador é não trivial dado a não linearidade do problema. Em Arruda e Barros (2003a) foi proposto um algoritmo iterativo para o cálculo dos parâmetros.

É considerado um controlador da forma:

$$C(s) = K_p \frac{s + 1/T_i}{s}. \quad (12)$$

A solução possui 4 etapas, são elas:

- Realização do experimento do relé para margem de ganho;
- Cálculo de um novo controlador $C^{(k)}(s)$ que satisfaça A_m em ω_c , onde:

$$K_p^{(k)} = K_p^{(k-1)} \frac{GM}{A_m}; \quad (13)$$

- Realização do experimento do relé para margem de fase;
- Cálculo de um novo controlador $C^{(k+1)}(s)$ que satisfaça ϕ_m , onde:

$$T_i^{(K+1)} = \frac{\tan \left[\phi_m - PM + \tan^{-1} \left(\omega_g T_i^{(k)} \right) \right]}{\omega_g}, \text{ e} \quad (14)$$

$$K_p^{(K+1)} = K_p^{(k)} \frac{\sqrt{\left(1/T_i^{(k)}\right)^2 + \omega_g^2}}{\sqrt{\left(1/T_i^{(K+1)}\right)^2 + \omega_g^2}}. \quad (15)$$

O algoritmo deverá ser executado até que os valores de margens seja igual aos especificados, convém utilizar uma tolerância ϵ para cada margem.

5. RESULTADOS

O método foi aplicado na malha de controle de trajetória do AGV, onde o sensor magnético realiza a medição da distância lateral do centro do sensor ao centro da trilha. Os valores medidos pelo sensor estão em milímetros, onde o zero representa o centro do sensor, valores positivos significam que a trilha está a direita do centro do sensor e valores negativa significam que a trilha está a esquerda do centro do sensor.

O sinal do sensor é utilizado para controlar a velocidade angular do veículo, mantendo-se a velocidade linear constante. As velocidades angulares de cada roda são calculadas por meio da equação (6).

O controle de trajetória é realizado por um controlador PI na forma padrão do Simulink, expresso pela equação (16).

$$C(s) = P \left(1 + I \frac{1}{s} \right) \quad (16)$$

Da equações (12) e (16) percebe-se que os controladores possuem uma estrutura diferente, sendo necessário realizar as seguintes operações: $P = K_p$ e $I = 1/T_i$.

Os experimentos foram realizados com o AGV percorrendo uma linha reta de 10m de comprimento. Com tolerâncias de $\epsilon_{GM} = 0,01$ para margem de ganho e $\epsilon_{PM} = 1^\circ$ para margem de fase.

O controlador inicial possui ganhos $P = 0,05$ e $I = 0,001$. Foi realizado um experimento para a estimação da margem de ganho com o controlador inicial, parte do experimento pode ser visto na Fig. 7, onde $GM = 1,6366$. Já a margem de fase inicial foi de $PM = 100,3851^\circ$, parte do experimento pode ser visto na Fig. 8.

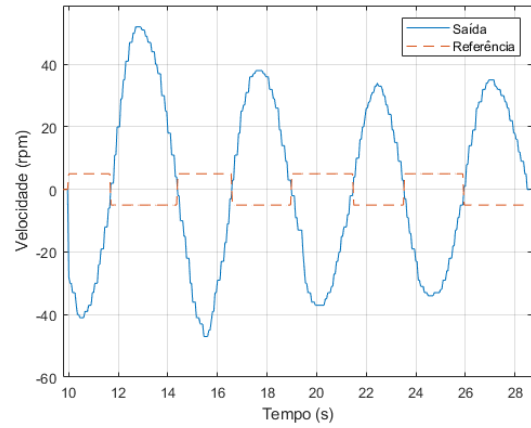


Figura 7. Parte do experimento do relé para estimação da margem de ganho.

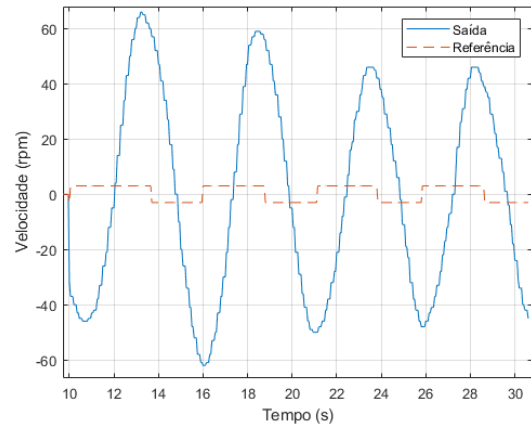


Figura 8. Parte do experimento do relé para estimação da margem de fase.

O método foi utilizado para realizar a sintonia com três especificações de margens, são elas:

- Caso 1: $A_m = 1,4$ e $\phi_m = 60^\circ$,
- Caso 2: $A_m = 1,8$ e $\phi_m = 90^\circ$,
- Caso 3: $A_m = 1,6$ e $\phi_m = 75^\circ$.

5.1 Caso 1

O caso 1 ($A_m = 1,4$ e $\phi_m = 60^\circ$), foi escolhido para observar o impacto de um controlador com comportamento mais agressivo no sistema. Na Tabela 1 tem-se os parâmetros do controlador calculado pelo método e as estimações da margem de ganho e margem de fase para cada iteração.

Tabela 1. Ganhos dos controladores e margens das iterações da primeira especificação.

Iteração	$K_p^{1/2}$	K_p	T_i	GM	PM
0	0,05	-	0,001	1,6366	100,3851°
1	0,0585	0,0585	0,0035	1,4244	90,7965°
2	0,0595	0,0590	0,0037	1,3979	62,1239°
3	0,0589	-	-	1,4194	61,6000°

5.2 Caso 2

No caso 2 ($A_m = 1,8$ e $\phi_m = 90^\circ$) tem-se uma abordagem mais robusta com margens maiores que o caso 1. Na Tabela 2 tem-se os parâmetros do controlador calculado pelo método e as estimações da margem de ganho e margem de fase para cada controlador.

Tabela 2. Ganhos dos controladores e margens das iterações do caso 2.

Iteração	$K_p^{1/2}$	K_p	T_i	GM	PM
0	0,05	-	0,0010	1,6366	100,3851°
1	0,0455	0,0453	0,0019	1,7958	96,8182°
2	0,0452	0,0455	0,0015	1,8019	92,9388°
3	0,0453	-	-	1,8064	89,5279°

5.3 Caso 3

No caso 3 ($A_m = 1,25$ e $\phi_m = 45^\circ$), é utilizado um controlador mais robusto que o caso 1 e mais agressivo do que o controlador do caso 2. Na Tabela 3 tem-se os parâmetros do controlador calculado pelo método e as estimações da margem de ganho e margem de fase para cada controlador.

Tabela 3. Ganhos dos controladores e margens das iterações do caso 3.

Iteração	$K_p^{1/2}$	K_p	T_i	GM	PM
0	0,05	-	0,0010	1,6366	100,3851°
1	0,0511	0,0484	0,0027	1,5787	93,1429°
2	0,0478	0,0481	0,0028	1,6063	77,5000°
3	0,0480	-	-	1,6042	75,2914°

5.4 Comparação

Em todos os casos o método convergiu na terceira iteração, satisfazendo as especificações de margens de ganho e fase. Na Fig. 9 tem-se a evolução das margens a cada iteração do método.

Observou-se uma maior variação nos valores dos ganhos dos controladores ao serem calculados pela primeira vez por meio da sintonia, como visto na Fig. 10. A existência de iterações fracionadas no cálculo do ganho proporcional se dá pelo fato de este ganho ser calculado 2 vezes a cada iteração.

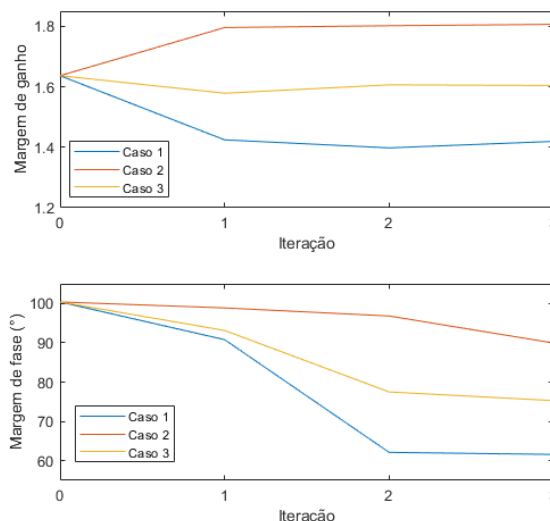


Figura 9. Gráfico da evolução das margens de ganho a cada iteração.

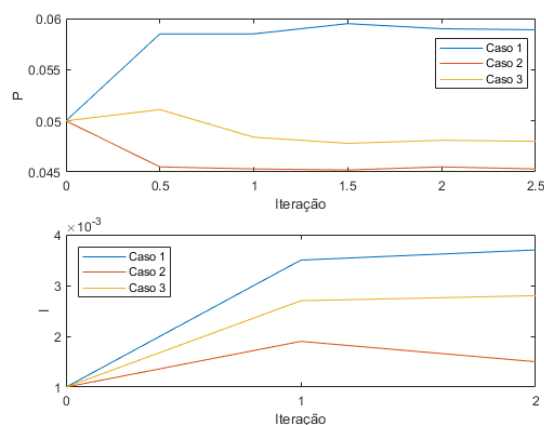


Figura 10. Gráfico da evolução dos ganhos do controlador a cada iteração.

Para comparar o desempenho dos controladores calculados, realizou-se um experimento em uma trilha composta por 2 retas conectadas por meio de um trecho curvo, assim como mostrado na Fig. 11.

Na Fig. 12, observa-se o desempenho dos 3 controladores projetados. O caso 1 possui uma resposta mais agressiva, porém resulta em oscilações de maior amplitude, ao ponto de quase perder a referência da trilha em $t \approx 35s$. O controlador do caso 2, por possuir a maior margem de fase, também possui as oscilações de menor amplitude. No caso 3 foi obtido um desempenho intermediário em relação aos casos anteriores.

Para comparar o desempenho durante todo trajeto foi utilizado a integral do erro absoluto (*Integral Absolute Error* - IAE), por ser um critério de desempenho adequado para controladores integrativos (da Silva e Barros, 2020). O resultado pode ser visto na Tabela 4.

Dentre os 3 controladores projetados, o controlador que garante a maior margem de fase para o sistema obteve

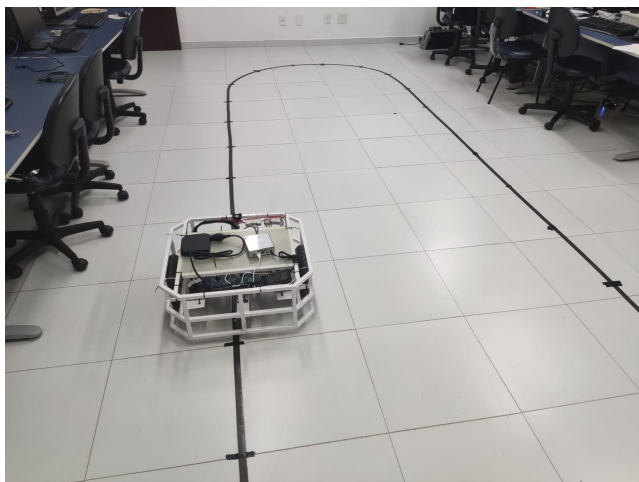


Figura 11. Trilha de teste.

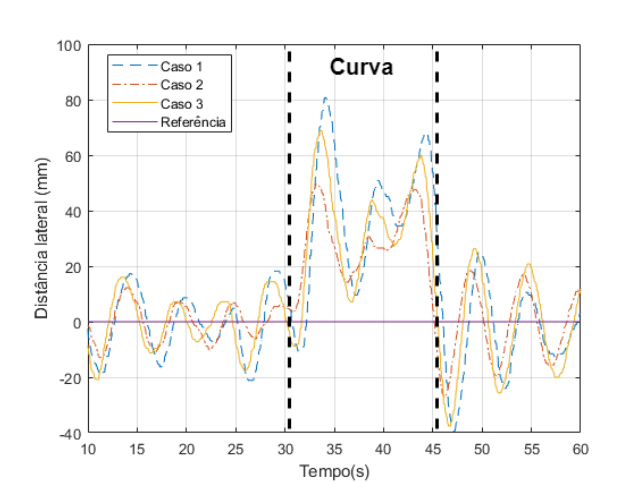


Figura 12. Gráfico comparando o desempenho dos 3 controladores projetados.

Tabela 4. Integral do erro absoluto dos 3 casos projetados.

Especificação	IEA
Caso 1	$2,0553 \times 10^4$
Caso 2	$1,4808 \times 10^4$
Caso 3	$1,9254 \times 10^4$

o melhor desempenho. Ao diminuir as margens, as amplitudes das oscilações aumentaram. No caso 1, mesmo uma margem de fase $GM = 1,4$ quase tornou o sistema instável. Isso se deve ao fato de que, por limitações do sensor, o AGV sairia da trilha não sendo capaz de voltar apenas com a estratégia de controle utilizada.

6. CONCLUSÃO

Todos os experimentos foram realizados com o sistema em malha fechada, proporcionando segurança em toda sua realização. O método utilizado satisfaz as especificações de margens de ganho e fase, sem a necessidade de um modelo do sistema. Foi possível estimar as margens pelo método do relé em malha fechada simplificando o trabalho de sintonia. Todos os controladores obtidos mantiveram a estabilidade do sistema e garantiram as margens especificadas.

REFERÊNCIAS

- Arruda, G. e Barros, P. (2003a). Relay-based gain and phase margins pi controller design. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52(5), 1548–1553.
- Arruda, G.H.M. e Barros, P.R. (2003b). Relay-based closed loop transfer function frequency points estimation. *Automatica*, 39(2), 309–315.
- Åström, K.J. e Hägglund, T. (1984). Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. *Automatica*, 20(5), 645–651.
- Åström, K.J. e Hägglund, T. (1995). *PID Controllers - Theory, Design, and Tuning*. ISA, 2nd edition edition.
- da Silva, M.T. e Barros, P.R. (2020). An iterative procedure for tuning decentralized pid controllers based on effective open-loop process. In *2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, volume 1, 813–818. IEEE.
- Dhaouadi, R. e Hatab, A.A. (2013). Dynamic modelling of differential-drive mobile robots using lagrange and newton-euler methodologies: A unified framework. *Advances in Robotics & Automation*, 2(2), 1–7.
- Dias, C.C., Lima, R.B.C., e Barros, P.R. (2020). *Projeto baseado em modelo aplicado ao desenvolvimento de um sistema de controle para veículo autoguiado*. Master's thesis, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.
- Lee, S.Y. e Yang, H.W. (2012). Navigation of automated guided vehicles using magnet spot guidance method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(3), 425–436.
- Li, S., Wei, W., e Wang, R. (2015). Study on control structure for the automated guided vehicle base on visual navigation. In *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*, 2515–2518. doi: 10.1109/CCDC.2015.7162344.
- Long, J. e Zhang, C.L. (2012). The summary of agv guidance technology. In *Manufacturing Engineering and Automation II*, volume 591 of *Advanced Materials Research*, 1625–1628. Trans Tech Publications Ltd. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.591-593.1625.
- Moshayedi, A.J., Jinsong, L., e Liao, L. (2019). Agv (automated guided vehicle) robot: Mission and obstacles in design and performance. *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, 12(4), 5–18.
- Pakdaman, M. e Sanaatiyan, M.M. (2009). Design and implementation of line follower robot. In *2009 Second International Conference on Computer and Electrical Engineering*, volume 2, 585–590.
- Saadatmand, S., Azizi, S., Kavousi, M., e Wunsch, D. (2020). Autonomous control of a line follower robot using a q-learning controller. In *2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 0556–0561.
- Saini, V., Thakur, Y., Malik, N., e M, S.N. (2021). Line follower robot with obstacle avoiding module. In *2021 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N)*, 789–793.