

## MÉTODOS NÃO CONVENCIONAIS PARA SINTONIA DE CONTROLADORES PID APLICADOS A MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA: UMA BREVE REVISÃO

**Rodrigo Rossetto Gati**

Instituto Federal de São Paulo – câmpus Catanduva

**Douglas Dias Lieira**

Instituto Federal de São Paulo – câmpus Catanduva

**Denis Mosconi**

Instituto Federal de São Paulo – câmpus Catanduva

*Desde sua invenção, os motores de corrente contínua têm sido cada vez mais utilizados, desde aplicações aeroespaciais até brinquedos. Dentre as vantagens de sua utilização pode-se citar a facilidade de controlar sua posição ou velocidade, manipulando-se a tensão fornecida. Tal controle normalmente é realizado através da aplicação do controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) cujos ganhos devem ser determinados a fim de garantir estabilidade e atender às exigências de projeto. Neste trabalho explora-se, através de uma breve revisão bibliográfica sistemática, a utilização de métodos não convencionais que empregam técnicas de otimização e inteligência artificial para sintonizar controladores PID aplicados ao controle de posição ou velocidade de motores CC. A pesquisa foi feita na base de dados do Institute of Electrical and Electronic Engineers, considerando-se apenas trabalhos publicados entre 2017 e 2020. Foram encontrados 15 trabalhos sendo 7 deles discutidos neste artigo. Com este trabalho concluiu-se que métodos não convencionais podem exigir pouco esforço na determinação dos ganhos de controladores PID, porém são mais complexos de serem implementados exigindo que o projetista saiba, além da teoria de controle, técnicas de computação e otimização.*

**Palavras-chave:** Motor CC. Controlador Proporcional-Integral-Derivativo. Parametrização de controladores

*Since their invention, DC motors have been increasingly used, from aerospace applications to toys. Among the advantages of their use, we can mention the ease of controlling their position or speed, manipulating the input voltage. Such control is usually performed through the application of the Proportional-Integral-Derivative controller (PID) whose gains must be determined in order to guarantee stability and meet the project requirements. This work explores, through a brief systematic bibliographic review, the use of unconventional methods that employ optimization techniques and artificial intelligence to tune PID controllers applied to the control of speed or position of DC motors. The research was carried out in the database of the Institute of Electrical and Electronic Engineers, considering only works published between 2017 and 2020. There were 15 works, 7 of which were discussed in this article. With this work it was concluded that unconventional methods may require little effort in determining*

*the gains of PID controllers, however they are more complex to be implemented, requiring the designer to know, in addition to the control theory, computation and optimization techniques.*

*Keywords: DC motor. Proportional-Integral-Derivative Controller. Parameterization of controllers.*

## 1 INTRODUÇÃO

Motores de corrente contínua (motores CC) são máquinas elétricas capazes de converter corrente e tensão contínuas em movimento. O primeiro motor CC foi desenvolvido em 1832 pelo engenheiro e cientista britânico William Sturgeon (GEE, JAMES, 2004). A partir de então, este tipo de motor passou a ser largamente utilizado, estando presente nas mais variadas áreas, tais como robótica, médica, industrial, militar, doméstica e recreativa. Em 2016, o mercado global de motores elétricos CC foi avaliado em US\$ 20,196 bilhões, e continua crescendo: é esperado que em 2025 este valor passe a ser US\$ 35,6 bilhões (GRAND VIEW RESEARCH, 2017).

Dentre as diversas vantagens de se utilizar motores de corrente contínua, destaca-se a facilidade de controlar sua velocidade ou posição, através da manipulação da tensão de entrada. Para realizar tais controles, o controlador proporcional-integral-derivativo (PID) pode ser utilizado (OGATA, 2010). Apesar desse tipo de controlador ser bem conhecido e amplamente aplicado, há um desafio: determinar os ganhos ótimos que garantam sua boa performance, estabilidade e eficiência, de acordo com as exigências de projeto.

Ao longo dos anos, diversos métodos para sintonia de controladores PID têm sido propostos, tais como o Ziegler-Nichols (ZIEGLER, NICHOLS, 1942), lugar das raízes (EVANS, 1948) e tentativa e erro. Esses métodos são bem estudados em cursos de engenharia que possuam disciplinas de teoria de controle, facilmente encontrados em livros da área e são ditos métodos convencionais.

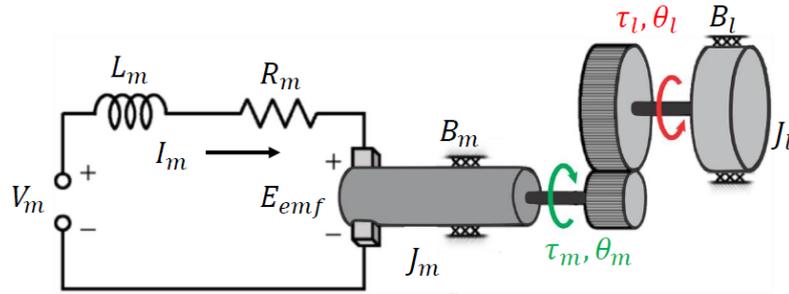
Com o desenvolvimento da informática, novos métodos de sintonia baseados em técnicas de otimização e inteligência artificial tem sido desenvolvidos. Tais métodos ditos não convencionais, não são apresentados em livros da área de sistemas de controle e com mínima (ou nula) abordagem nos cursos de engenharia com disciplinas correlatas.

O objetivo deste trabalho é apresentar, através de uma breve revisão bibliográfica, alguns métodos não convencionais para sintonia de controladores PID aplicados ao controle de velocidade ou posição de motores de corrente contínua. O esforço em realizar este trabalho é justificado pela importância da divulgação de métodos pouco conhecidos e que podem ser úteis em diversas aplicações desenvolvidas por engenheiros que lidam com controle de sistemas.

Este artigo é organizado da seguinte maneira: na Seção 2 é apresentado o modelo matemático do motor de corrente contínua, bem como suas funções de transferência para entrada em tensão e saída em posição ou velocidade, na Seção 3 é apresentado o controlador PID, na Seção 4 é exposta a metodologia, na Seção 5 são apresentados os resultados e discussão e a conclusão do trabalho é feita na Seção 6.

## 2 MODELO MATEMÁTICO DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Um esquemático do motor de corrente contínua é apresentado na Figura 1, podendo-se observar que o motor é compreendido em um circuito elétrico e um circuito mecânico, combinados e acoplados entre si (MOSCONI, SILVA E SIQUEIRA, 2021).



**Figura 1** – Esquemático do motor de corrente contínua com redução.  $V_m$  é a tensão de entrada,  $I_m$  a corrente,  $L_m$  a indutância,  $R_m$  a resistência do enrolamento,  $E_{emf}$  a tensão contra-eletromotriz,  $J_m, J_l$  são as inércias do motor e da carga, respectivamente,  $B_m, B_l$  são os coeficientes de atrito viscoso do motor e da carga,  $\tau_m, \tau_l$  são os torques do motor e da carga e  $\theta_m, \theta_l$  são os deslocamentos angulares do motor e da carga, respectivamente.

Fonte: Mosconi, Silva e Siqueira (2021)

Aplicando-se a Lei de Kirchoff para tensões no circuito elétrico, e desconsiderando-se a indutância ( $L_m \ll R_m$ ) é possível relacionar a tensão e a corrente de entrada com a velocidade angular do motor, conforme Equação (1).

$$I_m = \frac{V_m - K_m \dot{\theta}}{R_m} \quad (1)$$

Onde  $I_m$  é a corrente elétrica,  $V_m$  a tensão de entrada,  $K_m$  a constante contra-eletromotriz,  $R_m$  a resistência elétrica de armadura e  $\dot{\theta}$  a velocidade angular.

Aplicando-se a segunda lei de Newton no sistema mecânico, tem-se a Equação (2) que relaciona as variáveis cinemáticas e a corrente de entrada.

$$J_l \ddot{\theta}_l + \eta_g K_g^2 J_m \ddot{\theta}_l + B_{eq} \dot{\theta}_l = \eta_g \eta_m K_g K_t I_m \quad (2)$$

Onde  $J_l$  e  $J_m$  são os momentos de inércia da carga e do motor, respectivamente,  $K_g$  e  $\eta_g$  são a taxa de redução e a eficiência das engrenagens, respectivamente,  $K_m$  e  $\eta_m$  são a constante de torque e a eficiência do motor,  $B_{eq}$  é o coeficiente de atrito viscoso equivalente.  $\ddot{\theta}$  e  $\dot{\theta}$  são a aceleração e velocidade angulares, respectivamente.

Combinando-se as equações (1) e (2), e aplicando-se a transformada de Laplace tem-se a Equação (3) a qual representa a função de transferência entre a tensão de entrada e a posição angular.

$$\frac{\theta_l(s)}{V_m(s)} = \frac{\eta_g \eta_m K_g K_t}{J_{eq} R_m s^2 + (B_{eq} R_m + \eta_g \eta_m K_g^2 K_t K_m) s} \quad (3)$$

A função de transferência entre a tensão de entrada e a velocidade é expressa na Equação (4).

$$\frac{\dot{\theta}_l(s)}{V_m(s)} = \frac{\eta_g \eta_m K_g K_t}{J_{eq} R_m s + B_{eq} R_m + \eta_g \eta_m K_g^2 K_t K_m} \quad (4)$$

### 3 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO

O controlador proporcional integral derivativo (PID) é um tipo de controlador de feedback baseado no erro expresso pela diferença entre a entrada desejada (referência) e a saída produzida pela planta (DORF E BISHOP, 2011). O sinal de controle externado por este controlador é proporcional ao erro, à integral do erro e à derivada do erro no tempo sendo a lei de controle expressa pela Equação (5).

$$u = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Sendo  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  os ganhos proporcional, integral e derivativo, respectivamente,  $e(t)$  o erro (diferença entre referência e saída) e  $u$  o sinal de controle.

A ação de controle proporcional reduz o tempo de resposta e se apresenta mais suave do que o controle simples tipo *on-off*. Essa ação também reduz (mas não elimina) o erro em regime permanente.

A ação integral elimina o erro em regime permanente, porém pode tornar a resposta mais lenta bem como provocar um aumento de *overshoot* durante a resposta no estado transitório

A ação derivativa reduz tanto o tempo de resposta quanto o *overshoot*, porém pode ser problemática em sistemas com alto nível de ruído no sensoriamento.

Sintonizar um controlador PID significa escolher os ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  adequados que garantam que a planta produzirá a resposta desejada mantendo-se estável. Uma má escolha desses ganhos pode comprometer a qualidade do processo bem como a integridade do sistema.

### 4 METODOLOGIA

Uma pesquisa bibliográfica foi feita a fim de proporcionar uma revisão de artigos e trabalhos que tratam da sintonia de controladores PID utilizando métodos não convencionais. Tal pesquisa foi realizada na base de dados da IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), escolhida por ser uma base especializada em relação ao tema tratado neste artigo.

A ordem de busca foi escrita da seguinte maneira: ((("Document Title":PID) AND "Document Title":tuning) AND "Document Title":DC motor), como critério de inclusão considerou-se apenas os trabalhos publicados entre 2017 e 2020, foram desconsiderados os artigos que não tratam do controle PID, ou cuja sintonia não seja para aplicação em motores CC. Dentre os trabalhos encontrados, 7 foram selecionados por sua relevância e melhor descrição da técnica e discutidos neste artigo.

### 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

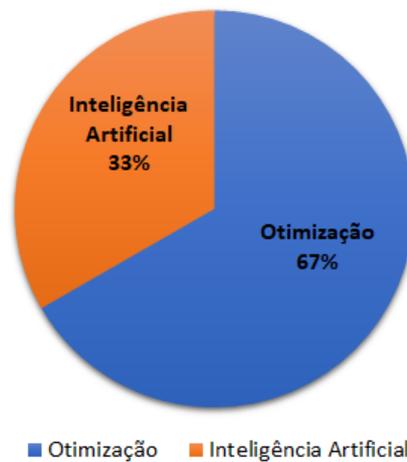
Aplicando-se a metodologia supracitada foram encontrados 15 trabalhos sendo que 13 foram publicados em congressos e 2 em periódicos. A Tabela 1 apresenta a distribuição da quantidade de trabalhos publicados a cada ano.

**Tabela 1** – Distribuição por ano das publicações identificadas na pesquisa

ANO	CONGRESSO	PERIÓDICO	TOTAL
2017	4	0	4
2018	4	0	4
2019	3	1	4
2020	2	1	3

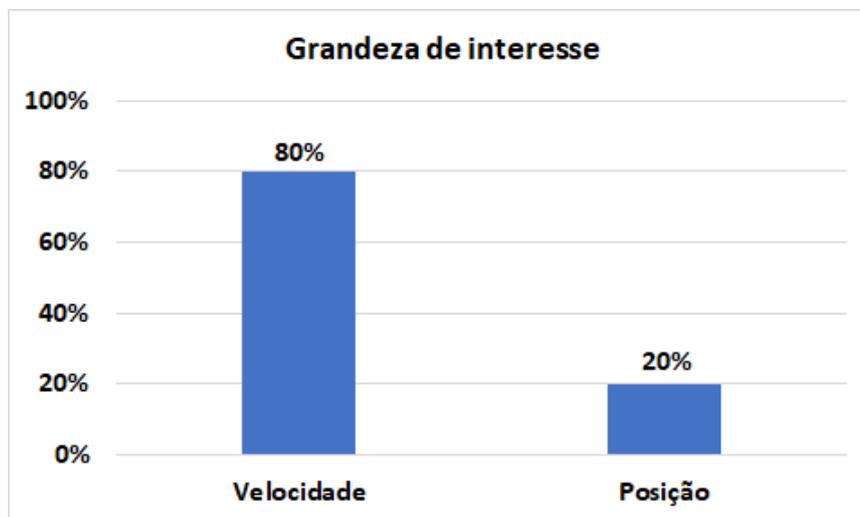
Todos os trabalhos utilizaram alguma técnica de otimização ou inteligência artificial, sendo que 10 trabalhos empregaram otimização e 5 fizeram uso de inteligência artificial. A Figura 2 apresenta a distribuição percentual dos trabalhos para cada tipo de técnica identificada.

**Distribuição dos métodos de sintonia**



**Figura 2 – Distribuição percentual dos métodos utilizados para sintonia de PID nos trabalhos encontrados.**

A maioria dos trabalhos lidou com o controle de velocidade (12 trabalhos), sendo que apenas 3 artigos tratam da sintonia de controladores PID aplicados ao controle de posição de motores DC. A Figura 3 apresenta a distribuição percentual dos trabalhos para cada grandeza de interesse controlada.



**Figura 3 – Distribuição percentual das grandezas de interesse controladas.**

Dos 15 trabalhos encontrados, 7 foram selecionados por ordem de relevância, e serão discutidos nos próximos parágrafos. Os demais artigos, não discutidos aqui, podem ser facilmente acessados utilizando a metodologia apresentada na Seção 4. Todos os artigos encontrados estão listados na Tabela 2.

**Tabela 2** – Relação de todos os artigos encontrados de acordo com o método de busca apresentado na Seção 4.

REFERÊNCIA	TÍTULO	METODOLOGIA*
Ramya, Jadhav e Pawar (2020)	Design and Implementation of Particle Swarm Optimization (PSO) Tuned PID Controller for Speed Control of Permanent Magnet Brush Less DC (PMBLDC) Motor	OTM
Thakur et al. (2020)	Sine Cosine Algorithm Assisted Tuning of PID Controller for DC Servo-Motor	OTM
Qi, Shi e Zhang (2020)	Tuning of Digital PID Controllers Using Particle Swarm Optimization Algorithm for a CAN-Based DC Motor Subject to Stochastic Delays	OTM
Kouassi et al. (2019)	PID Tuning Of Chopper Fed Speed Control Of DC Motor Based On Ant Colony Optimization Algorithm	OTM
Mohamed et al (2019)	Design of Speed Control System of DC motor Based on PID tuning with fuzzy define weighting point.	IA
Purnama et al (2019)	Intelligent Control Strategies for Tuning PID of Speed Control of DC Motor - A Review.	IA/OTM
Hekimoglu (2019)	Optimal tuning of fractional order PID controller for DC motor speed control via chaotic atom search optimization algorithm	OTM
Tasoren, Örenbas e Sahin (2018)	Analyze and Comparison of Different PID Tuning Methods on a Brushless DC Motor Using Atmega328 Based Microcontroller Unit	OTM
Flores-Moran, Yanez-Pazmino e Barzola-Monteses (2018).	Genetic algorithm and fuzzy self-tuning PID for DC motor position controllers	IA
Kumari e Swain (2018)	Optimal control based PID tuning for control of four quadrant chopper fed DC motor.	OTM
Al-Maliki e Iqbal (2018)	FLC-based PID controller tuning for sensorless speed control of DC motor.	IA
Achanta e Pamula (2017)	DC motor speed control using PID controller tuned by jaya optimization algorithm.	OTM
Ghany, Shamseldin e Ghany (2017)	A novel fuzzy self tuning technique of single neuron PID controller for brushless DC motor	IA
Pongfai e Assawinchaichote (2017)	Self-tuning PID parameters using NN-GA for brush DC motor control system	IA
Tang, Liu e Wang (2017)	DC motor speed control based on system identification and PID auto tuning	OTM

\* IA é Inteligência Artificial e OTM é otimização

Ramya, Jadhav e Pawar (2020) utilizaram uma técnica de otimização determinada como *Particle Swarm Optimization* (PSO) para sintonizar um controlador PID aplicado ao controle de velocidade de um motor CC sem escovas de imã permanente. Esse tipo de motor tem larga aplicação em áreas tais como aeronáutica, médica, robótica, química e automação industrial. Quando comparado aos métodos de Ziegler-Nichols e algoritmo genético, o controlador PID sintonizado pela técnica PSO apresentou melhor eficiência, com menor tempo de assentamento e *overshoot* insignificante.

Uma técnica de otimização desenvolvida recentemente – Algoritmo Seno Cosseno (MIRJALILI, 2016), – foi utilizada por Thakur et al. (2020) para sintonizar um controlador PID de um servo sistema a motor CC. A sintonização foi executada através da minimização da integral

do erro quadrático entre a referência e a saída do sistema. Embora a técnica empregada garantiu a estabilidade do motor em estado estacionário, um *overshoot* de 20% foi obtido durante o regime transitório, para uma entrada degrau, o que pode ser indesejável para algumas implicações.

Kouassi et al. (2019) utilizaram uma técnica de otimização baseada em colônia de formigas (ACO) para ajustar o controlador PID para controle de velocidade do motor CC. Com apenas seis iterações o ACO determinou os ganhos ótimos que fizeram o sistema apresentar *overshoot* nulo e tempo de acomodação de 0,29 segundos, contra 6,96% de *overshoot* e 0,38 segundos de tempo de acomodação com os ganhos determinados pelo método de Ziegler-Nichols.

Hekimoglu (2019) utilizou técnicas de otimização baseadas na dinâmica molecular. Tais técnicas são chamadas *Atom Search Optimization* (ASO) e *Chaotic Atom Search Optimization* (ChASO) e foram usadas para ajustar um controlador de ordem fracionária proporcional integral derivativo (FOPID), aplicado ao controle de velocidade do motor CC. Os ganhos ideais foram determinados após oito iterações. Ambos os controladores ASOFOPID e ChASO-FOPID promoveram *overshoot* nulo e tempo de estabilização de 0,06 e 0,04 segundos, respectivamente. A abordagem proposta foi comparada a diferentes métodos de ajuste ótimo e controladores, e o ChASO-FOPID apresentou os melhores resultados.

Al-Maliki e Iqbal (2018) discutiram o controle de velocidade de motores CC não equipados com sensor de velocidade, de maneira que tal grandeza foi determinada utilizando sensores não ideais de corrente e tensão juntamente com um estimador de estados baseado em Filtro de Kalman. A fim de mensurar a eficácia dos controladores, os autores consideraram como índices de performance a Integral do Erro Absoluto (IEA), o *overshoot* e o tempo de acomodação. Foi proposto um controlador tipo FLC-PID (*Fuzzy Logic Controller PID based*) cujo ganhos foram determinados através da utilização de Algoritmo Genético (AG). Comparando-se o controlador proposto com um controlador PID tradicional cujos ganhos foram determinados utilizando-se MATLAB, os autores identificaram que tanto o controlador proposto quanto o método utilizado para sintonizá-lo (AG) são eficientes, visto que promoveram uma redução de 75,98%, do tempo de acomodação, uma redução de 56,2% do IEA e uma redução de 97,89% do *overshoot*, em relação aos métodos tradicionais.

Um estudo de comparação entre o ajuste do controlador PID usando Fuzzy e Algoritmo Genético foi realizado por Flores-Moran, Yanez-Pazmino e Barzola-Monteses (2018). O controlador foi usado para controlar a posição do motor DC. Ambos os métodos resultaram em um *overshoot* de 5%, mas o controlador PID ajustado por fuzzy apresentou uma ação rápida com tempo de acomodação de 0,4 s, enquanto o controlador ajustado por AG apresentou uma ação lenta com tempo de acomodação de 0,78 s.

Achanta e Pamula (2017) compararam *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Jaya Optimization Algorithm* (JOA) para ajustar o controlador PID aplicado a um controle de velocidade de motor CC. Com o PSO o tempo de acomodação e o *overshoot* foram de 0,40s e 0,0063% respectivamente, enquanto com o JOA os valores obtidos foram 0,52 s para o tempo de acomodação e 2,28% para o *overshoot* o que leva à conclusão de que o PSO é melhor que o JOA para esta aplicação.

Uma breve revisão sobre estratégias para sintonia de controladores PID aplicados ao controle de velocidade de motores CC foi apresentado por Purmana et al (2019). Os autores apresentam um descritivo das técnicas baseadas em Algoritmo Genético, *Particle Swarm Optimization* e Fuzzy, bem como podem ser utilizadas para determinação dos ganhos do PID.

Em relação aos trabalhos apresentados, é possível verificar que diversas técnicas podem ser utilizadas para determinar os ganhos ideais dos controladores PID, porém todas provêm de métodos de otimização ou inteligência. Isso se deve ao fato de que esses recursos têm se mostrado úteis na busca de soluções ótimas para problemas de engenharia, sendo cada vez mais comumente empregados na seleção de parâmetros ótimos de projetos.

Entretanto, ainda é necessário promover essa área de pesquisa a fim de oferecer ao público interessado o que há de mais recente e prático a fim de proporcionar mais opções para sintonia de controladores aplicados ao controle de motores de corrente contínua, além dos métodos tradicionais já bem conhecidos

## 6 CONCLUSÃO

Com esse trabalho é possível concluir que a inteligência artificial e as técnicas de otimização têm sido regularmente estudadas para determinação de ganhos de controladores PID aplicados ao controle de posição e velocidade de motores de corrente contínua, mostrando-se eficazes para tal finalidade.

Quando comparados com os métodos tradicionais, os métodos não convencionais são capazes de determinar o ganho exigindo um esforço menor do projetista do controlador. Porém tais métodos são mais difíceis de serem implementados visto que exigem conhecimento de inteligência artificial e técnicas de programação avançadas. Já os métodos convencionais, apesar de não exigirem tais pré-requisitos, podem ser mais demorados e nem sempre aplicáveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHANTA, R. K.; PAMULA, V. K. DC motor speed control using PID controller tuned by jaya optimization algorithm. In: 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI), Chennai, 2017. **Proceedings...** Chennai, India: IEEE, 2017.

AL-MALIKI, A. Y.; IQBAL, K. FLC-based PID controller tuning for sensorless speed control of DC motor. In: 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Lyon, France, 2018. **Proceedings...** Lyon, France: IEEE, 2018.

DORF, R. C.; BISHOP, H. R. *Sistemas de Controle Modernos*. 11 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

EVANS, W. R. Graphical analysis of control systems. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 67, n. 1, p. 547–551, 1948.

FLORES-MORAN, E.; YANEZ-PAZMINO, W.; BARZOLA-MONTESES, J. Genetic algorithm and fuzzy self-tuning PID for DC motor position controllers. In: 2018 19th International Carpathian Control Conference (ICCC), Hungary, 2018. **Proceedings...** Hungary: IEEE, 2018.

GHANY, M. A. A.; SHAMSELDIN, M. A.; GHANY, M. A. A. A novel fuzzy self tuning technique of single neuron PID controller for brushless DC motor. In: 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2017. **Proceedings...** Cairo, Egypt: IEEE, 2017.

GEE, William; JAMES, A. J. L. Frank. **Sturgeon, William (1783–1850)**. Oxford University Press, Oxford, 2004.

GRAND VIEW RESEARCH. **Electric DC Motors Market Size, Share, Global Industry Report, 2025**. GVR, United States, 2017.

HEKIMOGLU, B. Optimal tuning of fractional order PID controller for DC motor speed control via chaotic atom search optimization algorithm. **IEEE Access, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)**, v. 7, p. 38100–38114, 2019.

KOUASSI, B. A. et al. PID tuning of chopper fed speed control of DC motor based on ant colony optimization algorithm. In: 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Beijing, 2019. **Proceedings...** Beijing, China: IEEE, 2019.

KUMARI, S.; SWAIN, S. K. Optimal control based PID tuning for control of four quadrant chopper fed DC motor. In: 2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP), Bhubaneswar, India, 2018. **Proceedings...** Bhubaneswar, India: IEEE, 2018.

MIRJALILI, S. SCA: A sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-Based Systems, Elsevier BV*, v. 96, p. 120–133, 2016.

MOHAMED, E. A. M. et al. Design of Speed Control System of DC motor Based on PID tuning with fuzzy define weighting point. In: 2019 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE), Khartoum, Sudan, 2019. **Proceedings...** Khartoum, Sudan: IEEE, 2019.

MOSCONI, D.; SILVA, M. M. .; SIQUEIRA, A. A. G. . Optimal tuning of a proportional controller for DC motor position control via Fibonacci Search Method. **Journal of Mechatronics Engineering**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 12–21, 2021. DOI: 10.21439/jme.v4i1.88.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2010.

PONGFAI, J.; ASSAWINCHAICHOTE, W. Self-tuning PID parameters using NN-GA for brush DC motor control system. In: 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Phuket, Thailand, 2017. **Proceedings...** Phuket, Thailand: IEEE, 2017.

PURMANA, H. S. et al. Intelligent Control Strategies for Tuning PID of Speed Control of DC Motor - A Review. In: 2019 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), Yogyakarta, Indonesia, 2019. **Proceedings...** Yogyakarta, Indonesia: IEEE, 2019.

Qi, Z.; Shi, Q.; Zhang, H. Tuning of Digital PID Controllers Using Particle Swarm Optimization Algorithm for a CAN-Based DC Motor Subject to Stochastic Delays. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 67, n. 7, p. 5637-5646, 2020.

RAMYA, M. A.; JADHAV, S. P.; PAWAR, S. N. Design and implementation of particle swarm optimization (PSO) tuned PID controller for speed control of permanent magnet brush less DC (PMBLDC) motor. In: 2020 International Conference for Emerging Technology (INCET), India, 2020. **Proceedings...** India: IEEE, 2020.

TANG, W.; LIU, Z.; WANG, Q. DC motor speed control based on system identification and PID auto tuning. In: 2017 36th Chinese Control Conference (CCC), Dalian, China, 2017. **Proceedings...** Dalian, China: IEEE, 2017.

TASOREN, A. E.; ÖRENBAS, H.; SAHIN, S. Analyze and Comparison of Different PID Tuning Methods on a Brushless DC Motor Using Atmega328 Based Microcontroller Unit. In: 2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), Istanbul, Turkey, 2018; **Proceedings...** Istanbul, Turkey: IEEE, 2018.

THAKUR, A.; MONGA, H.; SINGH, V. P.; KUMAR, R.; MATHUR, A. Sine cosine algorithm assisted tuning of PID controller for DC servo-motor. In: 2020 International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management (ICCAKM), Dubai, 2020. **Proceedings...** Dubai, United Arab Emirates: IEEE, 2020.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. **Transactions of the ASME**, v. 64, p. 759–768, 1942.

|