



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

KAROLAYNE SANTOS DE AZEVEDO

COMPARAÇÃO ENTRE ESQUEMAS DE CONTROLE DE VELOCIDADE PARA
MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

PAU DOS FERROS

2020

KAROLAYNE SANTOS DE AZEVEDO

**COMPARAÇÃO ENTRE ESQUEMAS DE CONTROLE DE VELOCIDADE PARA
MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do
Semi-Árido como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Cecílio Martins de Sousa Neto, Prof. Dr.

Pau dos Ferros

2020

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva tese. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A994c Azevedo, Karolayne Santos de.
COMPARAÇÃO ENTRE ESQUEMAS DE CONTROLE DE
VELOCIDADE PARA MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA /
Karolayne Santos de Azevedo. - 2020.
34 f. : il.

Orientador: Cecílio Martins de Sousa Neto.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de --Selecione um
Curso ou Programa--, 2020.

1. Máquina de Corrente Contínua. 2. Controle.
3. Sistema. 4. Velocidade. I. Sousa Neto, Cecílio
Martins de, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

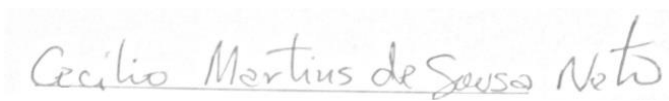
KAROLAYNE SANTOS DE AZEVEDO

**COMPARAÇÃO ENTRE ESQUEMAS DE CONTROLE DE VELOCIDADE PARA
MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do
Semi-Árido como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Computação.

Defendida em: 07 /02 / 2020.

BANCA EXAMINADORA



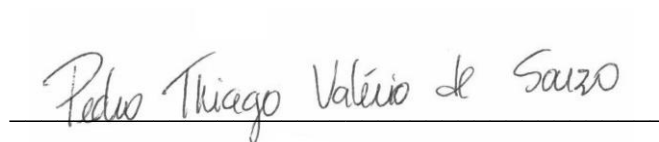
Cecílio Martins de Sousa Neto, Prof. Dr. (UFERSA)

Presidente



Ádller de Oliveira Guimarães, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador



Pedro Thiago Valério de Souza, Prof. Msc. (UFERSA)

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Deus todo poderoso que, pela sua misericórdia, contribuiu diretamente com meu discernimento e dedicação a este trabalho de conclusão e ao longo de todo o período deste curso. Pela força e sabedoria concedida que me ajudou a vencer mais uma etapa tão importante na minha vida.

Agradeço aos meus pais que no empenho, dedicação e força concederam o exemplo para sempre acreditar na minha capacidade e ciência, pelas oportunidades e pela sua ajuda possibilitaram a conclusão deste curso. Pelo carinho e conforto que sempre esteve presente nas horas que mais necessitei e a que recorria. Aos meus irmãos Kaline Brena e Kayo Antônio que sempre estiveram torcendo por mim, bem como meus amados avós.

Aos meus amigos Robson Thiago, Bruno José, Moisés Barros, Dhiogo Samuel, Nancy Maia, Maruska, Debora Moraes, Igor Ramon. Agradeço imensamente por me acolherem e ajudar-me nessa experiência que tem sido muito gratificante e instrutiva para minha formação pessoal.

Agradeço imensamente ao meu grande orientador Dr. Cecílio Martins de Sousa Neto, pela dedicação no processo de orientações e construção desse trabalho, bem como toda compreensão e conselhos ofertados ao longo desse período. A Dr. Veronica Lima e Dr. Francisco Segundo Gurgel por todo auxílio prestatividade e amizade durante este período.

RESUMO

A criação dos sistemas de controle trouxe consigo grandes avanços nos mais diversas aplicações dentro da engenharia e da indústria. As máquinas em corrente contínua, são dispositivos que compõem muitas dessas aplicações, devido à facilidade de implementação de diversas técnicas de controle. Desde modo, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de estruturas de controle aplicadas na regulação de velocidade de uma máquina de corrente contínua, utilizando para isso análises computacionais e experimentais para entender o comportamento dinâmico do sistema.

Palavras-chave: Máquina de Corrente Contínua, Controle, Sistema, Velocidade.

ABSTRACT

The creation of control systems brought with it great advances in the most diverse applications within engineering and industry. Direct current machines are devices that make up many of these applications, due to the ease of implementing various control techniques. Thus, this work aims to evaluate the performance of control structures applied to the speed regulation of a direct current machine, using computational and experimental analyzes to understand the dynamic behavior of the system.

Keywords: Direct Current Machine, Control, System, Velocity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquemas de controle Convencionais.....	14
Figura 2: Esquema de Controle.	17
Figura 3: Modelo do circuito elétrico do motor CC.	18
Figura 4:Esquema de Controle Cascata.....	21
Figura 5: Lugar Geométrico das raízes para o Sistema Compensado Utilizando PID.....	24
Figura 6:Resposta em Degrau do Sistema em Malha Aberta.	25
Figura 7: Comportamento do Sistema Utilizando o Controlador PID.	26
Figura 8:Simulação realizada no Psim com Controle PID	27
Figura 9:Comportamento do Motor cc na presença do Controlador PI em Cascata.	28
Figura 10: Comparação da Resposta do PI em Cascata e PID.	30
Figura 11:Esquema de Controle de velocidade para Motor CC utilizando PID.	31
Figura 12:Saída do sistema em RPM	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros do Motor CC.....	19
Tabela 2: Parâmetros da máquina de corrente contínua.	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BLDCM *Brushless DC Machine*

MRAC *Model Reference Adaptive Control*

CC Corrente Contínua

PI Proporcional Integral

PD Proporcional Derivado

PID Proporcional Integral Derivativo

SMC Controle Por ModoDeslizante

ZN *Ziegler Nichols*

VSS-MRAC *Variable Structure System*

LGR Lugar Geométrico das raízes

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
2 ESTADO DA ARTE.....	14
2.1. Esquemas de Controle Não-Convencionais	15
2.2.1 Controle Por Modo Deslizante	16
3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	17
3.1 Máquina de Corrente Contínua	17
3.1.1 Modelagem do Motor CC.....	19
3.2.2 Esquema de Controle com PID	20
3.2.3 Esquema de Controle em Cascata	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1 Esquemas de Controle com PID e PI em Cascata	24
4.2. Resultados Experimentais Obtidos.....	30
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A criação dos sistemas de controle trouxe consigo grandes avanços nos mais diversas aplicações dentro da engenharia e da indústria, tais como: manipuladores robóticos, sistemas de pilotagem de avião, veículos espaciais, veículos automotivos, esteiras industriais e trens elétricos (NISE, 2002). As máquinas em corrente contínua, são dispositivos que compõem muitas dessas aplicações, sendo então instrumento de estudo desde o século passado, como ressalta (AHMED, 2012).

Por esta razão, o acionamento controlado de máquinas de corrente contínua, ainda estão sendo amplamente estudado em diversos trabalhos de pesquisa, no intuito de desenvolver novas estruturas de controle empregadas principalmente na regulação da velocidade de rotação, (RUSSOLO, 2011).

Em seu trabalho, Pantené (2008), enfatiza que as máquinas em corrente contínua, são nos dias atuais, concebidos com as mais modernas tecnologias de projeto, resultando em máquinas compactas com excelentes propriedades dinâmicas, sendo estas bastante conhecidos pela sua versatilidade e o fato de serem facilmente controlados por meio de esquemas de controle linear. Deste modo, são bastante utilizados em aplicações que exigem uma ampla faixa de velocidade ou aplicações que requerem controle preciso da saída do controlador, acarretando sua contínua utilização numa ampla variedade de aplicações (DIAS, 2018).

Neste sentido, diversas técnicas e abordagens são voltadas para o acionamento e controle destas máquinas de corrente contínua. Estas técnicas variam desde as técnicas de controle convencionais (controle linear), como o controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), no qual é amplamente utilizado para o controle de variáveis como velocidade e posição dos motores CC (GUIMARÃES 2013; VALE 2007, TAVEIROS, 2012; LI & XIA, 2006), até técnica de controle não-lineares. Entretanto, AHMED (2012) alerta para o fato que, ao usar um controle puramente linear, deve-se conhecer não apenas os parâmetros do motor, como também condições de operações como o conjugado de carga externa e distúrbios, para obter um bom desempenho do controlador. No mais, se estas características não forem conhecidas, deve-se aplicar as técnicas de controle não linear como os controladores Adaptativos.

Apesar de apresentar excelente desempenho, os controladores não convencionais, apresentam em sumo, certa complexidade com relação a sua implementação e, conseqüentemente um maior custo quando comparado aos controladores convencionais,

sendo então, estes indicados para sistemas que apresentem incertezas paramétricas ou com alto grau de complexidade em sua formação (JÁCOME, 2013; TEXEIRA, 2016). Contudo, estudos apontam como possível solução o uso do controle por modo deslizante, devido o mesmo apresentar bom desempenho e robustez mesmo sendo aplicados a sistemas não lineares. O controle por modo deslizante é insensível à incerteza paramétrica e a distúrbios externos. (GIL, 2019; AHMED, 2012; GHALIMATH et al, 2015).

Diante deste contexto, o uso de controladores convencionais, ainda se mostra como uma importante ferramenta no processo de controle industrial, proporcionando resultados satisfatórios, como respostas de transitórios rápidas, sobressinal e tempo de acomodação reduzidos, quando aplicado a sistemas relativamente simples de ser modelado (GIANELLI, 2013; GUIMARÃES, 2013).

Logo, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de estruturas de controle aplicadas na regulação de velocidade de uma máquina de corrente contínua, como também a realização de comparação de desempenho entre os esquemas de regulação com PID e PI's em cascata, por meio de simulações. Para tanto, será projetado dois tipos de esquemas de controle: regulação por meio de um controlador Proporcional-Integral e Derivativo (PID) e em cascata por meio de dois controladores Proporcional e Integral (PI), como também a implementação via *hardware* do controlador PID. Para tanto, utilizou-se o método matemático denominado Lugar Geométrico das Raízes para determinar os ganhos aproximados dos controladores de acordo com as especificações de projeto. As análises computacionais foram realizadas com o *Software* PSIM.

Sendo assim, os capítulos seguintes tratarão de detalhes relacionados aos aspectos necessários para compreender e desenvolver o trabalho.

No capítulo 2, é discutido o marco teórico necessário para dar embasamento ao que foi desenvolvido. Assim, a fundamentação teórica, aborda aspectos como teoria geral de controle bem como técnicas de controle linear e não linear.

No capítulo 3, é realizado o estado da arte, onde reúne os principais trabalhos que corroboraram com a construção do trabalho.

No capítulo 4, é realizado a descrição do sistema bem como a aplicação dos controladores PID, PI em cascata.

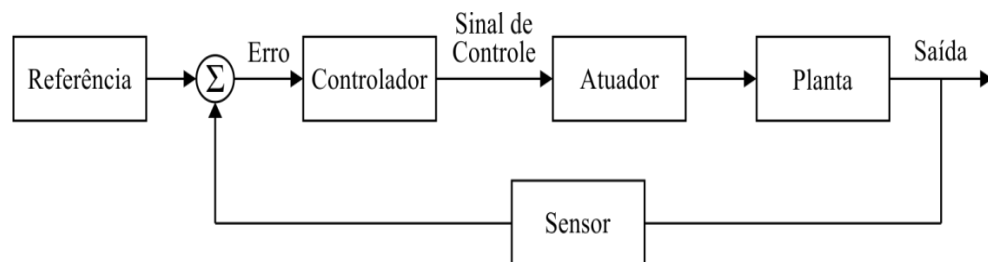
No capítulo 5, é apresentado os resultados das simulações dos controladores aplicados a máquina de corrente contínua.

No capítulo 6, são apresentadas as considerações finais do trabalho.

2 ESTADO DA ARTE

Os sistemas de controle se baseiam no sistema em malha fechada, devido a sua capacidade de adaptação na presença de distúrbios. No controle em malha fechada, o sinal de saída é medido através de sensores. Por sua vez, o sinal de saída é comparado com o sinal de entrada, denominado sinal de referência, originando o sinal do erro atuante, como apresentado na Figura 1. Este sinal é oriundo da diferença entre o sinal de entrada e o sinal de saída, sendo aplicado ao controlador, originando o sinal de controle, (OGATA, 2011. DIAS, 2018. GUIMARÃES, 2013).

Figura 1: Esquemas de controle Convencionais



Fonte: Autor (2019)

Em geral, o controle de velocidade de máquinas de corrente contínua é realizado por meio de um controlador PID convencional. Neste caso, a determinação dos parâmetros é normalmente baseada no lugar geométrico das raízes ou por Ziegler Nichols (GIL, 2019).

No intuito de otimizar a determinação dos parâmetros do controlador PID, pode-se citar o uso de técnicas de inteligência artificial como redes neurais e algoritmos genéticos. Guimarães (2013) fez uso do Algoritmo Genético (AG) com intuito de determinar, com maior precisão, os ganhos, proporcional, integral e derivativo do controlador PID utilizado para o controle de posição do rotor de um motor de corrente contínua, visando à busca de tempos de resposta e sobressinal mínimos. Para isto, ele utilizou os métodos de sintonia tradicionais de Ziegler-Nichols (ZN) para a obtenção do intervalo de busca inicial a ser utilizado para os ganhos do controlador PID. Em seguida, utilizou as técnicas de construção de AGs aplicados à sintonia de controladores PID a fim de obter valores ótimos da resposta.

De acordo com resultados obtidos pelo ator, de fato, pode-se constatar que o método de sintonia do controlador PID usando Algoritmo genético apresentou um excelente desempenho quando comparado com o método tradicional de Ziegler-Nichols para o controle de posição do rotor do motor CC.

Recentemente, Dias (2018) apresentou uma análise comparativa de desempenho entre os controladores PI e PID, aplicados em uma máquina de corrente contínua, no intuito de obter a resposta dinâmica do sistema, utilizando para isso o *software* Matlab. Os resultados obtidos demonstraram um melhor desempenho do controlador PID, quando comparado ao PI.

Li & Xia (2006), apresentou um estudo baseado em uma rede neural em conjunto com um controlador PID a fim de regular a velocidade de uma máquina de corrente contínua sem escovas, (do inglês, *Brushless DC Machine-BLDCM*). Diferentemente da máquina de corrente convencional, esta máquina apresenta um sistema não-linear, assim consequentemente seus controladores, possuíram parâmetros não-lineares. Neste sentido a aplicação de sistemas de controle puramente convencionais não tornarão o sistema estável, levando ao autor combinar uma rede neural com o controlador PID.

Apesar de fazer o uso do motor CC sem escovas, Chen et al (2009), propõem em seu artigo, o uso do controle em cascata combinado com um controlador do tipo modo deslizante, a fim de realizar o controle de velocidade de alto desempenho da máquina BLDCM. Embora possua características não lineares, o SMC (Controle por Modo Deslizante) e o controle de atraso de tempo são propostos como alternativa de melhorar o desempenho do sistema sob a influência da carga distúrbios e incertezas nos parâmetros.

2.1. Esquemas de Controle Não-Convencionais

Ao contrário dos esquemas de controle convencionais, os controladores não-convencionais lineares são indicados para sistemas nos quais apresentam variações paramétricas como ruídos e distúrbios externos que podem levar o sistema a instabilidade, (TEXEIRA, 2016), tornando inviável a aplicação das técnicas de controles puramente convencionais.

Segundo Gil (2019), estes sistemas são constituídos por um conjunto de subsistemas como sensores e cilíndricos pneumáticos, havendo assim a necessidade de descrevê-lo por meios de equações diferenciais não lineares. Na literatura as técnicas de controle não linear também conhecida como técnicas avançadas de controle, sendo as mais conhecidas: Controle

por Modo Deslizante (SMC), Controle Adaptativo e Controle preditivo, (YOUSSEF, 2013; GIL, 2019).

2.2.1 Controle Por Modo Deslizante

O controle por modo deslizante é um tipo de controlador não linear, robusto, sendo bastante eficiente para o controle de sistemas complexos, dinâmicos com equações de ordens elevadas, reduzindo a ordem de complexidade da planta, tornando-se bastante difundido dentre as técnicas do controle moderno (MIDHAT; HUMAIDI, 2017). Além de estabiliza/controlar sistemas com parâmetros conhecidos, o controlador SMC, como também é conhecido, não necessita de uma modelagem detalhada dos parâmetros e variáveis do sistema, além de possuir uma ótima resposta na presença de distúrbios. O custo deste controlador é reduzido, já que não necessita de circuitos extras ou exigem um poder computacional avançado, pois utilizam algoritmos simples, como enfatiza (GIL, 2019)

A lei de controle é descrita por espaço de estado. Os estados do sistema são alterados à medida que o tempo e a frequência do sistema aumentam, sendo utilizadas funções de comutações para realizar o controle dos estados que podem representar variáveis como: corrente, velocidade e posição do sistema. Esta função, pode ser melhor descrita no trabalho de (HUNG, WEIBINGGAO, 1993).

Segundo (GIL, 2019), a construção de controlador SMC, é dada basicamente por dois passos:

I. Determinação da função de comutação, contida no plano hiperbólico, tornando o sistema estável;

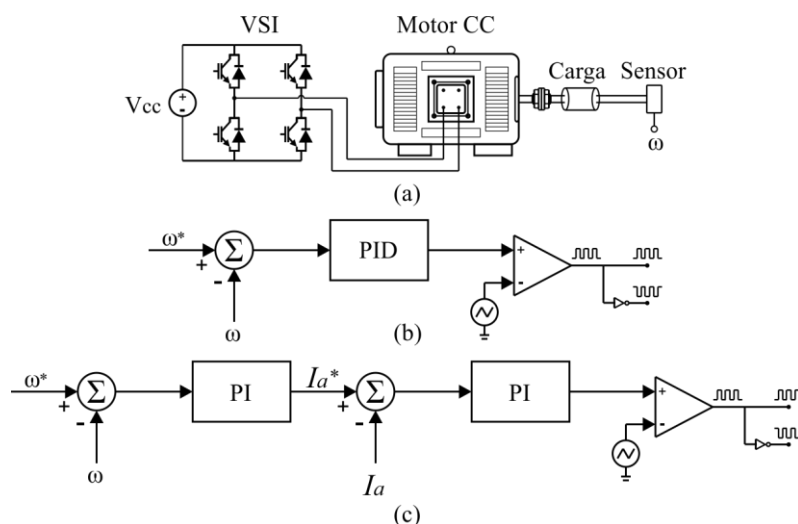
II. Determinação de uma lei de controle que convirja às trajetórias ou estados do sistema para uma superfície definida no espaço de estado para valores desejados, chamada de superfície de deslizamento.

Em seu trabalho, (GHALIMATH; SANKESWARI, 2015) enfatiza as vantagens e desvantagens do uso desse controlador, alertando para o fato que uma má projeção e escolha da função de comutação e de uma lei de controle pode causar não apenas os resultados prometido pelo controlador, mas também pode ocasionar a instabilidade do sistema.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Para avaliar o desempenho dos esquemas de controle na regulação da velocidade de uma máquina de corrente contínua, foi desenvolvido um estudo de simulação, conforme ilustrado na Figura abaixo.

Figura 2: Esquema de Controle.



Fonte: Autor (2019)

De acordo com a Figura 3, o sistema simulado é composto por uma máquina de corrente contínua, um inversor fonte de tensão (do inglês, *Voltage Source Inverter-VSI*), um sensor de velocidade, uma carga mecânica, um esquema de controle baseado no controlador PID, Figura 3 (b), e um esquema de controle em cascata utilizando controladores PI's, Figura 3 (c).

3.1 Máquina de Corrente Contínua

Dentre os mais diversos tipos de motores, neste trabalho iremos descrever as características dos motores de corrente contínua, visto possuir uma simplicidade de controle de variáveis como: velocidade de rotação e seu conjugado mecânico.

O motor CC funciona a partir do princípio da atração e repulsão de campos magnéticos, sendo formado basicamente por: Armadura, Comutador e Escovas, visto na Figura 4.

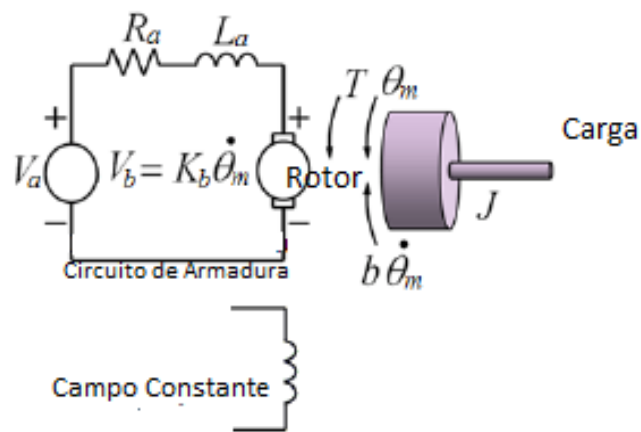
I. Armadura ou rotor: Compõem a parte móvel do dispositivo. Possui lâminas de silício, nas quais apresentam ranhuras onde são instaladas as bobinas do rotor. Os terminais da

bobina são conectados eletricamente a um comutador, gerando um campo magnético que irá reagir com o campo magnético do estator, criando torque e movimento.

II. Comutador ou coletor: Gerando o eixo do rotor, o comutador tem como função inverter o sentido da corrente na armadura, para produzir um torque que a mantenha girando em um sentido constante. É conectado eletricamente as bobinas do rotor através de escovas de carvão a fonte de energia elétrica, permitindo a movimentação do rotor sem causar curto circuito.

III. Escovas: As escovas conduzem a energia advinda da fonte externa para os contatos do comutador e as bobinas do rotor. Em sumo, são responsáveis pelo contato elétrico da parte fixa do motor com a parte rotativa (armadura).

Figura 3: Modelo do circuito elétrico do motor CC.



Fonte: Adaptada do artigo de Taveiros (2012).

A Figura 4, representa o diagrama esquemático de um motor de corrente contínua de excitação independente com uma carga mecânica conectada, tendo a corrente de campo constante. A tabela 1 refere-se aos parâmetros comentados acima e suas respectivas unidades de medidas.

Tabela 1: Parâmetros do Motor CC.

Símbolos	Unidades de Medidas
J	Inércia do Motor $Kg \cdot m^2$
L_a	Indutância da Armadura (H)
b_m	Coefficiente de Atrito Viscoso $(Kg \cdot m^2/s)$
R_a	Resistência de Armadura (Ω)
K_a	Constante do Torque do Motor (Nm/A)
K_b	Constante de Força Contra eletromotriz (Vs)
V_a	Tensão de Armadura (V)
V_b	Força/Tensão Eletromotriz (V)
θ_m	Posição Angular do Motor (rad/s)
T	Conjugado Mecânico $(N \cdot m)$

Fonte: Autor (2020).

3.1.1 Modelagem do Motor CC

Conforme Taveiros *et al*(2012) e Patané (2008) a força Eletromotriz é dada pela constante de Força eletromotriz pela derivada da posição Angular do Motor:

$$V_b = K_b \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

Aplicando A Lei de Newton e assumindo que a aceleração da máquina é dada pela diferença entre o conjugado da máquina menos o conjugado de atrito:

$$J_m \frac{d^2\theta}{dt^2} = T - b_m \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2)$$

Como o campo do motor CC é mantido com valor de tensão e corrente constante podemos dizer que:

$$T = K_a \cdot i_a(t) \quad (3)$$

De acordo com a Figura 4, a tensão de armadura é obtida por meio da Lei de Kirchoff como pode ser vista na Equação 3.

$$v_a(t) = v_b(t) + R_a \cdot i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4)$$

Relacionando as Equações (1),(2),(3),(4) e aplicando a transformada de Laplace , obtêm-se a Equação 5, na qual relaciona a posição angular da máquina com a tensão de armadura.

$$\frac{\theta_m}{v_a} = \frac{k_a}{J_m L_a s^3 + (J_m R_a + L_a B_m) s^2 + (R_a B_m + K_a K_b) s} \quad (5)$$

Para encontrar uma equação na qual relacione a tensão nos terminais de armadura com a velocidade angular de rotação W_m , basta apenas derivar a Equação 5, obtendo a Equação 6.

$$\frac{W_m}{V_a} = \frac{K_a}{J_m L_a s^2 + (J_m R_a + L_a B_m) s + (R_a B_m + K_a K_b)} \quad (6)$$

3.2.2 Esquema de Controle com PID

Como mencionado anteriormente, o controlador PID é um dos mais utilizados na indústria devido a características como:

- I. Facilidade de projeção e implementação de seus parâmetros, quando comparados com controladores mais robustos;
- II. Desempenho considerável, até mesmo em sistemas de que exista alguma incerteza no processo de controle;
- III Baixo custo quando comparado com outros controladores;
- VI A combinação dos ajustes pode determinar se o sistema será oscilatório ou não, se o sistema será rápido ou lento.

Este controlador reúne as características do controlador proporcional, integral e derivativo, fazendo assim com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipada pela ação derivativa.

Matematicamente o controlador PID é definido pela função de transferência a seguir:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (7)$$

em que: k_p , $k_p T_d$, $k_p \frac{1}{T_i}$ correspondem ao ganho proporcional, integral e derivativo.

Com um controlador PID é possível obter os outros (P, PI ou PD), zerando-se aquele que não nos interessa. Exemplo: se queremos um controlador PI, basta zerar o ganho do derivativo, se queremos um controlador P, zeramos o derivativo e o integral, e assim por diante, (DIA, 2018).

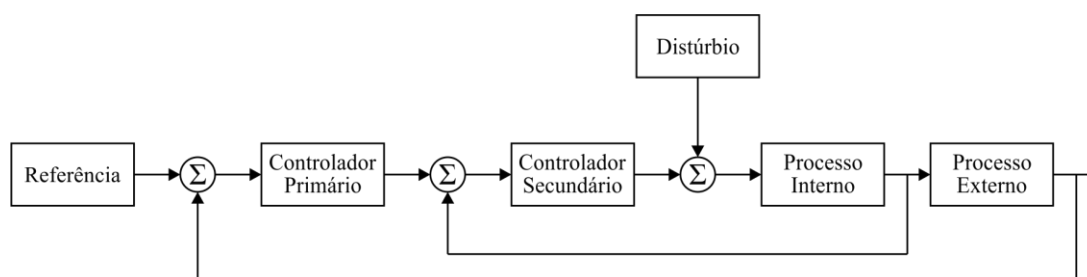
Vale salientar que estes parâmetros são determinados de acordo com as especificações do sistema e requerem métodos para isso, podendo destacar o método do lugar das raízes e o método de Método Ziegler-Nichols (ZN). Entretanto dependendo das especificações e característica do projeto, estes métodos não são tão eficazes, sendo necessária a utilização de algoritmos e softwares a fim de fornecer com exatidão os parâmetros do controlador PID.

3.2.3 Esquema de Controle em Cascata

O controle em Cascata como sendo uma técnica de controle convencional. Este tipo de controle é amplamente utilizado por processos e plantas nas quais possuem uma contínua perturbação em torno da variável manipulada ou até mesmo em sistemas não lineares (GIL,2019).

O controlador em Cascata é formado pela presença de duas malhas, denominadas de primária e secundária, cada qual composta por um controlador, conforme ilustrado na Figura 5. O controlador primário é responsável por regular o controle secundário, e esta deve ser mais rápida que a malha secundária melhorando a velocidade de resposta e reduzindo os distúrbios causados pela malha secundária. Em sua maioria, os controladores secundários são implementados pelos controladores P ou PI e os controladores primários são implementados por PI ou PID. Para este tipo de controle é necessário que duas variáveis do processo sejam medidas e controladas (SANTOS, 2014).

Figura 4:Esquema de Controle Cascata



Fonte: Autor (2020)

Baseado na Figura 5, o sinal de saída do controlador primário é o sinal de referência para o controlador secundário, ou seja, o controlador primário cascadeia o controlador secundário, e este, encontra-se localizado dentro da malha primária. Desta forma, os distúrbios que afetam a variável secundária, como uma variação de corrente ao aplicar uma carga no sistema, são corrigidas pelo controlador secundário, que é mais rápido do que o primário, antes que possam influenciar a medição primária (GIL,2019).

Ainda com o intuito de controlar a velocidade do motor CC, utilizando para isso a estratégia dos controladores em Cascata, foram utilizados controladores do tipo PI, tanto na malha interna como na malha externa. Para atender as especificações deste tipo controlador, é necessário determinar as leis de controle que regem sistema. A primeira lei de controle, da malha secundária, é destinada ao controle de corrente do motor, Equação 8, na qual resulta numa função de transferência de primeira ordem que relaciona corrente e tensão de armadura da máquina.

$$\frac{I_a}{V_a} = \frac{l_a}{s + \frac{r_a}{l_a}} \quad (8)$$

A segunda lei de controle é destinada ao controle da velocidade do sistema, malha primária, entretanto relaciona a corrente de armadura com a velocidade angular do motor resultando numa equação de primeira ordem, Equação 9.

$$\frac{w_m}{i_a} = \frac{j_m}{s + \frac{b_m}{j_m}} \quad (9)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo, serão apresentados os resultados de simulação e experimentais obtidos por meio do *software* Psim e da placa de prototipagem Arduino. Estudos de simulação são importantes para verificar o comportamento do sistema e servem como base para implementações experimentais. Com base nisso, foi desenvolvido um estudo de simulação de controle de uma máquina de corrente contínua. Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros da máquina de corrente contínua utilizados na função de transferência do sistema, baseados no motor cc. Este parâmetros foram retirados de acordo com a máquina disponível do modelo de simulação Psim.

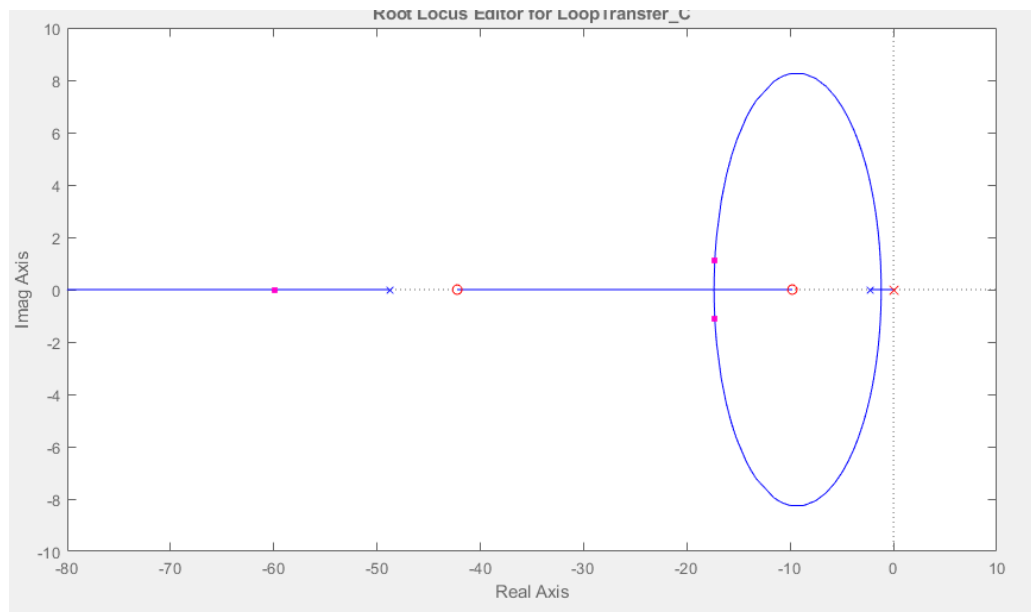
Tabela 2: Parâmetros da máquina de corrente contínua.

Momento de Inércia do motor	$0.4Kg - m^2$
Coeficiente de Amortecimento	$0.4N - m$
Indutância Elétrica da Armadura	0.01 H
Resistência Elétrica da Armadura	$0.5(\Omega)$
Velocidade Nominal	1200 (RPM)

Fonte: Autor.

Os ganhos dos controladores utilizados, foram obtidos por meio do método de projeto baseado no lugar geométrico das raízes, sendo este baseado no diagrama de polos e zero no plano complexo s do sistema em malha aberta. Na Figura 5 é apresentado o lugar geométrico das raízes do sistema com o controlador PID.

Figura 5: Lugar Geométrico das raízes para o Sistema Compensado Utilizando PID

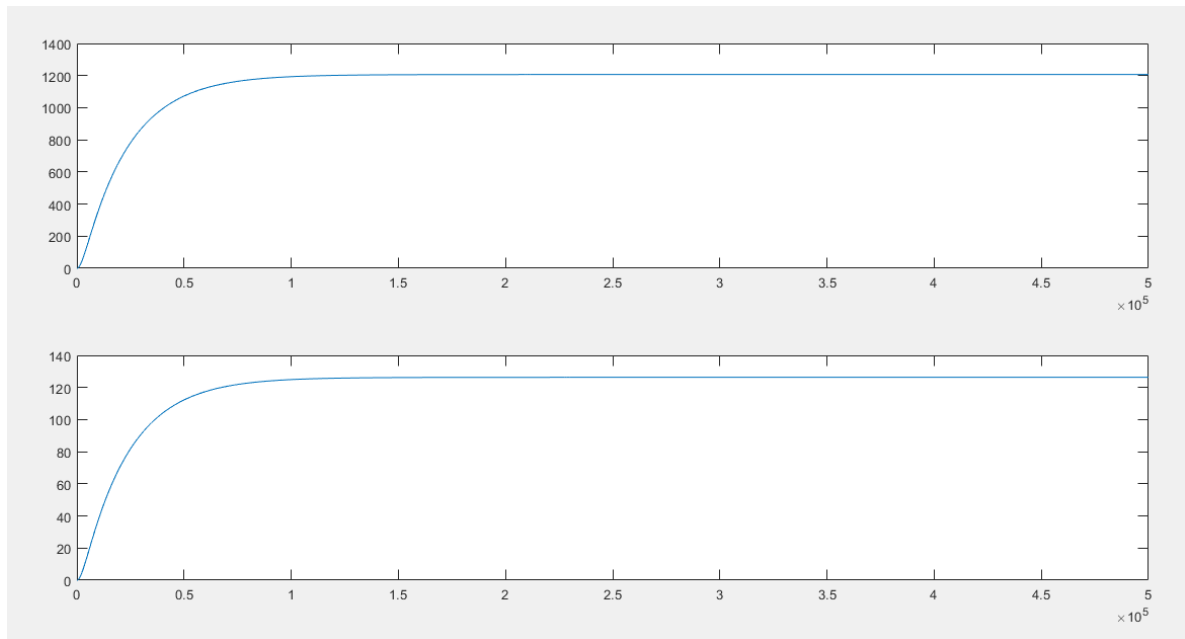


Fonte:Autor

4.1 Esquemas de Controle com PID e PI em Cascata

Na Figura 6, é apresentada a resposta a um degrau de 120 V, em malha aberta, da máquina de corrente contínua. Neste caso, em regime permanente a máquina apresentou uma velocidade de aproximadamente 1200 rpm e 125 rad/s. Baseado na Figura 3, o sistema apresentou uma resposta dinâmica superamortecida, resultando num sistema estável, possuindo tempo de acomodação longo, características de um sistema mecânico, e ausência de sobressinal.

Figura 6: Resposta em Degrau do Sistema em Malha Aberta.



Fonte: Autor.

Uma vez analisado a resposta do sistema em malha aberta, foi avaliado o desempenho do sistema com os esquemas de com controlador PID e com PI em cascata. Na Tabela 3 são apresentados os ganhos dos controladores PID e PI em cascata considerando um coeficiente de amortecimento $\xi = 0.7$ e um tempo de acomodação de 0.1 segundos, que seriam as especificações de projetos imposta para realizar o cálculo dos controladores.

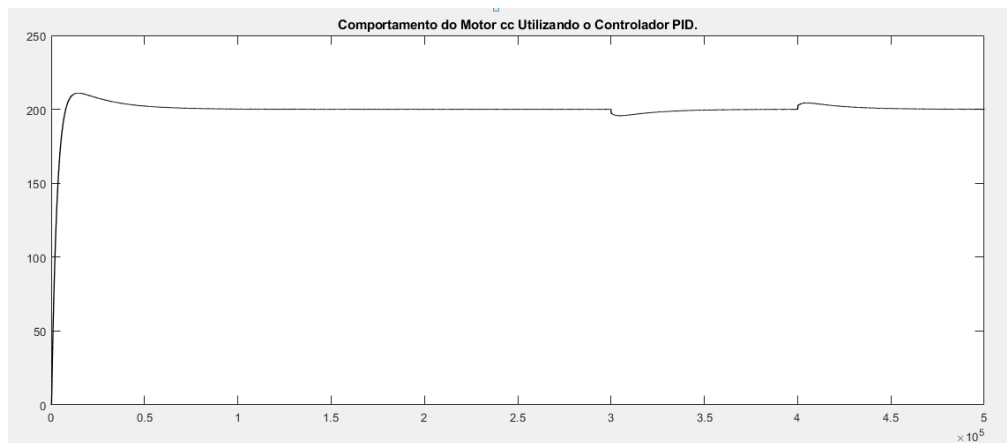
Substituindo os parâmetros da Figura 6 na Equação 18, resultou nos parâmetros referentes aos ganhos do controlador PID apresentados na Tabela abaixo:

Tabela 3: Valores dos Ganhos do controlador PID

Ganhos	Ganhos do Controlador PID
Ganho Proporcional K_p	39.4
Ganho Integral K_i	313
Ganho Derivativo K_d	0.757

Substituindo os valores dos ganhos do sistema compensado, pode-se observar o comportamento do mesmo sob a presença de distúrbio, Figura 7.

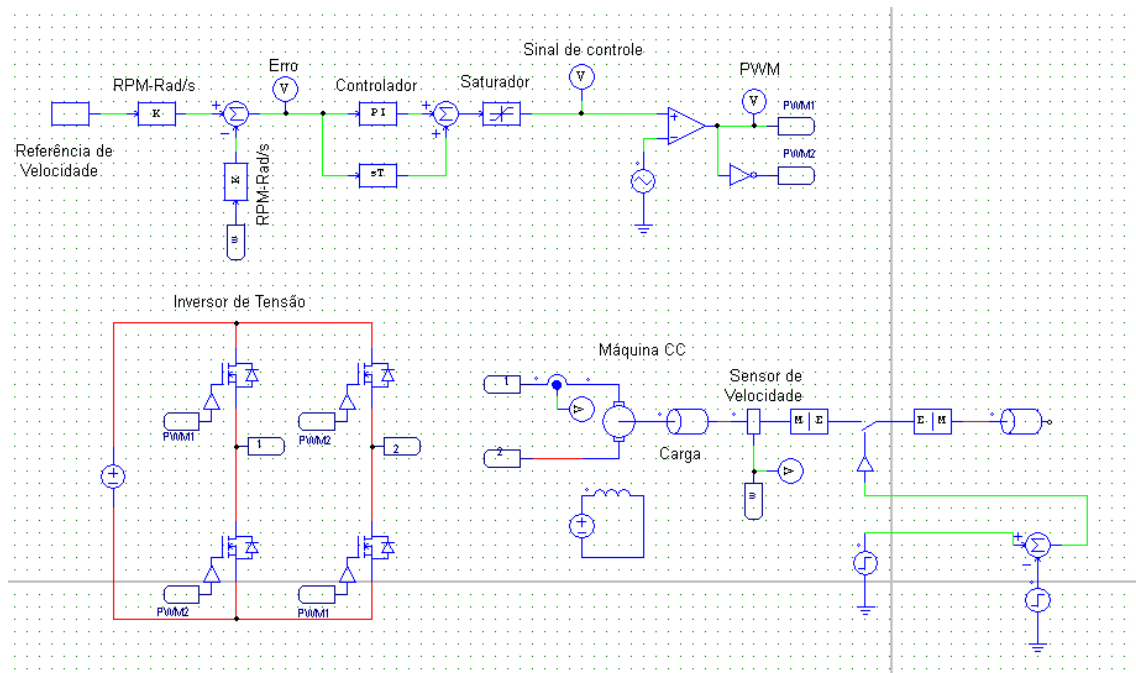
Figura 7: Comportamento do Sistema Utilizando o Controlador PID.



Fonte: Autor.

O distúrbio adicionado no sistema é oriundo da existência de uma carga depois do motor cc. Vale salientar que esta carga também esteve sujeita a uma variação de sinal, representada pelo esquema abaixo:

Figura 8: Simulação realizada no Psim com Controle PID



Fonte: Autor.

Ao analisar o sistema compensado, pode-se retirar as seguintes considerações: O sistema possui sobressinal relativamente baixo, 5.8511 % o que indica sua estabilidade, apresenta erro nulo e tempo de subida e acomodação reduzidos, cerca de 0.1 e 0.6 segundos, tornando o sistema mais rápido.

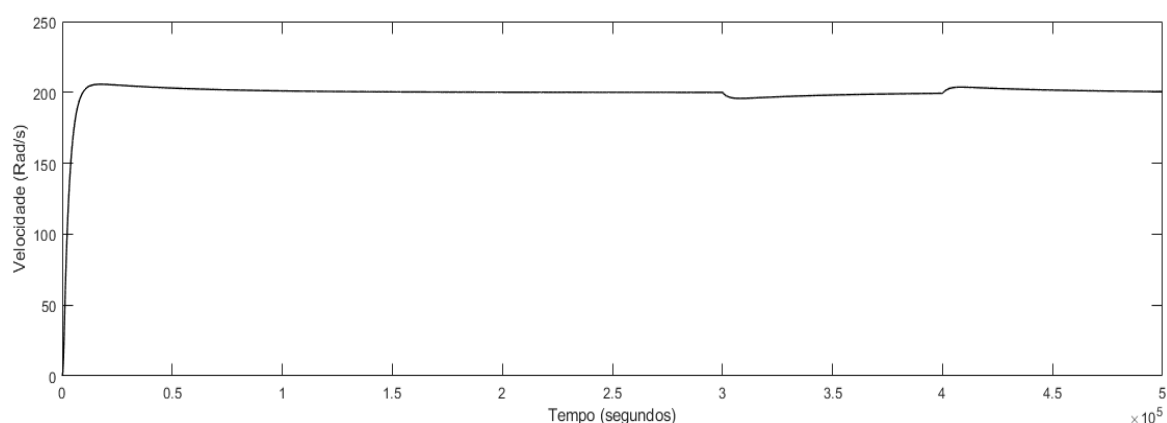
Para determinar os parâmetros do controlador em Cascata, utilizou-se o método polinomial, descrito com detalhes no trabalho de Neto (2016). Substituindo os parâmetros da Tabela 2, nas Equações 8 e 9, resultou-se em ganhos cujo valores, estão apresentados na Tabela 3. Vale ressaltar que o tempo de acomodação utilizado na malha externa é de 1 segundo, ou seja, dez vezes maior do que o tempo de acomodação da malha interna, 0.1 segundos.

Tabela 3: Valores de Ganho e Tempo de acomodação de acordo com suas respectivas malha de controle

Malhas	Ganho Proporcional (K_p)	Ganho Integral (K_i)
Malha interna (Malha Corrente)	3000	4200
Malha externa (Malha Velocidade)	17.5	83.3

Na Figura 9 é apresentada a resposta do sistema com o esquema de controle em cascata. Baseado na Figura 9, o sistema também é estável, apresentando sobressinal de 2.5773 %, indicando a estabilidade do sistema. O sistema também apresenta tempo de subida e acomodação reduzidas e erro nulo em regime permanente.

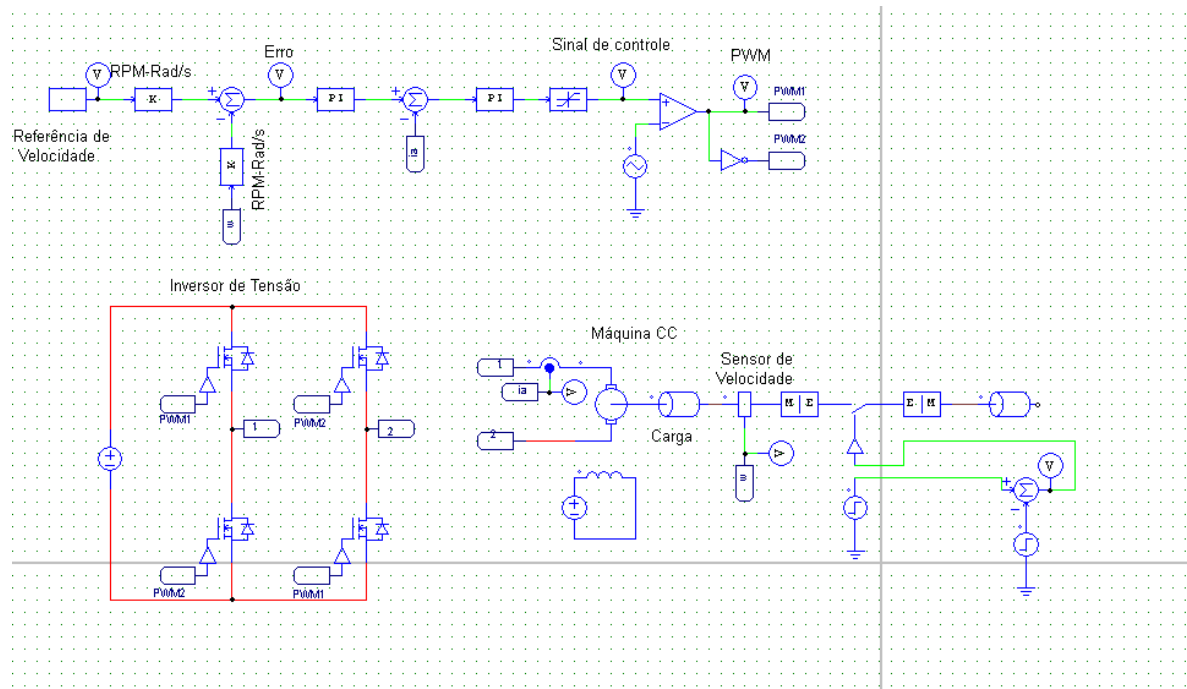
Figura 9: Comportamento do Motor cc na presença do Controlador PI em Cascata.



Fonte: Autor.

Por meio da Figura 10, pode-se observar a presença de apenas dois controladores PI's responsáveis pelo controle da velocidade e corrente do sistema respectivamente. Assim como o esquema de controle PID, o esquema em cascata também foi submetido sob as mesmas condições de distúrbios, Figura 10:

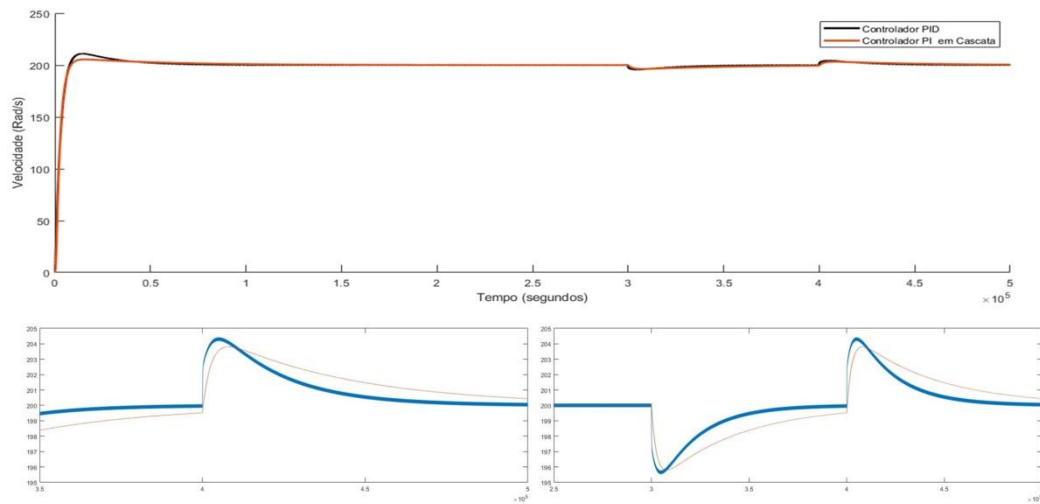
Figura 10: Simulação realizada no Psim com Controle PI em Cascata.



Fonte: Autor.

Na Figura 10, é apresentada a comparação da resposta do sistema sob a presença dos controladores PID, representado na cor preta, e PI em Cascata, representado pela cor vermelha. Apesar de apresentar comportamentos semelhantes, o sistema compensado pelo PI em cascata apresentou um menor sobressinal e tempo de acomodação em relação ao PID, além disso este tipo de esquema apresenta uma menor complexidade de projeto e implementação.

Figura 8: Comparação da Resposta do PI em Cascata e PID.



Fonte: Autor (2020).

4.2. Resultados Experimentais Obtidos

A fim de analisar o comportamento do sistema experimentalmente, foi implementado um algoritmo de controle PID, com o auxílio da plataforma Arduino, se utilizou de circuito de ponte H, sendo responsável por gerar um sinal de controle PWM, e um sensor de velocidade, no qual foi responsável por medir a frequência de rotação do eixo do motor CC, o sistema pode ser visto na Figura 11:

Figura 9:Esquema de Controle de velocidade para Motor CC utilizando PID.

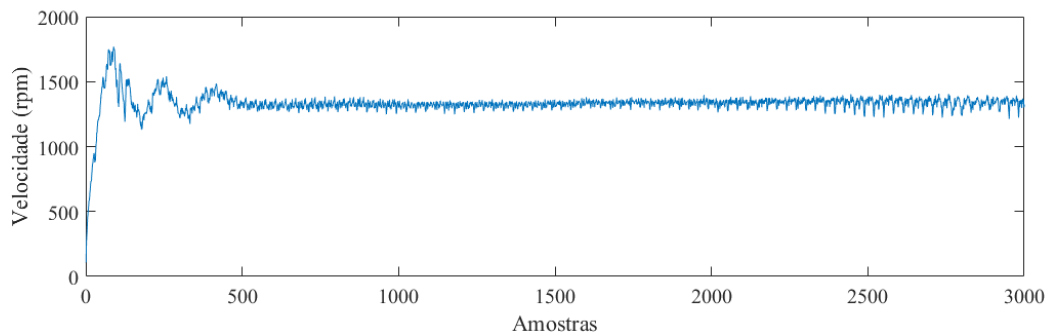


Fonte: Autor (2020)

A alimentação da tensão de armadura e do circuito da ponte H, foram alimentados com 5 Vots e 8 Volts, respectivamente. Os parâmetros que foram utilizados no algoritmo PID, foram os mesmos obtidos na seção 4.1. O sinal de PWM gerado pela ponte H é responsável por gerar o sinal de controle do sistema.

Durante o período de 5 segundos foram coletadas cerca de 3000 amostras, posteriormente essas amostras foram exportadas para o software Matlab, com intuito de ser melhor visualizadas, Figura 12.

Figura 10:Saída do sistema em RPM



Fonte: Autor (2020)

O sinal de referência para esta análise foi de 1300 rpm. Apesar de apresentar um sobressinal de 17,8%, pode-se observar que o mesmo apresentou um desempenho satisfatório, aproximando-se do sinal de referência estipulado, indicando coerência no processo de aferição dos ganhos do controlador. Estes resultados apresentam certa divergência com os resultados obtidos pela simulação, nos quais, podem ser explicado devido às limitações encontradas durante o processo de implementação, como falta de sensores de boa qualidade, para a implementação de um sistema mais robusto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi apresentada uma análise comparativa entre duas estruturas de controle em um motor de corrente contínua, com intuito de controlar a velocidade do motor de corrente contínua, bem como melhorar seu desempenho na presença de distúrbio.

Para tanto, utilizou-se o método matemático denominado Lugar Geométrico das Raízes para determinar os ganhos aproximados dos controladores de acordo com as especificações de projeto. As análises computacionais foram realizadas com o *Software* PSIM.

Ao aplicar as estruturas de controles no modelo em questão, pode-se constatar melhorias no desempenho do sistema, tornando-o mais rápido e estável na presença de distúrbio. Apesar de apresentar comportamentos parecidos, o controlador PI em cascata mostrou-se mais eficiente, devido o mesmo apresentar melhor desempenho em regime transitório e permanente.

A aplicação e implementação prática do controlador PID, proporcionou melhor uma visão pática com relação à projeção e funcionamento dos sistemas de controle, bem como a sintonia de seus parâmetros afetam significativamente o desempenho do sistema, assemelhando-se com os sistemas presentes do dia-a-dia. Processo.

5.1 Trabalhos Futuros

Como continuação do estudo realizado neste trabalho de conclusão de curso, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- 1) Determinar os parâmetros da máquina de corrente contínua utilizada na obtenção dos resultados experimentais;
- 2) Implementar o esquema de controle em cascata;
- 3) Implementar estratégias de controle não-convencionais.

REFERÊNCIAS

- KATHUSHIKO, OGATA. **Engenharia de Controle moderno**. 5ª Edição. Editora LTC, 2011.
- DIAS, Bryan Souza. **ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE UM CONTROLADOR PI E PID APLICADO EM UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA**. 2018. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário do Sul de Minas, Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2018.
- GUIMARÃES, Ádler de Oliveira. **ALGORITMO GENÉTICO APLICADO NO CONTROLE DE POSIÇÃO DO ROTOR DE UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA COM REJEIÇÃO A DISTÚRBIOS POR AÇÃO FEEDFORWARD**. 2013. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2013.
- GIL, Gloria Milena Vargas. **Estudo, Simulação e Implementação de um Sistema Fotovoltaico de baixa Potência usando Controle por Modos Deslizantes**. 2019. 119 f. Tese (Doutorado) - Curso de Sistema de Potência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- VON ZUBEN, Fernando José et al. **Redes neurais aplicadas ao controle de máquina de indução**. 1993.
- LIBERZON, Daniel. **Calculus of variations and optimal control theory: a concise introduction**. Princeton University Press, 2011.
- LEVIS, A. Challenges to control: A collective view--Report of the workshop held at the University of Santa Clara on September 18-19, 1986. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 32, n. 4, p. 275-285, 1987.
- YOUSSEF, Ebrahim Samer El. **CONTROLE POR MODO DESLIZANTE DE ROBÔS MÓVEIS SOBRE RODAS**. 2013. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Automação e Sistemas, Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MIDHAT, Bashar Fateh; HUMAIDI, Amjad Jaleel. **Design of Integral Sliding Mode Controller for Servo DC Motor**. Al-nahrain Journal For Engineering Sciences (njes), Midhat, v. 20, p.685-691, jun. 2017. GHALIMATH, Prabhudev; SANKESWARI, S. S.. Speed control of DC motor using sliding mode control approach. Iosr Journal Of Electrical And Electronics Engineering (iosr-jeee). Ambajogai, p. 17-22. jul. 2015.

SANTOS, Ricardo Martins. **CONTROLE CASCATA E SUPERVISÃO APLICADA A CONTROLE DE NÍVEL EM PLANTA DIDÁTICA DE PROCESSOS**. 2014. 82 f. Monografia- Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2014.

SANTOS MOTA, D., & Goldemberg, C. (2010). **Comparison between voltage control structures of synchronous machines**. *IEEE Latin America Transactions*, 8(6), 631-636.

SOUSA NETO, Cecílio Martins de. Estabilizador de Sistema de Potência Baseado na Transformada Wavelet Para Sistemas de Geração . 2016. 118 f. Tese (Doutorado) em Engenharia Elétrica e de Computação, UFRN, Natal, 2016.