

Gabriel Rodrigues Neves
Guilherme Rocha Pereira

**Desempenho do Motor CC com Regulação de Velocidade
Alimentado por Retificador Controlado e Recortador de Tensão –
Análise Comparativa**

Goiânia
2020

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC nº 1204/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):

Nome completo do autor: *Guilherme R. Pereira e Gabriel R. Neves*

Título do trabalho: *Desempenho do Motor CC com Regulação de Velocidade alimentado por Retificador Controlado e Retificador de Tensão ANALISE COMPARATIVA.*

2. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF do TCCG.

Gabriel Rodrigues Neves *Guilherme Rocha Pereira*

(Assinatura do autor)²

Ciente e de acordo:

Wander G. do-Silva

(Assinatura do orientador)²

Data: 18 / 02 / 2020

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² As assinaturas devem ser originais sendo assinadas no próprio documento, imagens coladas não serão aceitas.

Gabriel Rodrigues Neves
Guilherme Rocha Pereira

**Desempenho do Motor CC com Regulação de Velocidade
Alimentado por Retificador Controlado e Recortador de Tensão –
Análise Comparativa**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado à disciplina TCC, do curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Goiás, com requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal de Goiás UFG
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador: Wander Gonçalves da Silva

Goiânia

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rocha Pereira, Guilherme

Desempenho do Motor CC com Regulação de Velocidade Alimentado por Retificador Controlado e Recortador de Tensão – Análise Comparativa [manuscrito] / Guilherme Rocha Pereira, Gabriel Rodrigues Neves. - 2020.

xv, 15 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Wander Gonçalves da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Cidade de Goiás, 2020. Bibliografia.

1. controle de velocidade. 2. motor CC. 3. recortador de tensão. 4. retificador controlado. I. Rodrigues Neves, Gabriel. II. Gonçalves da Silva, Wander, orient. III. Título.

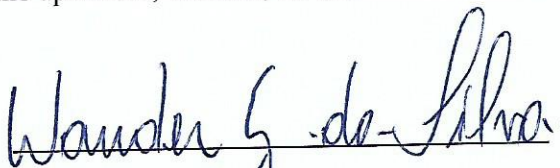
CDU 621.3

Gabriel Rodrigues Neves
Guilherme Rocha Pereira


**Desempenho do Motor CC com Regulação de Velocidade
Alimentado por Retificador Controlado e Recortador de Tensão –
Análise Comparativa**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado à disciplina TCC, do curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Goiás, com requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro Eletricista.

Trabalho aprovado, Goiânia, 13 de fevereiro de 2020



Prof. Wander Gonçalves da Silva
Orientador



Prof. Enes Gonçalves Marra
Avaliador 1



Prof. Lourenço Matias
Avaliador 2

Goiânia

2020

Desempenho do Motor CC com Regulação de Velocidade Alimentado por Retificador Controlado e Recortador de Tensão – Análise Comparativa

Guilherme R. Pereira e Gabriel R. Neves

Resumo – O presente trabalho apresenta um estudo comparativo do desempenho do motor CC com controle de velocidade alimentado por retificador trifásico totalmente controlado (controle de fase) e por recortador de tensão (Chopper). O sistema de controle é constituído de duas malhas, uma interna para regulação da corrente de armadura e outra externa para a velocidade. Os reguladores são do tipo Proporcional-Integral, cujos ganhos foram ajustados de forma a evitar saturação dos reguladores, mantendo todo o sistema linear. Para fins de comparação, os ajustes dos reguladores foram os mesmos nos sistemas considerados. Resultados de simulação no ambiente MATLAB/SIMULINK® são apresentados, evidenciando a diferença de desempenho entre as duas formas distintas de acionamento do motor cc.

Palavras-Chave – controle de velocidade, motor cc, recortador de tensão, retificador controlado.

Abstract – This paper presents a comparative study the speed controlled dc motor drive fed by either, a fully controlled three-phase rectifier or Chopper. The control system is done in two loops, an inner one for the armature current and the outer one for the speed. The regulators are the Proportional-Integral type, which gains have been adjusted such as saturation is avoided, keeping the whole system linear. For comparison, the controller gains were kept the same for both control systems. Simulation results are presented showing the difference in terms of response for the two different speed control approaches.

Keywords – speed control, dc motor, chopper, controlled rectifier.

I. INTRODUÇÃO

O tamanho do mercado global de motores CC foi avaliado em \$20,196 bilhões em 2016, com o maior segmento de utilização de motores CC sendo em máquinas industriais [1]. Expressivo número de processos industriais demanda sistemas de acionamento elétrico com controle de torque e/ou velocidade. Processos de fabricação de filmes plásticos, por exemplo, necessitam de controle preciso de velocidade do acionamento elétrico mesmo na presença de distúrbios de carga [2]. Outras aplicações são amplamente relatadas na literatura, tais como propulsão elétrica, elevadores, máquinas ferramenta, indústria têxtil, entre outras [3]. Os motores elétricos utilizados podem ser motores CA ou CC. Entre os motores CA, encontra-se na literatura inúmeras publicações utilizando-se o motor de indução trifásico – MIT ou motores síncronos a ímãs permanentes.

Para fins de regulação de velocidade, o motor CC foi predominante até a década de 80. Entretanto, com o desenvolvimento da eletrônica de potência e dos microprocessadores, tornou-se possível obter fontes de tensão com amplitude e frequência variáveis, possibilitando-se assim o desenvolvimento de sistemas de acionamento elétrico utilizando-se o MIT com controle vetorial ou de campo orientado. A partir de então, o MIT passou a ocupar o espaço do Motor CC em aplicações onde faz-se necessário o controle de torque ou velocidade [3]. Entretanto, em função de seu comportamento linear e facilidade de controle, o motor CC é ainda utilizado na indústria e considerado para fins de estudo de análise de sistemas lineares em cursos de graduação em engenharia elétrica [4,5].

Para o motor CC, o controle de velocidade pode ser realizado atuando-se na tensão de armadura ou no campo. O controle pela tensão de campo é normalmente utilizado quando se deseja velocidades acima da nominal, operando-se na região de enfraquecimento de campo. A vantagem neste tipo de controle é que um nível de potência relativamente baixo é necessário uma vez que o enrolamento de campo requer uma pequena fração da potência entregue à armadura [6].

Quando se deseja trabalhar com velocidade variável, até seu valor nominal, o controle pela armadura é normalmente utilizado. Neste trabalho, será considerado apenas o caso em que o controle da velocidade será realizado por meio da variação da tensão de armadura que, por sua vez, será ajustada por meio de retificador trifásico totalmente controlado (controle por fase) ou por meio de recortador de tensão (Chopper). Serão apresentados os modelos desenvolvidos no ambiente MATLAB/SIMULINK®, juntamente com o modelo linear considerado na literatura clássica. Resultados de simulação computacional serão igualmente apresentados, possibilitando a realização de comparações capazes de ilustrar de forma clara e objetiva, como as metodologias de controle se ajustam ao modelo clássico do motor CC com controle de velocidade considerado na literatura, assim como as diferenças nas respostas de velocidade do motor CC com controle de fase ou alimentado por recortador de tensão.

II. MODELAGEM DO MOTOR CC

O circuito elétrico equivalente da armadura de um motor CC de excitação independente é apresentado na Figura 1.

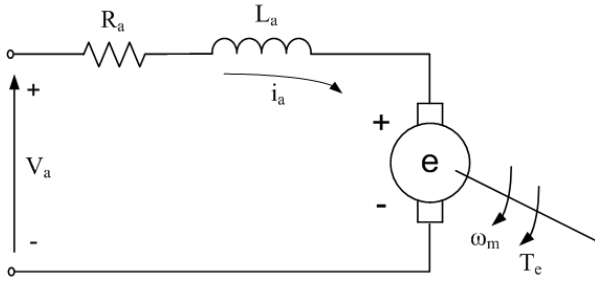


Figura 1. Circuito equivalente da armadura do motor CC.

Onde:

- V_a – Tensão de armadura em [V]
- i_a – Corrente de armadura em [A]
- R_a – Resistência de armadura em [Ω]
- L_a – Indutância de armadura em [H]
- e – Força eletromotriz em [V]
- ω_m – Velocidade angular em [rad/s]
- T_e – Torque eletromagnético [Nm]

Aplicando-se a lei das tensões de Kirchoff no referido circuito, tem-se:

$$V_a = e + R_a i_a + L \frac{di_a}{dt} \quad (1)$$

Para o motor CC, a força eletromotriz – fem é função do fluxo de campo, Φ_f , da velocidade angular, ω_m , e de uma constante, K , relacionada aos aspectos construtivos da máquina, conforme equação (2).

$$e = K \Phi_f \omega_m \quad (2)$$

Para o motor CC na configuração independente, com fluxo de campo constante, a equação (2) pode ser reescrita por:

$$e = K_b \omega_m \quad (3)$$

Onde K_b representa a constante de fem, em Volts/rad/s.

Em regime permanente a corrente de armadura é constante e a equação (1) se reduz a:

$$V_a = e + R_a i_a \quad (4)$$

O balanço de potência pode ser obtido multiplicando-se a equação (3) por i_a resultando em:

$$V_a i_a = e i_a + R_a i_a^2 \quad (5)$$

Reconhecendo-se que o termo $R_a i_a^2$ representa as perdas joule na armadura e $V_a i_a$, a potência total fornecida, o termo $e i_a$ representa a potência elétrica transformada em potência mecânica ou potência no entreferro [3] que, expressa em função da velocidade angular e torque eletromagnético, torna-se:

$$P_a = \omega_m T_e = e i_a \quad (6)$$

Portanto,

$$T_e = \frac{e i_a}{\omega_m} \quad (7)$$

Substituindo a equação (3) na equação (7), tem-se que:

$$T_e = K_b i_a \quad (8)$$

Observa-se que a constante de fem, K_b , é a mesma para a equação do torque, porém, na equação (8), sua unidade é Nm/A.

Considerando que o motor aciona uma carga mecânica, do ponto de vista eletromecânico tem-se que:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m = T_e - T_L = T_a \quad (9)$$

Onde:

- J – Momento de inércia em [Kg.m^2]
- B – Coeficiente de atrito em [Nm/rad/s]
- T_L – Torque de carga em [Nm]
- T_a – Torque de aceleração em [Nm]

Aplicando-se a transformada de Laplace nas equações (1) e (9), bem como substituindo (3) em (1) e (7) em (9), tem-se:

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_b \omega_m(s)}{L_a s + R_a} \quad (10)$$

e

$$\omega_m(s) = \frac{K_b I_a(s) - T_L(s)}{J s + B} \quad (11)$$

Colocando-se as equações (10) e (11) na forma de diagrama de blocos, tem-se o motor CC de excitação independente representado conforme Figura 2.

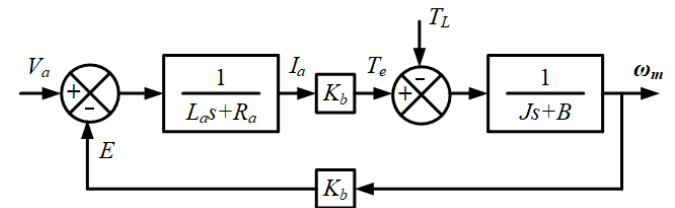


Figura 2: Modelo do motor CC em diagrama de blocos.

As Funções de Transferência, tomando-se como saída a velocidade do motor, ω_m , e como entradas, tensão de armadura, V_a , e conjugado resistente ou torque de carga, T_L , são:

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_b}{J L_a s^2 + (B L_a + J R_a) s + (B R_a + K_b^2)} = G_{\omega V}(s) \quad (12)$$

$$\frac{\omega_m(s)}{T_L(s)} = \frac{-(L_a s + R_a)}{J L_a s^2 + (B L_a + J R_a) s + (B R_a + K_b^2)} = G_{\omega L}(s) \quad (13)$$

Portanto, a resposta de velocidade do motor CC para entradas simultâneas de tensão de armadura, V_a , e conjugado de carga, T_L , é dada por:

$$\omega_m(s) = G_{\omega V}(s)V_a(s) + G_{\omega L}(s)T_L(s) \quad (14)$$

A transformada inversa de Laplace da equação (14) possibilita a obtenção da resposta de velocidade no tempo. Observa-se a partir da equação (14) que, a velocidade final do motor depende da tensão de armadura aplicada e do conjugado de carga, que é visto como um distúrbio no sistema. As equações (12) e (13) demonstram que as funções de transferência do motor CC de excitação independente representam um sistema linear de segunda ordem cuja resposta de velocidade, dependendo dos parâmetros do motor, pode ser do tipo superamortecida, criticamente amortecida ou subamortecida [4,5].

III. O MOTOR CC COM MALHA FECHADA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE

Para a realização do controle de velocidade, é comum o emprego de duas malhas de realimentação: *i*) malha interna de regulação de corrente de armadura e *ii*) malha externa de regulação de velocidade, conforme ilustrado na Figura 3.

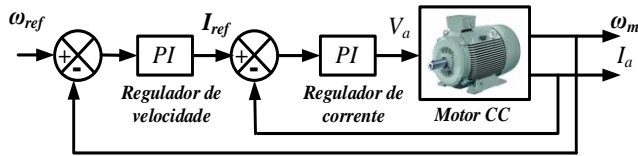


Figura 3: Diagrama de blocos do motor CC com controle de corrente e velocidade.

Onde:

ω_{ref} Velocidade de referência.
 I_{ref} Corrente de referência.

Observa-se que a saída do regulador de corrente representa a tensão a ser aplicada na armadura do motor enquanto a saída do regulador PI de velocidade representa a corrente de armadura de referência para a malha de regulação de corrente. Portanto, a tensão de armadura a ser aplicada ao motor depende da velocidade de referência e do torque de carga (conjugado resistente) presente no eixo do motor. Considerando que a fonte de energia elétrica é do tipo senoidal, na frequência de 60 Hz, para se conseguir uma tensão de armadura em corrente contínua de valor ajustável, faz-se necessária a utilização de *i*) conversor CA-CC ou *ii*) conversor CC-CC. O conversor CA-CC é, normalmente, um retificador trifásico totalmente controlado em ponte de Graetz [7, 8, 9]. O controle da tensão de saída do conversor está associado ao controle do ângulo de disparo dos tiristores do conversor.

O conversor CC-CC representa um conversor em dois estágios, isto é, um retificador trifásico a diodos (conversor

CA-CC não controlado) e um conversor CC-CC (recortador de tensão ou *Chopper*). O controle da tensão de saída é realizado no recortador de tensão (*Chopper*), controlando-se a razão cíclica de uma chave eletrônica com modulação por largura de pulso (PWM) [3, 7].

IV. O MOTOR CC COM CONTROLE DE FASE

O funcionamento do motor CC com controle de fase já é bem conhecido no meio científico. O motor CC é alimentado por um retificador trifásico totalmente controlado em ponte de Graetz. São utilizadas duas malhas fechadas: *i*) uma malha interna para controle de corrente e *ii*) uma malha externa, para controle de velocidade [3, 10, 11].

O diagrama de blocos do motor CC com controle de fase é ilustrado na Figura 4.

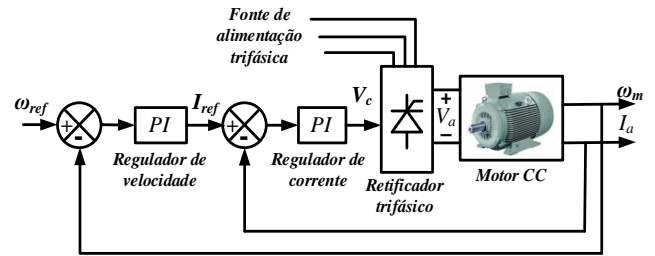


Figura 4: Diagrama de blocos do motor CC com controle de fase.

Conforme pode ser observado, a saída do regulador PI de corrente será um sinal de controle do ângulo de disparo dos tiristores do retificador trifásico que alimenta o motor CC.

O retificador trifásico utilizado é do tipo totalmente controlado, constituído de tiristores, na configuração ponte de Graetz, cujo arranjo é ilustrado na Figura 5.

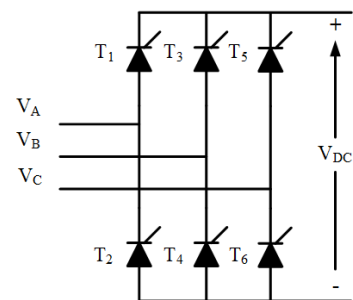


Figura 5. Retificador controlado em ponte de Graetz.

As tensões, V_A , V_B e V_C representam as tensões senoidais de uma fonte de alimentação trifásica, na frequência de 60 Hz. Para a ponte retificadora ilustrada na Figura 5 alimentando carga de característica indutiva, a tensão CC média de saída, V_{dc} , é dada por [3]:

$$V_{dc} = V_m \frac{3}{\pi} \cos \alpha \quad (15)$$

Onde:

V_{dc} – Tensão CC de saída do retificador
 V_m – Valor de pico da tensão CA de entrada
 α – Ângulo de disparo dos tiristores

O ângulo de atraso ou disparo dos tiristores, α , será função da velocidade e/ou corrente de armadura do motor CC no referido sistema de acionamento elétrico, conforme ilustrado na Figura 3, onde o erro de velocidade será responsável pela elevação ou redução da tensão de armadura, isto é, tensão de saída da ponte retificadora. Entretanto, o ganho do conversor (retificador) não é constante, tornando o sistema não linear. Portanto, faz-se necessária uma correção por meio de um sinal de controle de entrada V_c , de forma que:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{V_c}{V_{cm}} \right) = V_{cn} \quad (16)$$

Onde:

V_c – Sinal de entrada de controle
 V_{cm} – Absoluto do valor máximo da tensão de controle
 V_{cn} – Sinal de controle normalizado

Desta forma, tem-se que [3]:

$$V_{dc} = \left(\frac{3}{\pi} V_m \right) V_{cn} = \left(\frac{3}{\pi} \frac{V_m}{V_{cm}} \right) V_c = K_r V_c \quad (17)$$

Onde K_r representa o ganho do conversor.

Embora não esteja ilustrado na figura, é comum a utilização de um filtro passa-baixa para filtrar o sinal de corrente da armadura do motor CC. Com o objetivo de se reduzir as ondulações (*ripple*) da corrente de armadura do motor CC, é comum também a inserção de uma indutância em série com o circuito de armadura.

V. O MOTOR CC COM RECORTADOR DE TENSÃO

Uma forma alternativa para se obter uma fonte de tensão CC ajustável para o acionamento do motor CC com controle de velocidade é por meio do emprego de recortadores de tensão. Recortadores de tensão ou *Chopper* são conversores CC-CC onde a entrada é uma fonte de tensão CC fixa, proveniente de uma bateria ou um conversor CA-CC não controlado (ponte retificadora a diodos), e a saída é uma tensão CC de valor médio ajustável. A fonte CC constante (entrada), é obtida a partir de um retificador trifásico a diodos, conforme ilustrado na Figura 5, onde os tiristores são substituídos por diodos retificadores. O esquema básico de funcionamento do *Chopper* é ilustrado na Figura 6.

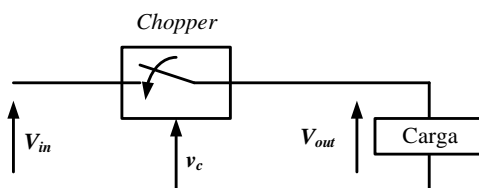


Figura 6. Recortador de tensão.

Onde:

V_{in} – Tensão CC de entrada do recortador de tensão
 v_c – Sinal de controle
 V_{out} – Tensão CC de saída ajustável.

Os recortadores de tensão podem ser construídos para operação em um ou quatro quadrantes. Seu princípio de operação consiste no controle do tempo em que a chave permanece aberta e fechada em um determinado período. As formas de onda de tensão são ilustradas na Figura 7. Considerando a chave como ideal e com queda de tensão em condução desprezível, a tensão média de saída do Chopper pode ser dada por:

$$V_{med} = \frac{t_{on}}{T} V_{dc} = d V_{dc} \quad (18)$$

Onde:

V_{med} – Tensão DC média de saída do *Chopper*
 t_{on} – Tempo em que a chave permanece fechada
 T – Período de chaveamento
 d – Razão cíclica.

Variando-se a razão cíclica, d , onde $0 < d < 1$, varia-se o valor médio da tensão de saída do recortador de tensão, que, no caso de interesse, será justamente a tensão a ser aplicada na armadura do motor CC.

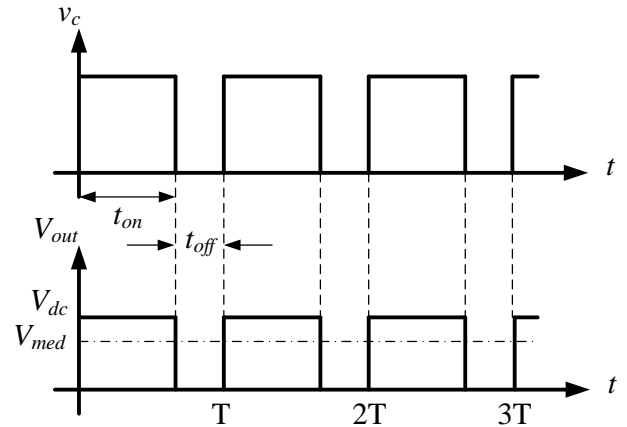


Figura 7. Formas de onda de tensão do *Chopper*.

O controle da razão cíclica pode ser realizado de duas formas distintas: i) mantendo-se a frequência constante e variando-se o tempo em que a chave permanece fechada, t_{on} , ou ii) variando-se a frequência de chaveamento, mantendo-se constante o tempo em que a chave permanece fechada.

O diagrama de blocos do motor CC com controle de velocidade alimentado por recortador de tensão é apresentado na Figura 8.

VI. MODELAGEM NO AMBIENTE MATLAB/SIMULINK

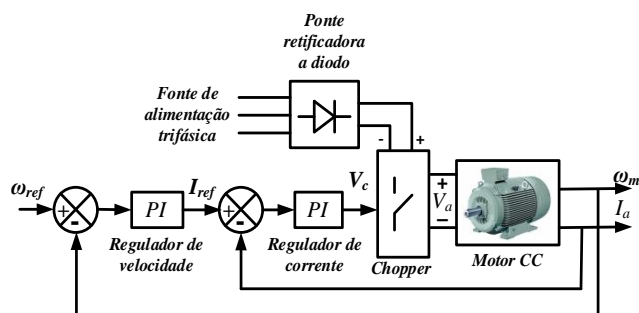


Figura 8: Diagrama de blocos do motor CC alimentado por Recortador de Tensão.

Conforme ilustrado na figura, a saída do regulador de corrente representa um sinal de controle para abertura e fechamento das chaves eletrônicas do recortador de tensão. Estas chaves são normalmente transistores bipolares – TBJ, IGBT's, MOSFET's ou um GTO's [3, 7].

O controle da tensão de saída do recortador de tensão, a ser aplicada na armadura do motor CC, é normalmente realizado por modulação por largura de pulso (PWM), em uma frequência de chaveamento na ordem de alguns kHz, porém, compatível com a capacidade das chaves. Uma onda portadora triangular é gerada e um sinal de erro de corrente é alimentado em um controlador do tipo Proporcional Integral – PI, cujo sinal de saída (sinal de controle v_c) é comparado com a onda triangular, conforme ilustrado na Figura 9. Assim, uma tensão de armadura proporcional é aplicada ao motor CC pelo *Chopper*, a partir de uma fonte de tensão CC constante. O sinal de controle da tensão de armadura é equivalente à razão cíclica das chaves do recortador de tensão. Sempre que o sinal de controle, v_c , for maior que a onda triangular, a chave do recortador de tensão ilustrado na Figura 6 é fechada, aplicando-se a tensão de entrada na carga ($V_{out} = V_{in}$). Quando o sinal de controle v_c for menor que a onda triangular, a chave é aberta e a tensão de saída do *Chopper* é nula.

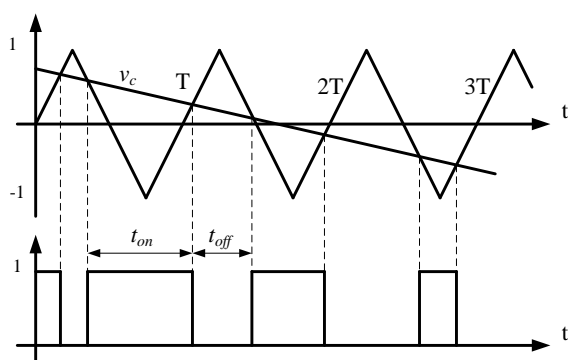


Figura 9. Princípio da modulação PWM.

Os diagramas de blocos apresentados nas figuras 3, 4 e 8 foram realizados no ambiente MATLAB/SIMULINK e estão apresentados nas Figuras 10, 11 e 14, respectivamente.

A Figura 10 ilustra o modelo linear do motor CC, a Figura 11 o motor CC alimentado por retificador trifásico totalmente controlado. Observa-se que o diagrama geral segue aquilo que foi apresentado na Figura 10, possuindo as malhas fechadas de regulação de corrente e velocidade. A principal diferença é que a saída do regulador de corrente é um sinal de disparo dos tiristores da ponte retificadora enquanto, no modelo linear, era exatamente a tensão de armadura do motor CC.

A Figura 12 ilustra o modelo Simulink do motor CC, identificado na Figura 11 como Motor CC de excitação independente. O modelo é genérico e o que o torna um motor de excitação independente é justamente a presença de uma fonte CC independente para alimentação do campo, conforme pode ser observado na figura.

A Figura 13 ilustra o conteúdo do bloco do circuito de disparo dos tiristores que constituem o retificador controlado que, por sua vez, alimenta a armadura do motor CC. Pode-se observar ali as saídas para os terminais de disparo (gatilho) das respectivas chaves eletrônicas.

No interior dos blocos denominados Regulador de Velocidade e Regulador de Corrente possuem, em seu interior, existe um integrador com seu ganho, somado a um amplificador para produzir o ganho do regulador proporcional. A soma dos dois constituem o regulador tipo PI. No interior do bloco denominado de Ponte Retificadora, estão as seis chaves (tiristores), conforme ilustrado na Figura 5.

O bloco identificado como Transdutor representa simplesmente um ganho para ajuste dos valores dentro de uma faixa de variação do ângulo de disparo dos tiristores da ponte retificadora.

A Figura 14 representa o modelo Simulink do motor CC alimentado por recortador de tensão operando em apenas um quadrante, isto é, tensão e corrente de armadura positivos.

No acionamento do motor CC alimentado por conversores estáticos (retificador e recortador de tensão), é comum a adição de uma indutância em série com a armadura do motor CC com o objetivo de filtrar ondulações de corrente de armadura uma vez que a tensão de armadura aplicada no motor por meio dos conversores não é constante, mas, chaveada.

Ainda, em função das ondulações da corrente resultante da tensão de armadura chaveada, é comum o emprego de filtros passa-baixa para filtrar as altas frequências do sinal de corrente obtido na prática, por sensores.

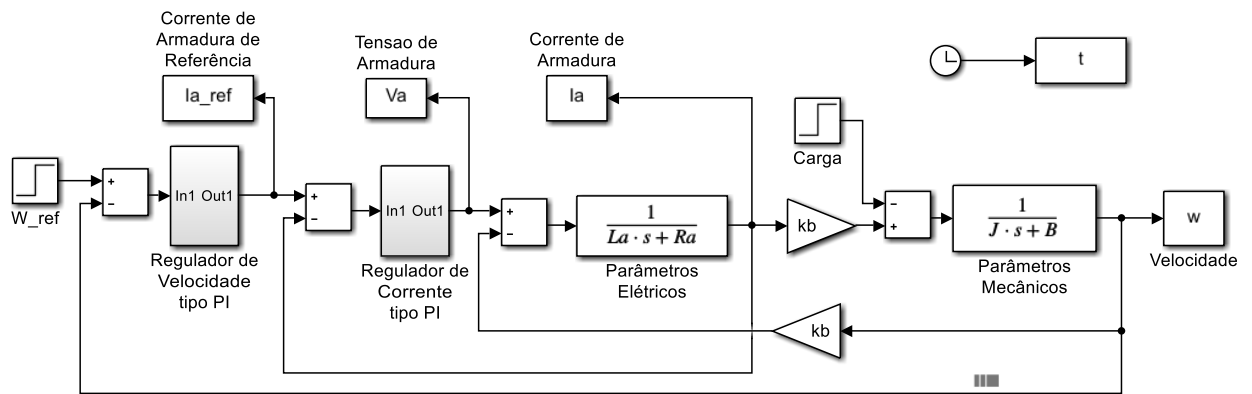


Figura 10. Modelo linear do motor CC no ambiente MATLAB/SIMULINK®.

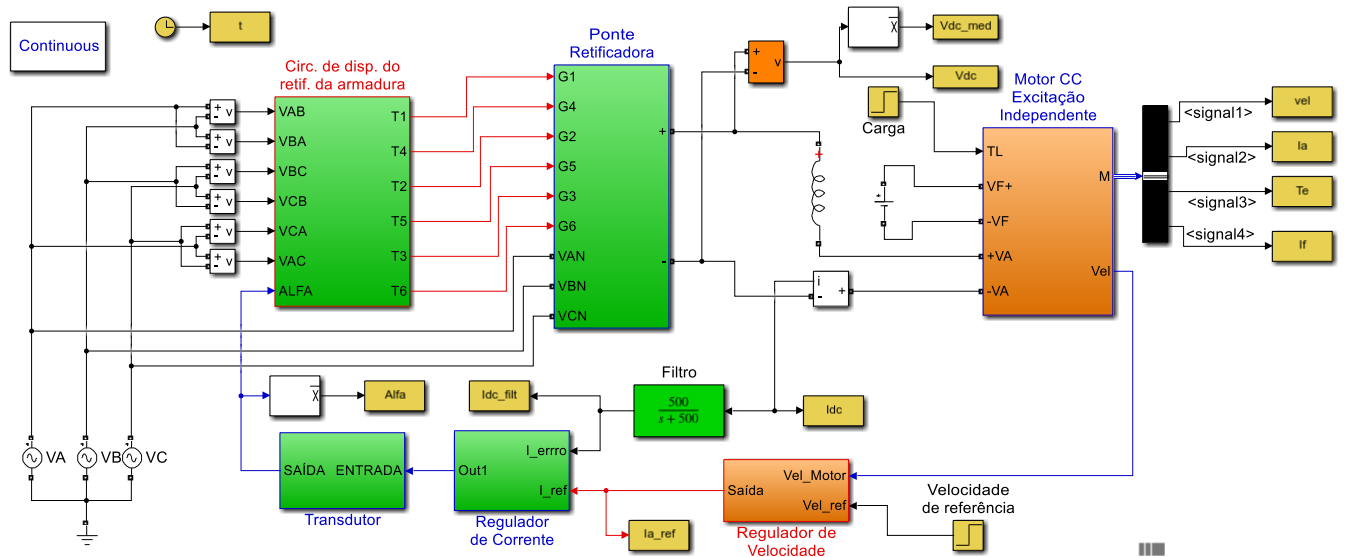


Figura 11. Modelo do motor CC alimentado por retificador trifásico totalmente controlado no ambiente MATLAB/SIMULINK®.

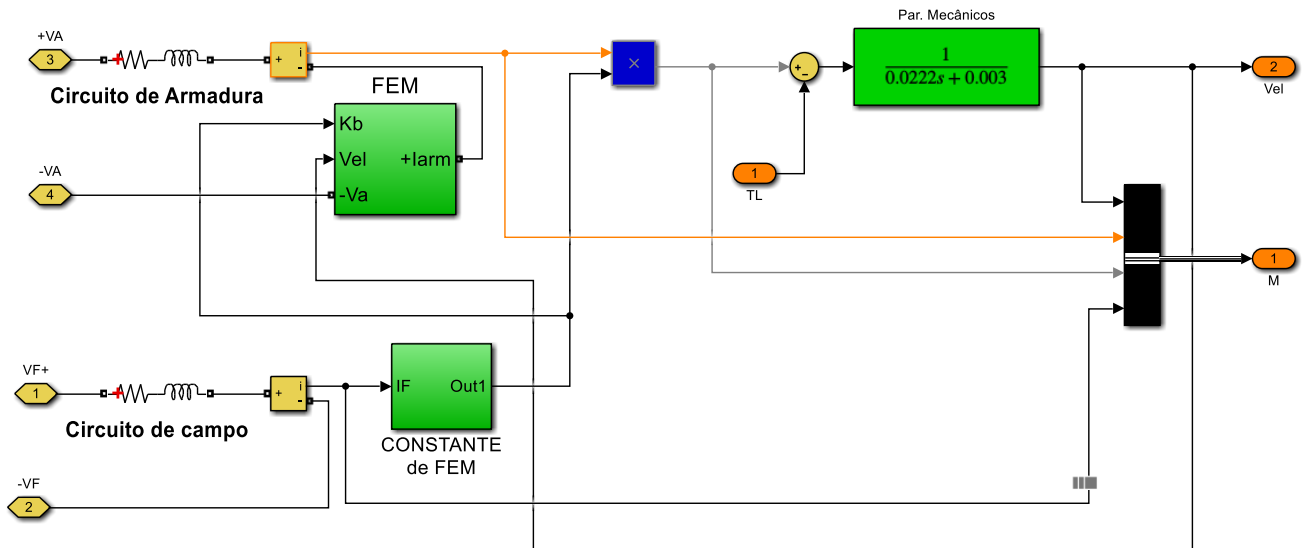


Figura 12. Modelo do Motor CC no ambiente SIMULINK.

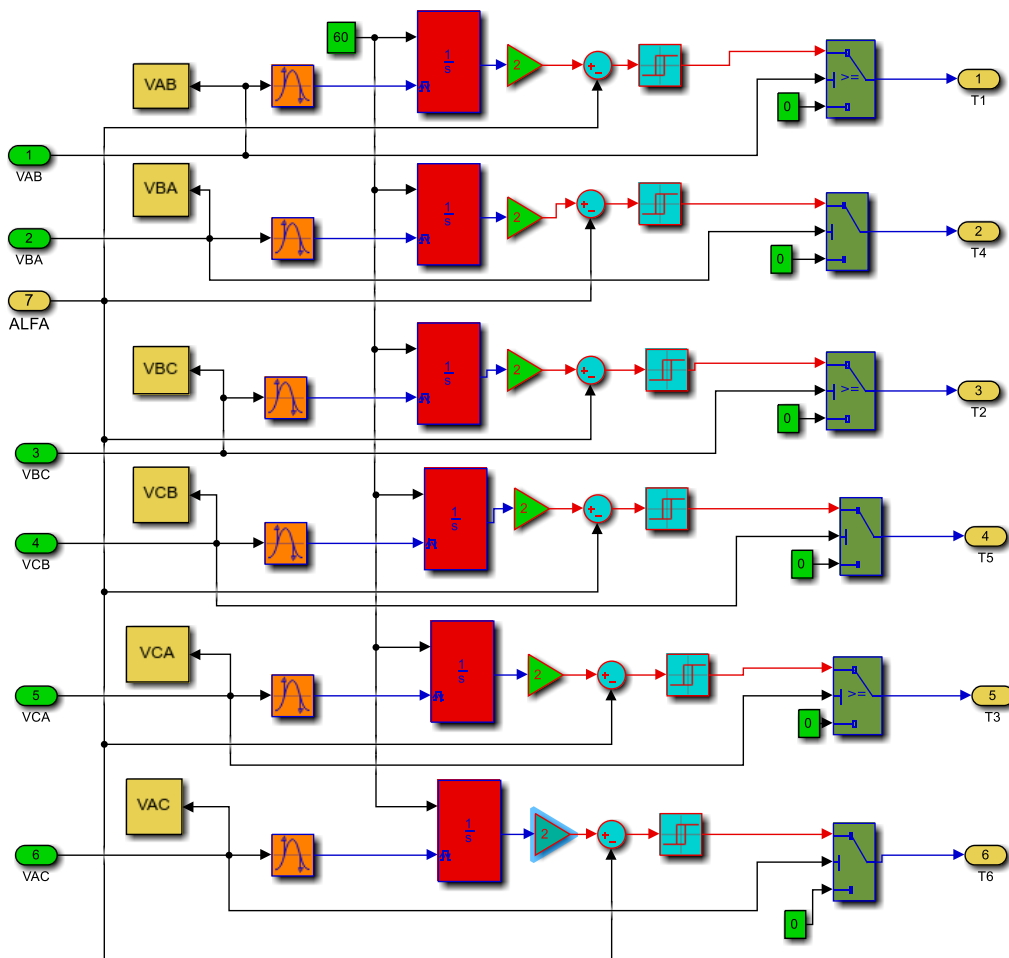


Figura 13. Modelo SIMULINK do circuito de disparo dos tiristores da ponte retificadora.

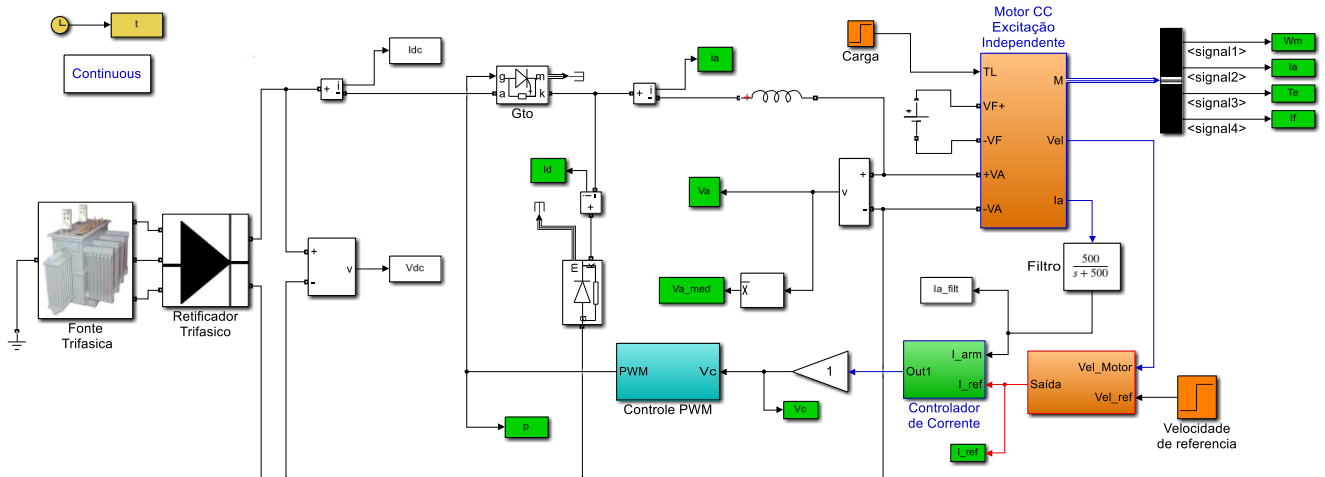


Figura 14. Modelo do motor CC alimentado por recortador de tensão no ambiente MATLAB/SIMULINK®.

Portanto, os diagramas de blocos das figuras 11 e 14 contemplam a presença do filtro passa-baixa. Entretanto, no modelo linear 10, não há necessidade de seu uso como também não foi adicionada nenhuma indutância em série com a armadura do motor.

VII. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os três modelos ilustrados nas Figuras 3, 4 e 8 foram implementados no ambiente MATLAB/SIMULINK® (Figuras 10, 11 e 14) para simulação de forma a possibilitar a comparação de resultados. Os parâmetros do motor CC utilizado foram:

$$\begin{aligned} L_a &= 28\text{mH} & J &= 0,0222 \text{ Kg.m}^2 & k_b &= 1,1 \text{ Nm/A} \\ R_a &= 2,58\Omega & B &= 0,003 \text{ Nm/rad/s} & k_b &= 1,1 \text{ V/rad/s} \\ V_{a(nom)} &= 220\text{V} & I_{a(nom)} &= 10\text{A} & I_{f(nom)} &= 1\text{A} \end{aligned}$$

Para se determinar os ajustes dos ganhos dos reguladores PI de corrente e de velocidade, existem diferentes técnicas e/ou ferramentas disponíveis na literatura [3, 8, 9, 10]. Existirão infinitos valores possíveis para os ganhos proporcional e ganho integral dos reguladores de corrente e velocidade, capazes de atender a diferentes critérios estabelecidos pelo projetista.

Para o problema aqui apresentado, o ajuste do ganho proporcional (P) do regulador de corrente foi determinado de forma que, para uma corrente de referência de até 10A, a tensão a ser aplicada no motor não ultrapassasse seu valor nominal, isto é, 220V. Portanto, foi definido como sendo 22 V/A. O ganho integral (I), por sua vez, foi definido de forma que se obtivesse uma resposta ligeiramente sub-amortecida. Assim, seu valor ficou estabelecido em 100 V/A.s.

O ajuste do ganho proporcional do regulador de velocidade foi ajustado de forma que, para um degrau de referência de

velocidade de até 100 rad/s, o valor inicial da corrente de referência para o regulador PI de corrente não ultrapassasse seu valor nominal, isto é, 10A. Assim, seu valor foi estabelecido em 0,1 A/rad/s. O ganho integral foi determinado de forma a se obter uma resposta de velocidade ligeiramente sub-amortecida. Portanto, seu valor ficou definido em 0,5 A/rad.

Foi aplicado um degrau de referência de velocidade no instante inicial $t = 0\text{s}$, com um conjugado resistente inicial de 5 Nm. Em $t = 5\text{s}$, foi acrescido um degrau de conjugado resistente também de 5 Nm fazendo com que o conjugado total de carga no eixo do motor se tornasse 10 Nm.

Para o motor CC alimentado por recortador de tensão, serão ainda apresentados resultados com diferentes valores de frequência da onda triangular transportadora de forma a possibilitar a variação de sua constante de tempo e permitir comparação com o retificador totalmente controlado, cuja constante de tempo é única e dependente da frequência da tensão da fonte CA de alimentação.

Serão apresentados resultados isolados para os três modelos desenvolvidos e, ao final, os mesmos resultados em uma mesma figura de forma a possibilitar comparação.

A Figura 15 ilustra a resposta da tensão de armadura, velocidade e corrente do motor CC, em uma janela de tempo de 10s, para um degrau de velocidade de referência de 100 rad/s. Como pode ser observado, de fato, a tensão máxima de armadura no motor, no instante $t = 0\text{s}$, foi exatamente igual ao seu valor nominal, isto é, 220V. Da mesma forma, a corrente de armadura não ultrapassou 10A. No instante de aplicação do distúrbio de carga, em $t = 5\text{s}$, a velocidade se reduz enquanto a corrente e tensão de armadura são elevadas para atender a demanda de carga. Em função da ação do regulador de velocidade, seu valor em regime permanente retorna ao valor de referência.

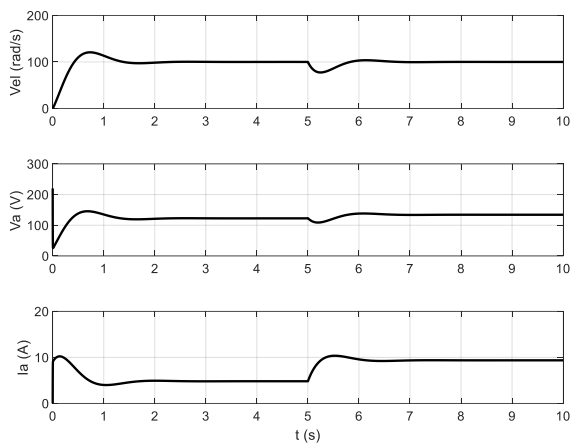


Figura 15: Velocidade, tensão de armadura e corrente de armadura do motor CC para um degrau de velocidade de 100 rad/s e distúrbio de carga em $t = 5s$.

Conforme pode ser observado, de fato, em $t = 0s$ o valor de pico da tensão de armadura atingiu exatamente o seu valor nominal, isto é, 220V. Da mesma forma, o valor inicial da corrente de armadura não ultrapassou 10A. Em $t = 5s$, em função da aplicação do conjugado resistente de 5Nm, a velocidade é reduzida momentaneamente, porém, em função do integrador, retorna ao seu valor de referência. Neste mesmo instante, o valor médio da tensão de armadura diminui momentaneamente, antes de aumentar sensivelmente em função do acréscimo da carga no eixo do motor. Da mesma forma, a corrente de armadura aumenta para produção de maior conjugado eletromagnético, de forma a contrabalancear o conjugado resistente.

A Figura 16 ilustra a resposta de corrente de armadura do motor CC comparada ao valor de referência fornecido pelo regulador de velocidade. Conforme pode ser observado, em função dos ganhos definidos para o regulador de corrente, o tipo de resposta é sub-amortecida e a corrente real segue o valor de referência estabelecido pelo regulador de velocidade.

Com o objetivo de reduzir o *ripple* da corrente de armadura, conforme explicado anteriormente, foi inserida em série com a armadura uma indutância de 1 mH, o que representa um valor muito menor do que a própria indutância de armadura do motor CC, portanto, não alterando de forma significativa os parâmetros do sistema.

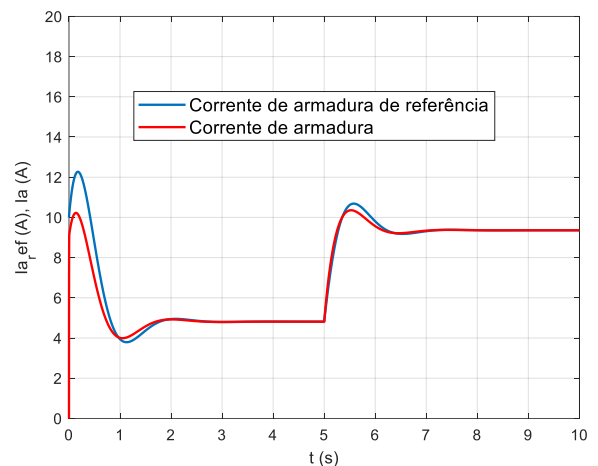


Figura 16: Corrente de armadura de referência fornecida pelo regulador de velocidade e corrente de armadura do motor CC.

A Figura 17 ilustra a resposta de velocidade, o valor médio da tensão de armadura e a corrente de armadura do motor CC com controle de fase. Como pode ser observado, o comportamento é o mesmo daquele obtido com o modelo linear e apresentado na Figura 15. A principal diferença é em relação à forma da corrente de armadura que, em função do chaveamento da tensão de armadura, não é mais constante.

A constante de tempo do filtro passa-baixa foi definida como sendo de 2 ms, isto é, significativamente inferior à constante de tempo elétrica do motor, porém, suficiente para atenuar suas ondulações, resultantes do chaveamento da tensão da armadura. A Figura 18 ilustra a corrente de armadura do motor e seu sinal após a filtragem. Como pode ser observado sua dinâmica não foi alterada pela presença do filtro.

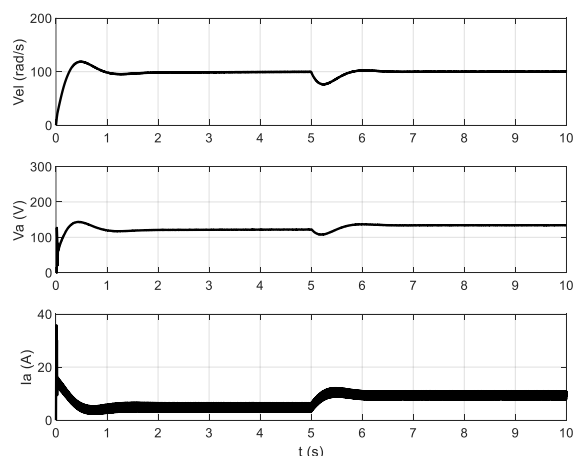


Figura 17: Velocidade, tensão de armadura e corrente de armadura do motor CC com controle de fase para um degrau de velocidade de 100 rad/s e distúrbio de carga em $t = 5s$.

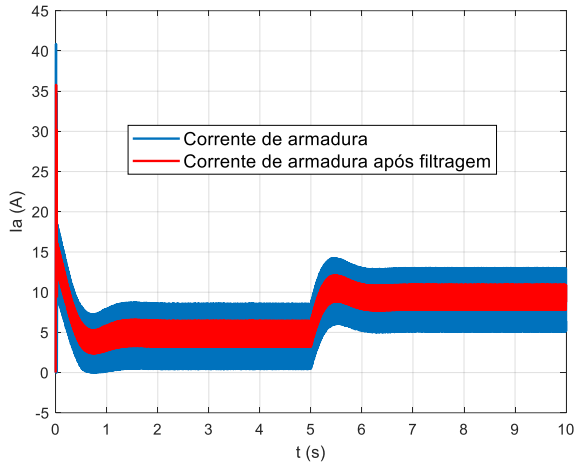


Figura 18. Corrente de armadura do motor CC com controle de fase e seu sinal filtrado.

A Figura 19 ilustra, em $6s < t < 6.02s$, as tensões de linha da fonte de alimentação trifásica e a forma de onda da tensão CC na saída do retificador, acompanhada de seu valor médio. Conforme pode ser observado, o ângulo α de disparo dos tiristores é ajustado de forma a se obter a tensão de armadura necessária para levar a velocidade do motor ao valor de referência, dentro das condições de carga estabelecidas. Para o motor CC alimentado por retificador controlado, suprido por fonte de tensão trifásica de valor eficaz de 220V (tensão de linha), o valor de pico da tensão de saída do retificador será de 311V, como pode ser observado.

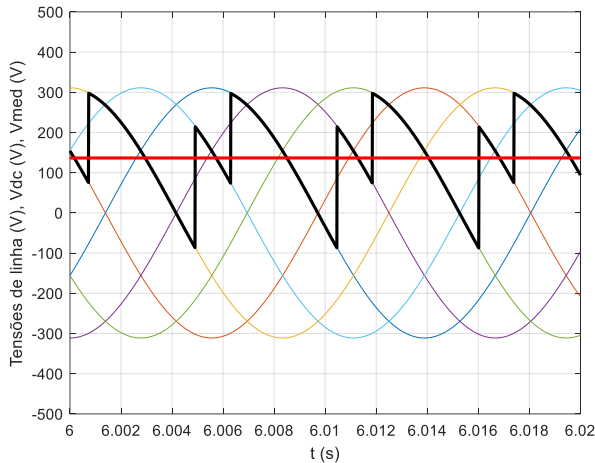


Figura 19. Tensões de linha da fonte de alimentação, tensão CC na saída do retificador trifásico e seu valor médio.

A Figura 20, por sua vez, ilustra a variação do ângulo de disparo dos tiristores deste a partida até o tempo final de simulação. Observa-se que seu valor varia para que a tensão de saída do retificador, isto é, a tensão de armadura do motor CC, seja aquela necessária e suficiente para que a velocidade final seja aquela definida pelo valor de referência. Sua dinâmica acompanha a tensão de armadura, conforme ilustrada na Figura 17, porém, com formato invertido uma vez que, para maior tensão de armadura, o ângulo de disparo α deve ser reduzido, conforme demonstrado na equação 15.

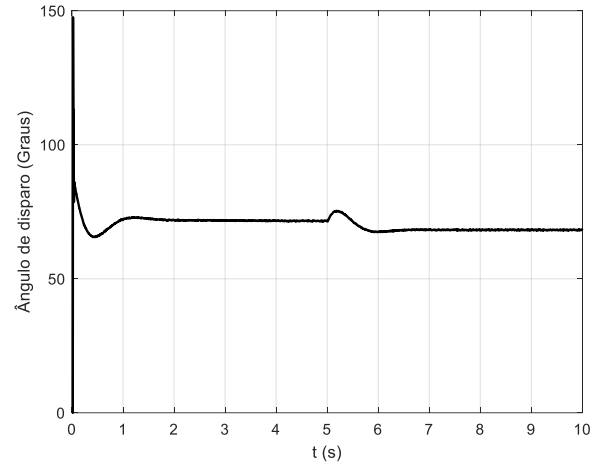


Figura 20. Variação do ângulo de disparo α dos tiristores da ponte retificadora.

A Figura 21 ilustra a resposta de velocidade, tensão de armadura (valor médio) e corrente de armadura do motor CC, para o motor CC alimentado por recortador de tensão, nas mesmas condições previamente estabelecidas e mantendo-se os ganhos dos reguladores PI de corrente e velocidade.

A Figura 22 ilustra a corrente de referência fornecida pelo regulador de velocidade e a corrente de armadura do motor CC. Observa-se que, para o degrau de referência de velocidade de 100 rad/s, o valor inicial, em $t = 0s$, da corrente de referência foi exatamente 10A. Observa-se ainda que a corrente de armadura segue o valor estabelecido como referência pelo regulador de velocidade.

O gráfico superior da Figura 23 ilustra a onda triangular portadora, na frequência de 5kHz, e o sinal de controle fornecido pelo regulador de corrente. No gráfico inferior, a tensão de armadura aplicada no motor CC. Observa-se ali de forma clara o efeito da modulação por largura de pulso (PWM). O valor de pico corresponde ao valor máximo das tensões de linha da fonte de alimentação trifásica.

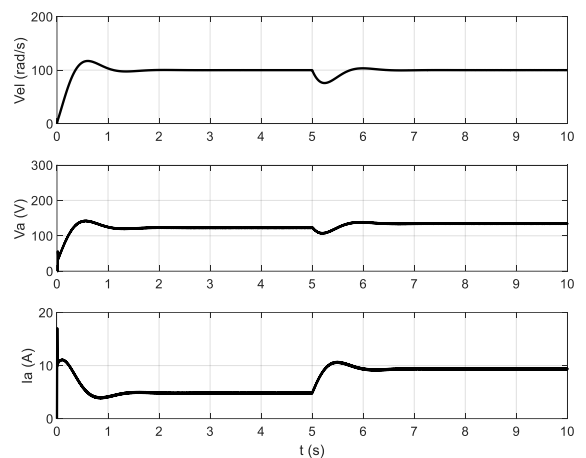


Figura 21: Velocidade, tensão de armadura e corrente de armadura do motor CC alimentado por recortador de tensão para um degrau de velocidade de 100 rad/s e distúrbio de carga em $t = 5s$.

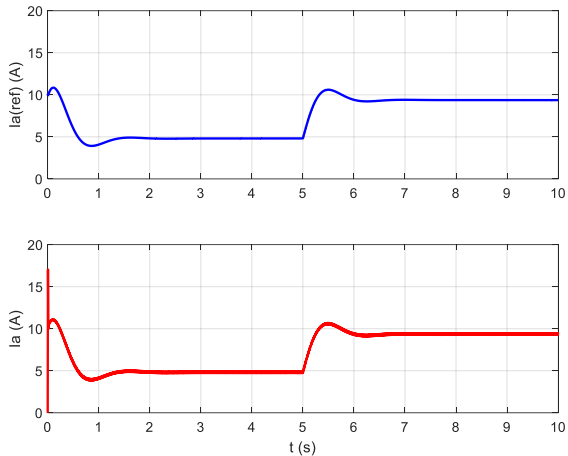


Figura 22. Corrente de referência e corrente de armadura do motor CC alimentado por recortador de tensão.

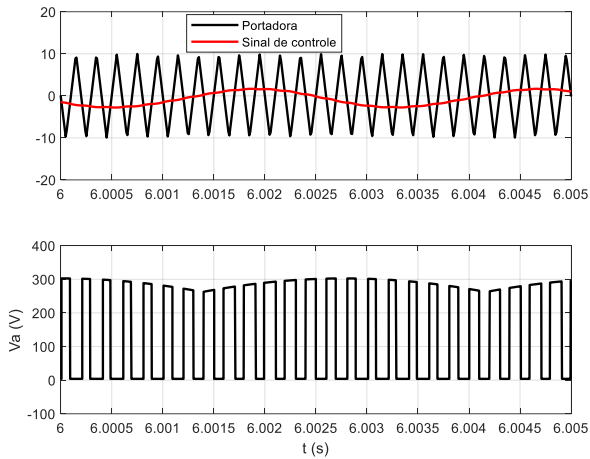


Figura 23. Onda triangular transportadora acompanhada do sinal de controle; tensão de armadura no motor CC – alimentação por recortador de tensão.

Com o objetivo de fazer com que o tempo de atraso do recortador seja mais próximo ou até mesmo igual ao tempo de atraso introduzido pelo retificador trifásico, variou-se a frequência da onda triangular portadora para realização da modulação PWM no recortador de tensão. Foram consideradas frequência de 2,5 KHz e frequência de 360 Hz. Os resultados são apresentados a seguir.

A Figura 24 ilustra a resposta de velocidade do motor CC alimentado por recortador de tensão considerando a onda triangular transportadora utilizada para a modulação PWM nas frequências de 2,5 kHz (gráfico superior) e 360 Hz (gráfico inferior). Conforme pode ser observado, a dinâmica das respostas de velocidade é a mesma.

A Figura 25 ilustra a corrente de armadura do motor CC alimentado por recortador de tensão considerando a onda triangular transportadora utilizada para a modulação PWM na frequência de 2,5 kHz e 360 Hz.

Observa-se que, diferentemente da resposta de velocidade, a ondulação da corrente de armadura se eleva na medida em que a frequência da onda portadora diminui. Naturalmente que o torque eletromagnético produzido pelo motor se comporta da mesma forma uma vez que é diretamente proporcional à corrente de armadura.

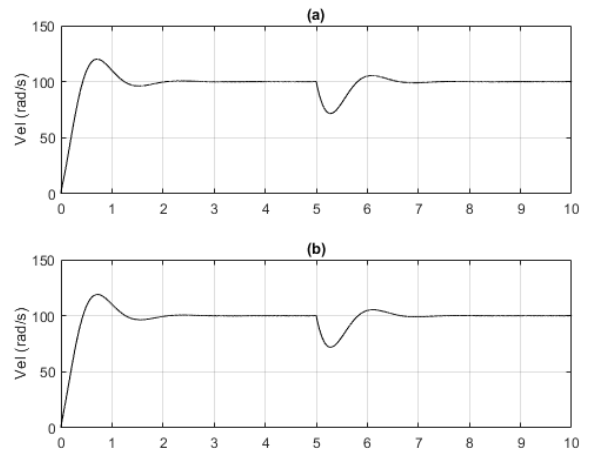


Figura 24. Resposta de velocidade do motor CC alimentado por recortador de tensão com frequência da onda triangular transportadora de (a) 2,5 kHz e (b) 360 Hz.

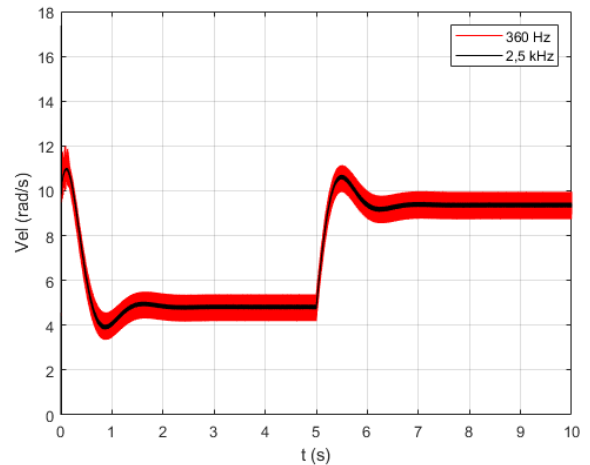


Figura 25. Resposta de corrente de armadura do motor CC alimentado por recortador de tensão com frequência da onda triangular transportadora de 2,5 kHz e 360 Hz.

Na Figura 26 pode-se observar a onda triangular transportadora acompanhada do sinal de controle e a tensão de armadura aplicada no motor com chaveamento em 2,5 kHz e 360 Hz.

Observa-se que, naturalmente, na medida em que a frequência modulação PWM diminui, aumenta-se a oscilação do sinal de controle e, conseqüentemente, aumentando-se o ripple da corrente de armadura e torque eletromagnético produzido.

Na Figura 27, na mesma janela de tempo apresentada na Figura 26, isto é, para $6s < t < 6,01s$, pode-se observar a tensão de armadura aplicada no motor com chaveamento em 2,5 kHz e em 360 Hz. O valor de pico, não constante, ocorre em função da forma de onda senoidal da tensão de alimentação senoidal, na frequência de 60 Hz.

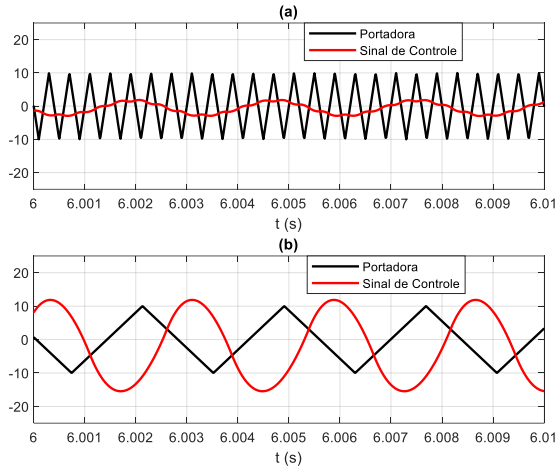


Figura 26. Onda triangular transportadora e sinal de controle nas frequências de (a) 2,5 kHz e (b) 360 Hz.

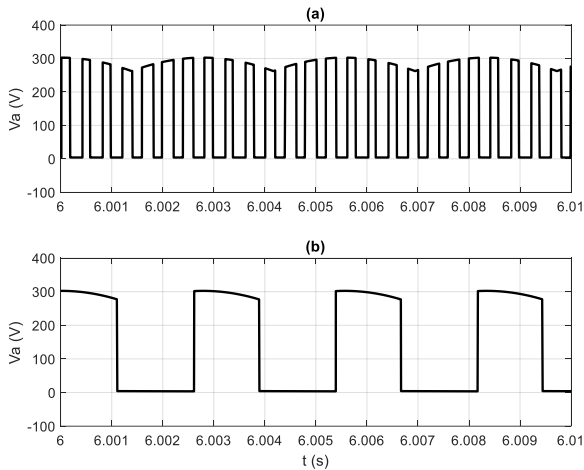


Figura 27. Tensão de armadura do motor alimentado por recortador de tensão com PWM e tensão média em (a) 2,5 kHz e (b) 360 Hz.

VIII. ANÁLISE DE RESULTADOS

As respostas de velocidade do motor CC considerando o modelo linear (Figura 3), a alimentação por meio de retificador controlado, conforme ilustrado na Figura 4 e alimentação por meio de recortador de tensão (Figura 8), foram colocadas no mesmo gráfico de forma a possibilitar comparação.

Conforme apresentado na Figura 28, observa-se uma diferença mais expressiva apenas no regime transitório durante os instantes iniciais da partida do motor.

A diferença observada pode ser justificada e compreendida. Para fins de comparação, foram mantidos os ajustes dos reguladores de corrente e velocidade para os três modelos apresentados. As simulações foram realizadas mantendo-se as configurações tais como, método numérico, passo de cálculo e tolerância relativa. Os ganhos foram definidos para o sistema linear conforme ilustrado na Figura 3. Entretanto, ali (modelo linear) não foram considerados os conversores estáticos que possibilitam a obtenção de tensão CC ajustável.

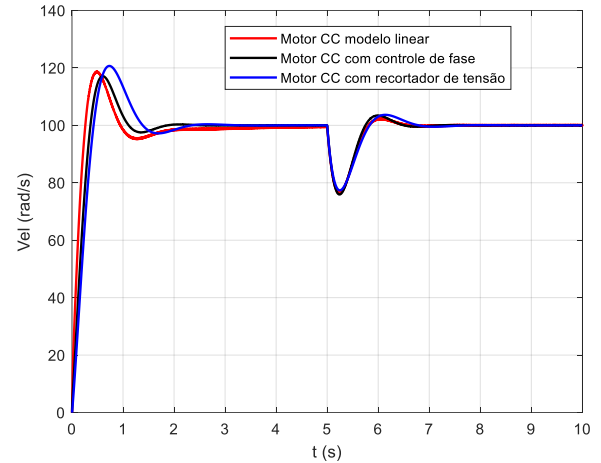


Figura 28: Respostas de velocidade do motor CC ao degrau de velocidade de referência e distúrbio de carga (modelo linear, controle por fase e controle por recortador de tensão).

O retificador trifásico totalmente controlado pode ser considerado um sistema de dados amostrados, linearizado na forma de um sistema de primeira ordem, cujo intervalo de amostragem define o tempo de atraso associado ao disparo dos tiristores da ponte retificadora que, por sua vez, está associado à frequência da fonte de alimentação. Sua função de transferência é representada, portanto, por um sistema de primeira ordem com um determinado ganho e um atraso de fase conforme equação (19) [3]:

$$G_r(s) = \frac{K_r}{1 + sT_r} \quad (19)$$

Onde:

K_r – Ganho do retificador.

T_r – Constante de tempo do retificador.

Para o retificador trifásico em ponte de Graetz o intervalo de amostragem representa seu tempo de atraso [3]. Quando um tiristor é acionado (ligado), seu ângulo de disparo não pode ser alterado. O novo atraso de disparo tornar-se-á efetivo apenas para o tiristor que conduzirá na sequência, isto é, daí a 60° , que representa o intervalo de comutação entre dois tiristores na ponte retificadora. Assim, a equação que representa este atraso é dada por:

$$T_r = \frac{60}{360} * \frac{1}{f_s} \quad (20)$$

Onde:

f_s -Frequência de tensão de alimentação.

Portanto, para a frequência da tensão de alimentação em 60 Hz, $T_r = 1,388$ ms [3].

Considerando-se o retificador trifásico como uma caixa preta com um determinado ganho K_r , este valor será $1,35V/V_{cm}$, onde V representa a tensão de linha da fonte de alimentação CA (valor eficaz) e V_{cm} , o valor máximo do sinal de controle, em Volts [4].

O recortador de tensão com modulação PWM, assim como o retificador trifásico totalmente controlado, também pode ser representado por um sistema de primeira ordem cuja função de transferência é dada pela equação (20) [3]:

$$G_r(s) = \frac{K_c K_{rt}}{1 + s \frac{T}{2}} \quad (21)$$

Onde:

K_c – Ganho do controlador PWM.

K_{rt} – Ganho do recortador de tensão.

T – Período da onda triangular transportadora.

O ganho do controlador PWM de corrente, K_c , depende do ganho do amplificador de erro de corrente, isto é, do ganho proporcional do regulador PI de corrente. Entretanto, na grande maioria dos casos práticos, a malha de controle de corrente PWM pode ser considerada como um bloco de ganho unitário uma vez que o tempo de atraso devido à frequência da onda portadora é normalmente desprezível [3].

O controlador de corrente PWM possui um tempo de atraso de meio período da forma de onda portadora e seu ganho é o ganho do recortador de tensão [3]. Para a realização da modulação PWM, na frequência de 5 kHz, o período é, portanto, de $0,2$ ms, resultando em atraso de apenas $0,1$ ms.

Considerando o atraso calculado em (20) e (21), bem como o que se encontra na literatura ([3], [4]), pode-se adicionar um bloco entre o regulador de corrente e o motor CC na Figura 3 para representar o retificador trifásico controlado ou o recortador de tensão. A Figura 29 ilustra uma comparação entre o modelo linear com este bloco adicional e o modelo com retificador controlado, e a Figura 30 entre o modelo linear e o modelo com recortador de tensão a 5 kHz.

Nas figuras, fica claro que as duas respostas ainda possuem transitórios diferentes, mesmo representando o mesmo

modelo de formas diferentes. Na realidade, os modelos de conversor introduzido na literatura são aproximações para representar estes de forma aproximada. Na realidade, a representação dos conversores seria diferente, porém isto não entra no escopo deste trabalho.

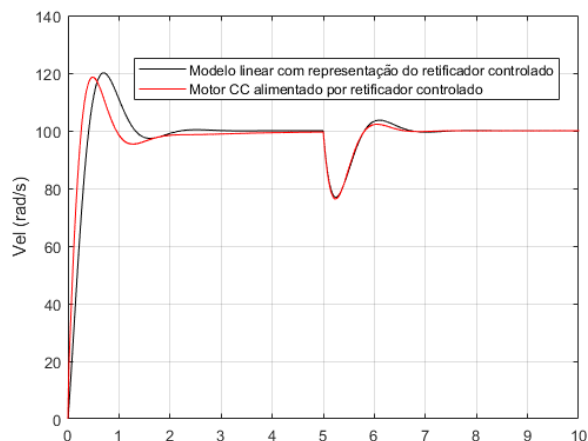


Figura 29: Respostas de velocidade do motor CC pelo modelo linear com bloco representando o retificador trifásico controlado e alimentado por retificador trifásico controlado.

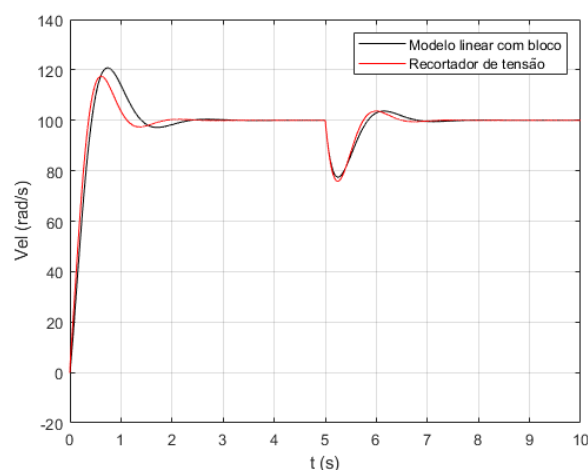


Figura 30: Respostas de velocidade do motor CC pelo modelo linear com bloco representando o recortador de tensão e alimentado por recortador de tensão.

Para o controle de velocidade do motor CC, o parâmetro relevante está associado ao seu coeficiente de atrito, B , e momento de inércia, J . Considerando seus valores numéricos, a constante de tempo mecânica do referido é de 135 ms, isto é várias ordens de magnitude maior do que os tempos de atraso, tanto do retificador trifásico quanto do recortador de tensão. Isto significa que o tempo de resposta do regulador de corrente associado aos conversores utilizados é muito menor que qualquer variação de velocidade mecânica do motor CC, justificando considerar a malha de controle de corrente como ideal.

Os resultados apresentados (Figuras 15, 17, 21 e 28) demonstram que, na dinâmica de resposta de velocidade, uma

diferença pode ser observada apenas no regime transitório, em seus instantes iniciais. Observa-se pequena diferença em termos de ultrapassagem percentual (*overshoot*) na resposta de velocidade, porém, os tempos de acomodação são muito próximos.

Ainda do ponto de vista dinâmico foram analisadas as respostas de velocidade do motor CC alimentado por recortador de tensão para três frequências distintas de chaveamento, isto é, 5 kHz, 2,5 kHz e 360 Hz. A Figura 31 apresenta respostas obtidas.

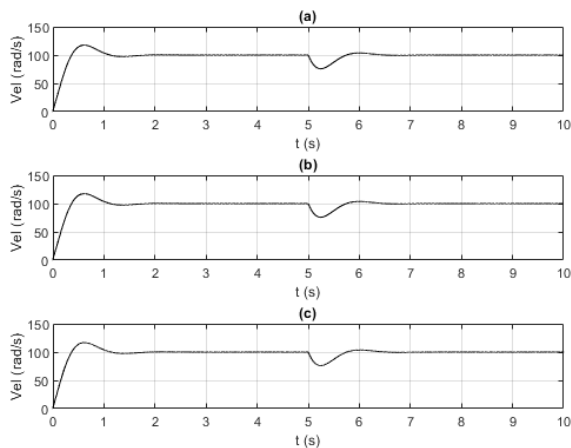


Figura 31: Respostas de velocidade do motor CC alimentado por recortador de tensão para diferentes frequências de modulação PWM (a) 5 kHz, (b) 2,5 kHz e (c) 360 Hz.

Conforme pode ser observado, praticamente não há diferença entre as respostas de velocidade para as três distintas frequências de chaveamento.

Se, do ponto de vista dinâmico, a resposta de velocidade é praticamente a mesma para diferentes valores de frequência de chaveamento para realização da modulação PWM, o mesmo não pode se afirmar em relação ao *ripple* presente na resposta de velocidade e corrente de armadura.

A Figura 32, ilustra em escala ampliada, a velocidade do motor CC em regime permanente considerando o controle por fase (retificador controlado) e por recortador de tensão em diferentes frequências de modulação PWM.

Conforme pode ser observado na Figura 32 (a), o maior *ripple* de velocidade foi obtido com o controle por fase (retificador controlado).

No caso do motor CC alimentado por recortador de tensão, observou-se praticamente o mesmo *ripple* de velocidade para a modulação PWM em 5 kHz – Figura 32 (b) ou em 2,5 kHz – Figura 32 (c). Entretanto, à medida em que a frequência da modulação é reduzida, observa-se maior *ripple* de velocidade, conforme observado na Figura 32 (d).

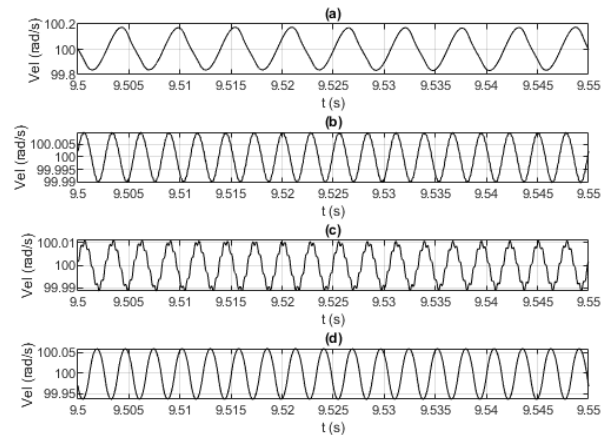


Figura 32: Velocidade do motor CC em regime permanente com controle de fase (a) e alimentado por recortador de tensão com diferentes frequências de modulação PWM: 5 kHz (b), 2,5 kHz (c) e 360 Hz (d).

Portanto, pode-se afirmar que, com um pequeno ajuste nos ganhos do regulador de velocidade, seria possível obter respostas dinâmicas praticamente idênticas utilizando-se tanto o retificador trifásico quanto o recortador de tensão. Este pequeno ajuste se justifica uma vez que as plantas são ligeiramente diferentes em função do tipo de conversor de potência utilizado (retificador trifásico ou recortador de tensão).

IX. CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou o desempenho do motor CC com controle corrente de armadura e velocidade, quando alimentado por retificador trifásico totalmente controlado e por recortador de tensão ou *Chopper*. A definição dos ganhos dos reguladores PI foi determinada a partir do modelo linear, para uma determinada referência de velocidade e condições de carga, de forma a assegurar que os valores nominais da corrente e tensão de armadura do motor não fossem excedidos. A partir de então, foram mantidos inalterados tanto para o modelo utilizando o retificador quanto para o modelo utilizando o recortador de tensão. Para assegurar as mesmas condições para comparação dos resultados, a fonte trifásica foi a mesma, tanto para o retificador totalmente controlado quanto para o retificador a diodo, utilizado para a alimentação do recortador de tensão.

A partir dos resultados obtidos por meio de simulação computacional no ambiente MATLAB/SIMULINK®, observou-se que a tensão média aplicada ao motor por ambos os conversores para suprir a demanda de velocidade e carga foi a mesma obtida considerando-se o modelo linear. De fato, não poderia ser diferente. Embora a forma de onda da tensão aplicada na armadura seja diferente em função da utilização do retificador ou do recortador de tensão, o valor médio da tensão de armadura é idêntico, que também não poderia ser diferente.

Em termos de tempo de resposta (tempo de acomodação), praticamente não se observou diferença nos resultados obtidos. De fato, utilizando-se reguladores de corrente em ambos os casos, observa-se que o tempo de resposta do regulador de corrente é muito superior ao do regulador de velocidade.

O atraso introduzido pelos conversores (retificador ou *Chopper*) não comprometem a resposta de velocidade. Uma pequena diferença foi observada apenas na ultrapassagem percentual uma vez que os tempos de atraso do retificador e recortador de tensão são diferentes. O atraso introduzido pelo retificador é de 1,388 ms enquanto para o *Chopper*, operando na frequência de 5 kHz, é de apenas 0,1 ms.

Em relação ao acionamento do motor CC por recortador de tensão com modulação PWM em diferentes frequências, observou-se que, quanto maior a frequência de chaveamento, menor o *ripple* de torque e conseqüentemente, de velocidade em regime permanente. Observa-se também que a partir de uma certa frequência, a diferença do *ripple* entre as duas frequências começa a ser desprezível. Portanto observa-se vantajoso operar com frequência de chaveamento elevada, respeitando-se a capacidade das chaves eletrônicas.

Em termos percentuais, o *ripple* de velocidade para o motor CC com controle por fase, foi de 0,4% enquanto, para o *Chopper*, operando em 2,5 kHz ou 5kHz, o ripple de velocidade foi de 0,02% e para a frequência de 360 Hz, 0,1%.

REFERÊNCIAS

- [1] “*Electric DC Motors Market Size, Share & Trends Analysis By Type, By Voltage, By End Use and Segmented Focus.*”, Grand View Research, Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-dc-motor-market>>, Grand View Research, 2017, Acesso em: 10 de Dezembro, 2019.
- [2] Ho, S., JONES, A. and Cox, C.S., “*Torque Disturbance and their Effect on Process Control*”, *Power Electronics and Variable Speed Drives*”, October 1994, Conf. Publication no. 399, IEE, pp. 602 – 607.
- [3] R. Krishnan, “*Electric Motor Drives Modeling, Analysis, and Control*”, Prentice Hall, 2001.
- [4] Stephen D. Umans, “*Máquinas Elétricas de Fitzgerald*” – McGraw-Hill, 7ª. Edição
- [5] Katsuhiko Ogata, “*Engenharia de Controle Moderno*”, LTC, 1997.
- [6] Norman S. Nise, “*Engenharia de Sistemas de Controle*”, LTC, 3ª Edição, 2000.
- [7] N. Mohan, T. M. Underland, W. P. Robbins, “*Power Electronics – Converters, Applications and Design*”, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1995.
- [8] A. Ahmed, “*Eletrônica de Potência*”, Prentice Hall, 2000.
- [9] N. Mohan, “*Máquinas Elétricas e Acionamentos – Curso Introdotório*, 1ª Edição, LTC, 2015.
- [10] Da Silva, W. G., P. P. Acarnley, J. W. Finch, “*Applicaton of Genetic Algorithms to the Online of Electric Drive Speed Controllers*”, IEEE Transactions on Industrial Electroics, 2001.
- [11] W. G. da Silva, B. P. Alvarenga, P. P. Acarnley, J.W. Finch, “*Aplicação on-line de algoritmo genético na otimização de um regulador de velocidade fuzzy para acionamentos elétricos*”, *Computação Evolucionária em Problemas de Engenharia*, Omnipax, 2011, pp.89-104.