



## COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DO MOTOR CC COM REGULAÇÃO DE VELOCIDADE ALIMENTADO POR RETIFICADOR CONTROLADO E RECORTADOR DE TENSÃO

W. G. da Silva, B. P. Alvarenga, G. T. de Paula, G. R. Pereira, G. P. Neves

EMC – Universidade Federal de Goiás

**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.

### COMPARISON OF THE SPEED CONTROLLED DC MOTOR DRIVE FED BY THREE-PHASE RECTIFIER AND CHOPPER

**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

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 [1]. Outras aplicações são relatadas na literatura, tais como propulsão elétrica, elevadores, máquinas ferramenta, indústria têxtil, entre outras [2]. 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, para fins de regulação de velocidade, o motor CC foi predominante até década de 80, quando passou a ser progressivamente substituído por outros sistemas de acionamento elétrico tais como, por exemplo, o MIT com controle vetorial. Entretanto, em função de seu comportamento linear, o motor CC é ainda é utilizado na indústria e considerado para fins de estudo de análise de sistemas lineares em cursos de graduação em engenharia elétrica. [3,4].

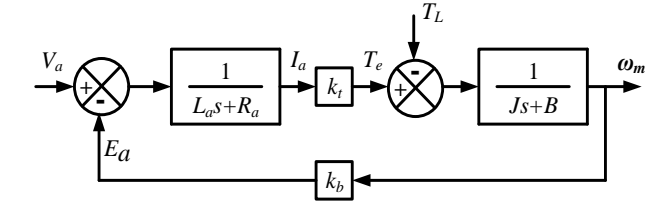
Para o motor CC, o controle de velocidade pode ser realizado atuando-se na tensão de armadura ou no campo. Neste trabalho, será considerado apenas o caso em que o controle da velocidade será realizado por meio da variação da tensão de armadura, obtida por meio de retificador trifásico totalmente controlado (controle por fase) ou por meio de recortador de tensão (*Chopper*). Serão apresentados os modelos que foram desenvolvidos no ambiente MATLAB/SIMULINK®, juntamente com o modelo clássico linear considerado na literatura clássica [3,4]. 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 pela literatura.

#### II. MODELAGEM DO MOTOR CC COM MALHA FECHADA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE

O modelo clássico do motor CC está ilustrado na Figura 1. A demonstração deste modelo já é bem conhecida na literatura [2], portanto, dispensa apresentação.

Para a realização do controle de velocidade, utiliza-se 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 2.

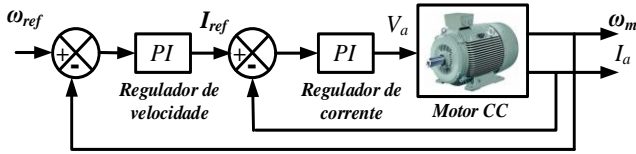
Figura 1: Modelo do motor CC em diagrama de blocos.



Onde:

- $V_a$  Tensão de armadura em V.
- $E_a$  Força eletromotriz em V.
- $I_a$  Corrente de armadura em A.
- $k_t$  Constante de torque em Nm/A.
- $k_b$  Constante de força eletromotriz em V/rad/s.
- $T_e$  Conjugado eletromagnético em Nm.
- $T_L$  Conjugado resistivo em Nm.
- $T_a$  Conjugado de aceleração em Nm.
- $L_a$  Indutância da armadura em H.
- $R_a$  Resistência da armadura em  $\Omega$ .
- $J$  Momento de inércia em  $\text{Kg.m}^2$ .
- $B$  Coeficiente de atrito em  $\text{Nm/rad/s}$ .
- $\omega_m$  Velocidade angular em rad/s.
- $s$  Operador Laplace

Figura 2: Diagrama de blocos do motor CC com controle de corrente e velocidade.



Onde:

- $\omega_{ref}$  Velocidade de referência.
- $I_{ref}$  Corrente de referência.

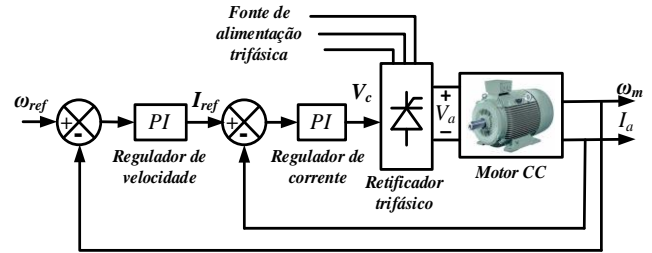
Conforme ilustrado na Figura 2, a saída do regulador de corrente representa a tensão a ser aplicada na armadura do motor enquanto a saída do regulador PI de velocidade representa a corrente de armadura de referência para a malha de regulação de corrente. Portanto, a tensão de armadura a ser aplicada ao motor depende da velocidade de referência e do conjugado 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 [2,5,6]. 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) [2,5].

### III. O MOTOR CC COM CONTROLE DE FASE

O funcionamento do motor CC com controle de fase já é bem conhecido no meio científico. Considerando que existem inúmeras literaturas disponíveis e, com o objetivo de se evitar longas leituras, explicações detalhadas não serão aqui apresentadas. Para o leitor interessado, recomenda-se a leitura das referências [2,5,6]. O diagrama de blocos do motor CC com controle de fase é ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Diagrama de blocos do motor CC com controle de fase.

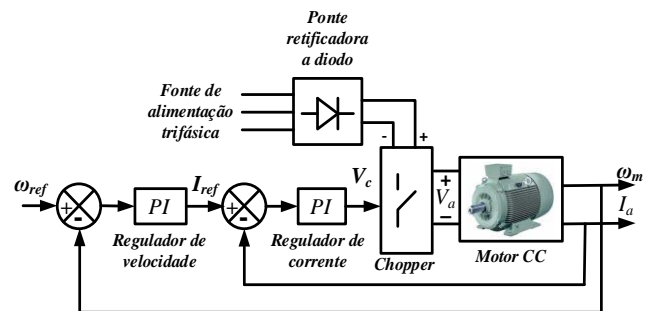


Conforme pode ser observado, a saída do regulador PI de corrente será ser um sinal de controle do ângulo de disparo dos tiristores do retificador trifásico que alimenta o motor CC. Embora não esteja ilustrado na figura, é comum a utilização de um filtro passa-baixa para filtrar o sinal de corrente da 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.

### IV. O MOTOR CC COM RECORTADOR DE TENSÃO

Para o acionamento do motor CC com controle de velocidade por meio de recortador de tensão (*Chopper*) faz-se necessária a obtenção de uma tensão CC ajustável, a partir de uma fonte CC de valor constante. A fonte CC constante, por sua vez, é obtida a partir de um retificador trifásico a diodos, conforme ilustrado na Figura 4. O valor médio da tensão de armadura do motor CC é controlado por meio do *Chopper*, variando-se a razão cíclica da chave eletrônica, isto é, o tempo em que a mesma permanece fechada em relação ao período da onda portadora utilizada para a realização da modulação por largura de pulso, PWM.

Figura 4: 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 da chave eletrônica do recortador de tensão. Esta chave é normalmente um transistor bipolar, IGBT, MOSFET ou um GTO [2,5]. 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 da chave.

## V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os três modelos ilustrados nas Figuras 2, 3 e 4 foram implementados no ambiente MATLAB/SIMULINK® de forma a possibilitar a comparação de resultados. Os parâmetros do motor CC utilizado foram:

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

Para se determinar os ajustes dos ganhos dos reguladores PI de corrente e de velocidade, pode-se utilizar diferentes técnicas e/ou ferramentas disponíveis na literatura [2,7,8,9]. Existirão infinitos valores possíveis para ganho proporcional e ganho integral, 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.

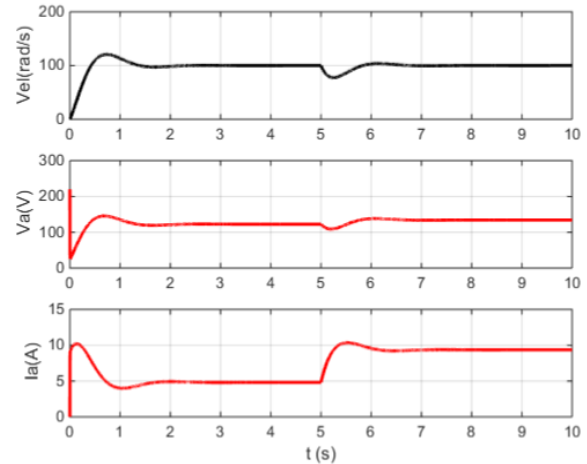
O ajuste do ganho proporcional do regulador de velocidade foi ajustado de forma que, para um degrau de referência de velocidade de até 100 rad/s, o valor inicial da corrente de referência para o regulador PI de corrente não ultrapassasse seu valor nominal, isto é, 10A. Assim, seu valor foi estabelecido 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.

A Figura 5 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 com conjugado resistente inicial de 5 Nm, acrescido de um distúrbio de carga de 5 Nm em  $t = 5\text{s}$ . 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.

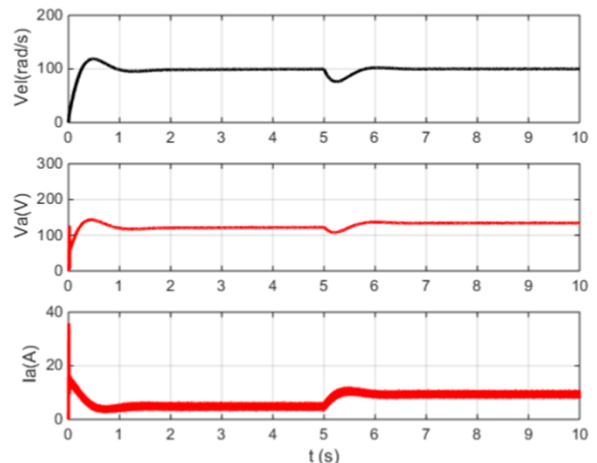
Figura 5: Tensão de armadura, velocidade e corrente de armadura do motor CC para um degrau de velocidade de 100 rad/s e distúrbio de carga em  $t = 5\text{s}$ .



Para o motor CC alimentado por retificador controlado, a fonte de tensão trifásica foi definida em 220V<sub>rms</sub> (tensão de linha). Assim, o valor de pico da tensão de saída do retificador será de 311V. É importante destacar que foram mantidos os valores de ganhos do regulador PI de corrente e regulador PI de velocidade.

Com o objetivo de reduzir o *ripple* da corrente de armadura, 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. A Figura 6 ilustra a resposta de velocidade, a tensão de armadura e a corrente de armadura do motor CC com controle de fase.

Figura 6: Tensão de armadura, velocidade e corrente de armadura do motor CC alimentado por retificador controlado para um degrau de velocidade de 100 rad/s e distúrbio de carga em  $t = 5\text{s}$ .

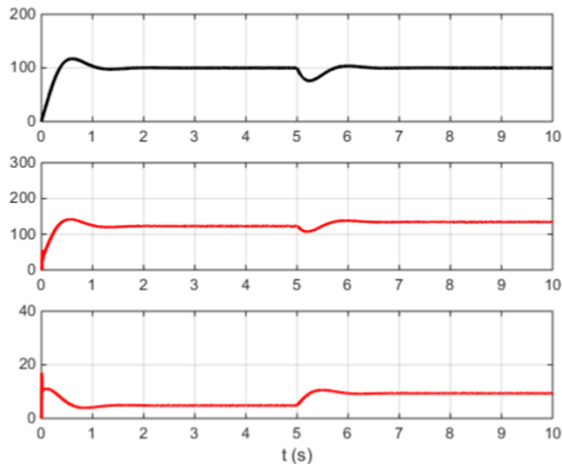


Com a finalidade de se filtrar as ondulações em alta frequência da corrente de armadura em função do

chaveamento do retificador, foi utilizado um filtro passa-baixa com uma constante de tempo de 2 ms.

A Figura 7, por sua vez, apresenta as respostas de velocidade e tensão e corrente de armadura para o motor CC com controle de velocidade alimentado por recortador de tensão (*Chopper*).

Figura 7: Tensão de armadura, velocidade 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  $t = 5s$ .



Conforme pode ser observado nas Figuras 6 e 7, o valor médio da tensão aplicada na armadura do motor CC em regime permanente, pelos respectivos conversores (retificador trifásico e recortador de tensão), é o mesmo obtido com o modelo linear (Figura 5).

As Figuras 8 e 9 ilustram a tensão de armadura do motor CC aplicada, respectivamente, pelo retificador e pelo recortador de tensão, com seus respectivos valores médio. Observando-se a escala de tempo de ambas as figuras, fica evidente a diferença na frequência de chaveamento das tensões. No caso do retificador (Figura 8), a frequência do chaveamento da tensão está relacionada à frequência da tensão da rede de alimentação, isto é, 60 Hz. Para o recortador de tensão (Figura 9), a frequência de chaveamento, que fora fixada em 5 kHz.

Figura 8: Tensões de linha da fonte CA, tensão de armadura aplicada no motor pelo retificador e seu valor médio.

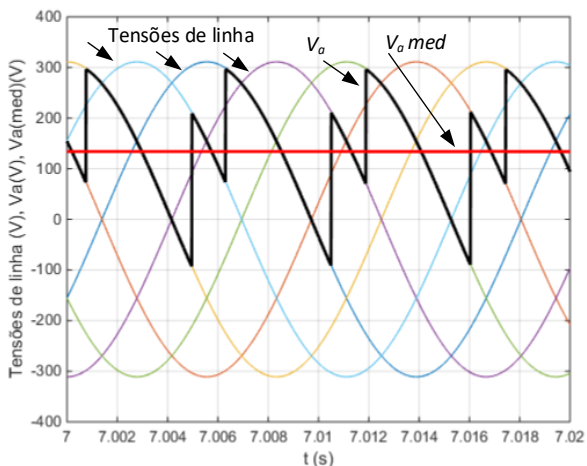
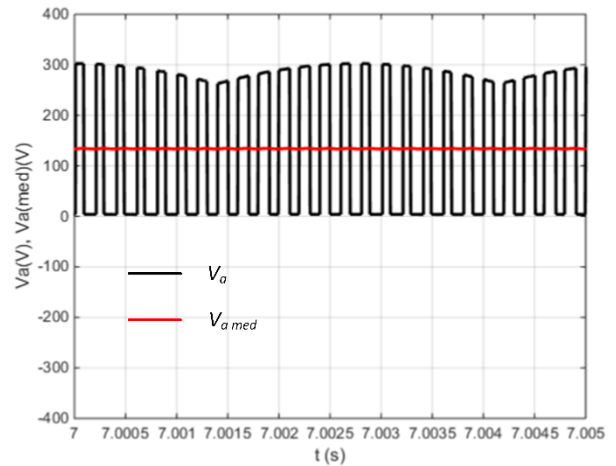
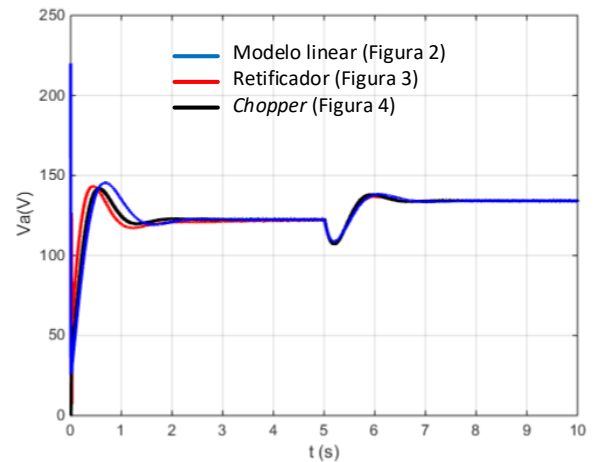


Figura 9: Tensão de armadura aplicada no motor pelo recortador de tensão e seu valor médio.



A Figura 10 apresenta os valores médios da tensão de armadura aplicada ao motor para suprir a demanda de velocidade e carga, considerando o modelo linear, o motor CC alimentado por retificador e motor CC alimentado por recortador de tensão.

Figura 10: Tensão de armadura (valor médio) do motor CC.



Observa-se que os valores são idênticos, com exceção do transitório nos instantes iniciais da partida, justamente em função das características dos conversores. No instante da aplicação do degrau de carga de 5 Nm em  $t = 5s$ , seu valor é aumentado de forma a suprir a nova demanda por maior corrente de armadura e conseqüentemente, o conjugado eletromagnético produzido pelo motor.

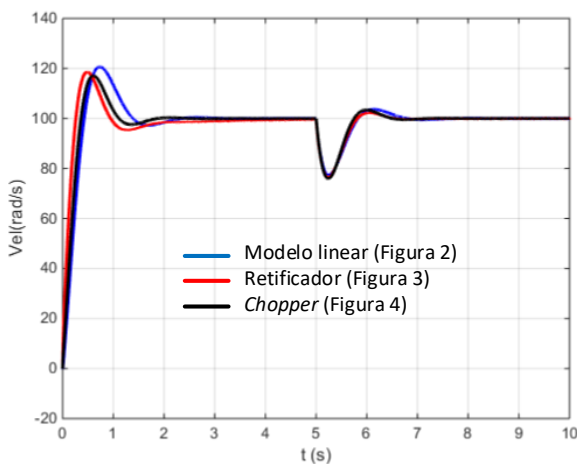
## VI. ANÁLISE DE RESULTADOS

As respostas de velocidade do motor CC considerando o modelo linear (Figura 1), a alimentação por meio de retificador controlado, conforme ilustrado na Figura 2 e alimentação por meio de recortador de tensão (Figura 3), foram colocadas no mesmo gráfico de forma a possibilitar comparação. Conforme apresentado na Figura 11, 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. Os ganhos foram definidos para o sistema linear conforme ilustrado na Figura 2. Entretanto, aquele modelo não considera os conversores que foram inseridos no sistema de forma a possibilitar a obtenção de tensão CC ajustável.

Figura 11: Respostas de velocidade do motor CC ao degrau de velocidade de referência e distúrbio de carga.



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 (1) [2]:

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

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 [2]. 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  $60^\circ$ , que representa o intervalo de comutação entre dois tiristores na Ponte Retificadora. Portanto, para a frequência da tensão de alimentação em 60 Hz,  $T_r = 1,388$  ms [2]. 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 [2].

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 (2) [2]:

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

Onde:

$K_c$  Ganho do controlador PWM.  
 $K_{rt}$  Ganho do recortador de tensão.  
 $T$  Período da forma de onda 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 [2].

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 [2]. Para a realização da modulação PWM, foi utilizada uma onda triangular na frequência de 5 kHz, cujo período é de 0,2 ms, resultando em atraso de apenas 0,1 ms.

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, muitas vezes 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 5, 6, 7 e 10) demonstram que a diferença pode ser observada apenas no regime transitório nos instantes iniciais. Observa-se pequena diferença em termos de *overshoot* na resposta de velocidade, porém, os tempos de acomodação são muito próximos.

Portanto, pode-se afirmar que, com um pequeno ajuste nos ganhos do regulador de velocidade, seria possível obter respostas 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).

## VII. 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 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 no *overshoot* 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.

## REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] R. Krishnan, “*Electric Motor Drives Modeling, Analysis, and Control*”, Prentice Hall, 2001.
- [3] Katsuhiko Ogata, “*Engenharia de Controle Moderno*”, LTC, 1997.
- [4] Norman S. Nise, “*Engenharia de Sistemas de Controle*”, LTC, 3ª Edição, 2000.
- [5] N. Mohan, T. M. Underland, W. P. Robbins, “*Power Electronics – Converters, Applications and Design*”, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, 1995.
- [6] A. Ahmed, “*Eletrônica de Potência*”, Prentice Hall, 2000.
- [7] N. Mohan, “*Máquinas Elétricas e Acionamentos – Curso Introdotório*”, 1ª Edição, LTC, 2015.
- [8] 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.
- [9] 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.