

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA / ENGENHARIA ELÉTRICA
Trabalho Final de Curso II

FILIPE LACERDA LEMOS

FRENAGEM REGENERATIVA EM MÁQUINAS CC

Trabalho Final de Curso II como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica apresentado à Pontifícia Universidade Católica de Goiás

BANCA EXAMINADORA:

Prof. MSc. Carlos Alberto Vasconcelos Bezerra – Orientador - ENG-PUC Goiás
Prof. MSc. Carlos Daniel de Souza Bezerra - IFG
Prof. Dr. Antônio Marcos de Melo Medeiros- ENG - PUC Goiás

Goiânia, 15 de Junho de 2022.

FRENAGEM REGENERATIVA EM MÁQUINAS CC

Lemos F.L., Bezerra C.A.V.

filipeeng109@gmail.com, cavb64@gmail.com

Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Av, Universitária 1.440, Setor Universitário – Goiânia - Goiás

Abstract—This course conclusion work aims to develop a methodology for research, analysis, simulation and assembly of a regenerative braking system using DC motors with independent excitation or permanent magnet, controlled by the armature from an AC network, having as actuator a *Dual* pulse converter operating with circulating current. The search for sustainable development and energy recovery in mechanical systems is increasing, from that on, theoretical studies on the subject discussed were discussed, as well as electronic techniques for driving the DC machine. A mathematical model was made, simulating and analyzing the results generated in the application of braking technology. These research and methodology guided the development of the experimental results, verifying the possibility of braking regeneration using the *Dual Converter*. From this study, the experiment was built and the tests verified that it is possible to confirm the power during the braking of the CC machine. The control system was properly realized in open loop, in this way the regenerated power can be even higher through a control technique.

Keywords — *Regenerative braking. Dual Converter, CC Machines.*

Resumo—Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de pesquisa, análise, simulação e montagem de um sistema de frenagem regenerativa por meio de motores de corrente contínua com excitação independente ou a ímã permanente, com controle pela armadura a partir de uma rede AC, tendo como atuador um conversor *Dual* de dois pulsos operando com corrente de circulação. A busca por desenvolvimento sustentável e a recuperação de energia em sistemas mecânicos é cada vez maior, a partir disso foi discutido estudos teóricos sobre o assunto abordado, e técnicas eletrônicas para o acionamento da máquina CC. Foi feito um modelo matemático, simulando e analisando os resultados gerados na aplicação da tecnologia de frenagem. Esses estudo e metodologia nortearam o desenvolvimento do protótipo de experimentação, verificando a possibilidade da frenagem regenerativa com a utilização do conversor dual. A partir deste estudo, o protótipo foi construído e os experimentos realizados comprovaram que é possível a regeneração da potência durante a frenagem da máquina cc. O sistema de controle foi realizado em malha aberta, desta forma a potência regenerada pode ainda ser maior através de uma técnica de controle apropriada.

Palavras-Chave — *Frenagem regenerativa. Conversor Dual, Máquinas CC.*

I. INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento da demanda por fontes alternativas de energia e com o desenvolvimento tecnológico, foi possível a criação e aprimoramento de técnicas de reaproveitamento de energia, tanto para máquinas de alta carga utilizados em indústria, quanto para aplicações e equipamentos usuais do cotidiano.

A redução do consumo energético é uma tendência que definitivamente veio para fazer parte da vida de todos, seja por fatores financeiros, onde esses equipamentos conseguem reduzir gastos consideráveis com contas de energia, ou até mesmo com combustíveis em aplicações de carros elétricos, seja por fatores ambientais, que permeiam a redução dos desperdícios, evitando assim a exploração exacerbada e contínua dos recursos naturais. Em virtude dessas mudanças na forma como as pessoas consomem e encaram a energia, tornou-se interessante um estudo da frenagem e como ela pode ser utilizada de maneira mais sustentável e econômica.

A frenagem convencional, também chamada de frenagem dinâmica é caracterizada pela dissipação da energia em forma de calor no momento do seu uso. Seguindo essa tendência mundial de economia e reaproveitamento de energia a frenagem vem sendo alvo de diversos estudos. Dessa forma surgiu a frenagem regenerativa, onde nesse caso o motor atua como um gerador e devolve essa energia para o sistema. Esse tipo de frenagem é o objeto de estudo do presente artigo.

O objetivo deste material é mostrar a elaboração de um modelo teórico e prático que represente de forma visual o processo de transformação da energia cinética em elétrica, aplicando dispositivos da eletrônica que façam o disparo, conversão, controle e medição energética no sistema, além de conceitos de inércia e conversão de energia.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Frenagem Regenerativa

Normalmente, levando em consideração o processo de desaceleração de um motor ou de veículos convencionais, durante a frenagem a energia é dissipada em forma de calor, sendo esse processo denominado frenagem dinâmica. Na chamada frenagem regenerativa, quando o fluxo de corrente é invertido e através da capacidade da máquina elétrica de operar como gerador, se proporciona um torque negativo e se converte a energia cinética em elétrica (SEN, 1997) . O ideal é adicionar junto ao freio dinâmico o sistema regenerativo (FLINDERS; MATHEW; OGHANNA, 1995). A energia regenerada é acumulada em bancos de capacitores ou baterias e estocada ali até que seja necessária em outras aplicações do sistema ou transformada em energia cinética. A seguir, representado pela figura 1, é ilustrado um diagrama de fluxo para o sistema em aceleração e utilizando o processo de frenagem.

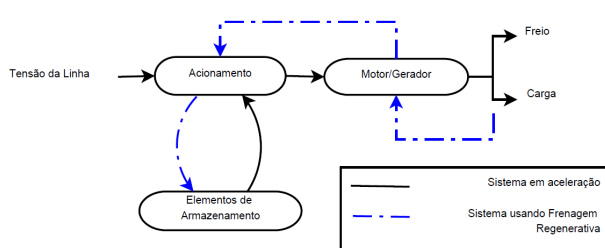


Figura 1. Conceito de Frenagem Regenerativa (DELGADO - 2010)

Neste estudo a energia da frenagem regenerativa será retornada para a rede AC e as cargas ali conectadas poderão absorver esta energia.

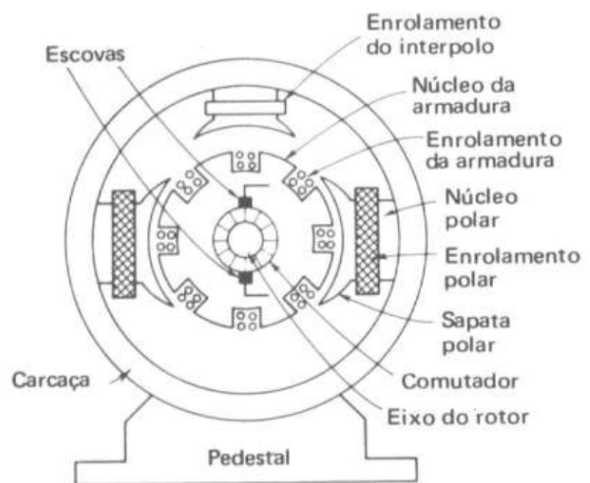


Figura 2. Diagrama simplificado de uma máquina CC – (UMANS – 2014)

B. Máquinas de Corrente Contínua (CC)

Os motores de corrente contínua (motor CC) são máquinas de corrente contínua (MCC), ou seja, funcionam tanto como motores quanto geradores de energia elétrica. Como o próprio nome indica, os motores CC são acionados por uma fonte de corrente contínua. Eles são motores que possuem ímãs permanentes ou então têm campo e armadura, neste caso não possuem ímãs permanentes (MATTEDE – 2021). São muito usados e possuem diversas aplicações como por exemplo, brinquedos, eletrodomésticos, máquinas industriais, veículos elétricos, entre outros.

Um diagrama simplificado de uma máquina CC está ilustrado na Figura 2 e um diagrama mais detalhado em corte está mostrado na Figura 3 (Umans – 2014). A estrutura física da máquina consiste em duas partes: O estator ou parte estacionária e o rotor ou parte rotativa. A parte estacionária da máquina é constituída de uma carcaça que fornece o suporte físico e de peças polares que se projetam para dentro e propiciam um caminho para o fluxo magnético na máquina. As extremidades das peças polares, que estão mais próximas do rotor, alargam-se sobre a superfície do rotor para distribuir uniformemente o seu fluxo sobre a superfície do rotor. Essas extremidades são denominadas sapatas polares. A superfície exposta de uma sapata polar é denominada face polar e a distância entre as faces polares e o rotor é denominada entreferro de ar, ou simplesmente entreferro.

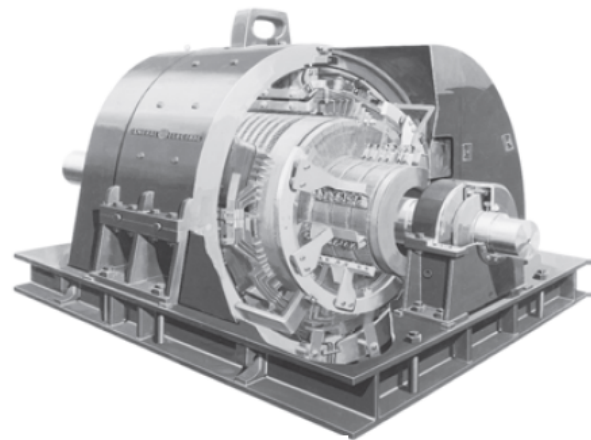


Figura 3. Visão em corte de uma máquina CC – (UMANS - 2014)

Há dois enrolamentos principais em uma máquina CC: os enrolamentos de armadura e os enrolamentos de campo. Os enrolamentos de armadura são definidos como os enrolamentos nos quais a tensão é induzida e os enrolamentos de campo são definidos como os enrolamentos que produzem o fluxo magnético principal da máquina. Em uma máquina CC normal, os enrolamentos de armadura estão localizados no rotor e os enrolamentos de campo estão localizados no estator. Como os enrolamentos de armadura estão localizados no rotor, o próprio rotor de uma máquina CC é denominado algumas vezes armadura. O circuito equivalente para um motor CC com excitação independente é mostrado na Figura 4 (Rashid – 2014).

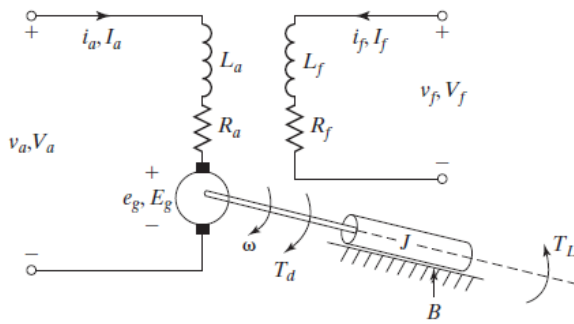


Figura 4. Circuito equivalente de motor CC com excitação independente – (Rashid – 2014)

Quando um motor com excitação independente é alimentado com uma corrente de campo i_f e uma corrente de armadura i_a flui no circuito da armadura, o motor desenvolve uma força contra eletromotriz (fcm) e um torque para equilibrar o torque da carga a determinada velocidade. Em um motor com excitação independente, a corrente de campo i_f não depende da corrente de armadura i_a , e as variações na corrente de armadura não tem nenhum efeito sobre a corrente de campo. Normalmente, a corrente de campo é muito menor que a de armadura (RASHID – 2014). As equações que descrevem as características de um motor com excitação independente podem ser determinadas a partir da Figura 4, aplicando a Lei das tensões de Kirchhoff no circuito do campo e da armadura. Para o circuito do campo, a equação 1 descreve o comportamento dinâmico do mesmo.

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (1)$$

A equação 2, descreve o comportamento dinâmico da armadura.

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_g \quad (2)$$

Onde e_g é a força contra-eletromotriz induzida na armadura e dada pela equação 3.

$$e_g = k_v \omega i_f \quad (3)$$

A interação da corrente da armadura e o campo magnético desenvolvido pela corrente de campo, desenvolve um conjugado que é dado pela equação 4.

$$T_d = k_t i_f i_a \quad (4)$$

Este conjugado desenvolvido deverá contrabalançar o conjugado resistente da carga que é dado pela equação 5.

$$T_r = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (5)$$

Onde:

- ω : velocidade angular do motor ou frequência angular do rotor, em rad/s;
- B : constante do atrito viscoso, em Nm/rad/s;
- K_v : constante de tensão, em V/A-rad/s;
- K_t : constante de torque, que é igual a de tensão KV;
- L_a : indutância do circuito de armadura, em H;

- L_f : indutância do circuito de campo, em H;
- R_a : resistência do circuito de armadura, em Ω ;
- R_f : resistência do circuito de campo, em Ω ;
- J : momento de inércia, em $\text{kg} \times \text{m}^2$;
- T_L : torque da carga, em Nm.

Em condições de regime permanente, as derivadas no tempo dessas equações são zero, e os valores médios em regime permanente são dadas pelas equações 6,7,8 e 9.

$$V_f = R_f i_f \quad (6)$$

$$e_g = k_v \omega i_f \quad (7)$$

$$V_a = R_a i_a + e_g = R_a i_a + k_v \omega i_f \quad (8)$$

$$T_d = k_t i_f i_a = B\omega + T_L \quad (9)$$

A potencia desenvolvida é dada pela equação 10.

$$P_d = T_d \omega \quad (10)$$

A partir da Equação 8, a velocidade de um motor CC com excitação independente pode ser encontrada a partir da equação 11.

$$\omega = \frac{V_a - R_a i_a}{K_v i_f} \quad (11)$$

A partir da Equação 11, nota-se que a velocidade do motor pode ser variada através dos seguintes métodos:

- Controle da tensão da armadura V_a , conhecido como controle por tensão ou controle pela armadura;
- Corrente de campo i_f , conhecido como controle pelo campo;
- Demanda do torque, que corresponde a uma corrente de armadura.

Neste trabalho o controle da velocidade para frenagem regenerativa será realizado através do controle pela armadura.

C. Conversores duais monofásicos

Segundo Rashid (2014), os conversores monofásicos completos com cargas indutivas permitem apenas uma operação em dois quadrantes. Se dois desses conversores completos forem conectados back-to-back, como mostra a Figura 5, tanto a tensão de saída quanto o fluxo da corrente de carga podem ser invertidos. Esse sistema proporciona um funcionamento em quatro quadrantes e é chamado de conversor dual. Os conversores duais são normalmente utilizados em acionamentos de velocidade variável de alta potência. Se α_1 e α_2 são os ângulos de disparo dos conversores 1 e 2, respectivamente, as tensões médias de saída correspondentes são V_{CC1} e V_{CC2} . Os ângulos de disparo são controlados de forma que um conversor opere como retificador e o outro, como inversor - porém ambos produzem a mesma tensão média de saída. As figuras 7 à 10 mostram as formas de onda de saída para dois conversores, em que as duas tensões médias de saída são as mesmas. A Figura 6 apresenta as características $v - i$ de um conversor dual.

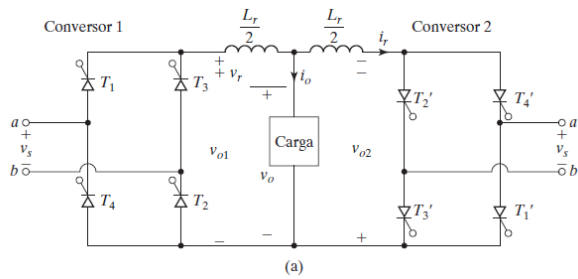


Figura 5. Conversor Dual Monofásico – (Rashid – 2011)

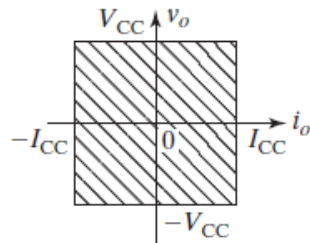


Figura 6. Quadrantes – (Rashid – 2011)

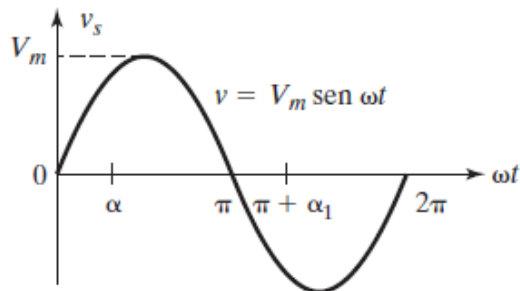


Figura 7. Tensão de alimentação de entrada – (Rashid – 2011)

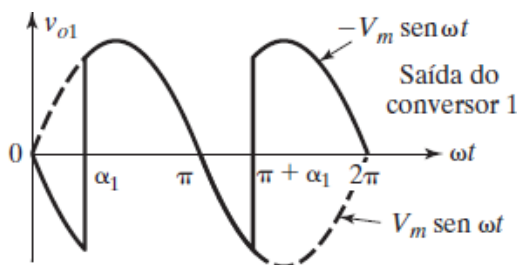


Figura 8. Tensão de saída para o conversor 1 – (Rashid – 2014)

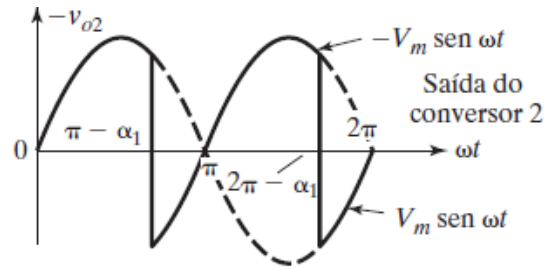


Figura 9. Tensão de saída para o conversor 2 – (Rashid – 2011)

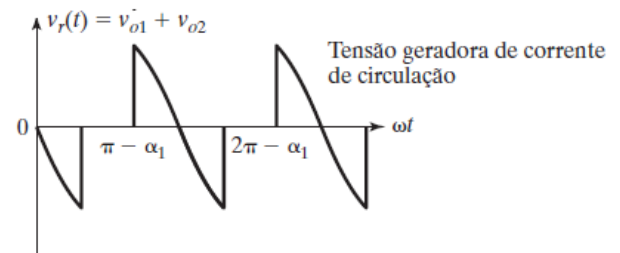


Figura 10. Tensão no indutor de circulação – Fonte: Rashid (2011)

Para um conversor de dois pulsos alimentando por uma carga indutiva, operando no modo de condução contínua (MCC), a tensão média na carga é dada pela Equação 12.

$$V_{CC} = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \quad (12)$$

As tensões médias nas saídas dos conversores 1 e 2 serão dadas pelas Equações 13 e 14.

$$V_{CC1} = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha_1 \quad (13)$$

$$V_{CC2} = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha_2 \quad (14)$$

Como um conversor está em retificação e o outro, em inversão, tem-se:

$$V_{CC1} = -V_{CC2} \text{ ou } \cos \alpha_2 = -\cos \alpha_1 = \cos(\pi - \alpha_1)$$

Portanto os ângulos de disparos dos conversores 1 e 2 serão complementares de acordo com a Equação 15,

$$\alpha_2 = \pi - \alpha_1 \quad (15)$$

Como as tensões instantâneas de saída dos dois conversores estão defasadas, pode haver uma diferença de tensão instantânea e isso pode resultar em uma corrente de circulação entre os dois conversores. Essa corrente de circulação não flui através da carga, e normalmente é limitada por um indutor de corrente de circulação L_r , como mostra a Figura 5. Se V_{o1} e V_{o2} forem as tensões instantâneas de saída dos conversores 1 e 2, respectivamente, a corrente de circulação poderá ser encontrada por meio da integração da diferença de tensão instantânea a partir de $\omega t = \pi - \alpha_1$. Como as duas tensões médias de saída durante o intervalo $\omega t = \pi + \alpha_1$ a $2\pi - \alpha_1$ são iguais e opostas, suas contribuições para a corrente instantânea

de circulação i_r são iguais a zero.

Assim a corrente de circulação será dada pela equação 16.

$$i_r(t) = \frac{1}{\omega L_r} \int_{\pi-\alpha_1}^{\omega t} v_r d(\omega t) = \frac{1}{\omega L_r} \int_{\pi-\alpha_1}^{\omega t} (v_{o1} + v_{o2}) d(\omega t)$$

$$i_r(t) = \frac{V_m}{\omega L_r} [\int_{\pi-\alpha_1}^{\omega t} \text{sen}\omega t d(\omega t) - \int_{\pi-\alpha_1}^{\omega t} \text{sen}\omega t d(\omega t)]$$

$$i_r(t) = \frac{V_m}{\omega L_r} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \quad (16)$$

Desta forma, a corrente nos indutores de circulação assumirá:

$$i_r > 0, \text{ para } 0 < \alpha_1 < \frac{\pi}{2}$$

e

$$i_r < 0, \text{ para } \frac{\pi}{2} < \alpha_1 < \pi$$

Para $\alpha_1 = 0$, somente o conversor 1 opera. Para $\alpha_1 = \pi$, somente o conversor 2 opera. Para $0 < \alpha_1 < \pi/2$, o conversor 1 fornece uma corrente de carga positiva $+i_o$, e, assim, a corrente de circulação só pode ser positiva. Para $\pi/2 < \alpha_1 < \pi$, o conversor 2 fornece uma corrente de carga negativa $-i_o$, e, assim, somente uma corrente de circulação negativa pode fluir. Em $\alpha_1 = \pi/2$, o conversor 1 fornece circulação positiva durante o primeiro semiciclo, e o conversor 2, circulação negativa durante o segundo semiciclo. A corrente de circulação instantânea depende do ângulo de disparo. Para $\alpha_1 = 0$, sua magnitude torna-se mínima quando $\omega t = n\pi$, para n assumindo valores pares ($n = 0, 2, 4, \dots$), e máxima quando $\omega t = n\pi$, para n assumindo valores ímpares ($n = 1, 3, 5, \dots$). Se a corrente de carga de pico for I_p , um dos conversores que controla o fluxo de potência pode conduzir uma corrente de pico de $(I_p + 4V_m/L_r)$. Os conversores duais podem operar com ou sem corrente de circulação. Em caso de operação sem corrente de circulação, apenas um conversor opera de cada vez e conduz a corrente de carga, e o outro é completamente bloqueado pela inibição dos pulsos de acionamento. Entretanto, a operação com corrente de circulação tem as seguintes vantagens:

- Corrente de circulação mantém a condução contínua de ambos os conversores ao longo de todo o intervalo de controle, independentemente da carga;
- Como um conversor funciona sempre como retificador e o outro, como inversor, é possível haver fluxo de potência em um dos dois sentidos em qualquer instante do tempo;
- Como ambos os conversores estão em condução contínua, o tempo de resposta para a mudança de operação de um quadrante a outro é menor.

1) *Circuito de Disparo do Conversor Dual*: Baseado na Equação 15, o conversor 1 deverá ser disparado com um ângulo α_1 e o conversor 2 com o complemento, ou seja $\alpha_2 = \pi - \alpha_1$. Utilizando um circuito de disparo projetado com o TCA - 785, a figura 11 ilustra o diagrama de blocos que este circuito deverá assumir.

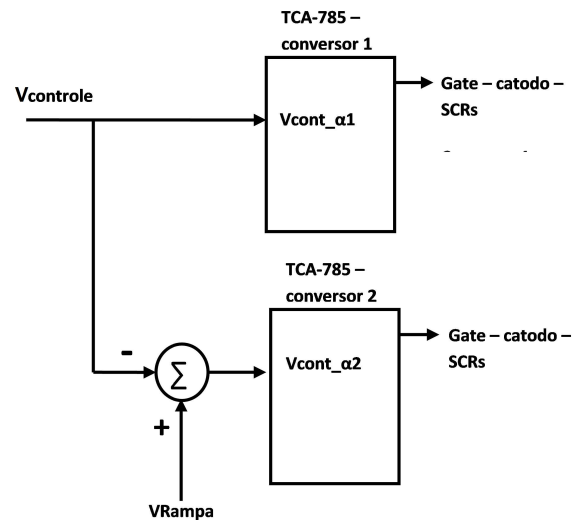


Figura 11. Diagrama de blocos do conversor Dual utilizando o CI TCA-785 – Fonte: O Autor

De acordo com Almeida (1986), no TCA-785, o ângulo de disparo é controlado por uma tensão de controle, regulada através de um programa desenvolvido em um Controlador Lógico Programável (CLP), variando de 0 a V_{Rampa} . Assim, para o circuito a ser utilizado a Equação 17, fornece a operação necessária no sinal de controle para atender os requisitos.

$$V_{cont_{\alpha 2}} = V_{Rampa} - V_{Controle} \quad (17)$$

Ajustando a tensão da rampa em 10 V, a tensão de controle deverá variar de 0 a 10 V com a finalidade de controlar o ângulo de disparo dos conversores 1 e 2 de 0 a 180°. Nesta situação a tensão de controle nos conversores seriam complementares, de acordo com a Equação 18.

$$V_{cont_{\alpha 2}} = 10 - V_{cont_{\alpha 1}} \quad (18)$$

Para uma tensão de controle de 2V no conversor 1 a tensão de controle no conversor 2 seria 8V, portanto complementares. Assim $\alpha_1 = 36^\circ$ e $\alpha_2 = 144^\circ$.

O apêndice A apresenta o princípio de operação do CI TCA - 785, bem como os cálculos envolvidos no dimensionamento deste circuito.

D. Sistemas de Controle

O controle do sistema de frenagem regenerativa será realizado em malha aberta, conforme diagrama da figura 12. Desta forma é possível verificar a possibilidade de regeneração e em uma oportunidade futura desenvolver a melhor técnica de controle para o sistema, com possibilidade de comparações de técnicas tradicionais de controle e técnicas utilizando inteligência artificial, de modo que a maior potência regenerada seja alcançada.

III. METODOLOGIA

Com o intuito de estudar a frenagem regenerativa nas máquinas CC alimentadas por uma rede AC através de um conversor Dual, foi desenvolvido um estudo inicial da estruturação do protótipo envolvendo o conversor, a estrutura de frenagem e o sistema de controle. O projeto foi desenvolvido em duas etapas.

Na primeira etapa foi realizado as simulações computacionais para ajustes práticos dos sistemas envolvidos. Na segunda etapa foi desenvolvido o *Hardware* e o *Software* responsáveis pelo controle e operação do sistema.

A. Simulação Computacional do Sistema

A simulação foi desenvolvida no software PSIM na sua versão estudante (<https://powersimtech.com/academia/for-students/>), de acordo com o diagrama ilustrado na figura 12.

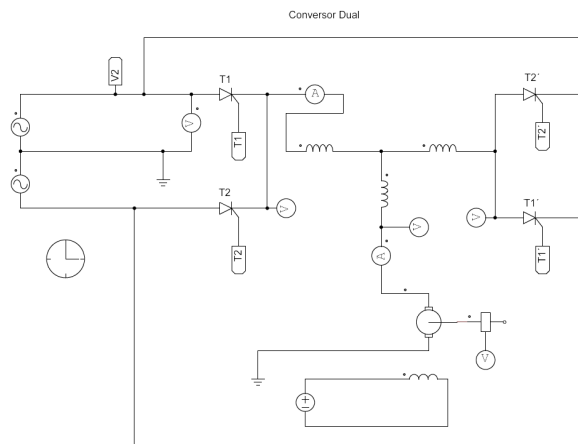


Figura 12. Diagrama do Conversor Dual - Simulação PSIM – Fonte: O autor

O Sistema de controle foi realizado de modo a acionar o conversor Dual aplicando um degrau inicial com um ângulo de disparo de 10° no conversor positivo, após 10 segundos uma rampa é aplicada neste ângulo elevando o mesmo para 170° no período de um segundo e permanecendo assim até o final do ciclo em que ocorre em 20 segundos. A figura 13 ilustra o circuito de controle desenvolvido no PSIM e a figura 14 apresenta os resultados das variáveis envolvidas.

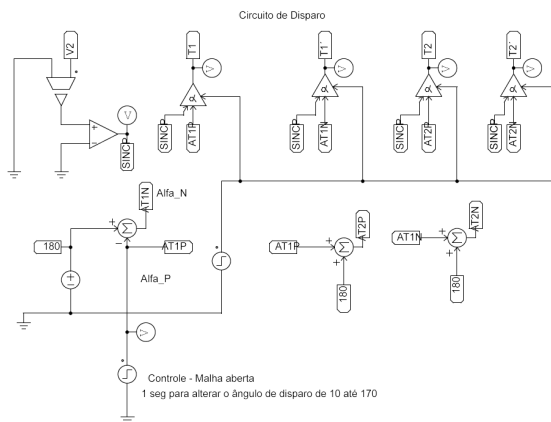


Figura 13. Controle do Conversor Dual - Simulação PSIM – Fonte: O autor

Na figura 14, é possível verificar que a regeneração é possível através do uso do Conversor *Dual*. A potência negativa, representada pelo traço azul claro, apresentada no instante

da desaceleração da máquina CC pode ser observada. Como o controle é realizado em malha aberta a potência não foi maximizada neste instante, isto significa que com uma técnica de controle apropriada mais potência pode ser regenerada no momento da desaceleração. Pode-se observar também pelo fato do sistema apresentar um comportamento de sistemas de fase não-mínima, que também na aceleração pode acontecer a regeneração.

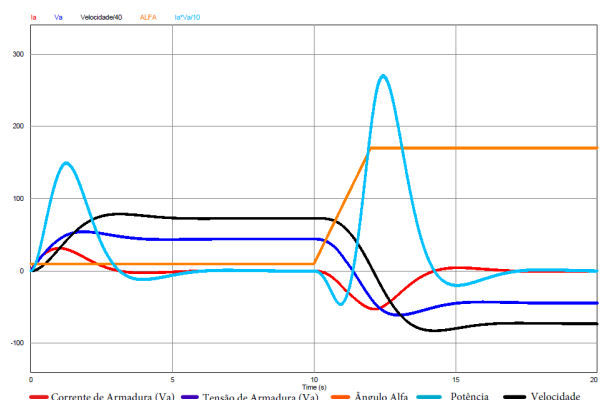


Figura 14. Variáveis na frenagem regenerativa - Simulação PSIM – Fonte: O autor

B. Montagem do Protótipo

O *Hardware* do sistema foi montado em bancada para o estudo proposto no trabalho final de curso II. A Figura 15, apresenta o diagrama de blocos do sistema. Nesta etapa foi montado o conversor Dual e o circuito de disparo do mesmo. O acionamento da máquina CC foi realizado em malha aberta, de modo que a mesma pudesse ser operada nos quatro quadrantes. Os sensores de corrente (SC), tensão (ST) e velocidade (SV), foram ajustados para poder medir valores positivos e negativos, uma vez que a corrente da armadura, tensão da armadura e velocidade da carga passam por valores positivos e negativos no processo de acionamento do sistema de frenagem. O sistema de aquisição de dados foi implementado utilizando um Arduino UNO. Como carga do motor, foi utilizada uma roda de bicicleta adaptada de modo que a energia cinética da mesma pudesse ser regenerada no processo de frenagem.

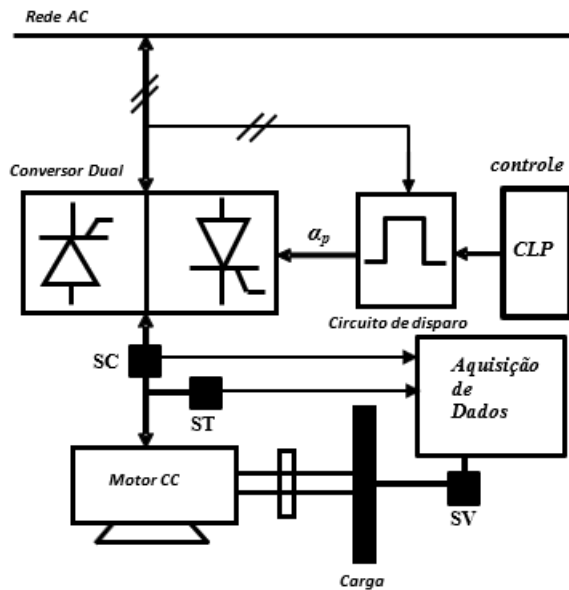


Figura 15. Diagrama de blocos do sistema de frenagem regenerativa – Fonte: O autor

Foi programado no CLP, o acionamento do sistema de regeneração de modo que a aceleração e desaceleração pudesse ser realizada conforme a simulação no PSIM, obtendo vários ciclos de acionamentos.

A figura 16 apresenta a topologia do conversor *dual*, que foi montado utilizando o conversor com transformador de Tap central, para diminuir o número de SCRs na topologia. A estrutura é composta pelo conversor P e conversor N. Os indutores de circulação L_r são necessários para limitar a corrente de circulação entre os conversores e o indutor de alisamento L_s irá fazer com que os conversores operem no modo de condução contínua (MCC). Os SCRs (T_1 e T_1') e (T_2 e T_2') são disparados simultaneamente com ângulos complementares em cada semiciclo da rede elétrica. T_1 e T_2 são disparados com o ângulo α_P e T_1' e T_2' com o ângulo α_N .

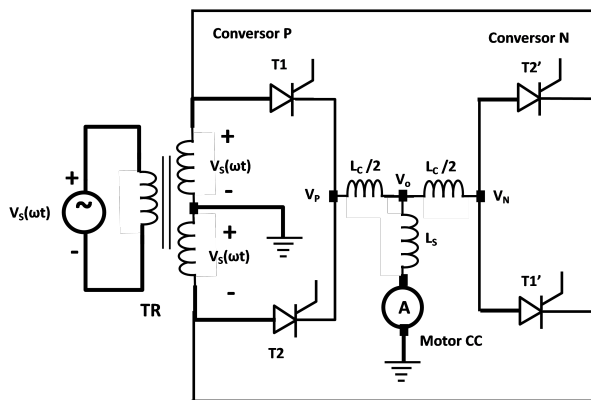


Figura 16. Topologia do Conversor Dual – Fonte: O Autor

A figura 17 ilustra a foto da bancada montada em laboratório do sistema de regeneração. Nesta fotografia fica evidenciado os transformadores, indutores, circuito de disparo, SCRs, motor

CC, carga, CLP e sistema de aquisição de dados utilizados no protótipo.

O apêndice B ilustra os esquemas elétricos dos sensores de tensão, velocidade e corrente da armadura. Estes sensores foram calibrados com as sensibilidades necessárias as medições das grandezas envolvidas.

O apêndice C resume os programas do CLP e de aquisição de dados das variáveis envolvidas no sistema de frenagem regenerativa proposto neste trabalho.

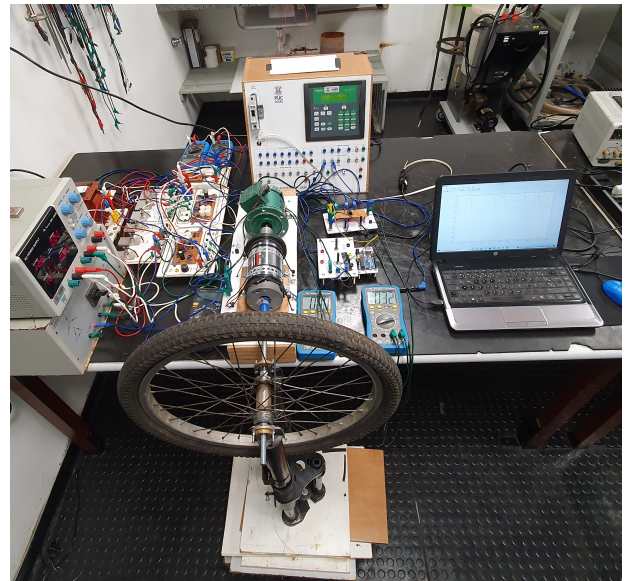


Figura 17. Foto da montagem experimental – Fonte: O autor

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No Trabalho Final de Curso II (TFC II), foi implementado a parte prática do Conversor *Dual* com o controle em malha aberta, com a medição da potência da frenagem regenerativa. Foi realizada a montagem do Conversor, observando a operação do mesmo em quatro quadrantes e as principais formas de ondas verificadas no mesmo, bem como os pontos de monitoração representados na figura 16. Está indicado logo abaixo na figura 18, o diagrama de blocos do circuito de disparo utilizado para o controle dos tiristores do conversor.

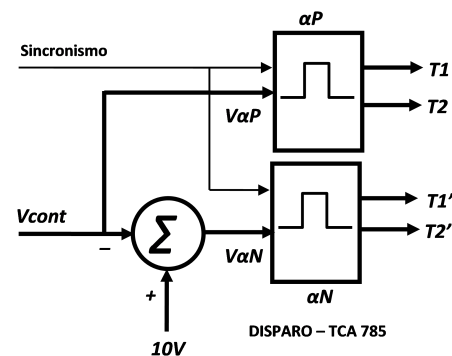


Figura 18. Diagrama de blocos do circuito de disparo – Fonte: O autor

A figura 19 ilustra as tensões de controle do conversor positivo e negativo. A rampa do TCA 785 foi ajustada para um valor máximo de 10 V. Assim variando a tensão de controle do Conversor Dual ($V_{controle}$) de 0 a 10V, os ângulos de disparos dos conversores positivo e negativo serão complementares entre 0 e 180°. Nesta figura tem se uma tensão de controle de 3,06 V, que é aplicada no conversor positivo, assim a tensão complementar aplicada no conversor negativo foi de 7,00V. Estes valores correspondem a ângulos de $\alpha_P = 54^\circ$ e $\alpha_N = 126^\circ$, respectivamente. Com estes ângulos, o conversor positivo opera na retificação e o negativo na inversão. Desta forma é possível ter o controle da frenagem regenerativa, pois o conversor pode levar a máquina CC a operar em quatro quadrantes.



Figura 19. Tensão de controle e complementar do Conversor Dual – Fonte: O autor

A figura 20 ilustra a rampa do TCA 785 sincronizada com a rede elétrica e ajustada em 10V para seu valor máximo.

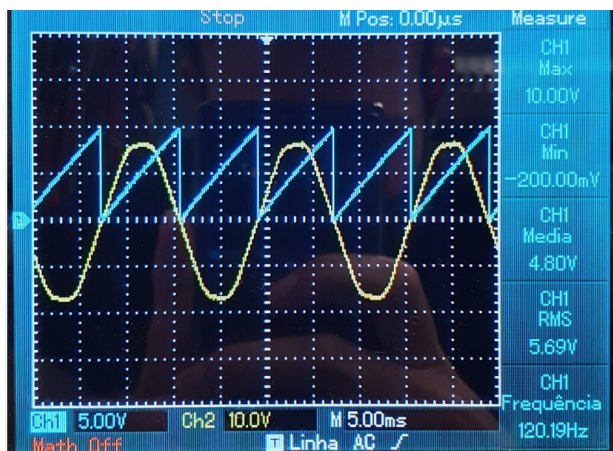


Figura 20. Rampa do TCA 785 sincronizada com a rede elétrica AC – Fonte: O autor

A figura 21 apresenta a tensão V_p no Conversor Dual para um ângulo de disparo $\alpha_p = 30^\circ$ e $\alpha_n = 150^\circ$, tendo uma tensão de controle de 1,67V. Nesta situação o conversor positivo está na retificação, o negativo na inversão e a máquina CC opera como motor girando no sentido horário.

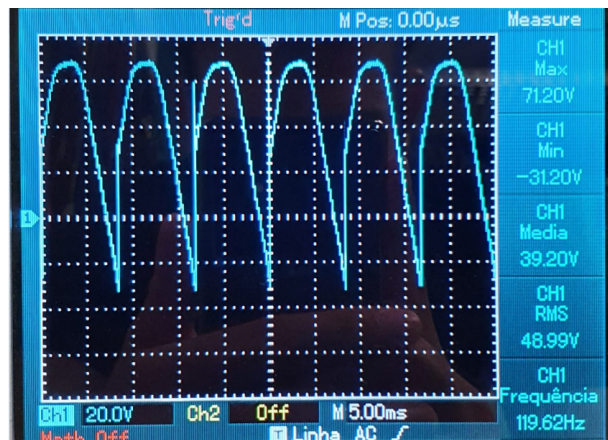


Figura 21. Tensão no Conversor Dual - Conversor positivo - $V_p - \alpha_p = 30^\circ$ – Fonte: O autor

Pode-se notar que o conversor opera no modo de condução contínua (MCC), isto é importante para o controle da frenagem regenerativa.

A figura 22 apresenta a tensão no indutor de circulação (L_r) do Conversor Dual para um ângulo de disparo $\alpha_p = 30^\circ$ e $\alpha_n = 150^\circ$, tendo uma tensão de controle de 1,67V.

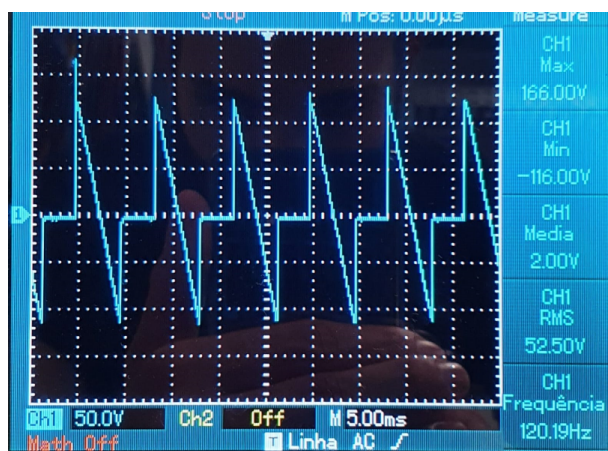


Figura 22. Tensão no Indutor de circulação - $\alpha_p = 30^\circ$ – Fonte: O autor

A tensão no indutor de circulação indica que o conversor Dual está operando com circulação de corrente entre o conversor positivo e negativo. Esta é uma condição importante que acontece na forma de operação do mesmo.

A figura 23 apresenta a tensão na armadura da máquina CC, para um ângulo de disparo $\alpha_p = 30^\circ$ e $\alpha_n = 150^\circ$, tendo uma tensão de controle de 1,67V.

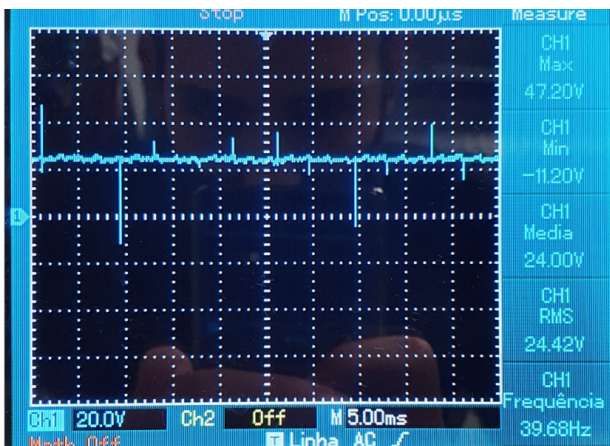


Figura 23. Tensão na armadura da máquina CC - Conversor positivo - $\alpha_p = 30^\circ$ - Fonte: O autor

Verifica-se que a tensão média é positiva, fazendo com que a máquina CC opere como motor com giro no sentido horário. Ao variar o ângulo de disparo do conversor de 0 a 180° a máquina CC pode ser levada a operar nos quatro quadrantes, possibilitando a frenagem regenerativa.

Com o conversor dual operando de forma correta, foi acrescentado ao mesmo os sensores de tensão, corrente e velocidade. Estes sensores foram ajustados, de modo que o sistema de aquisição de dados pudesse medir os seus valores em tempo real. A carga do motor foi ajustada utilizando uma roda de bicicleta, de modo que a inércia do sistema pudesse ser otimizada para o estudo da frenagem regenerativa.

O programa do CLP foi ajustado para gerar um degrau inicial no ângulo de disparo do conversor dual de 10° e na sequência alterar este ângulo para 170° , seguindo uma rampa durante o tempo de 1 segundo e permanecendo assim por um tempo suficiente para a velocidade da roda alcançar o regime permanente. A programação também permitia a desaceleração e aceleração do sistema a qualquer instante, através de uma chave ligada ao CLP.

Com o sistema operando foi feita a aquisição das variáveis envolvidas. A figura 24, ilustra a corrente da armadura e a potência elétrica durante alguns ciclos de aceleração e desaceleração. No gráfico, a potência se torna negativa durante o período de desaceleração do sistema. Desta forma o conversor permite a regeneração durante este instante, como já havia acontecido na simulação.

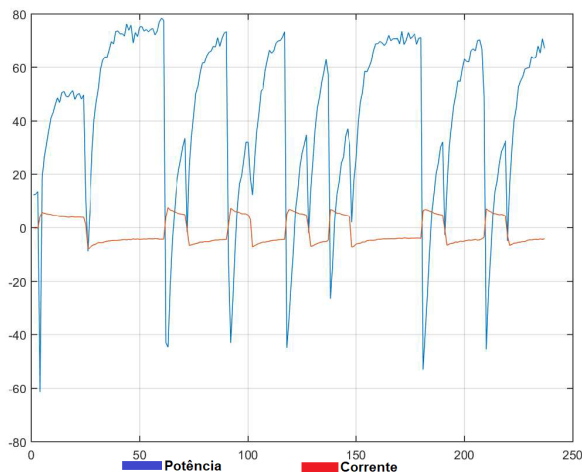


Figura 24. Variáveis na frenagem regenerativa - Potência(Azul) e Corrente (Vermelha) - Fonte: O Autor

O gráfico da figura 25, apresenta a corrente e a tensão da armadura, durante alguns ciclos de aceleração e desaceleração. Nos intervalos de tempo em que a tensão da armadura é positiva e a corrente negativa, a potência se torna negativa e retorna para a rede elétrica. Isto vai ocorrer sempre que a corrente e a tensão da armadura estiverem com sinais opostos. O conversor dual permite a regeneração nestas situações.

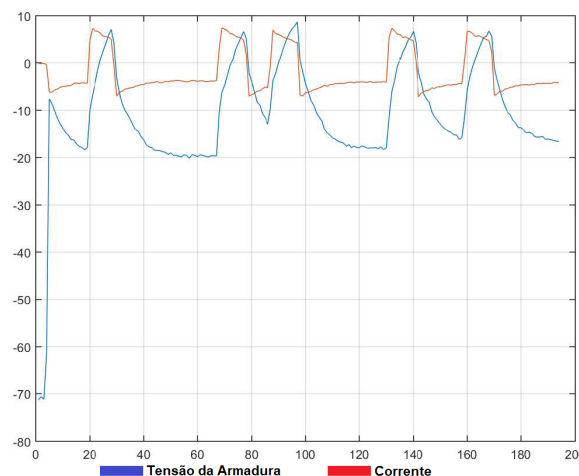


Figura 25. Variáveis na frenagem regenerativa - Tensão da armadura (Azul) e Corrente (Vermelha) - Fonte: O Autor

V. CONCLUSÃO

Na etapa de elaboração do TFC I, foi desenvolvido o Conversor *Dual* com seu circuito de disparo de modo que o controle deste pudesse ser realizado em malha aberta, com o intuito de avaliar a operação do conversor *Dual* e da máquina CC. Após os testes em bancada, foi verificado que o conversor permitiu a operação da máquina CC nos quatro quadrantes.

No TFC II, foi desenvolvido a etapa de simulação onde foi possível verificar o comportamento de vários parâmetros antes mesmo do sistema físico ser implementado, dessa forma garantindo a viabilidade dos testes experimentais. Na etapa de montagem do protótipo mecânico foi utilizado uma roda

de bicicleta acoplada ao eixo do motor CC visando alcançar um momento de inércia maior, e estendendo o tempo entre a frenagem e a inversão do sentido de rotação do eixo. A variação do ângulo de disparo ocorreu através de uma rampa aplicada através da lógica de programação desenvolvida no CLP, permitindo a uniformidade na operação e nos resultados. O sensor de corrente implementado e o Arduíno UNO utilizado para monitorar a tensão, em comunicação com o *software* Matlab possibilitou acompanhar o comportamento das variáveis em tempo real.

Através da comparação entre os resultados de simulação e experimentais foi possível observar que o sistema, embora em malha aberta, apresentou desempenho satisfatório frente a proposta inicial de recuperar a potência gerada nos instantes de frenagem, entretanto, no cenário da simulação houve regeneração também em instantes de aceleração, o que não chegou a ocorrer durante a execução experimental. Para projetos futuros uma sugestão seria o aprimoramento do controle do sistema através da implementação da lógica *Fuzzy* ou Inteligência Artificial, o que otimizaria ao máximo o aproveitamento energético da Frenagem Regenerativa.

REFERÊNCIAS

- [1] ALMEIDA, JOSÉ LUIZ ANTUNES DE. ELETRÔNICA INDUSTRIAL, ÉRICA LTDA, 1986
- [2] DELGADO, Adriana Cáceres. Algoritmo para Frenagem Regenerativa de uma Máquina Síncrona de Imã Permanente. Orientador: Niederauer Mastelari. 2010. 98 p. Tese (Mestrado) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, [S. l.], 2010.
- [3] FLINDERS, F.; MATHEW, R.; OGHANNA, W. Energy savings through regenerative braking using retrofit converters. Railroad Conference, 1995., Proceedings of the 1995 IEEE/ASME Joint, Baltimore, MD, p. 55 – 61, 1995.
- [4] RASHID, MUHAMMAD H. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA: DISPOSITIVOS, CIRCUITOS E APLICAÇÕES, EDITORA PEARSON, SÃO PAULO – SP, 2014
- [5] SEN, P. Principles of Electric Machines and Power Electronics. 2. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 1997. 615 p.
- [6] UMANS, STEPHEN D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley: Tradução: Anatólio Laschuk. – 7. ed. – Porto Alegre : AMGH, 2014.
- [7] MATTEDE, Henrique. Motor de corrente contínua, características e aplicações!: Motor de corrente contínua: O que é?. In: MATTEDE, Henrique. Motor de corrente contínua: O que é?. [S. l.], 20 jan. 2021. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/motor-de-corrente-continua-caracteristicas-e-aplicacoes/>. Acesso em: 1 jun. 2022.
- [8] AHMED, Ashfaq. Eletrônica de Potência. 1. ed. [S. l.]: Pearson, 1998.
- [9] ALMEIDA, José Luiz. Dispositivos Semicondutores Tiristores - Controle de Potência em CC e CA. 13. ed. rev. [S. l.]: Saraiva, 2018.
- [10] VOLPIANO, Sérgio. Eletrônica de potência. [S. l.]: SENAI-SP, 2018. 292 p.

Apêndice A

CI TCA-785

O Circuito integrado TCA 785 fabricado pela Siemens® é projetado para fazer o controle de tiristores. Os pulsos podem ser deslocados em ângulos de fase de 0 a 180° o que garante uma faixa total de controle em conversores CA-CC controlados. A figura A - 1 apresenta o CI com encapsulamento em linha dupla (DIL). Este CI apresenta 16 pinos que serão descritos a seguir:

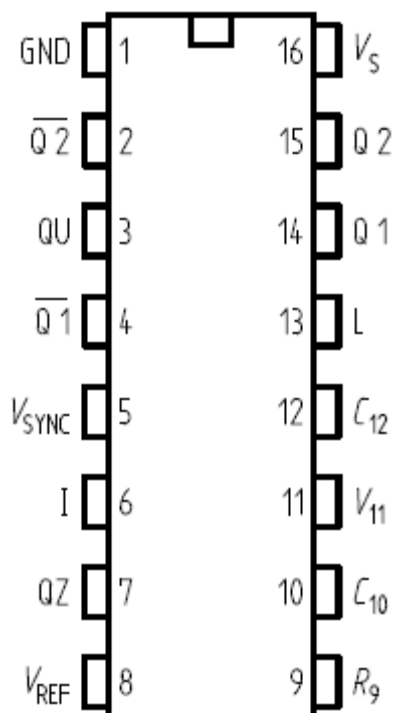


Figura A - 1- Pinagem do CI TCA-785 – Fonte: Datasheet TCA 785 Siemens

Principais pinos:

- (1) – Alimentação GND;
- (5) – Entrada de sincronismo com a rede elétrica;
- (6) – Entrada de Habilitação dos pulsos de saída;
- (9 – 10) – Controle da rampa interna;
- (11) – Entrada de controle do ângulo de disparo α ;
- (12) – Controle da largura dos pulsos de disparos de SCRs;
- (14) – Pulso sincronizado com o semiciclo negativo da rede elétrica;
- (15) – Pulso sincronizado com o semiciclo positivo da rede elétrica;
- (16) – Alimentação positiva VCC (8 a 18V)

A figura A - 2 apresenta o diagrama de blocos interno do CI TCA-785. O diagrama ilustra os principais blocos internos do CI composto por: Detetor de passagem por zero (DPZ); conversor cc-cc; registrador de sincronismo; monitor de descarga; comparador de controle; transistor de descarga; lógica.

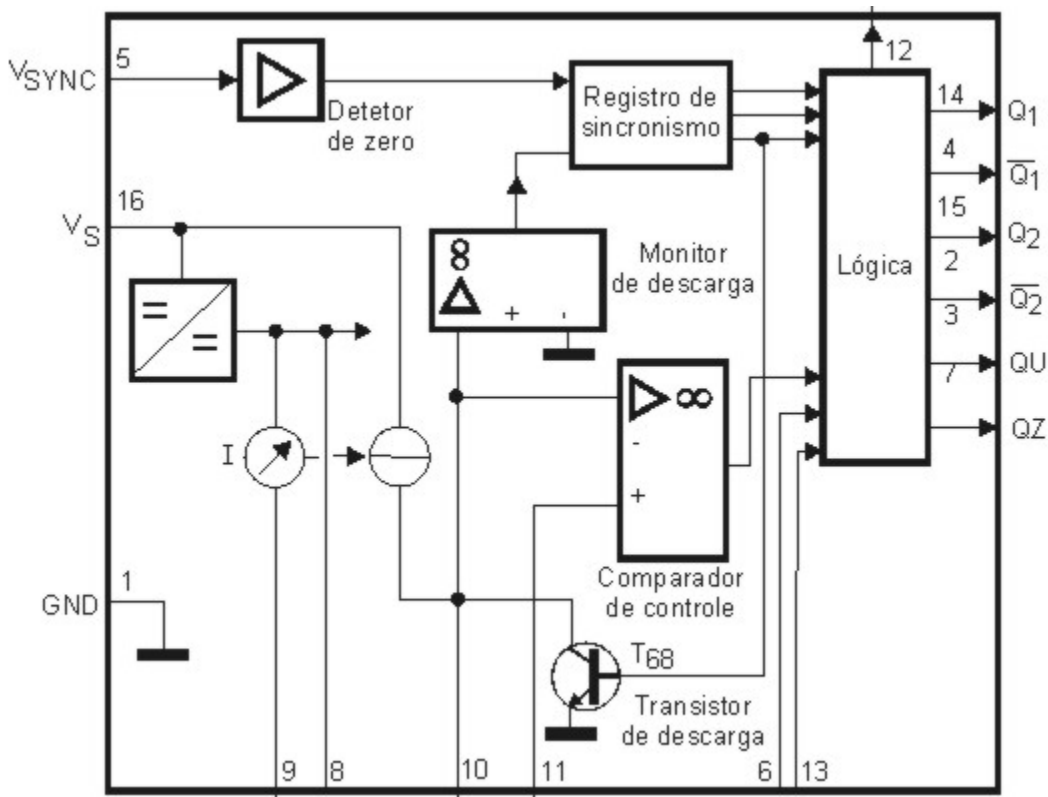


Figura A - 2- Diagrama de blocos do CI TCA – 785- Fonte: Datasheet TCA 785 Siemens

Princípio de funcionamento

A figura A - 3 apresenta o diagrama de ligações para a operação do CI, de modo que sirva para explicação do princípio de operação do mesmo.

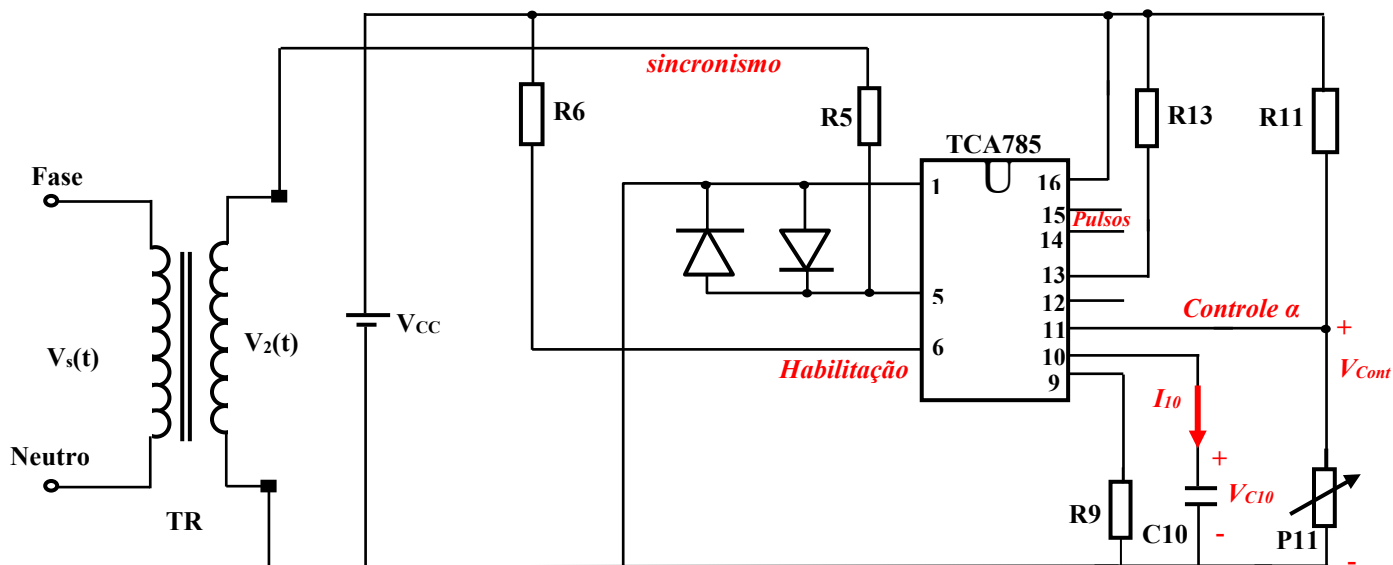


Figura A - 3 – Diagrama de ligações para operação do CI TCA-785- Fonte: O Autor

Uma amostra da tensão da rede elétrica é levada ao pino 5 de sincronismo, através do transformador TR. Assim o detector de passagem por zero (DPZ) vai gerar um pulso todas as vezes que a rede passa por zero. Este pulso é enviado ao registrador de sincronismo. No pino 10 tem-se uma fonte de corrente controlada pela resistência R9. Esta corrente constante é injetada no capacitor C10, no qual vai surgir uma tensão em rampa sincronizada como semiciclo positivo e negativo da rede. Esta rampa é controlada pelo registrador de sincronismo. A tensão da rampa é comparada com a tensão de controle aplicada no pino 11, no comparador de controle. Quando esta tensão é igual a rampa, um pulso é enviado para o pino 15, que está sincronizado com o semiciclo positivo e um para o pino 14, sincronizado com o semiciclo negativo.

A figura A - 4 ilustra as principais formas de ondas no circuito.

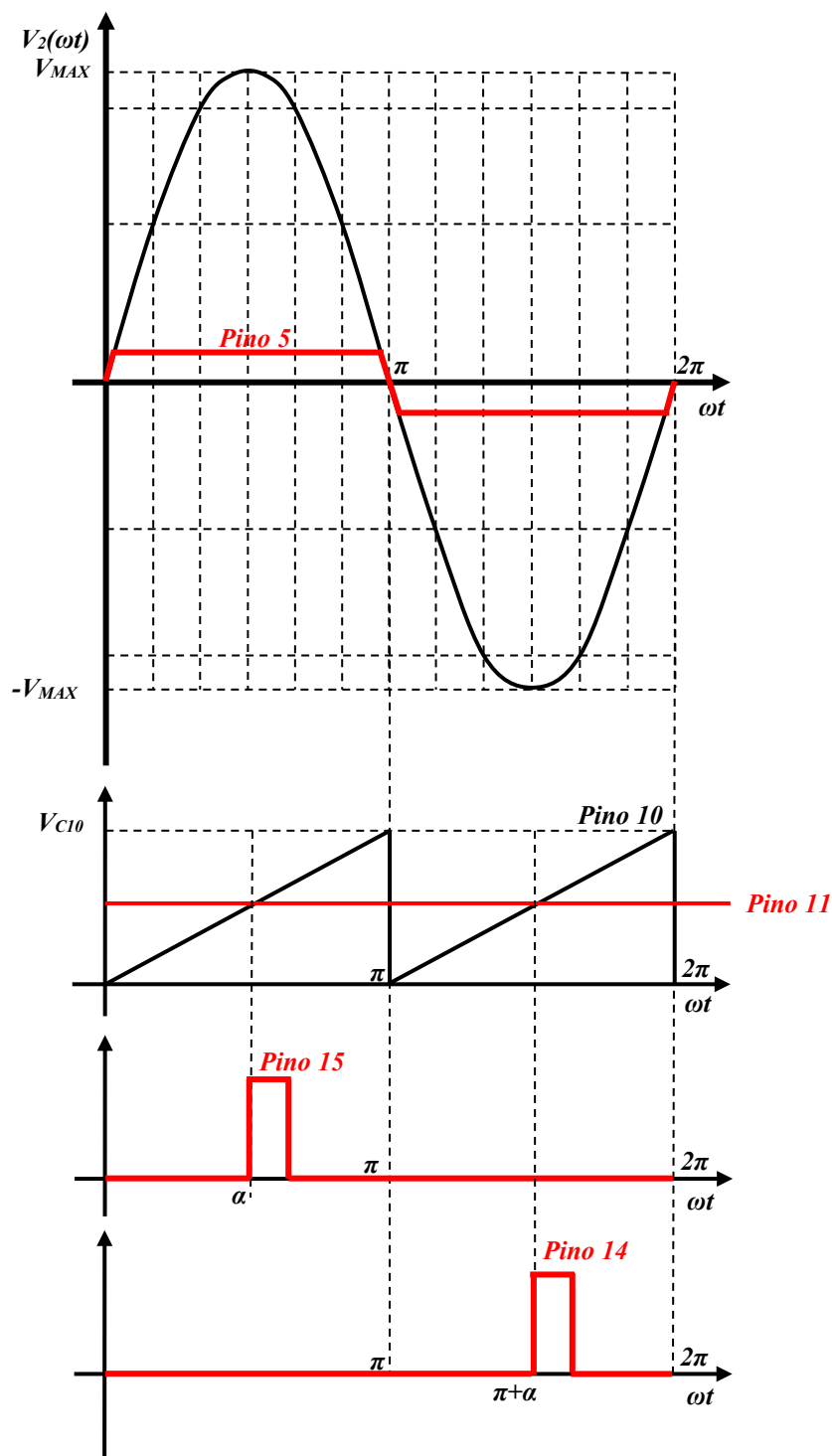


Figura A – 4 - Formas de ondas de tensões no CI TCA-785- Fonte: O Autor

Análise matemática

A tensão no capacitor C10 é dada pela equação 1.

$$V_{C10} = \frac{1}{C_{10}} \int I_{10} \cdot dt \quad (1)$$

Como a corrente I_{10} é constante, a tensão no capacitor é reduzida a equação 2.

$$V_{C10} = \frac{I_{10}}{C_{10}} \cdot t \quad (2)$$

Esta tensão é uma reta que dará origem a rampa sincronizada com os semiciclos positivo e negativo.

Na metade do período da rede elétrica ($t = T/2$), a tensão no capacitor atinge o valor máximo (V_{Cmax}). Assim, a tensão máxima no capacitor é a indicada na equação 3.

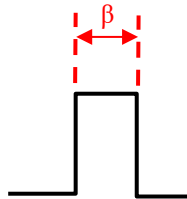
$$V_{Cmax} = \frac{I_{10}}{C_{10}} \cdot (T/2) \quad (3)$$

A corrente I_{10} deverá estar na faixa de 10 μ A a 1000 μ A (ALMEIDA – 1986), desta forma a deformação na rampa será mínima. Esta corrente será dada pela equação 4.

$$I_{10} = \frac{1,1,3,1}{R_9} = \frac{3,41}{R_9} \quad (4)$$

Desta forma, o ajuste correto de R_9 , fornecerá a corrente dentro da faixa mencionada e fixará o valor da tensão máxima da rampa no valor determinado pelo projetista. Lembrando que o valor máximo da tensão da rampa vai determinar a faixa de tensão de controle do ângulo α , no pino 11.

A corrente máxima nos pinos 14 e 15 é 250mA (ALMEIDA - 1996). Para valores maiores é necessário utilizar amplificadores. A largura dos pulsos nos pinos 14 e 15 são controladas pelo pino 12, da seguinte forma:



- Pino 12 aberto $\gg \beta = 30\mu s$;
- Capacitor C_{12} no pino 12 $\gg \beta = 620 \cdot C_{12(nF)}[\mu s]$;
- Pino 12 aterrado $\gg \beta = 180^\circ - \alpha$

Apêndice B

Sensor de Tensão e Velocidade da Armadura

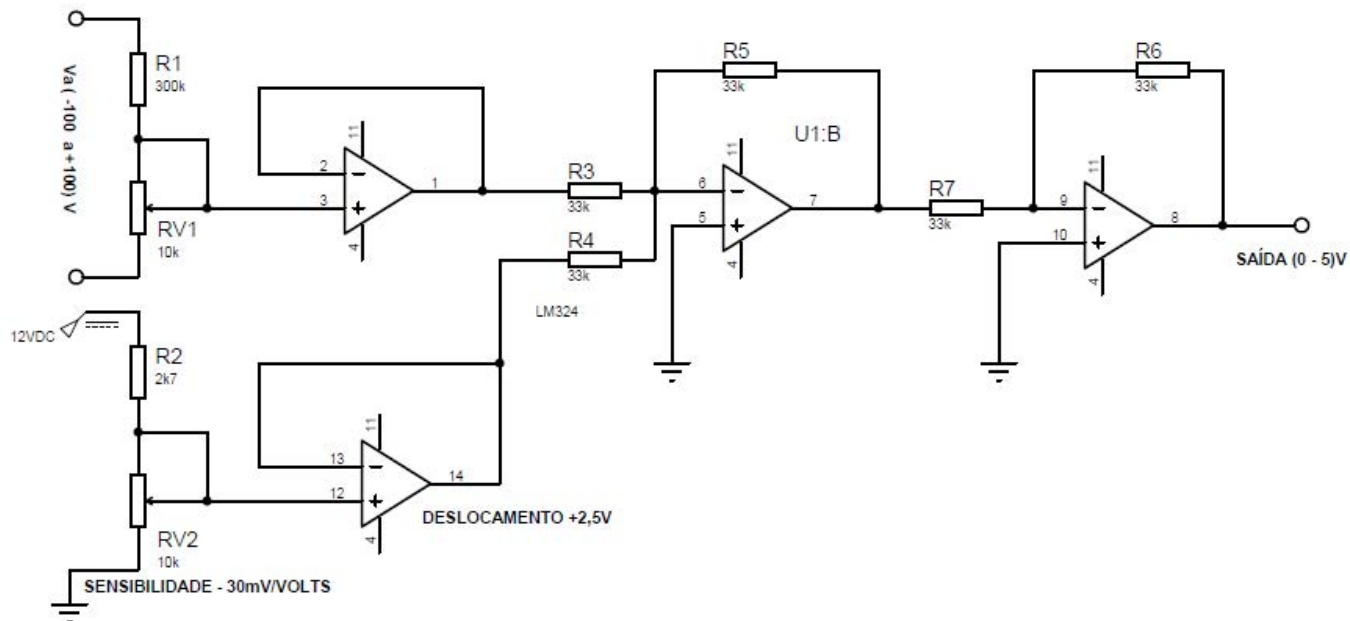


Figura B – 1 - Sensor de Tensão e Velocidade da Armadura - Fonte: O Autor

Sensor de Corrente da Armadura

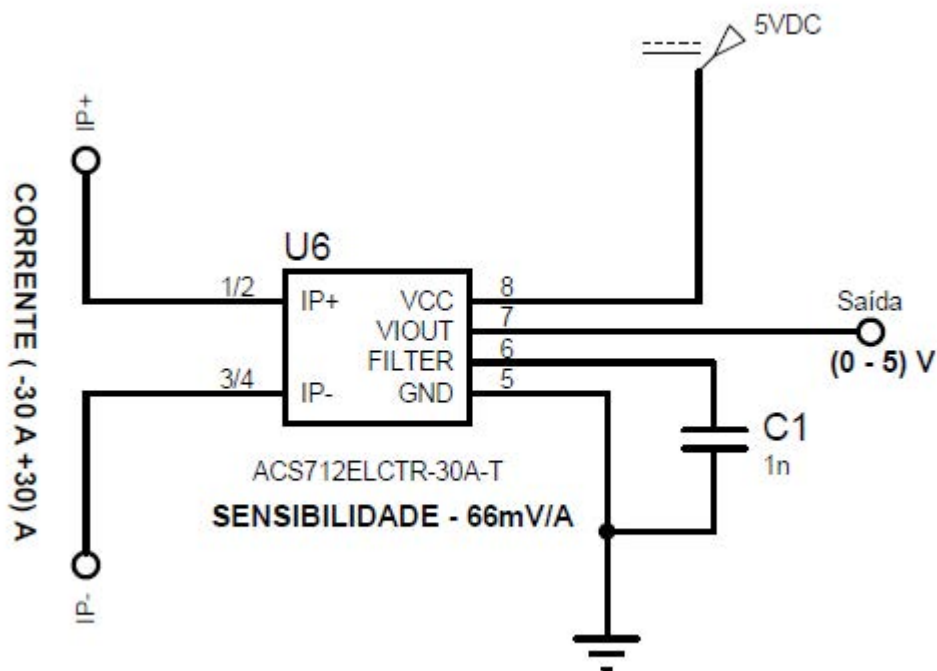


Figura B – 2 - Sensor de Corrente da Armadura - Fonte: O Autor

Apêndice C

Programa do CLP Expert BF Atos - Schneider

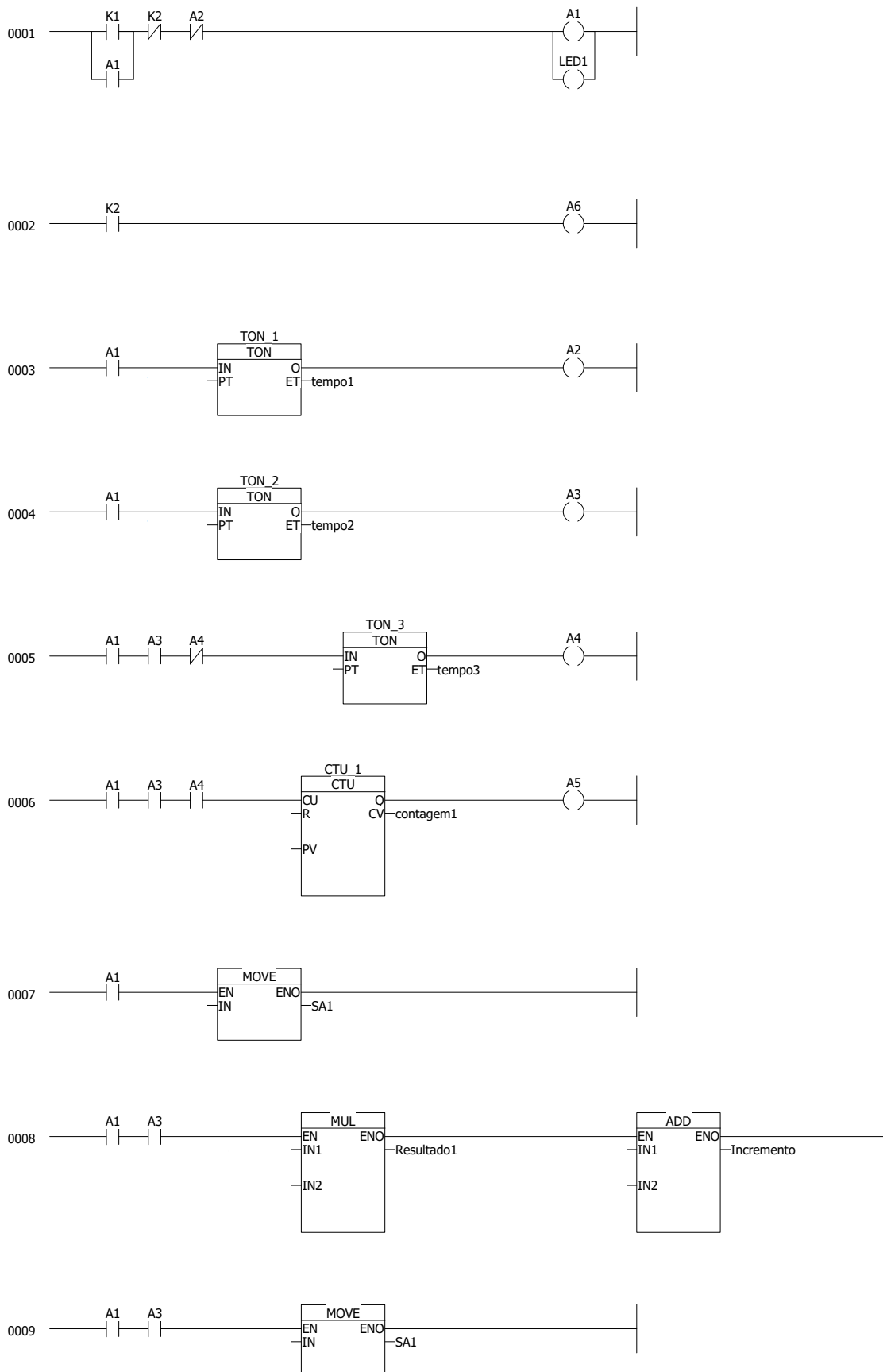


Figura C – 1 - Programação em linguagem Ladder para o CLP - Fonte: O Autor

Programa Aquisição de Dados - Matlab Arduino

```

a = arduino();
clear a;
a = arduino('COM4', 'Uno');
i = 1;
while i < 400
    leituraA0 = 0;
    leituraA1 = 0;
    leituraA2 = 0;
    for k=1:10
        leituraA0 = readVoltage(a, 'A0') + leituraA0;
        leituraA1 = readVoltage(a, 'A3') + leituraA1;
        %leituraA2 = readVoltage(a, 'A2') + leituraA2;
    end
    leitura1=leituraA0/10;
    leitura2=leituraA1/10;
    %leitura3=leituraA2;
    corrente = (((leitura1)*1000.0 - 2500.0)/66.0);
    Ia(i) = corrente;
    LeituraVa = (((leitura2)*1000.0 - 2500.0)/30.0);
    Va(i) = LeituraVa;
    %Velocidade = leitura3;
    % Vel(i) = Velocidade;
    pot = (Va.*Ia);
    time(i) = i;
    %plot(time,Ia,time,Va,time,pot)
    plot(time,Va,time,Ia)
    grid on
    %axis([0 400 -40 40])
    i = i + 1;
    pause(0.0001);
end
clear all
clc

```

RESOLUÇÃO n° 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante **FILIPPE LACERDA LEMOS** do Curso de ENGENHARIA ELÉTRICA, matrícula 2021.10038.0012-9, telefone: (62) 998251848 e-mail filipeeng@gmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei n° 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **FRENAGEM REGENERATIVA EM MÁQUINAS CC**, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 24 de Junho de 2022.

Assinatura do autor: _____ *Filipe Lacerda Lemos*

Nome completo do autor: **FILIPPE LACERDA LEMOS**

Assinatura do professor-orientador: _____ *Carlos Alberto Vasconcelos Bezerra*

Nome completo do professor-orientador: **CARLOS ALBERTO VASCONCELOS BEZERRA**