

MEC-SETEC

INSTITUTO FEDERAL MINAS GERAIS – Campus Formiga

Curso de Engenharia Elétrica

CLAUDIA DE FARIA LEAL

ESTUDO E PARAMETRIZAÇÃO DE UM CONVERSOR CA/CC
PARA O CONTROLE DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DE
MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

FORMIGA – MG

2016

CLAUDIA DE FARIA LEAL

ESTUDO E PARAMETRIZAÇÃO DE UM CONVERSOR CA/CC
PARA O CONTROLE DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DE
MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Ciências e Tecnologia de Minas Gerais Campus Formiga, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. José Antônio Moreira de Rezende.

Coorientador: Prof. Dr. Renan Souza Moura.

FORMIGA – MG

2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus e à minha família, pois sem eles nada seria possível.

Aos professores Renan Souza Moura e José Antônio Moreira de Rezende, pela orientação, ensinamentos, e ajuda no desenvolvimento do trabalho.

Ao técnico do laboratório de máquinas Allyson Fernandes Silva pela ajuda e disponibilidade, e também ao professor Marco Antônio Pereira Silva pelos conselhos.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise teórica e prática do conversor estático CA/CC da Weg CTW900 no controle da velocidade de rotação de motores de corrente contínua. Este conversor, que recentemente foi adquirido pelo laboratório de máquinas elétricas do IFMG campus Formiga, possui um kit de controle de velocidade de motores CC. Entretanto, nem todos os equipamentos deste kit foram adquiridos, o que inibiu o seu uso por meio dos esquemas de ligação de força e controle sugeridos nos catálogos do fabricante. Para contornar esta situação, foram desenvolvidos novos diagramas elétricos que permitam a utilização do CTW900 com os dispositivos disponíveis no laboratório de máquinas elétricas do campus. Experimentos práticos, configurações dos parâmetros do equipamento e a demonstração dos resultados obtidos por meio dos testes realizados utilizando os novos diagramas desenvolvidos, serão demonstrados e analisados neste trabalho.

Palavras-chaves: conversor CA/CC, controle de velocidade, motor CC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-	Partes construtivas motor CC	17
Figura 2.2-	Forças que atuam em uma espira imersa num campo magnético, percorrida pela corrente de armadura	18
Figura 2.3-	Esquema interno de um motor elétrico de corrente contínua	18
Figura 2.4-	Circuito de representação do motor CC	19
Figura 2.5-	Motor com excitação série	21
Figura 2.6-	Motor com excitação em paralelo	21
Figura 2.7-	Motor com excitação composta	22
Figura 2.8-	Modelo motor CC com excitação independente	23
Figura 2.9-	Conjugado médio de aceleração	24
Figura 2.10-	Controle pela armadura	27
Figura 2.11-	Controle pelo campo	28
Figura 2.12-	Controle pela adição de um reostato em série com a armadura	28
Figura 2.13-	Controle através do campo e da armadura	29
Figura 2.14-	Curvas de velocidade em função do torque para motores de corrente contínua..	29
Figura 2.15-	Regiões de acionamento de motores CC	30
Figura 3.1-	Conversor CA/CC CTW900.....	31
Figura 3.2-	Curva torque x velocidade (quadrantes de operação)	31
Figura 3.3-	Pontes retificadoras controladas	32
Figura 3.4-	Sistema básico de controle de velocidade de um motor CC utilizado por um conversor CA/CC	33
Figura 3.5-	Acionamento de motor CC com conversor dual	34
Figura 3.6-	Retificador monofásico controlado em ponte	36
Figura 3.7-	Sistema de controle em malha fechada	36
Figura 3.8-	Sistema de malha fechada com realimentação por taco-gerador	37
Figura 3.9-	Sistema de malha fechada com realimentação por encoder	37
Figura 3.10-	Sistema de malha fechada com realimentação por fcem	38
Figura 3.11-	Teclas IHM	39
Figura 3.12-	Tela no modo de monitoração	40
Figura 3.13-	Bloco-diagrama do conversor CA/CC CTW900	42

Figura 3.14- Conectores disponíveis na bancada didática do CTW900	43
Figura 3.15- Conexões de força sugeridas pelo fabricante	45
Figura 3.16- Energização do CTW900	47
Figura 3.17- Conexões de força do novo diagrama elétrico	48
Figura 4.1- Ajuste de comunicação entre o drive e o PC	51
Figura 4.2- Obtendo versão do Driver	51
Figura 4.3- Criação e abertura de projetos	52
Figura 4.4- Parametrização do drive	52
Figura 4.5- Criação novo arquivo de parâmetros	53
Figura 4.6- Editor de parâmetros	53
Figura 4.7- Grupo de ícones de monitoramento	54
Figura 4.8- Ícone função <i>trace</i>	55
Figura 4.9- Botão para iniciar configuração da função <i>trace</i>	57
Figura 4.10- Janela de configuração da função <i>trace</i>	58
Figura 4.11- Aquisição dos dados	58
Figura 5.1- Conexões em XC1 para acionamento 1	62
Figura 5.2- Conexões em XC1 para acionamento 2	64
Figura 5.3- Conexões em XC1 para acionamento 3	65
Figura 5.4- Conexões em XC1 para acionamento 4	67
Figura 5.5- Conexões em XC1 para acionamento <i>multispeed</i>	68
Figura 5.6- Rampa de aceleração e desaceleração para velocidade nominal de 1800 rpm ...	70
Figura 5.7- Rampa de aceleração e desaceleração para velocidade nominal de 900 rpm	71
Figura 5.8- Sinais de saída teste 1 para: (a) velocidade atual; (b) referência total; (c) corrente de armadura	73
Figura 5.9- Sinais de saída teste 2 para: (a) velocidade atual; (b) referência total; (c) corrente de armadura; (d) tensão de armadura	75
Figura 5.10- Sinais de saída teste 3 para: (a) velocidade atual; (b) tensão de armadura; (c) referência total; (d) corrente de armadura	77
Figura 5.11- Sinais de saída teste 4 para: (a) velocidade atual; (b) tensão de armadura; (c) referência total; (d) corrente de armadura	79
Figura 5.12- Conexões em XC1 teste 5	82
Figura 5.13- Sinais de saída teste 5 para: (a) velocidade atual; (b) tensão de armadura; (c) referência total; (d) corrente de armadura	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Funções das teclas da IHM.....	40
Tabela 3.2- Função dos itens da tela da IHM no modo de monitoração	41
Tabela 3.3- Função dos conectores de força.....	43
Tabela 3.4- Função dos conectores em XC1	44
Tabela 4.1- Opções do parâmetro P0550.....	56
Tabela 4.2- Opções do parâmetro P0552.....	56
Tabela 5.1- Referências Multispeed selecionadas conforme estado das DIs	69
Tabela 5.2- Configuração dos Parâmetros teste 1	72
Tabela 5.3- Programação dos parâmetros teste 2	74
Tabela 5.4- Programação dos parâmetros teste 3	76
Tabela 5.5- Programação dos parâmetros teste 4	78
Tabela 5.6- Programação entradas digitais teste 5	80
Tabela 5.7- Programação dos parâmetros função trace teste 5.....	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Considerações Iniciais	10
1.2	Justificativa.....	12
1.3	Objetivos	12
1.3.1	Objetivos Gerais	12
1.3.2	Objetivos Específicos.....	13
1.4	Metodologia.....	13
1.5	Estrutura do Trabalho	13
2	CONCEITOS BÁSICOS DE MOTORES CC	16
2.1	Motores de Corrente Contínua.....	16
2.1.1	Aspectos Construtivos	16
2.1.2	Princípio de Funcionamento.....	17
2.1.3	Equações Básicas dos Motores de Corrente Contínua.....	19
2.2	Classificação dos Motores de Corrente Contínua.....	20
2.2.1	Motores CC Auto excitados	20
2.2.1.1	Motor com Excitação Série	21
2.2.1.2	Motor com Excitação em Paralelo	21
2.2.1.3	Motor com Excitação Composta	22
2.2.2	Motores CC com Excitação Independente	22
2.3	Tempo de Aceleração e Tempo de Desaceleração.....	23
2.3.1	Tempo de Aceleração ou Tempo de Partida	23
2.3.2	Tempo de Desaceleração ou Tempo de Frenagem	26
2.4	Controle de Velocidade de Motores de Corrente Contínua.....	26
2.5	Curva torque x velocidade	29
3	CONVERTOR CA/CC CTW900.....	31
3.1	Conversores CA/CC	32
3.2	Kit de Controle de Velocidade de Motores CC – CTW900	38
3.3	Sobre o CTW900.....	41
3.4	Conectores	42

3.5	Esquemas de Ligação.....	44
4	SUPERDRIVE G2	50
5	TESTES PRÁTICOS.....	60
5.1	Acionamentos Típicos.....	60
5.1.1	Acionamento 1	61
5.1.2	Acionamento 2	62
5.1.3	Acionamento 3	64
5.1.4	Acionamento 4	65
5.2	Função <i>Multispeed</i>	67
5.3	Funções de Rampa	69
5.4	Testes Práticos Utilizando o SuperDrive G2	72
5.4.1	Teste 1	72
5.4.2	Teste 2.....	74
5.4.3	Teste 3.....	76
5.4.4	Teste 4.....	78
5.4.5	Teste 5.....	79
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
	ANEXO I – Diagramas de montagem sugeridos pelo fabricante	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O acionamento de máquinas e equipamentos mecânicos por motores elétricos é um assunto de extraordinária importância econômica. No campo dos acionamentos industriais, avalia-se que de 70 a 80% da energia elétrica consumida pelo conjunto de todas as indústrias sejam transformadas em energia mecânica através de motores elétricos. (1)

De acordo com (1), o motor de indução é o modelo de motor mais usado na indústria. Este fato deve-se a maioria dos sistemas atuais de distribuição de energia elétrica serem de corrente alternada. Comparado com o motor de corrente contínua, o motor de indução tem como vantagem a sua simplicidade, que se traduz em baixo custo e máxima eficácia com manutenção mínima. O rendimento é elevado para média e máxima carga, e pode-se assegurar um bom fator de potência com uma seleção correta.

Apesar dos motores de corrente alternada serem mais utilizados em aplicações industriais, em algumas situações, ainda opta-se pela utilização dos motores CC. No entanto, seu uso é restrito a casos especiais, onde o uso do mesmo compensa o custo elevado da sua instalação. Segundo Heckler (2), em aplicações onde se necessita manter o torque, mesmo com variação da carga e da velocidade do motor, os motores CC ainda são a melhor escolha como por exemplo em: máquinas de papel, bobinadeiras e desbobinadeiras, laminadores, máquinas de impressão, extrusoras, prensas, elevadores, etc.

De acordo com Braga (3), o motor de corrente contínua possui, sem dúvida, a grande habilidade de poder controlar torque e velocidade, dentro de uma longa faixa de valores. São dispositivos que operam aproveitando as forças de atração e repulsão geradas por eletroímãs e ímãs permanentes. São compostos por uma parte girante, chamada rotor (armadura), e uma parte fixa, chamada estator (campo).

Nos motores CC a armadura está localizada no rotor e é constituída por um enrolamento formando uma espécie de eletroímã. Quando uma corrente elétrica passa por esse eletroímã, é criado um campo magnético na armadura, que atrai e repele os ímãs do estator, onde ficam localizados os enrolamentos de campo, responsáveis por criar o campo magnético fixo. Então, a armadura gira e, para que possa continuar se movimentando, é necessário inverter os polos do eletroímã. São as escovas que cuidam dessa mudança de polaridade, fazendo contato com

dois eletrodos giratórios conectados à armadura, invertendo a polaridade magnética do eletroímã quando ele gira. (4)

Como mostra Garcia (5), por muito tempo, motores CC e outras cargas que exigiam alimentação em corrente contínua obtinham energia de grupos motor-gerador específicos para tal finalidade. O acoplamento mecânico entre os sistemas alternado e contínuo transmitia potência entre eles e ao mesmo tempo isolava-os eletricamente. Entretanto, tais conversores eram, quase sempre, fisicamente avantajados apresentando, frequentemente, difícil manutenção.

Cerca de 80 anos atrás, surgiu o conversor estático de potência, ou retificador, que passou a ter aplicações industriais imediatas por ser mais eficiente do que os tradicionais conversores constituídos por grupos motor-gerador e por exigir menores cuidados de manutenção. A grande utilização dos conversores estáticos de potência entre 1930 e 1970 ocorreu principalmente com finalidades eletroquímicas e de transmissão de energia elétrica em forma de corrente contínua. (5)

A partir de 1965, com a introdução de conversores de potência a semicondutores, de baixo custo e alta eficiência, o uso destes equipamentos passou a ser difundido no setor industrial. Todavia, o grande impulso na utilização destes equipamentos se deu a partir de 1970, com o aparecimento do tiristor, que substituindo as tradicionais válvulas a mercúrio e os diodos, proporcionou o aparecimento dos conversores controlados de tamanho reduzido. (5)

Inicialmente a potência de cada tiristor constituía-se numa limitação na potência total dos conversores, uma vez que a baixa potência de cada unidade implicava num excessivo número de tiristores para formar cada válvula. Atualmente, no entanto, os conversores não têm praticamente limitações de potência, devido ao considerável aumento na potência dos tiristores e ainda a grande evolução das novas chaves estáticas (GTO's e IGBT's). Com isso garante-se uma extensa diversidade de aplicações. Na indústria, em situações onde se deseja tanto alimentar o motor de corrente contínua quanto se fazer o controle da velocidade de rotação do mesmo, é muito comum a utilização de conversores estáticos de potência CA/CC. (5)

De acordo com Fuentes (6), esses conversores CA/CC são constituídos basicamente por duas pontes retificadoras controladas, que convertem a corrente alternada fornecida pela rede de energia elétrica em corrente contínua. O valor médio da tensão contínua retificada deve variar de um valor mínimo até um valor máximo conforme a necessidade do circuito de

controle. O campo e a armadura do motor CC são alimentados independentemente pelos circuitos retificadores possibilitando a ação de controle sobre a rotação e o torque do motor.

Os sistemas de controle de velocidade que utilizam motores CC e conversores CA/CC, reúnem extensas faixas de variação de tensão, robustez e precisão a economia de energia, garantindo um excelente desempenho e flexibilidade em diversas situações. Com base nisso, o laboratório de máquinas elétricas do IFMG campus Formiga fez, recentemente, a aquisição de um kit de controle de velocidade de motores CC da Weg, que contém um conversor CA/CC.

Para garantir uma alta precisão do kit, é necessário o uso de um sensor de velocidade, como um taco-gerador ou um encoder no eixo do motor, para que a realimentação de velocidade seja realizada. No entanto, durante o processo de compra, verificou-se que alguns componentes não foram inclusos, dentre eles o taco-gerador e o encoder. Tal situação impediria a princípio a utilização do kit. Mas ao longo do trabalho propôs-se uma nova forma de acionamento do motor CC utilizando o kit, bem como os dispositivos disponíveis no Laboratório de Máquinas Elétricas do Instituto.

1.2 Justificativa

Como não foi comprado todos os equipamentos do kit, buscou-se uma maneira de utilizar o conversor CA/CC com os recursos disponíveis. Para que isso fosse possível, desencadeou-se a necessidade de investigar o princípio de funcionamento do mesmo, assim como também, a busca por informações a respeito dos tipos de acionamento e controle de velocidade de um motor CC utilizando o CTW900, bem como o modo de configuração dos parâmetros do equipamento.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho foi descobrir como se fazer o acionamento e o controle da velocidade de um motor CC utilizando o kit de controle de velocidade da Weg - CTW900, adquirido pelo Laboratório de Máquinas do IFMG Campus Formiga.

1.3.2 Objetivos Específicos

Conhecer as principais funções do conversor CA/CC, e assimilar como é realizada a configuração dos parâmetros do equipamento.

1.4 Metodologia

A princípio, os catálogos e manuais foram analisados para conhecimento do funcionamento do kit de controle de velocidade de motores CC.

Em seguida, para se fazer o acionamento e o controle da velocidade do motor CC, efetuou-se a montagem de acordo com os diagramas elétricos de força e controle presentes nos catálogos do kit. Como o sistema de controle do CTW900 é em malha fechada, os diagramas sugerem que a realimentação de velocidade seja feita por taco-gerador ou encoder. No entanto, devido à falta de equipamentos, não foi possível acionar o motor CC com essa configuração.

Neste momento foi necessário que se pesquisasse outras maneiras de se acionar e controlar a velocidade de rotação da máquina utilizando o conversor CA/CC e os equipamentos disponíveis no laboratório. Verificou-se que a realimentação de velocidade também poderia ser feita com a força contra eletromotriz (f_{cem}) gerada na armadura.

Ao se fazer a realimentação de velocidade com a força contra eletromotriz, observou-se que, com essa configuração, não era possível acionar o motor CC utilizando os diagramas sugeridos nos catálogos. Assim sendo, desenvolveu-se um novo diagrama de montagem, e realizou-se uma série de experimentos práticos. Nestes testes, o diagrama de força teve o mesmo arranjo em todos os testes feitos. Já o diagrama de controle e a configuração dos parâmetros do conversor, foram efetuados com base nos acionamentos típicos presentes no “Manual do Usuário” do CTW900.

Constatou-se também que o kit CTW900 possui um *software* de programação e monitoração gratuito, o SuperDrive G2, isso permitiu que se iniciassem pesquisas e testes práticos para a aquisição de dados do motor via cabo USB.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, elaborados da seguinte forma:

Capítulo 1- Introdução: apresentação do assunto, descrevendo-se a justificativa, os objetivos, e a metodologia utilizada para a elaboração do trabalho.

Capítulo 2- Conceitos Básicos de Motores CC: constituído por uma síntese dos conceitos básicos dos motores CC, envolvendo os seus aspectos construtivos, princípio de funcionamento, equações básicas, e classificação quanto ao tipo de excitação dos enrolamentos da armadura e do campo. É demonstrado, inclusive, o comportamento do motor CC durante os seus períodos de partida e frenagem (tempo de aceleração/partida e tempo de desaceleração/frenagem). Adicionalmente são descritas as formas de se realizar o controle da velocidade de rotação, além da descrição dos quadrantes de operação do motor CC na curva torque x velocidade.

Capítulo 3- Conversor CA/CC CTW900: neste capítulo, primeiramente, é realizada uma descrição sobre o princípio de funcionamento dos conversores CA/CC e, posteriormente, é feito um relato sobre os componentes do kit de controle de velocidade adquirido pelo laboratório de máquinas elétricas, assim como também, uma descrição das funções da HMI do equipamento. É feita uma apresentação do bloco-diagrama e dos conectores presentes na bancada didática do CTW900. Em seguida, são apresentados os esquemas de ligação das conexões de força e controle sugeridas nos catálogos do equipamento, bem como o novo esquema de ligação proposto.

Capítulo 4- SuperDrive G2: neste capítulo, são apresentadas as principais características e funções disponíveis no *software* de programação e monitoração SuperDrive G2. É feita também uma descrição da forma de manuseio deste *software*.

Capítulo 5- Testes Práticos: é feita uma descrição dos experimentos realizados para a observação do modo de operação do CTW900. Os primeiros testes foram feitos com base nos acionamentos típicos presentes no “Manual do Usuário” do conversor. Outros foram desenvolvidos utilizando-se as funções *multispeed* e de rampa disponíveis no equipamento. Os demais foram realizados utilizando o *software* SuperDrive G2.

Capítulo 6- Considerações Finais: é analisado se os objetivos propostos foram alcançados, bem como as vantagens e desvantagens do controle da velocidade de rotação do motor CC proposta por este trabalho. Também é feita a sugestão de assuntos para trabalhos futuros.

Ao final encontram-se a bibliografia consultada e o Anexo I, o qual mostra os diagramas de montagem sugeridos pelo fabricante.

2 CONCEITOS BÁSICOS DE MOTORES CC

Neste capítulo, serão discutidos os conceitos básicos acerca dos motores de corrente contínua, que são importantes para a compreensão deste documento.

2.1 Motores de Corrente Contínua

De acordo com (7), os motores de corrente contínua, também conhecidos como motores CC, são dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica. Devido a sua versatilidade nas aplicações, possuem uma grande parcela no mercado de motores elétricos, destacando-se:

- Máquinas operatrizes em geral;
- Bombas a pistão;
- Guinchos e guindastes;
- Fornos, exaustores, separadores e esteiras para indústria cimenteira e outras.

2.1.1 Aspectos Construtivos

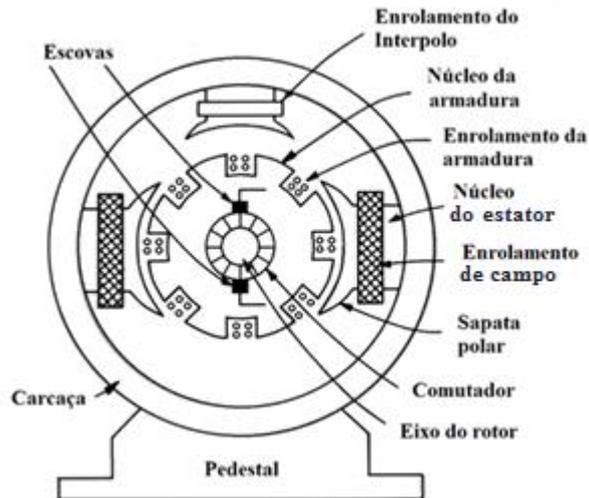
Os motores de corrente contínua são compostos basicamente de:

- Estator: este é o nome dado à parte fixa do motor, que pode conter um ou mais enrolamentos de polo, todos prontos para receber corrente contínua e produzir o campo magnético fixo. O enrolamento pode ser chamado de enrolamento de campo. (8)
- Armadura: é a parte móvel do motor, constituída por um rotor bobinado cujas bobinas também recebem corrente contínua e produzem campo magnético. (8)
- Comutador: garante que o sentido da corrente que circula nas bobinas da armadura seja sempre o mesmo, garantindo a repulsão contínua entre os campos do estator e do rotor, o que mantém o motor girando. (8)
- Escovas: são responsáveis pelo contato elétrico entre a parte fixa do motor e a parte girante. (8)

- Interpolos: sua finalidade é compensar o efeito da reação da armadura na região de comutação, evitando o deslocamento da linha neutra em carga, reduzindo a possibilidade de centelhamento. (9)

As partes construtivas de um motor CC podem ser observadas na Figura 2.1:

Figura 2.1- Partes construtivas motor CC



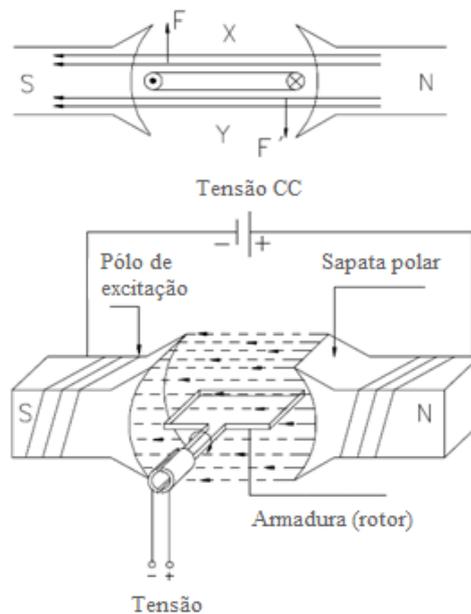
Fonte: KOSOW, 2005 (10)

2.1.2 Princípio de Funcionamento

O funcionamento de um motor de corrente contínua está baseado nas forças produzidas da interação entre o campo magnético e a corrente de armadura no rotor, que tendem a mover o condutor num sentido que depende do sentido do campo e da corrente na armadura. (9)

A Figura 2.2 mostra o sentido das forças que agem sobre uma espira. Sob a ação da força a espira irá se movimentar até a posição X-Y onde a força resultante é nula, não dando continuidade ao movimento. Torna-se então, necessário a inversão da corrente na espira para que se tenha um movimento contínuo. Este problema é resolvido utilizando um comutador de corrente. Este comutador possibilita a circulação de corrente alternada no rotor através de uma fonte CC. (9)

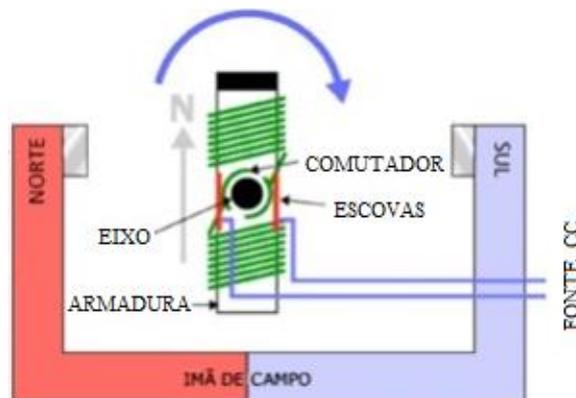
Figura 2.2- Forças que atuam em uma espira imersa num campo magnético, percorrida pela corrente de armadura.



Fonte: DT – 3: Características e especificações de motores de corrente contínua e conversores CA/CC, p. 12 (9)

Para se obter um conjugado constante durante todo um giro da armadura do motor utilizam-se várias espiras defasadas no espaço montadas sobre um tambor e conectadas ao comutador, como mostra a Figura 2.3. (9)

Figura 2.3 – Esquema interno de um motor elétrico de corrente contínua



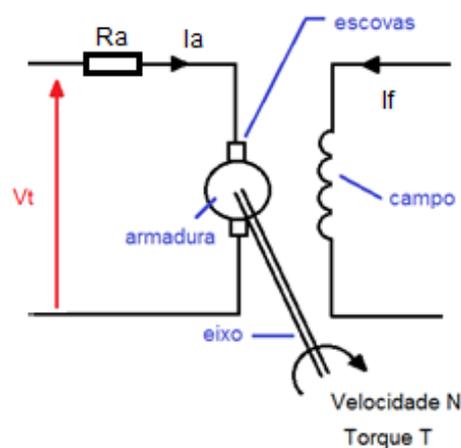
Fonte: CUNHA, 2009 (11)

Com o deslocamento dos condutores da armadura no campo surgem tensões induzidas (força contra eletromotriz - f_{cem}), atuando no sentido contrário ao da tensão aplicada. A soma das forças que atuam sobre os condutores do induzido cria o conjugado eletromagnético. (9)

2.1.3 Equações Básicas dos Motores de Corrente Contínua

O circuito de representação dos motores de corrente contínua é mostrado na Figura 2.4. Quando o motor gira, uma tensão interna f_{cem} (força contra eletromotriz) é gerada na armadura devido as bobinas desta cortarem as linhas de fluxo do campo magnético do enrolamento de campo. Nos terminais da armadura é aplicada uma tensão V_t fazendo o motor girar. Quando isso acontece, a força contra eletromotriz (f_{cem}) se opõe à tensão V_t , fazendo com que a corrente necessária para acelerar o motor seja reduzida. O torque de carga é responsável pelo nível de corrente na armadura. (12)

Figura 2.4- Circuito de representação do motor CC



Fonte: Elaborado pela autora

As equações básicas para um motor de corrente contínua são:

$$f_{cem} = V_t - I_a \cdot R_a \quad (2.1)$$

$$f_{cem} = K_1 \cdot N \cdot \varphi \quad (2.2)$$

$$T = K_2 \cdot I_a \cdot \varphi \quad (2.3)$$

$$\varphi = K_3 \cdot I_f \quad (2.4)$$

$$P_{mec} = f_{cem} \cdot I_a \quad (2.5)$$

Em que,

V_t - tensão aplicada aos terminais da armadura [V]

f_{cem} - força contra eletromotriz [V]

I_a - corrente de armadura [A]

R_a - resistência de armadura [Ω]

I_f - corrente de campo [A]

T - torque [N m]

N - velocidade [rad/s]

Φ - fluxo [Wb]

P_{mec} - Potência mecânica [W]

K_1, K_2, K_3 - constantes de proporcionalidade

Analisando a equação 2.1, observa-se que a força contra eletromotriz é a diferença entre a tensão aplicada nos terminais da armadura e o produto da corrente e da resistência da armadura. Na equação 2.2, nota-se que a f_{cem} é diretamente proporcional a velocidade de rotação e ao fluxo. Já o fluxo, como é mostrado na equação 2.4, será maior quanto maior for a corrente no enrolamento de campo. Pela equação 2.3, observe que, como seria de se esperar, o torque é diretamente proporcional ao fluxo e a corrente de armadura, pois maior será a força eletromagnética aplicada. Já a potência mecânica dos motores de corrente contínua (equação 2.5), será maior quanto maiores forem a força contra eletromotriz e a corrente de armadura.

Uma vez apresentadas as equações inerentes aos motores de corrente contínua, a próxima seção demonstrará a classificação dos motores CC de acordo com as formas de ligação que podem ser efetuadas com seus enrolamentos, série e shunt.

2.2 Classificação dos Motores de Corrente Contínua

A classificação dos motores CC é feita de acordo com a forma de excitação do enrolamento de campo e da armadura. Sendo assim, eles podem ser classificados como auto excitados, ou com excitação independente.

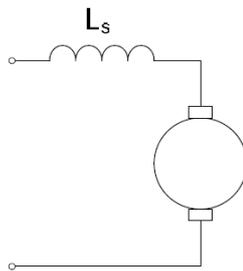
2.2.1 Motores CC Auto excitados

Os motores CC auto excitados são divididos de acordo com o esquema de ligação dos enrolamentos de campo e da armadura.

2.2.1.1 Motor com Excitação Série

No motor com excitação em série (Figura 2.5), as bobinas do enrolamento de campo ficam em série com o enrolamento da armadura e ambos constam de poucas espiras de fio grosso, o que garante ao motor um alto conjugado de partida e sua aplicação em bondes, ônibus e trens elétricos. (6)

Figura 2.5 - Motor com excitação série

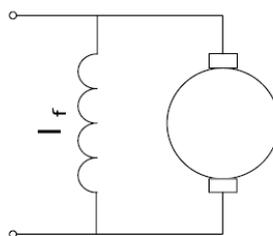


Fonte: FUENTES, 2005 (6)

2.2.1.2 Motor com Excitação em Paralelo

Segundo Fuentes (6), no motor com excitação em paralelo ou shunt (Figura 2.6) as bobinas do enrolamento de campo ficam em paralelo com o enrolamento da armadura e são feitas com um grande número de espiras de fio fino porque a corrente elevada necessária na condição de plena carga circula através do enrolamento de armadura. Neste tipo de ligação o motor tem uma velocidade praticamente constante, mesmo com ampla variação de carga. Como mostra Heckler (2), os motores CC com excitação em paralelo são usados onde se requer pequeno torque inicial e uma velocidade praticamente constante, como nos ventiladores, bombas centrífugas, máquinas ferramentas, etc.

Figura 2.6 - Motor com excitação em paralelo

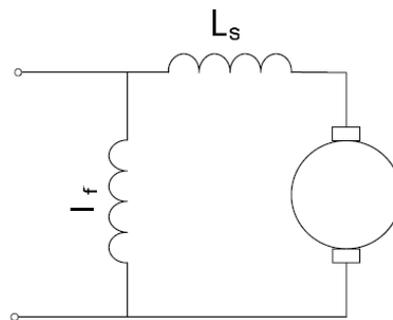


Fonte: FUENTES, 2005 (6)

2.2.1.3 Motor com Excitação Composta

De acordo com Fuentes (6), o motor com excitação composta (Figura 2.7) é a combinação do motor série com o paralelo, onde a parte em série do enrolamento de campo auxilia (composto cumulativo) ou se opõe (composto diferencial) à parte paralela do enrolamento de campo. O motor composto cumulativo tem a velocidade e a característica de partida entre os motores série e shunt, tendo mais conjugado de partida que o motor shunt por causa da parte série do campo. A composição diferencial é pouco utilizada. Segundo Heckler (2), os motores com excitação composta são usados em máquinas que necessita um conjugado inicial moderado. Por exemplo: guindastes.

Figura 2.7 - Motor com excitação composta



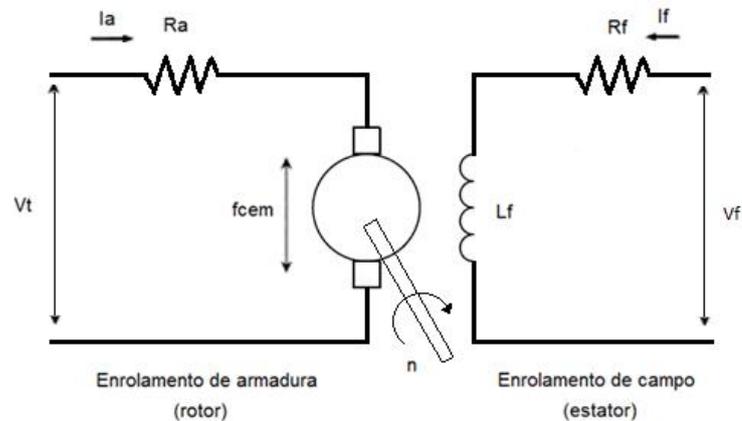
Fonte: FUENTES, 2005 (6)

2.2.2 Motores CC com Excitação Independente

Neste tipo de ligação, os enrolamentos de campo e armadura são alimentados por duas fontes CC independentes como mostra a Figura 2.8. Neste tipo de excitação, a rotação do motor pode ser alterada, mantendo o fluxo (Φ) constante e variando a tensão de armadura (controle de armadura), ou mantendo a tensão de armadura fixa e alterando o fluxo (controle pelo campo). (6)

A regulagem pela armadura é usada para acionamentos de máquinas operatrizes em geral, como: ferramentas de avanço, torque de fricção, bombas a pistão, compressores, etc. A regulagem de campo por sua vez é usada para acionamento de máquinas de corte periférico, como em chapeamento de toras, tornos, bobinadeiras, máquinas têxteis, etc. (9)

Figura 2.8 - Modelo motor CC com excitação independente



Fonte: Elaborado pela autora

Após a demonstração das formas de excitação dos enrolamentos de campo e armadura dos motores de corrente contínua nas seções anteriores, será discutido na seção seguinte, o comportamento de um motor CC com carga acoplada em seu eixo, tanto no momento de partida, quanto no instante em que ele é desligado.

2.3 Tempo de Aceleração e Tempo de Desaceleração

Os motores de corrente contínua levam um certo tempo para saírem da inércia e atingirem a velocidade nominal. Situação análoga acontece quando se para a máquina. Ela leva alguns segundos até parar totalmente. À esses tempos, dá-se o nome de tempo de partida ou aceleração e tempo de desaceleração ou frenagem.

2.3.1 Tempo de Aceleração ou Tempo de Partida

Pode-se interpretar a equação 2.6 abaixo da seguinte maneira: para ter um acréscimo de velocidade $d\omega$ do conjunto cujo momento de inércia é J , o motor deve aplicar um conjugado de aceleração C_a , durante um tempo dt .

$$C_m - C_r = C_a = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.6)$$

Explicitando o termo dt , obtém-se a equação abaixo:

$$dt = J \frac{d\omega}{C_a} \quad (2.7)$$

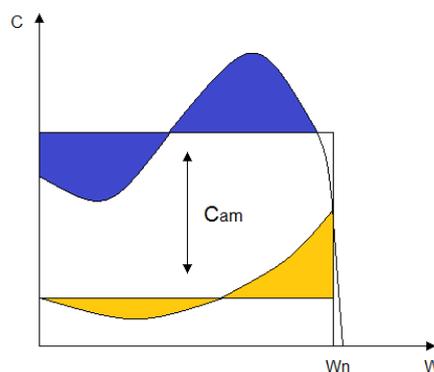
Ao integrar a equação 2.7 entre os limites de velocidade ω_1 e ω_2 , correspondentes aos instantes inicial e final do movimento, tem-se o tempo para o motor partindo de ω_1 (velocidade inicial) atingir ω_2 (velocidade nominal). Chamando t_a de tempo de aceleração, pode-se escrever:

$$t_a = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J \frac{d\omega}{C_m - C_r} = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{C_a} \quad (2.8)$$

Como pode ser observado na equação 2.8, o momento de inércia do conjunto (J) é uma grandeza constante. No entanto, não existe uma solução exata da integral, uma vez que, C_a não é uma função integrável. Com isso, é necessário a utilização de métodos aproximados que sejam capazes de fornecer resultados que satisfaçam as aplicações. Um dos métodos mais conhecidos é o Método dos Conjugados Médios. (13)

Este método consiste, basicamente, em substituir as características do conjugado motor e do conjugado resistente por características constantes que lhes sejam equivalentes, ou seja, durante o período de aceleração os conjugados desenvolvidos pelo motor e pela máquina acionada serão substituídos pelos seus respectivos conjugados médios. Como eles são constantes com a velocidade, o conjugado de aceleração será, por sua vez, constante pois representa a distância entre duas retas paralelas, conforme mostra a Figura 2.9. (13)

Figura 2.9 - Conjugado médio de aceleração



Fonte: Elaborado pela autora

O conjugado médio de aceleração (C_{am}) é a diferença entre o conjugado médio do motor (C_{mm}) e o conjugado resistente médio (C_{rm}), como mostra a equação abaixo:

$$C_{am} = C_{mm} - C_{rm} \quad (2.9)$$

O tempo de aceleração t_a calcula-se como se segue:

$$t_a = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{C_{am}} \quad (2.10)$$

Em que,

t_a - tempo de aceleração [s]

J - momento de inércia [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]

ω_1 e ω_2 - velocidades inicial e nominal, respectivamente [rad/s]

C_{am} - conjugado de aceleração médio equivalente [N.m]

Durante o período de aceleração, a temperatura máxima momentânea provocada pela corrente de partida que o motor pode suportar depende das características do seu projeto para dissipar o calor gerado no rotor e no estator. Na maioria dos casos, o tempo máximo de aceleração é limitado pela temperatura do rotor, porém há motores em que a limitação da temperatura na partida é do enrolamento do estator. Os cálculos para determinar o tempo máximo de aceleração partem da premissa de se considerar que todo o calor gerado no rotor e no estator, durante a partida, permanece nas barras e nas bobinas, elevando a temperatura de acordo com o calor específico do material. (13)

O máximo tempo que o motor pode suportar para que não sejam danificados o rotor ou o isolamento do estator pela alta temperatura gerada pela corrente de rotor bloqueado é chamado de tempo de rotor bloqueado. Este é um dado muito valioso para o engenheiro ao selecionar um motor para fazer um determinado acionamento, pois ele pode ter escolhido o motor corretamente para acionar a sua carga nas condições nominais de operação, mas se o tempo de aceleração for maior do que o tempo de rotor bloqueado, isto pode significar que o calor gerado pela corrente de partida é maior do que o calor produzido pela corrente de rotor bloqueado, o que poderia destruir o motor ou reduzir sua expectativa de vida útil. Neste caso, o motor não poderia ser utilizado. (13)

O tempo de aceleração só faz sentido ser calculado e analisado quando o motor parte com a carga acoplada, que é o caso dos motores CC presentes no laboratório de máquinas do IFMG campus Formiga, que tem um gerador CC inserido em seu eixo. Neste caso, t_a aumenta com o aumento do momento de inércia da carga e com a presença do conjugado resistente. Quando o motor parte a vazio o problema não existe, pois, praticamente, há somente a inércia do rotor, e ele atinge rapidamente a sua velocidade de regime, quando se inicia de maneira efetiva a dissipação do calor gerado para o meio ambiente por meio da ventilação. (13)

2.3.2 Tempo de Desaceleração ou Tempo de Frenagem

Se o motor está operando na sua condição de regime, por exemplo, na sua condição nominal, e é desligado, ele irá parar após um determinado tempo. Se o motor é desligado, cessa imediatamente a ação do seu conjugado, porém, enquanto ele não parar, acionado pela energia cinética armazenada na massa girante do conjunto, o conjugado resistente continua a atuar, mesmo que de forma decrescente, dependendo do tipo de característica da máquina acionada. Este conjugado resistente é que faz o motor parar. (13)

Em muitas aplicações se deseja calcular o tempo que o motor gastaria para parar após o seu desligamento da rede. Para se calcular este tempo de desaceleração se emprega a mesma expressão 2.10, só que agora, com outros significados para as letras, conforme se segue.

$$t_d = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{C_{rm}} \quad (2.11)$$

Em que, t_d é o tempo de desaceleração em s ; J o momento de inércia total da massa girante em kg.m^2 ; ω_2 a velocidade de onde se parte e ω_1 a velocidade aonde se chega, em rad/s ; C_{rm} o conjugado resistente médio da máquina acionada, em $N.m$. (13)

Depois de explicitar os conceitos envolvidos nos momentos de partida e frenagem dos motores CC, a próxima seção abordará os métodos para se fazer o controle da velocidade de giro dos mesmos.

2.4 Controle de Velocidade de Motores de Corrente Contínua

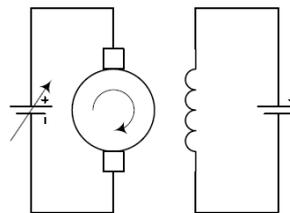
Uma das principais aplicações práticas dos motores CC é no acionamento de cargas que necessitam de uma variação da sua velocidade de forma controlada. Os motores CC com excitação independente, por exemplo, podem ter sua velocidade controlada de acordo com os itens apresentados a seguir:

- Controle pela tensão aplicada na armadura (V_t);
- Controle pela tensão aplicada no campo (Φ);
- Controle por adição de resistência na armadura (R_a).

No controle pela tensão aplicada na armadura (Figura 2.10), a tensão e a corrente no campo são mantidas constantes, de modo que, o fluxo magnético produzido pelo enrolamento de campo também seja constante. Ao variar a tensão aplicada na armadura (V_t), ocorre também uma variação na rotação da máquina, existindo portanto, uma relação direta entre a rotação da máquina e a tensão aplicada à armadura. (6)

Os motores CC com excitação independente e controle por meio da tensão aplicada na armadura, são utilizados normalmente em aplicações onde haja a necessidade de torque constante em toda faixa de rotação, como por exemplo, no acionamento de máquinas operatrizes, tais como: ferramentas de avanço, bombas a pistão, compressores, etc. (9)

Figura 2.10 - Controle pela armadura

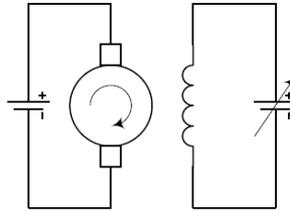


Fonte: FUENTES, 2005 (6)

No controle pelo campo (Figura 2.11), a tensão da armadura é mantida constante e varia-se a corrente de excitação (I_f). Como o fluxo magnético é proporcional a corrente de excitação, ao diminuir I_f , diminui-se também o fluxo magnético (Φ) e aumenta-se a velocidade de rotação (n) da máquina. Neste tipo de controle, a potência da máquina permanece constante enquanto a rotação é elevada e o torque é reduzido. Este processo de aumento da velocidade de rotação em consequência da diminuição do fluxo é conhecido por enfraquecimento de campo. O

controle pelo campo é utilizado em acionamentos de máquinas de corte periférico, como chapeamento de tiras, tornos, bobinadeiras, máquinas têxteis, etc. (6)

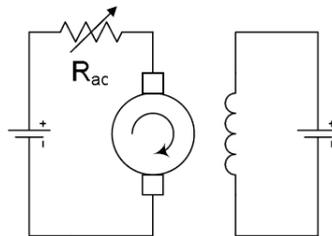
Figura 2.11- Controle pelo campo



Fonte: FUENTES, 2005 (6)

Observa-se que, além dos métodos de controle pelo campo e pela armadura apresentados, ao variar a resistência da armadura, também se obtêm uma variação na velocidade de rotação do motor. Para que haja essa variação, coloca-se em série com a armadura um reostato, como mostra a Figura 2.12, e por meio da variação do valor deste, consegue-se variar a velocidade do motor. Devido a potência dissipada no reostato adicionado, existe uma perda considerável de energia neste método.

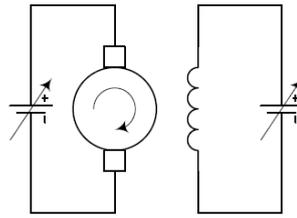
Figura 2.12- Controle pela adição de um reostato em série com a armadura



Fonte: FUENTES, 2005 (6)

De acordo com a Figura 2.13, no controle pela tensão aplicada na armadura e no campo, são aplicadas as duas técnicas abordadas anteriormente, o que proporciona um controle integral da operação do motor CC. A partir desta técnica é possível obter várias alternativas de conjugado e rotações. Ela vem sendo bastante empregada nos conversores modernos para acionamento em corrente contínua. (6)

Figura 2.13- Controle através do campo e da armadura



Fonte: FUENTES, 2005 (6)

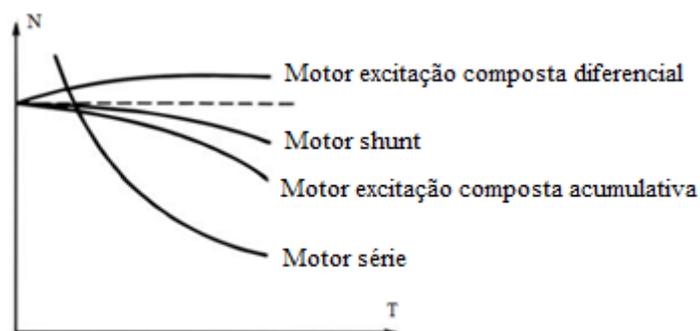
Como foi mostrado nesta seção, existem várias formas de se fazer o controle da velocidade de rotação dos motores de corrente contínua. Contudo, do ponto de vista do acionamento dos motores CC, sabe-se que eles podem operar em quatro regiões de operação da curva torque x velocidade, como pode ser visto na seção a seguir.

2.5 Curva torque x velocidade

Segundo Marques (12), os motores de corrente contínua são utilizados em muitas aplicações. Algumas requerem que a velocidade permaneça constante à medida que a carga aplicada ao eixo do motor é variada. Em outras, é necessário variar a velocidade dentro de uma determinada faixa. O responsável pela escolha do motor para uma determinada aplicação deve conhecer a curva da velocidade em função do torque.

As curvas características de velocidade em função do torque para vários tipos de motores de corrente contínua são apresentadas na Figura 2.14. (14)

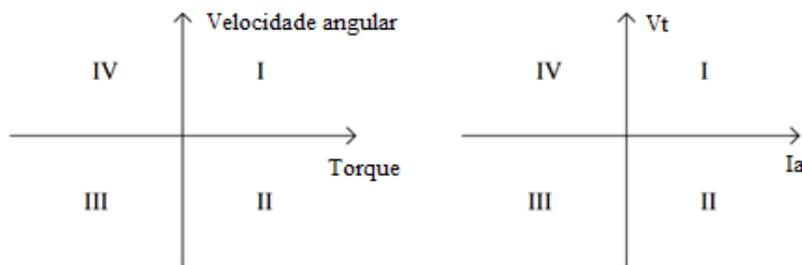
Figura 2.14 - Curvas de velocidade em função do torque para motores de corrente contínua.



Fonte: MARQUES, 2013 (14)

De acordo com Pomilio (15), do ponto de vista do acionamento da máquina CC, pode-se definir, no plano torque x velocidade, quatro regiões de operação, como indicado na Figura 2.15. Note-se que o mesmo plano pode ser colocado em termos do valor médio da corrente de armadura (I_a) e da força contra eletromotriz de armadura, caso se suponha constante o fluxo de entreferro.

Figura 2.15 – Regiões de acionamento de motores CC



Fonte: POMILIO, 2014 (15)

Pela Figura 2.15, observa-se que, no quadrante I tem-se torque e velocidade positivos, indicando, que a máquina está operando como motor e girando num dado sentido. Em termos de tração, pode se dizer que se está operando em tração para frente. (15)

No quadrante III, tanto o torque quanto a velocidade são negativos, caracterizando uma operação de aceleração em ré. (15)

Já o quadrante II se caracteriza por um movimento em ré (velocidade negativa) e torque positivo, implicando, assim, numa frenagem. (15)

No quadrante IV, tem-se velocidade positiva e torque negativo, ou seja, frenagem. Nota-se um movimento de avanço, mas com redução da velocidade. (15)

Além da apresentação dos quadrantes de operação dos motores corrente contínua, também foi retratado neste capítulo, os principais conceitos envolvidos na compreensão do funcionamento dos motores CC, bem como as formas básicas de controle da velocidade de rotação dos mesmos. Com base nisso, serão demonstradas no capítulo seguinte, as formas de acionamento e controle da velocidade de rotação dos motores de corrente contínua, só que agora, por meio da utilização de conversores estáticos.

3 CONVERSOR CA/CC CTW900

Recentemente, o IFMG campus Formiga fez a aquisição de um kit de controle de velocidade de motores CC da Weg, em que, incluso nele, tem-se o conversor estático CA/CC CTW900 (Figura 3.1).

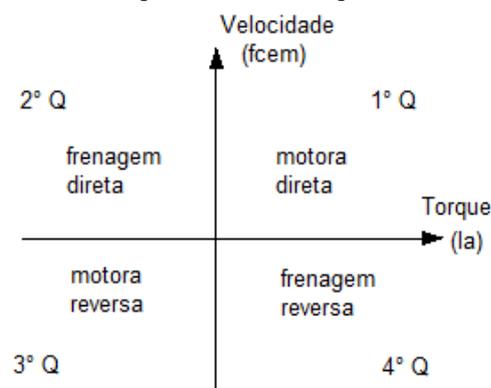
Os conversores de corrente alternada para contínua (CA/CC) CTW900, são equipamentos destinados ao acionamento e controle de motores CC com excitação independente, para variação e controle de velocidade em 1 ou 4 quadrantes de velocidade da curva torque x velocidade (Figura 3.2). O princípio de funcionamento dos conversores CA/CC será apresentado com mais detalhes na seção a seguir.

Figura 3.1- Conversor CA/CC CTW900



Fonte: Autora

Figura 3.2- Curva torque x velocidade (quadrantes de operação)



Fonte: Elaborado pela autora

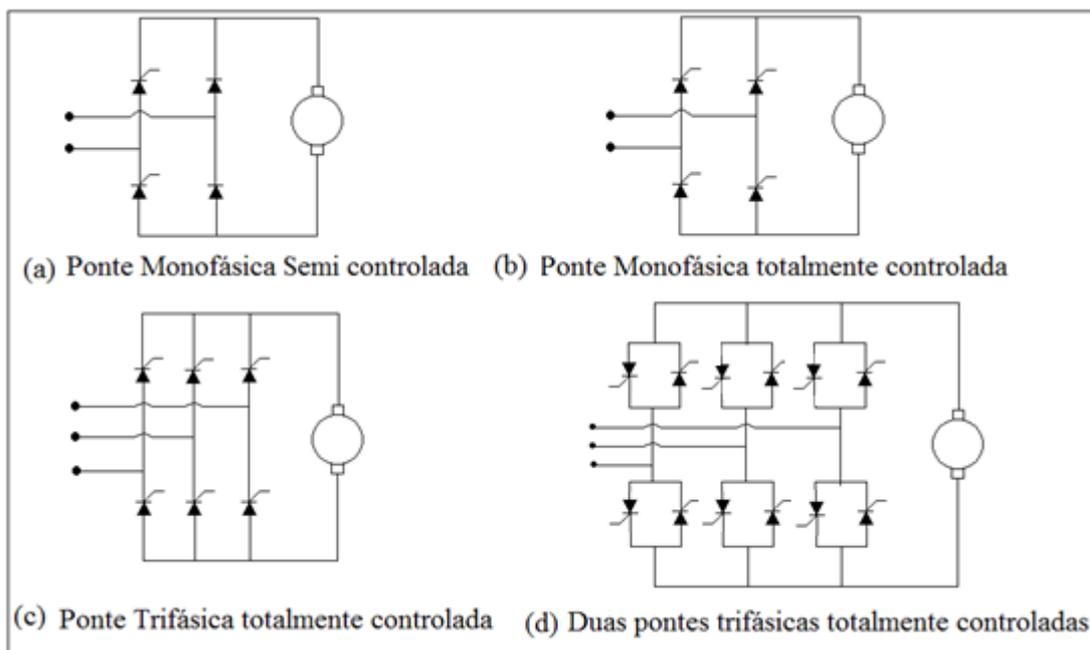
3.1 Conversores CA/CC

Os conversores estáticos realizam o controle de velocidade em motores CC por meio de pontes retificadoras controladas. As pontes retificadoras controladas mudam CA para CC por meio de tiristores que controlam a tensão e a direção dos ciclos alternados, fazendo com que eles gerem corrente contínua com pouca ondulação. Estas pontes podem ser monofásicas ou trifásicas, semi controladas ou totalmente controladas. (6, 15)

As pontes retificadoras monofásicas semi controladas são formadas por dois SCRs (tiristores) e dois diodos retificadores, e são utilizadas em acionamentos de baixa potência, por razões econômicas. Já as totalmente controladas, são formadas por quatro SCRs e são geralmente aplicadas em acionamentos de baixa potência, onde exista a necessidade de frenagem do motor CC. (6, 15)

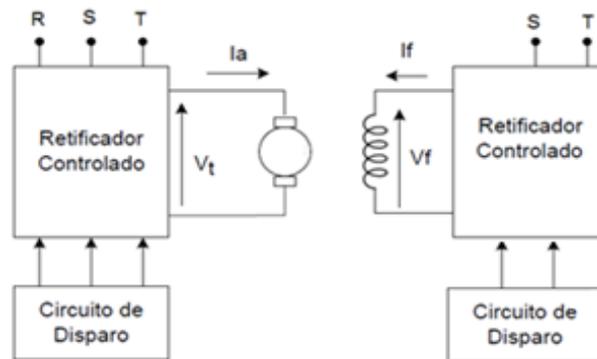
As pontes trifásicas totalmente controladas são formadas por seis SCRs e são utilizadas em acionamentos de potência superior a 10 kW nos quais exista a necessidade de aceleração e frenagem do motor CC em um sentido de rotação. A utilização de duas pontes trifásicas totalmente controladas em antiparalelo conforme ilustra a Figura 3.3-(d), é feita em aplicações onde é necessário a aceleração e frenagem em ambos sentidos de rotação. (6)

Figura 3.3 - Pontes retificadoras controladas



A Figura 3.4 ilustra o esquema básico de controle de velocidade de um motor CC com excitação independente adotado por um conversor CA/CC. Os conversores CA/CC (como o CTW900, por exemplo) controlam a velocidade dos motores de corrente contínua através da variação da tensão de armadura por meio de um retificador trifásico controlado (ou semi controlado) em antiparalelo, assim como também a partir da variação da corrente de campo, através de um circuito retificador monofásico controlado. (16)

Figura 3.4 – Sistema básico de controle de velocidade de um motor CC utilizado por um conversor CA/CC

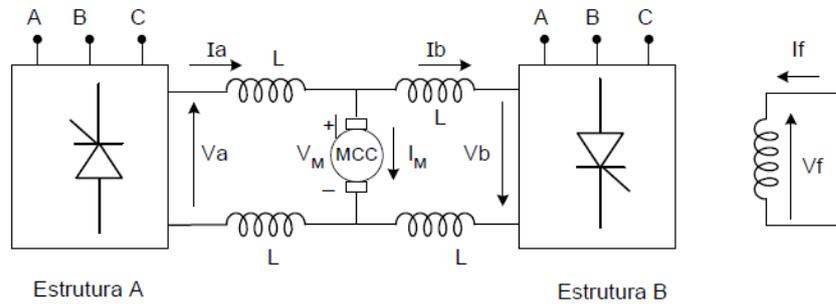


Fonte: Elaborado pela autora

Com base na Figura 3.4, observa-se que, antes de ir para a armadura, a alimentação trifásica passa primeiramente por um módulo tiristor SCR. O mesmo ocorre com o enrolamento de campo, onde a alimentação monofásica segue, primeiramente, para um módulo tiristor SCR, antes de alimentar o enrolamento de campo. Os tiristores dos retificadores controlados da armadura e do campo serão disparados (entrarão em condução) com o auxílio de um circuito de disparo presente no conversor.

O módulo tiristor SCR que controla a armadura é composto por uma ponte retificadora trifásicas controlada em antiparalelo (ver Figura 3.3-(d)). Este modo de operação também pode ser conhecido como acionamento por conversores duais. O modo de acionamento de um motor CC com conversor dual pode ser observado na Figura 3.5. Observa-se que, cada estrutura (A e B) permite a operação em dois quadrantes de operação, totalizando quatro quadrantes. (16)

Figura 3.5- Acionamento de motor CC com conversor dual



Fonte: CORRADI JUNIOR, 2011 (16)

A estrutura A fornece corrente positiva e tensão tanto positiva como negativa para o motor, permitindo a operação no 1° (motora direta) e 4° (frenagem reversa) quadrantes. Já a estrutura B é capaz de fornecer corrente negativa, e tensão nos dois sentidos, o que proporciona a operação no 2° (frenagem direta) e 3° (motora reversa) quadrantes. As estruturas são capazes de operar isoladas ou simultaneamente. No caso isolado, quando uma estrutura estiver funcionando, os pulsos de disparo da outra estrutura são inibidos. Para inverter o sentido de rotação, a estrutura que opera é inibida, e a outra entra em funcionamento provocando a inversão de rotação. (16)

Na operação simultânea das estruturas, estas fecham uma malha contendo os indutores. Como a tensão média nos indutores é nula, então as tensões médias de saída dos retificadores devem ser iguais com sinais opostos ($V_{A \text{ médio}} = -V_{B \text{ médio}}$). Esta condição é garantida através de uma relação entre os ângulos de disparo dos dois retificadores:

$$\alpha_A + \alpha_B = 180^\circ \quad (3.1)$$

Se esta relação não for satisfeita, a diferença entre os valores médios de tensão faz crescer uma corrente de circulação entre as estruturas. Tal corrente crescerá indefinidamente até provocar danos aos retificadores. (16)

O conversor dual permite o controle de velocidade, reversão e frenagem regenerativa. Quando o motor funciona na região motora direta, a estrutura A opera como retificador fornecendo energia para o motor. Então se têm que:

$$\alpha_A < 90^\circ \text{ e } \alpha_B > 90^\circ \quad (3.2)$$

Nesta situação, a estrutura A fornece tensão e corrente positivas para o motor ($V_M > 0, I_M > 0$). Já a estrutura B não processa energia. (16)

Com a elevação do ângulo de disparo α_A (e diminuição de α_B) ocorre uma redução de velocidade através de uma frenagem direta, situação em que a estrutura B opera como inversor, transferindo energia do motor para a rede CA (regeneração). Neste caso, a estrutura B fornece tensão positiva e corrente negativa para o motor ($V_M > 0, I_M < 0$), e a estrutura A não processa energia.

Para funcionamento na região motora reversa, têm-se que a estrutura B opera como retificador fornecendo energia para o motor. Daí:

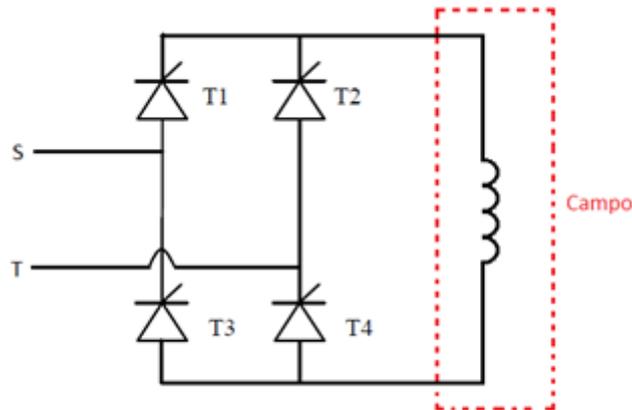
$$\alpha_B < 90^\circ \text{ e } \alpha_A > 90^\circ \quad (3.3)$$

Nesta situação, a estrutura B fornece tensão e corrente negativas para o motor ($V_M < 0, I_M < 0$), e a estrutura A não processa energia. (16)

Para reduzir a velocidade, provocando uma frenagem reversa deve-se elevar o ângulo de disparo α_B (e diminuir α_A), deste modo a estrutura A opera como inversor, transferindo energia do motor para a rede CA (regeneração). Nesta situação, a estrutura A fornece tensão negativa e corrente positiva para o motor ($V_M < 0, I_M > 0$), e a estrutura B não processa energia. (16)

O módulo tiristor SCR que controla o enrolamento de campo é mostrado na Figura 3.6. Observa-se que ele é composto por uma ponte retificadora monofásica controlada, formada por quatro SCR's que são comandados aos pares: T1-T4 e T2-T3. Quando a tensão de entrada é positiva, os SCR's T1 e T4 podem ser disparados, permitindo um caminho para a corrente circular até o enrolamento de campo. No semi ciclo negativo da rede, os SCR's T2 e T3 conduzem a partir do pulso de "gatilho" (ângulo de disparo for disparado), desta forma a corrente do enrolamento de campo permanece unidirecional, mesmo que a fonte seja alternada. A variação da tensão de saída é obtida variando-se o ângulo de disparo dos SCR's. (16)

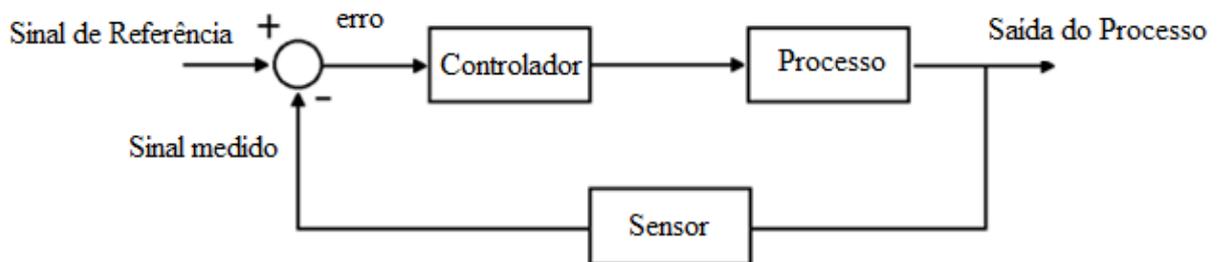
Figura 3.6- Retificador monofásico controlado em ponte



Fonte: Elaborado pela autora

O sistema de controle utilizado pelos conversores CA/CC, como o CTW900, por exemplo, é do tipo malha fechada. Estes são sistemas onde o sinal de saída possui efeito direto no sinal de controle. São denominados sistemas de controle realimentados ou com retroação como mostra a Figura 3.7. São utilizados para enviar o sinal de erro para o controlador e deste modo eliminá-lo. Nos conversores CA/CC (CTW900), o sinal de erro será a diferença entre o sinal de referência (tensão de armadura de referência) e o sinal medido pelo sensor (sinal de tensão correspondente a velocidade do motor CC). (17)

Figura 3.7- Sistema de controle em malha fechada



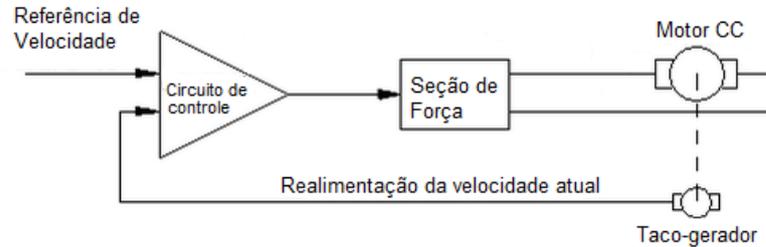
Fonte: Elaborado pela autora

Nos conversores CA/CC (CTW900), a realimentação pode ser feita de três maneiras: realimentação por taco-gerador, realimentação por encoder, e realimentação por *f_{cem}* (força contra eletromotriz).

- Realimentação por taco-gerador: taco-geradores são sensores de velocidade que proporcionam uma saída precisa que é proporcional a velocidade de rotação do motor.

Um sistema de malha fechada utilizando o taco-gerador para realimentação da velocidade pode ser observado na Figura 3.8. (18)

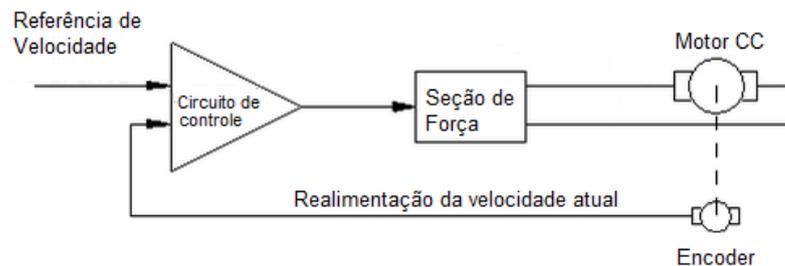
Figura 3.8- Sistema de malha fechada com realimentação por taco-gerador



Fonte: Elaborado pela autora

- Realimentação por encoder: encoders são sensores que emitem um sinal que varia de frequência de acordo com a variação da velocidade. Um sistema de malha fechada utilizando o encoder para realimentação da velocidade pode ser observado na Figura 3.9. (18)

Figura 3.9- Sistema de malha fechada com realimentação por encoder

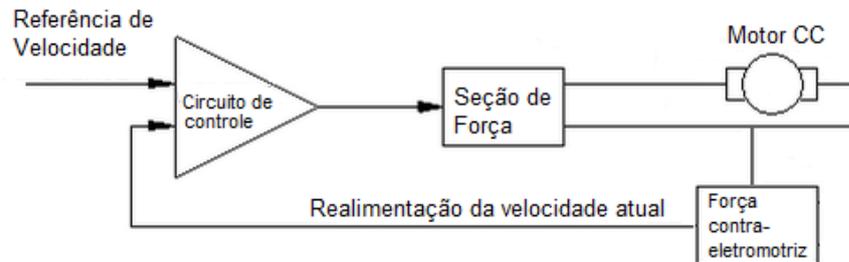


Fonte: Elaborado pela autora

- Realimentação por f_{cem} : baseia-se na capacidade de um motor de corrente contínua atuar como um gerador de corrente contínua. Quando um motor CC está em rotação, ele irá gerar um nível de tensão chamado força contra eletromotriz que é proporcional à velocidade de rotação. Uma vez que a tensão de armadura que vem a partir da unidade de saída está sob a forma de pulsos, a tensão f_{cem} pode ser medida entre os pulsos. Este

sinal é então introduzido no circuito de regulação de velocidade da unidade, como mostra a Figura 3.10. (18)

Figura 3.10- Sistema de malha fechada com realimentação por *f_{cem}*



Fonte: Elaborado pela autora

Após a descrição dos conceitos teóricos envolvendo os conversores CA/CC, a seção seguinte apresentará ao leitor uma visão do kit de controle de velocidade de motores CC da Weg, fazendo uma descrição dos seus componentes, bem como as principais funções da HMI do equipamento.

3.2 Kit de Controle de Velocidade de Motores CC – CTW900

Segundo (19), as seguintes placas fazem parte do kit de controle de velocidade de motores CC-CTW900:

- 01 placa P076- 1 conversor CA/CC;
- 01 placa P010- 1 módulo simulador de defeitos;
- 01 placa P011- 3 chaves seletoras;
- 01 placa P012- 3 fusíveis 16 A;
- 01 placa P013- 1 relé PTC;
- 01 placa P016- 1 reatância trifásica;
- 01 placa P017- 1 chave seletora;
- 01 placa P018- 1 módulo de chaveamento de sinais;
- 01 placa P019- 3 botões pulsadores verdes;
- 01 placa P020- 3 botões pulsadores vermelhos;
- 01 placa P021- 1 sinaleiro incolor;
- 01 placa P022- 3 fusíveis 2 A;

- 01 placa P023- 1 rede de sobrecarga;
- 02 placas P053- 1 contator tripolar;
- 01 placa P067- 3 sinaleiros vermelhos;
- 01 placa P074- 1 medidor analógico;
- 01 placa P004- 1 freio de Foucault (opcional);
- 01 placa P014- 1 módulo de frenagem (opcional);
- 01 placa P005- 1 módulo com tacogerador, motor CC e motor de indução (opcional).

Este conversor apresenta ainda uma interface homem máquina (IHM), em que, por meio desta, é possível realizar a programação do CTW900, além de visualizar e fazer o ajuste de todos os seus parâmetros. Possui uma forma de navegação intuitiva, com opção de acesso sequencial aos parâmetros ou através de grupos (Menu). As teclas da IHM podem ser observadas na Figura 3.11.

Figura 3.11- Teclas IHM



Fonte: Elaborado pela autora

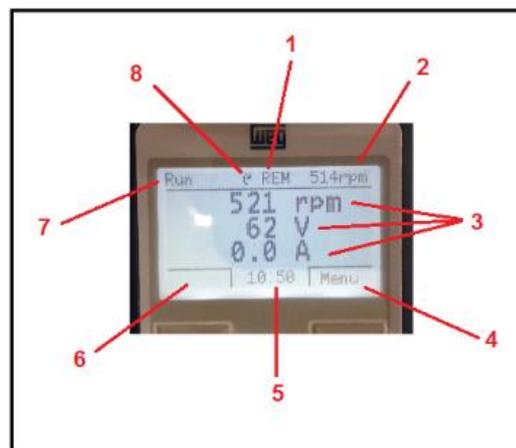
A função de cada tecla é a seguinte:

Tabela 3.1- Funções das teclas da IHM

Tecla	Função
1	“Soft Key” direita: função definida pelo texto no display logo acima.
2	Tem a função de incrementar o conteúdo do parâmetro, aumentar o valor da referência, e de selecionar o grupo anterior da lista de Grupos de Parâmetros. (Obs: os parâmetros disponíveis no CTW900 podem ser visualizados a partir do “Manual do Usuário” presente no kit.)
3	Acelera o motor com o tempo de aceleração determinado pela rampa de aceleração. Esta tecla estará ativa quando o comando estiver no modo local.
4	Desacelera o motor, até sua parada, com tempo determinado pela rampa de desaceleração. Esta tecla estará ativa quando o comando estiver no modo local.
5	A tecla JOG acelera o motor com tempo determinado pela rampa de aceleração até velocidade definida pelo parâmetro P0100. Mantém o motor nessa velocidade enquanto estiver pressionada, e ao ser liberada, desacelera o motor de acordo com o tempo de desaceleração definido no parâmetro P0101 até a sua parada.
6	Seleciona o modo local ou remoto.
7	Controle do sentido de giro do motor.
8	Tem a função de decrementar conteúdo do parâmetro, diminuir o valor de referência, e de selecionar o próximo grupo de lista de Grupo de Parâmetros.
9	“Soft Key” esquerda: função definida pelo texto no display logo acima.

A tela da IHM no modo de monitoração, pode ser vista conforme ilustra a Figura 3.12:

Figura 3.12- Tela no modo de monitoração



Fonte: Elaborado pela autora

A função de cada item indicado na figura pode ser observada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Função dos itens da tela da IHM no modo de monitoração

Tecla	Função
1	Indica o modo de operação, que pode ser local ou remoto.
2	Mostra a rotação do motor em rpm.
3	São parâmetros de monitoração: referência de velocidade em rpm, tensão da armadura em volts, e corrente de armadura em Ampères. Esses parâmetros de monitoração podem ser alterados de acordo com os parâmetros do conversor P0205, P0206 e P0207. Os parâmetros de P0208 a P02012 indicam a unidade de engenharia para indicação da velocidade.
4	Função da “soft key” direita.
5	Indicação da hora. Pode ser ajustada nos parâmetros P0197, P0198 e P0199 do conversor.
6	Função da “soft key” esquerda.
7	<ul style="list-style-type: none"> a. Status do CTW900: desabilitado, ready, run, subtensão, falha, auto ajuste, configuração, bloqueado, acelerando, desacelerando. b. Última falha (FXXX). c. Último alarma (AXXX).
8	Indicação do sentido de rotação do motor

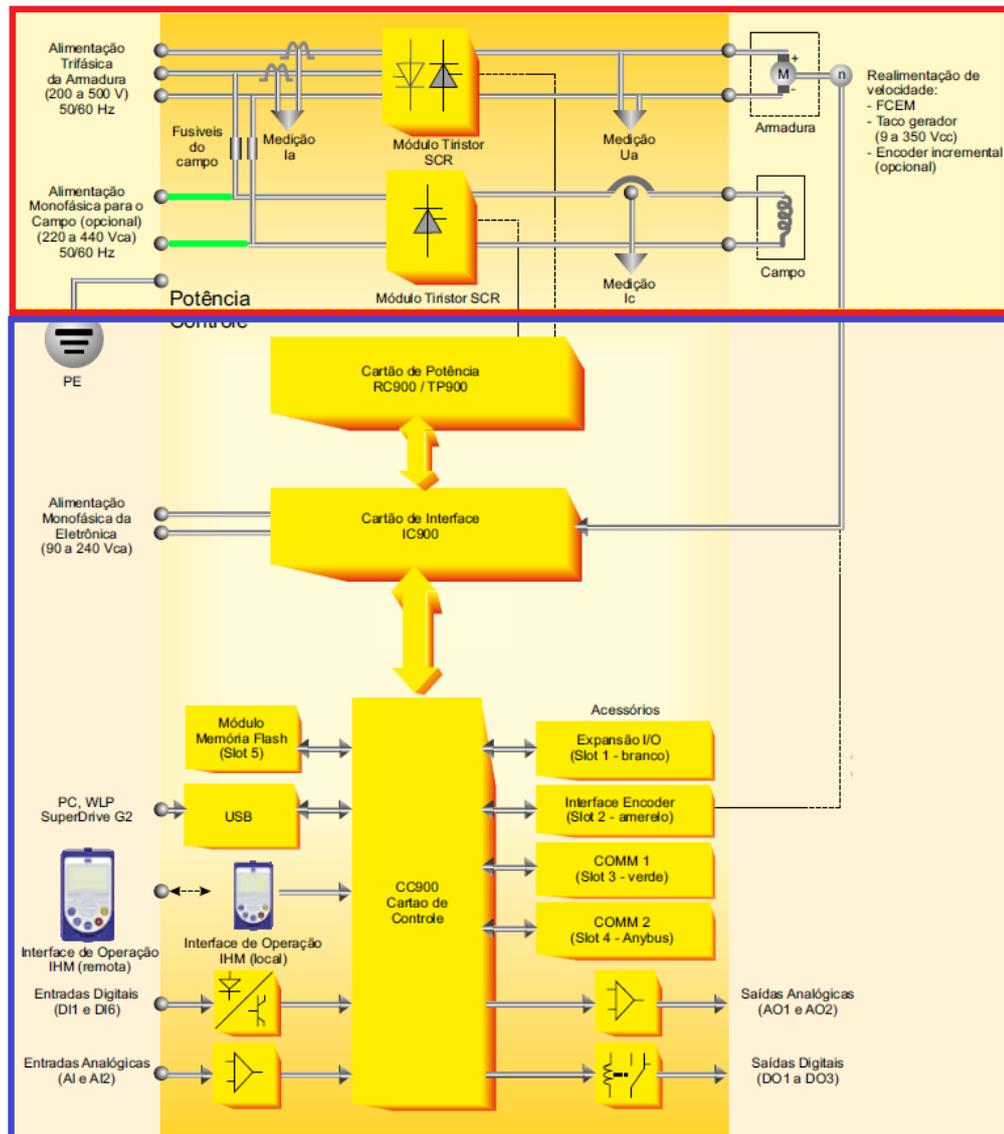
Depois de conhecer o kit de controle de velocidade e os principais aspectos externos do equipamento, a próxima seção retratará a composição interna do CTW900.

3.3 Sobre o CTW900

Os circuitos de comando de motores elétricos normalmente são representados por meio de dois diagramas: diagramas de força ou potência, e diagramas de controle. O diagrama de força denota como o motor é alimentado à fonte de energia. Já o diagrama de controle demonstra a lógica de operação do motor.

Como é mostrado em (20), o bloco-diagrama da Figura 3.13 ilustra uma visão geral do conjunto do CTW900. Os retângulos em vermelho e azul representam os circuitos de força e controle do equipamento, respectivamente. Como já foi mencionado no item 3.1 deste capítulo, a conversão da tensão de alimentação da armadura é feita por uma ponte retificadora trifásica controlada em antiparalelo, já a da tensão de alimentação do enrolamento de campo é feita por uma ponte retificadora monofásica controlada. O diagrama de controle do CTW900 é composto pelos cartões de controle CC900, de interface IC900, e de potência RC900/TP900.

Figura 3.13- Bloco-diagrama do conversor CA/CC CTW900



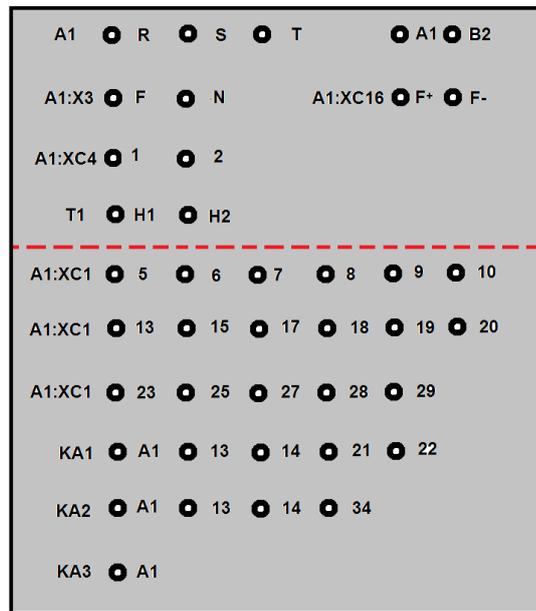
Fonte: CTW900- CONVERSOR CA/CC: Manual do Usuário, p. 7 (20)

Depois de retratar os diagramas internos de força e controle do conversor, o próximo passo, é compreender como acessar esses circuitos por meio dos conectores presentes na bancada didática do equipamento.

3.4 Conectores

Os conectores disponíveis na bancada didática do CTW900 são esboçados na Figura 3.14. Observa-se que os que estão acima da linha tracejada em vermelho são responsáveis pelas ligações de força, e os abaixo pelas de controle.

Figura 3.14- Conectores disponíveis na bancada didática do CTW900



Fonte: Elaborado pela autora

As funções típicas dos conectores de potência podem ser vistas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Funções dos conectores de força

Conexão	Descrição
R/S/T	Entrada da Rede de Alimentação CA Trifásica
A1 (+) B2 (-)	Saída de Tensão CC para a Armadura do motor
XC16	Saída de Tensão CC para o Campo do motor (F+ / F-)
XC4	Entrada para Taco-gerador CC
X3	Entrada da Alimentação CA Monofásica para o Campo (Opcional)
T1	Entrada da Alimentação CA Monofásica da Eletrônica

Fonte: CTW900- CONVERSOR CA/CC: Manual do Usuário, p. 38 (20)

As conexões de controle do CTW900 (entradas/saídas analógicas, entradas/saídas digitais) são feitas no conector XC1, localizado na placa eletrônica de controle CC900 (ver Figura 3.13). A função de cada conector é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Função dos conectores em XC1

Conector XC1		Função Padrão de Fábrica
1	+REF	Referência positiva para potenciômetro
2	AI1+	Entrada Analógica 1: referência de velocidade (remoto)
3	AI1-	
4	REF-	Referência negativa para potenciômetro
5	AI2+	Entrada analógica 2: referência de velocidade (remoto)
6	AI2-	
7	AO1	Saída analógica 1: velocidade real
8	AGND (24 V)	Referência 0V para as saídas analógicas
9	AO2	Saída analógica 2: corrente de armadura
10	AGND (24 V)	Referência 0V para as saídas analógicas
11	DGND	Referência 0V da fonte de 24 Vcc
12	COM	Ponto comum das entradas digitais
13	24 Vcc	Fonte 24 Vcc
14	COM	Ponto comum das entradas digitais
15	DI1	Entrada digital 1
16	DI2	Entrada digital 2
17	DI3	Entrada digital 3
18	DI4	Entrada digital 4
19	DI5	Entrada digital 5
20	DI6	Entrada digital 6
21	NF1	Saída digital 1 DO1 (RL1): sem falha
22	C1	
23	NA1	
24	NF2	Saída digital 2 DO2 (RL2): $N > N_x$
25	C2	
26	NA2	
27	NF3	Saída digital 3 DO3 (RL3): $N > N_x$
28	C3	
29	NA3	

Fonte: CTW900- CONVERSOR CA/CC: Manual do Usuário, p.44 (20)

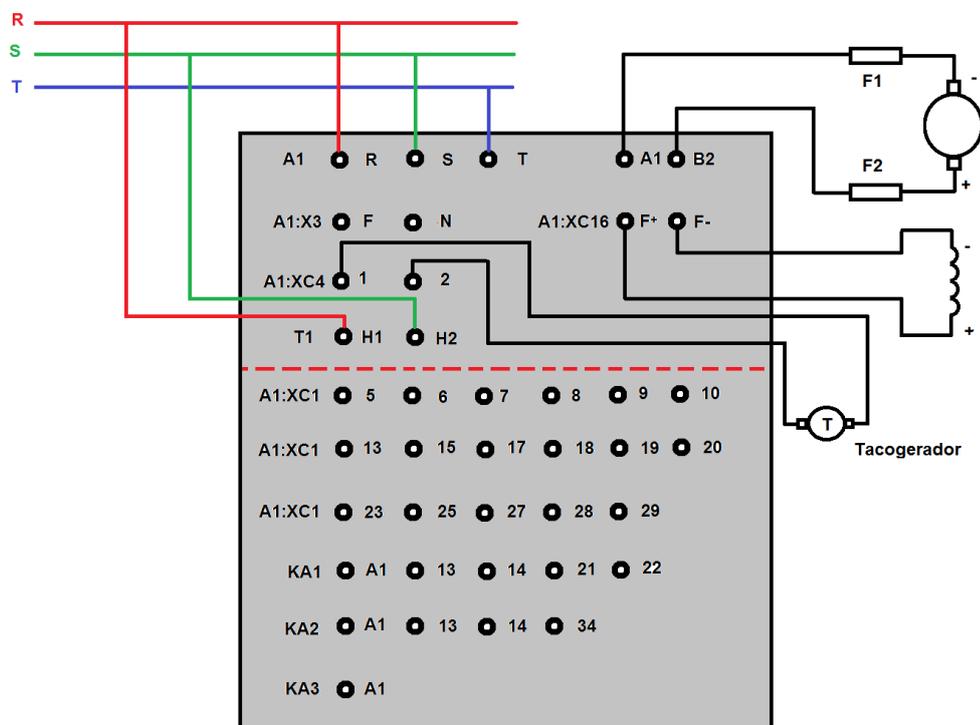
Depois de conhecer as funções típicas dos principais conectores presentes na bancada didática do kit de controle de velocidade, a seção seguinte, mostrará os esquemas de ligação dos circuitos de força e controle para o acionamento e controle da velocidade do motor CC.

3.5 Esquemas de Ligação

Para se fazer o acionamento e o controle da velocidade do motor CC, os catálogos presentes no kit sugerem a montagem dos circuitos de acordo com os diagramas elétricos apresentados no Anexo I deste trabalho. Segundo esses esquemas de ligação, o tipo de realimentação que deve ser utilizado é por taco-gerador ou encoder.

Os diagramas mostrados no Anexo I, apresentam, além das ligações de força e controle, uma lógica de acionamento para o motor CC. Simplificando esses diagramas (desconsiderando a lógica de acionamento), as conexões de força ficam conforme ilustra a Figura 3.15.

Figura 3.15- Conexões de força sugeridas pelo fabricante



Fonte: Elaborado pela autora

Durante os primeiros testes realizados, executou-se a montagem das ligações em conformidade com os diagramas apresentados no Anexo I. Porém, com essa configuração, foi possível apenas energizar o conversor, não conseguindo, portanto, acionar a máquina, devido a ausência de algumas das placas apresentadas na seção 3.2 deste capítulo, dentre elas tem-se a P004 (freio de Foucault), a P014 (módulo de frenagem), e a P005 (módulo com taco-gerador, motor CC e motor de indução).

A ausência dessas placas não seria um problema, caso algum dos motores CC do laboratório de máquinas tivesse taco-gerador, uma vez que a utilização das demais placas, a P004 e a P014, é opcional, ou seja, não compromete o correto funcionamento do motor.

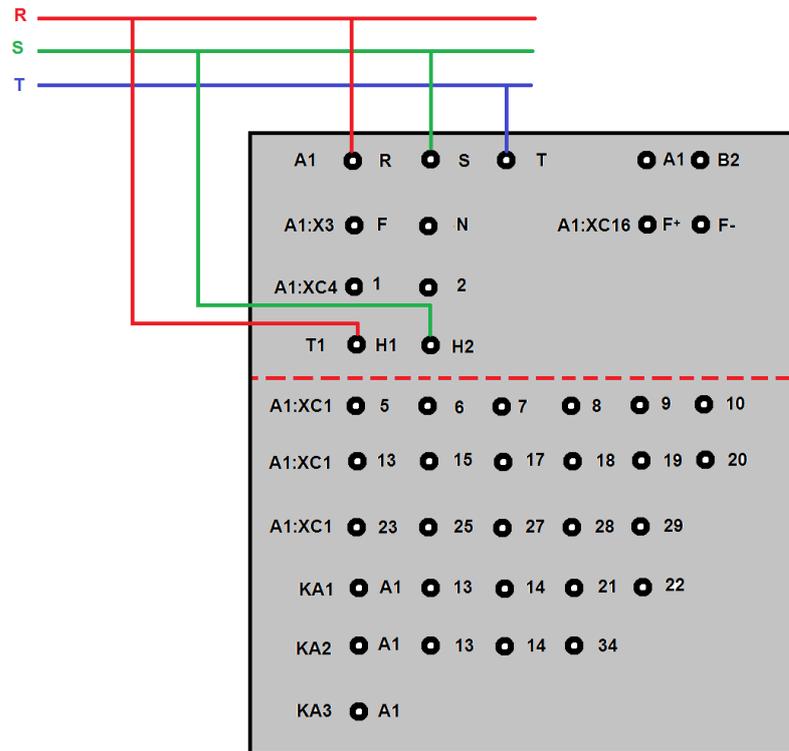
Como nenhum dos motores disponíveis no laboratório tinham taco-gerador, a única maneira para acionar e controlar a velocidade do motor CC, era se fazendo a realimentação por *fcem* (força contra eletromotriz).

A princípio, procurou-se utilizar os mesmos esquemas de ligação dos diagramas elétricos presentes no Anexo I, mudando somente o tipo de realimentação por meio da configuração de um dos parâmetros do equipamento (parâmetro P0202), e fazendo-se o *feedback* utilizando a tensão da armadura nos terminais A1:XC4 1 e 2 do conversor (ver Figura 3.15). No entanto, também não se obteve êxito.

Como os esquemas de ligação dos diagramas elétricos sugeridos pelos catálogos eram um pouco complexos e de árdua compreensão, sondou-se a elaboração de um novo diagrama que se adequasse mais a realidade do laboratório de máquinas do campus e que não fosse necessário a utilização de todas as placas presentes no kit.

O primeiro desafio para a elaboração deste novo diagrama foi descobrir como energizar o CTW900. Depois de muitos testes e pesquisas, constatou-se que o equipamento deve ter uma alimentação trifásica (200 a 500 Vac 50-60 Hz) através dos terminais R, S e T, e que sua parte eletrônica deve ser alimentada ligando duas fases aos terminais H1 e H2 da bancada didática, conforme esboça a Figura 3.16.

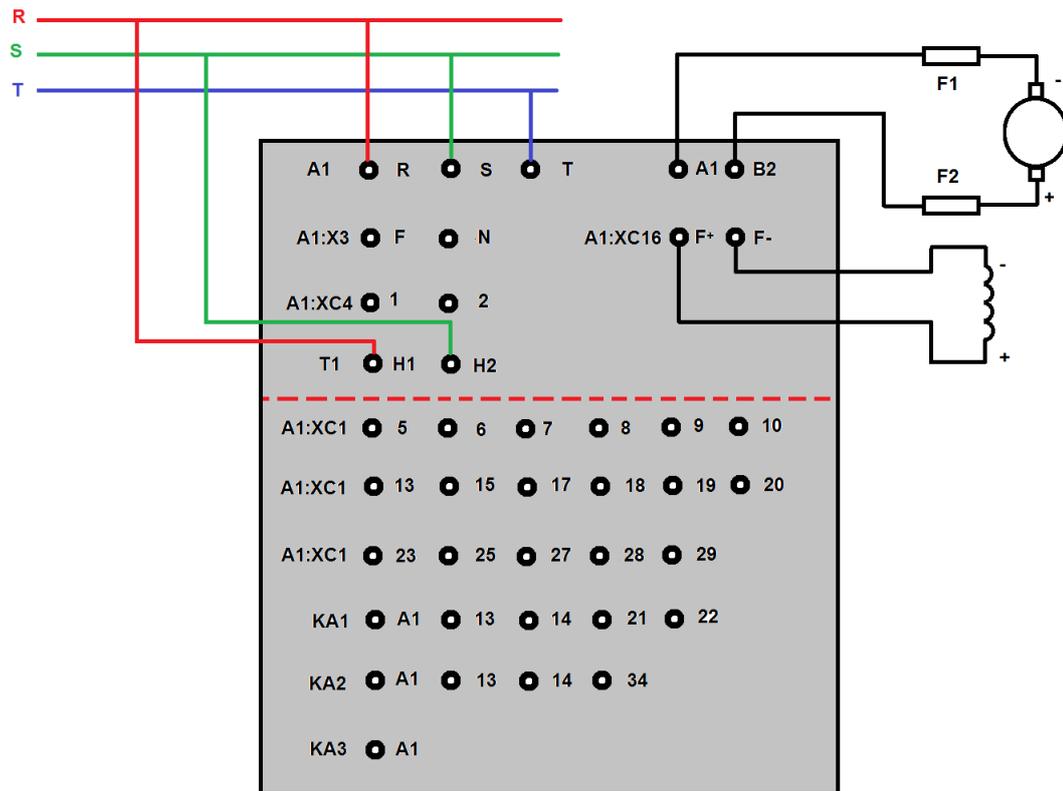
Figura 3.16- Energização do CTW900



Fonte: Elaborado pela autora

Diferentemente dos diagramas elétricos sugeridos nos catálogos do kit, para este tipo de realimentação de velocidade (realimentação por *fcem*), a ligação não é física, uma vez que o conversor já tem o conhecimento do valor dessa variável, sendo assim, a realimentação será feita internamente pelo conversor. Desse modo, as conexões de força devem ficar como as mostradas na Figura 3.17:

Figura 3.17- Conexões de força do novo diagrama elétrico



Fonte: Elaborado pela autora

Analisando a Figura 3.17 observa-se que o sinal oriundo dos terminais A1 e B2 da bancada didática passa, primeiramente, por um conjunto de fusíveis antes de ir para a armadura do motor CC. Esta configuração foi utilizada com o intuito de proteger o enrolamento da armadura do motor contra qualquer distúrbio no sinal proveniente do CTW900.

A alimentação do enrolamento de campo do motor CC pode ser feita tanto internamente quanto externamente (ver Figura 3.13). Quando alimentado internamente, duas fases da alimentação trifásica da armadura passam, primeiramente, por dois fusíveis ultrarrápidos, para que, em seguida, sejam enviadas para um circuito retificador, e finalmente, para o enrolamento de campo do motor CC. No entanto, é possível se fazer esta alimentação externamente, caso a tensão de entrada da armadura seja muito elevada para o campo do motor. Para tanto, com o conversor desenergizado, remove-se os fusíveis de campo. O kit de controle de velocidade vem com um cabo específico para fazer a alimentação externa, onde ele deve fazer a ligação indicada em verde na Figura 3.13. Neste caso é necessário proteger o circuito do campo com fusíveis externos.

Como já foi dito anteriormente, as conexões de controle devem ser feitas nas entradas digitais em XC1. Essas ligações variarão conforme o tipo de acionamento que se deseja fazer. O “Manual do Usuário” presente no kit, apresenta os acionamentos típicos deste equipamento, com os esquemas de ligação nas entradas digitais e a respectiva configuração dos parâmetros. Mais informações a respeito das ligações em XC1 e da configuração dos parâmetros vão ser discutidos no Capítulo 5 deste documento.

Com o novo diagrama de força e controle proposto, foram realizados vários testes com o intuito de observar tanto o comportamento do motor quanto as funções disponíveis no CTW900. Ao longo dos experimentos constatou-se também que a configuração dos parâmetros além de poder ser feita no próprio equipamento, ela pode ser desenvolvida com o auxílio de um software de programação e monitoração incluso no kit adquirido pelo laboratório, chamado SuperDrive G2. Mais informações a respeito deste software poderão ser vistas no capítulo seguinte.

4 SUPERDRIVE G2

De acordo com (21), uma das características do CTW900 é que ele possui um *software* de programação e monitoração gratuito, o SuperDrive G2. As principais características deste *software* são as seguintes:

- identificação online do drive conectado;
- configuração off-line do drive;
- transferência de parâmetros do PC para o drive;
- transferência de parâmetros do drive para o PC;
- edição off-line dos parâmetros armazenados no PC;
- edição online dos parâmetros no drive;
- monitoração do estado do drive;
- monitoração gráfica de parâmetros;
- configuração, importação e visualização de variáveis armazenadas na função *trace* do drive;
- importação e exportação de projeto.

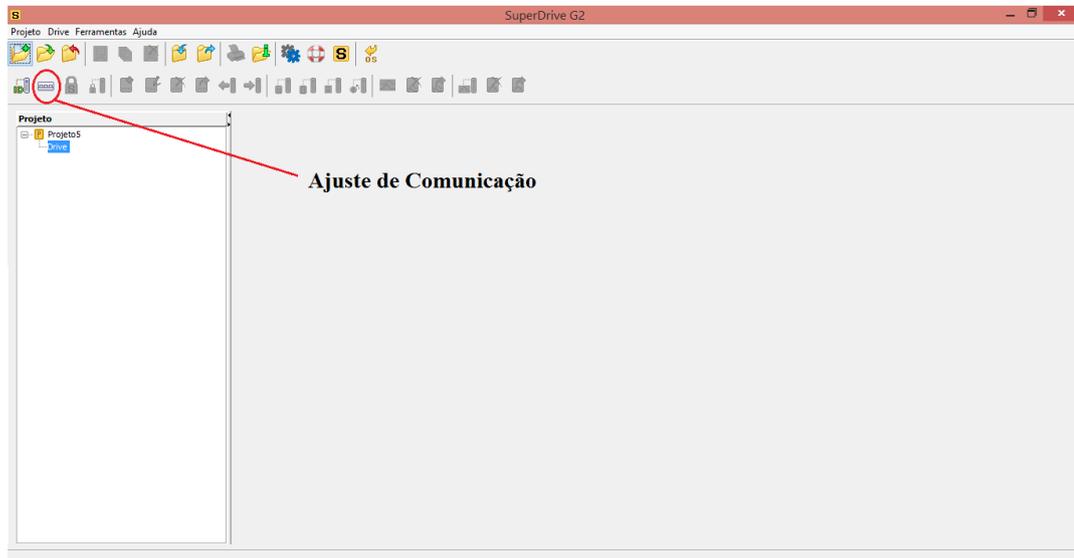
A comunicação entre o CTW900 e o PC deve ser feita utilizando um cabo USB incluso no kit de controle de velocidade. Já o arquivo para a instalação do *software* pode ser obtido tanto por meio de um CD incorporado ao kit, quanto a partir do *site* (22) da Weg.

Depois de instalar o SuperDrive G2 e de interligar o conversor ao computador, abrindo o *software*, uma janela como a da Figura 4.1 é mostrada. Para se fazer o ajuste de comunicação entre o drive e o PC basta, clicar no ícone indicado na imagem. Fazendo isso, aparecerá uma outra janela, conforme ilustra a Figura 4.2.

Na janela da Figura 4.2, é necessário atentar-se, primeiramente, a alguns detalhes, como por exemplo, qual tipo de comunicação deve ser utilizada. Como a conexão entre o PC e o conversor é feita através de um cabo USB, o item a ser escolhido no campo ‘tipo de conexão’ é o USB. Posteriormente, deve-se clicar no botão ‘obter versão’. Caso não haja nenhum problema de comunicação, o campo ‘nota’, apresentará uma mensagem informando a situação do driver USB instalado (Driver USB Ok!). A versão do driver USB instalada no computador

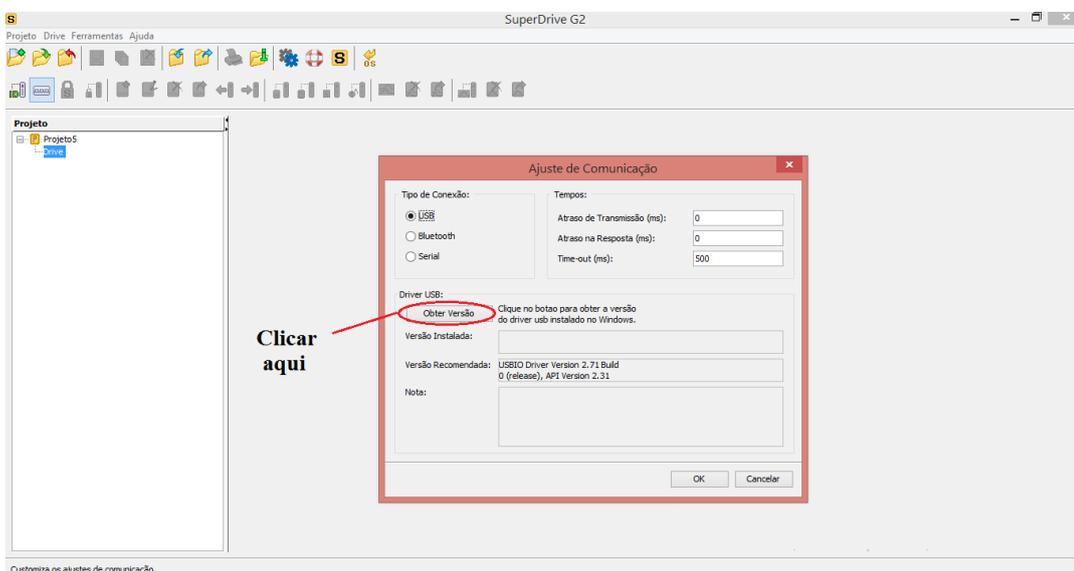
(campo ‘Versão Instalada’) deve ser compatível com a presente no campo ‘Versão Recomendada’.

Figura 4.1- Ajuste de comunicação entre o drive e o PC



Fonte: Elaborado pela autora

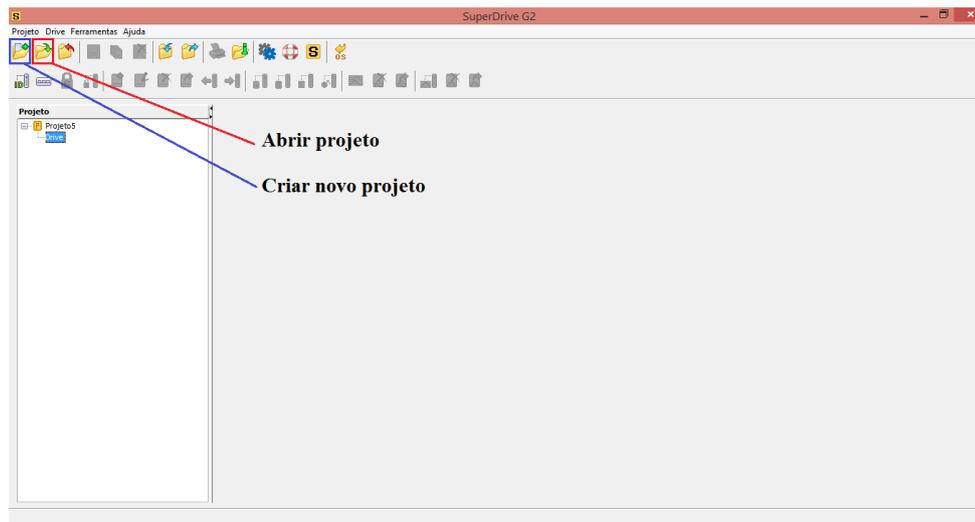
Figura 4.2- Obtendo versão do Driver



Fonte: Elaborado pela autora

Após a execução dos passos apresentados anteriormente, o usuário pode agora tanto criar um novo projeto quanto importar um já anteriormente desenvolvido. Isso pode ser feito clicando-se em um dos ícones indicados na Figura 4.3.

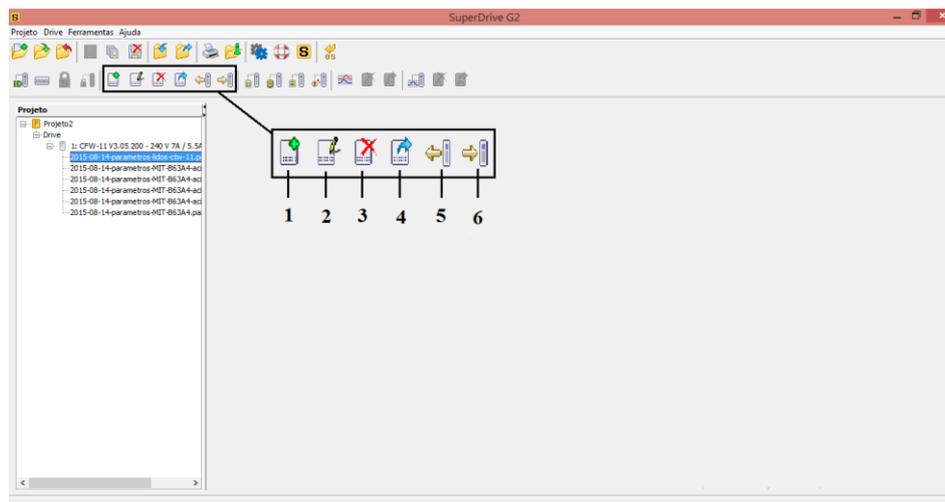
Figura 4.3- Criação e abertura de projetos



Fonte: Elaborado pela autora

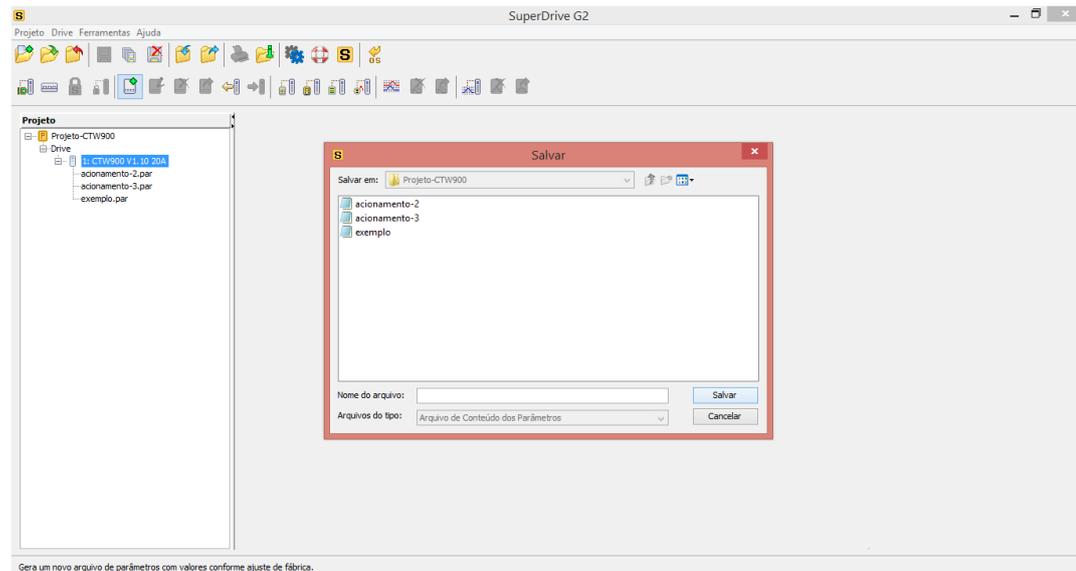
Para a criação de um novo arquivo de parâmetros de um dado projeto (gerado ou importado), basta clicar no ícone indicado pelo número 1 na Figura 4.4, e aparecerá uma janela como a da Figura 4.5. Nesta, nomeia-se o arquivo gerado como desejar e, em seguida, clica-se em salvar.

Figura 4.4- Parametrização do drive



Fonte: Elaborado pela autora

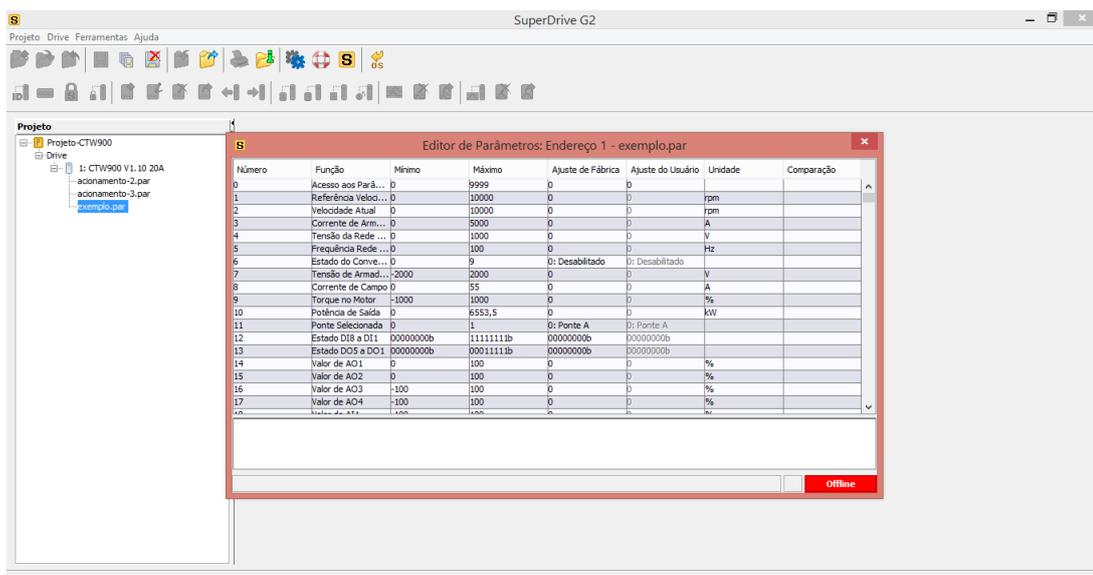
Figura 4.5- Criação novo arquivo de parâmetros



Fonte: Elaborado pela autora

O novo arquivo de parâmetros criado poderá ser configurado de acordo com a necessidade do usuário. Para isso, basta selecionar o arquivo e, em seguida, clicar no ícone 2 da Figura 4.4, onde aparecerá uma janela como a da Figura 4.6, em que tem-se todos os parâmetros do conversor. A configuração dos mesmos pode ser feita na coluna 'Ajuste do Usuário'.

Figura 4.6- Editor de parâmetros



Fonte: Elaborado pela autora

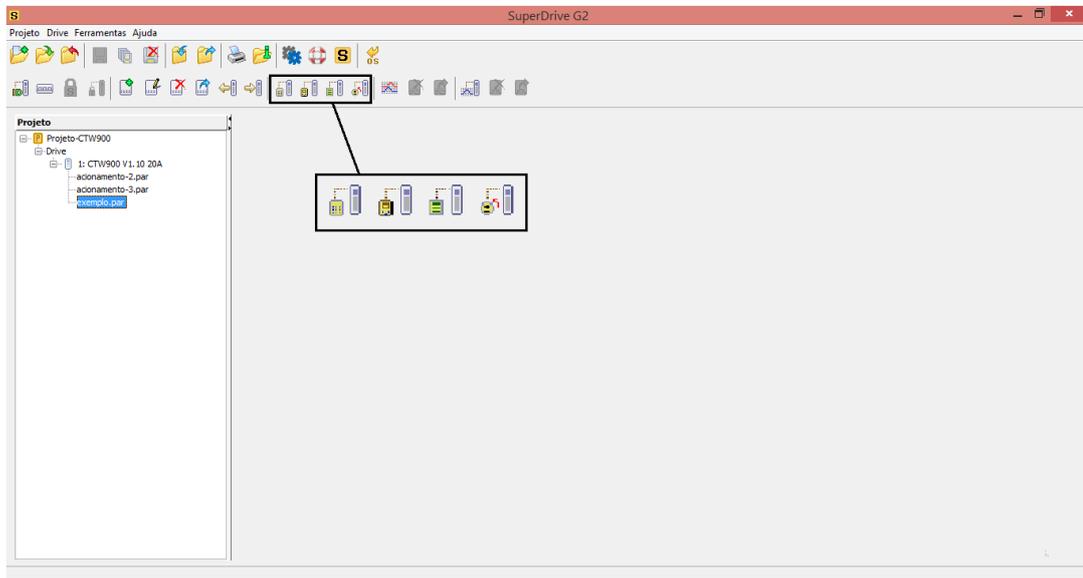
Assim que o usuário terminar a configuração dos parâmetros, deve-se, primeiramente, fechar o arquivo e, em seguida, clicar em ‘sim’ para salvar as alterações feitas. Para escrever essa nova configuração no drive (CTW900), basta selecionar o arquivo e clicar no ícone indicado pelo número 6 da Figura 4.4, e depois em ‘sim’ novamente para confirmar o envio dos parâmetros para o conversor.

Para remover ou exportar um arquivo de parâmetros, antes de tudo, se deve selecionar o arquivo desejado e, em seguida, pressionar um dos ícones indicados pelos números 3 (remover) ou 4 (exportar) da Figura 4.4.

Caso já se tenha feito a configuração dos parâmetros do conversor via HMI, e deseja-se que o arquivo criado no *software* tenha este mesmo perfil, clicando-se no ícone indicado pelo número 5 da Figura 4.4, é feita a leitura dos parâmetros do driver para o PC.

A partir do grupo de ícones indicado na Figura 4.7, se pode fazer o monitoramento dos parâmetros do CTW900, do status do conversor, e da referência de velocidade.

Figura 4.7- Grupo de ícones de monitoramento



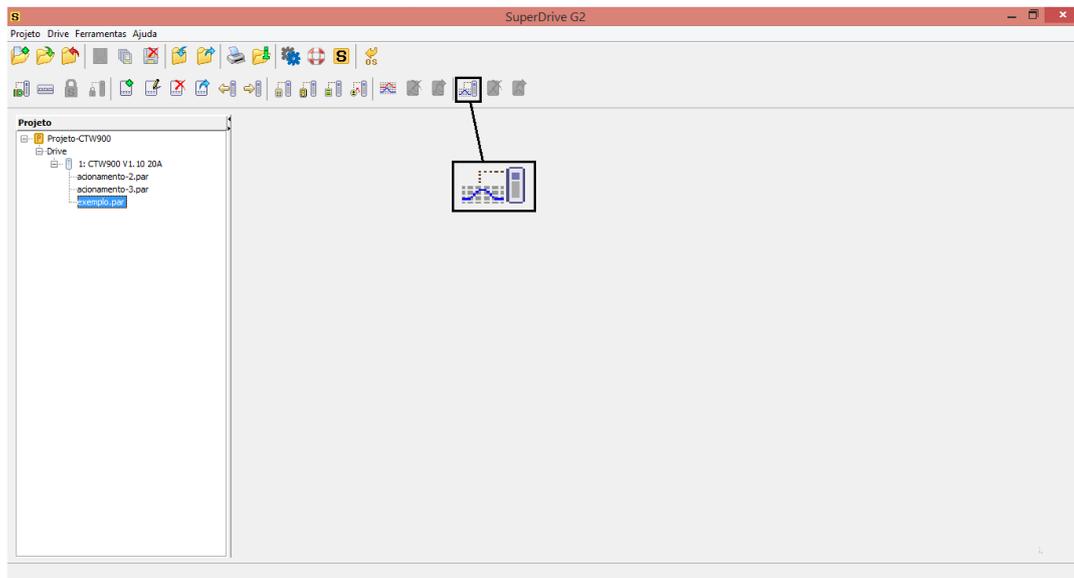
Fonte: Elaborado pela autora

Uma das funções do conversor disponíveis no *software* é a função *trace*. Ela é usada para registrar parâmetros (ex. corrente, tensão, velocidade) do CTW900 quando ocorre um determinado evento no sistema (ex. alarme/falha, corrente alta, etc). Este evento, por desencadear o processo de armazenamento dos dados, é chamado de *trigger* e é de fundamental

importância na função *trace*. De acordo com (23), os dados armazenados pela função *trace* podem ser visualizados nas saídas analógicas do conversor ou em um computador através do *software* SuperDrive G2, como aconteceu durante o período de testes (Capítulo 5).

A configuração dos parâmetros para a observação da função *trace* pode ser feita de dois modos. Um deles é por meio do ‘editor de parâmetros’, e o outro é através do ícone ‘função *trace*’ (ver Figura 4.8).

Figura 4.8- Ícone função *trace*



Fonte: Elaborado pela autora

Configurando-se os parâmetros da função *trace* a partir da janela de edição dos parâmetros (ver Figura 4.6), é necessário que se defina, primeiramente, a variável que será utilizada como fonte de “disparo” para a função *trace* através do parâmetro P0550 do CTW900. As opções para este parâmetro são:

Tabela 4.1- Opções do parâmetro P0550

Faixa de valores	Opções
0	Inativo
1	Referência Total
2	Velocidade Atual
3	Corrente de Armadura
4	Tensão de Armadura
5	Corrente de Campo
6	Torque do Motor
7	AI1
8	AI2
9	AI3
10	AI4

Fonte: CTW900- CONVERSOR CA/CC: Manual do Usuário, p.114 (20)

O valor do parâmetro programado em P0550 é comparado com uma referência determinada pelo usuário no parâmetro P0551.

Em seguida, a partir do parâmetro P0552, define-se a condição para que se inicie a aquisição dos sinais. As opções disponíveis são as seguintes:

Tabela 4.2- Opções do parâmetro P0552

Opção de P0552	Condição para início aquisição
P0550 = P0551	Variável selecionada em P0550 com valor igual ao ajustado em P0551
P0550 ≠ P0551	Variável selecionada em P0550 com valor diferente ao ajustado em P0551
P0550 > P0551	Variável selecionada em P0550 com valor maior ao ajustado em P0551
P0550 < P0551	Variável selecionada em P0550 com valor menor ao ajustado em P0551
Alarme	Detecção de uma condição de alarme no conversor
Falha	Ocorrência de uma falha no conversor
DIx	Entrada digital ativa

Fonte: CTW900- CONVERSOR CA/CC: Manual do Usuário, p.115 (20)

A quantidade de memória que o usuário deseja reservar para pontos da função *trace* deve ser feita através do parâmetro P0559. A faixa de ajuste é de 0 a 100%, o que corresponde solicitar a reserva de 0 a 15 KBytes para a função *trace*. Cada ponto armazenado pela função ocupa 2 bytes na memória do CTW900.

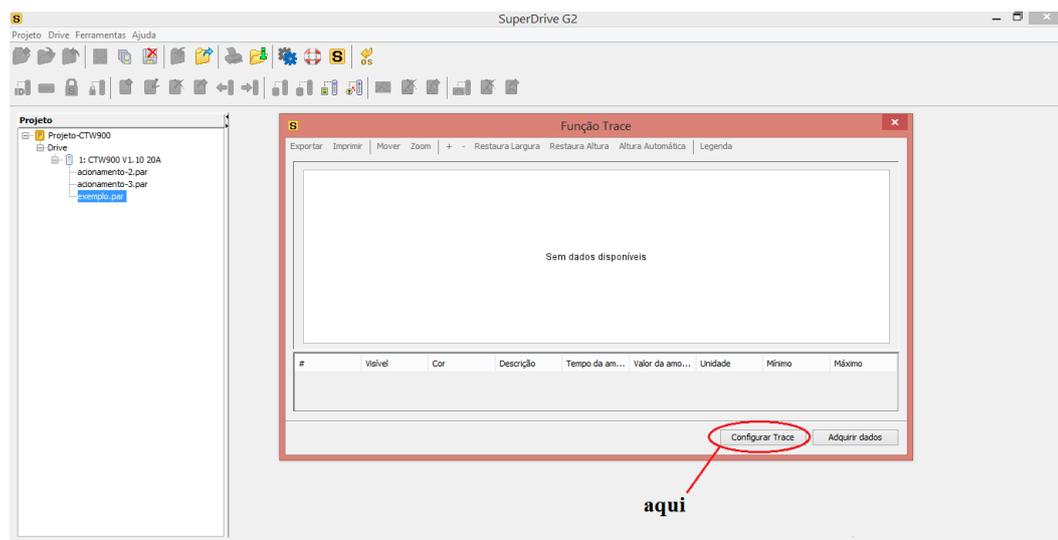
O parâmetro P0560 indica a quantidade de memória disponível para armazenar pontos da função *trace*, e sua faixa de variação é de 0 a 100%. Este parâmetro, geralmente, não está disponível para configuração.

Os sinais que serão registrados nos canais de 1 a 4 da função *trace* podem ser selecionados nos parâmetros P0561 a P0564. As opções para esses parâmetros são as mesmas apresentadas em P0550 (Tabela 4.1).

Para iniciar a espera pelo *trigger*, o parâmetro P0571 (Inicia *trace*) deve ser ativado. Esse é um parâmetro que pode ser alterado com o conversor em operação. Então, caso se deseja iniciar a função *trace* com o motor já em funcionamento, não é necessário pressionar “Salvar” na HMI para que se inicie a espera pelo *trigger*.

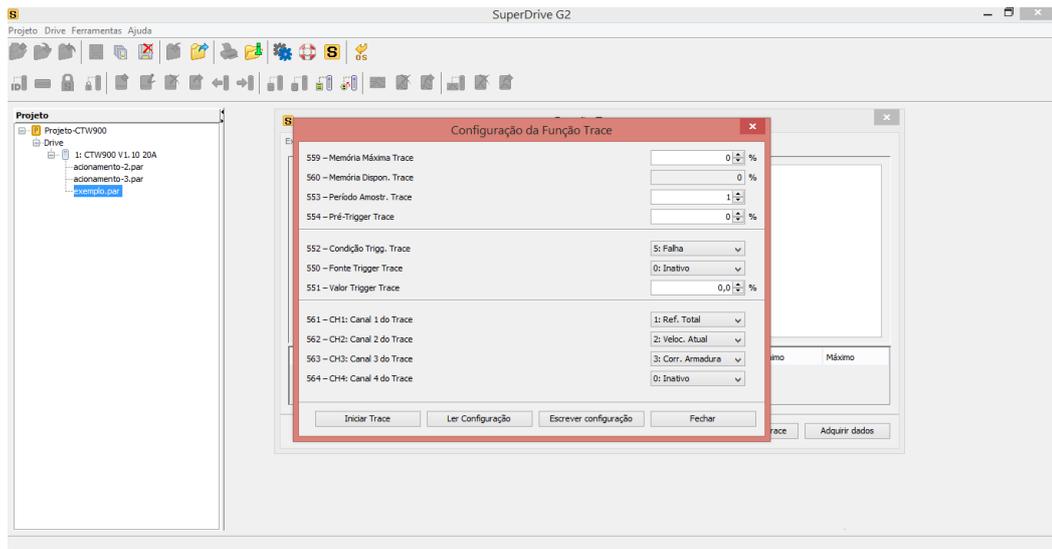
A configuração da função *trace* também pode ser feita clicando-se no ícone indicado na Figura 4.8. Fazendo isso, deve-se clicar, posteriormente, no botão mostrado na Figura 4.9, onde aparecerá uma janela como a da Figura 4.10. Esta janela apresenta todos os parâmetros que devem ser configurados nesta função. Depois que os mesmos forem ajustados conforme se deseja, é necessário que se pressione o botão ‘Escrever configuração’, e em seguida ‘Iniciar Trace’.

Figura 4.9- Botão para iniciar configuração da função *trace*



Fonte: Elaborado pela autora

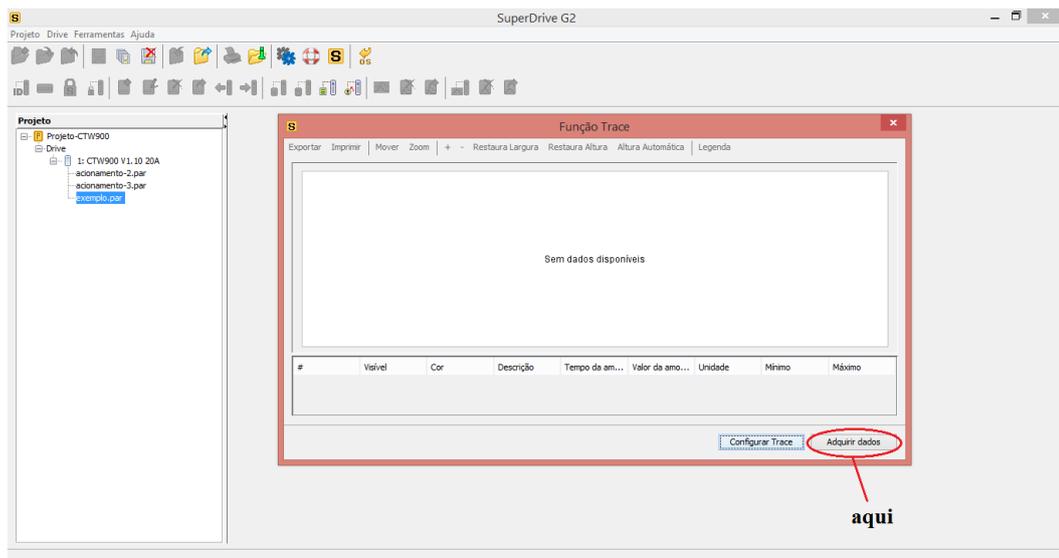
Figura 4.10- Janela de configuração da função trace



Fonte: Elaborado pela autora

Em ambos os modos de configuração da função *trace* (pelo editor de parâmetros ou pelo ícone função *trace*) a aquisição dos dados é feita clicando-se no botão ‘Adquirir dados’ da Figura 4.11. É recomendável também que se defina o período de amostragem do *trace*, ou seja, o tempo entre dois pontos de amostra em múltiplos de 200 μ s, a partir do parâmetro P0553.

Figura 4.11- Aquisição dos dados



Fonte: Elaborado pela autora

Como já foi apresentado ao leitor os conceitos básicos inerentes a compreensão do kit de controle de velocidade de motores CC CTW900 e o novo esquema de ligação proposto para os diagramas de força e controle no capítulo anterior, depois da apresentação do SuperDrive G2 neste capítulo, o próximo mostrará, a descrição, a configuração dos parâmetros, e os resultados obtidos em cada um dos experimentos realizados.

5 TESTES PRÁTICOS

A fim de observar o comportamento e as principais ferramentas do CTW900 no acionamento e no controle da velocidade de rotação de motores de corrente contínua, foram feitos uma série de experimentos práticos utilizando os acionamentos típicos e as funções básicas disponíveis no “Manual do Usuário” do kit.

Alguns desses experimentos foram realizados empregando o *software* SuperDrive G2. Por meio deste, obteve-se a aquisição dos sinais da velocidade de referência, da velocidade atual, da corrente e da tensão de armadura do motor CC, mediante diferentes fontes de *trigger* para o *trace*.

A seção a seguir apresentará a descrição dos experimentos práticos, a configuração dos parâmetros do conversor para cada tipo de acionamento e modo de controle da velocidade de rotação do motor CC sugerido pelo “Manual do Usuário” do CTW900.

5.1 Acionamentos Típicos

Para a realização dos acionamentos típicos sugeridos no “Manual do Usuário”, é necessário que se tenha como base o novo diagrama de força proposto no Capítulo 3 deste documento.

Foi constatado que as conexões de força serão as mesmas para qualquer tipo de acionamento. Desse modo, os enrolamentos de campo e armadura do motor CC devem ser conectados ao conversor CA/CC de acordo com os esquemas de ligação mostrados na Figura 3.17 presente no capítulo 3.

As conexões de controle devem ser feitas nas entradas digitais em XC1. Essas ligações variarão conforme o tipo de acionamento que se deseja fazer. Contudo, para qualquer acionamento, é necessário liberar os disparos da ponte da armadura. Para tanto, liga-se uma chave com retenção NA em uma das entradas digitais do equipamento, e configura-se o parâmetro correspondente a mesma como “Habilita Geral”.

A seguir serão apresentadas as conexões de controle e o modo de configuração dos parâmetros para diferentes tipos de acionamento e controle da velocidade de rotação de um motor CC utilizando o conversor CA/CC CTW900.

5.1.1 Acionamento 1

Neste acionamento o comando é feito via HMI (modo local). As saídas digitais são programadas com a configuração padrão de fábrica. É necessário apenas a conexão de uma chave na entrada digital DI1 de XC1, pré-programada como Habilita Geral, conforme ilustra a Figura 5.1.

Os parâmetros do equipamento que devem ser programados para este acionamento são:

- Tipo de realimentação: P0202 = 0 (*fcem*)
- Seleção fonte (modo local ou remoto) : P0220=2 (tecla LR – LOC) ou P0220=0 (sempre LOC)
- Configuração das entradas digitais:
 - DI1: P0263= 2 (Habilita Geral)
 - DI2: P0264= 1 (Gira/Para)
 - DI3: P0265= 8 (Sentido de Giro)
 - DI4: P0266= 0 (Sem Função)
 - DI5: P0267= 14 (2ª rampa)
 - DI6: P0268= 10 (JOG)

Depois de se fazer as conexões de força e controle de acordo com as Figuras 3.17 (Capítulo 3) e 5.1, respectivamente, e de configurar os parâmetros do conversor, o acionamento e o controle da velocidade de giro do motor CC é feito basicamente da seguinte forma:

Com o conversor energizado, a primeira coisa a ser feita para se acionar o motor CC é fechar a chave NA ligada à entrada digital 1 em XC1 configurada como “Habilita Geral”, de modo a liberar os disparos da ponte da armadura. Em seguida, para que o motor comece o seu movimento de rotação, basta que se aplique o comando “gira”, clicando-se na tecla 3 da HMI (ver Figura 3.11 do Capítulo 3). Para a inversão do sentido de giro da máquina, deve-se pressionar a tecla 7 indicada na Figura 3.11. É possível observar que, ao aplicar esse comando, a velocidade de giro do motor decai gradativamente até a sua parada, para que, em seguida, seu sentido de rotação seja invertido.

Pressionando-se a tecla 4 da Figura 3.11, a máquina cessa seu movimento de rotação. Observa-se que, quando o motor estiver parado, enquanto a tecla 5 (tecla JOG) for pressionada, o motor girará de acordo com a velocidade configurada no parâmetro P0122 (Referência

JOG/JOG+). A variação da velocidade do motor CC é feita por meio das teclas 2 e 8 (aumento da velocidade é feito pela tecla 2 e o declínio pela tecla 8).

Figura 5.1- Conexões em XC1 para acionamento 1

Conector XC1		
1	+ REF	
2	AI1 +	
3	AI1 -	
4	- REF	
5	AI2 +	
6	AI2 -	
7	AO1	
8	AGND (24V)	
9	AO2	
10	AGND (24V)	
11	DGND*	
12	COM	
13	24 Vcc	
14	COM	
15	DI1	
16	DI2	
17	DI3	
18	DI4	
19	DI5	
20	DI6	
21	NF1	DO1
22	C1	(RL1)
23	NA1	
24	NF2	DO2
25	C2	(RL2)
26	NA2	
27	NF3	DO3
28	C3	(RL3)
29	NA3	

Habilita Geral

Fonte: Elaborado pela autora

5.1.2 Acionamento 2

Neste acionamento o controle é feito no modo remoto. Todos os comandos realizados anteriormente por meio das teclas da HMI (modo local), agora serão feitos através de chaves ligadas às entradas digitais do conversor, como mostra a Figura 5.2. As ligações do potenciômetro conectado nas entradas 1, 2, 3 e 4 de XC1 indicadas na Figura 5.2, são feitas internamente ao equipamento. Todas as chaves interligadas nas entradas digitais são do tipo NA com retenção.

Os parâmetros do CTW900 para este acionamento devem ser programados da seguinte maneira:

- Tipo de realimentação: P0202 = 0 (fcem)
- Seleção fonte (modo local ou remoto): P0220=3 (tecla LR – REM) ou P0220= 1 (sempre REM)

➤ Configuração das entradas digitais:

DI1: P0263= 2 (Habilita Geral)

DI2: P0264= 0 (Sem Função)

DI3: P0265= 1 (Gira/Para)

DI4: P0266= 8 (Sentido de Giro)

DI5: P0267= 0 (Sem Função)

DI6: P0268= 10 (JOG)

O modo de acionamento do motor CC neste experimento, é análogo ao do acionamento 1. Primeiramente, deve-se liberar os disparos da ponte da armadura, fechando a chave interligada a entrada digital 1 configurada como “Habilita Geral”. Em seguida, para girar o motor, deve-se fechar a chave ligada a entrada digital 3 (conector 17 em XC1). Para parar o motor, basta abrir a mesma chave.

O sentido de giro do motor pode ser alterado fechando-se a chave conectada a entrada digital 4 (conector 18 em XC1). Nesta situação, a velocidade do motor decairá até parar, para que, em seguida, o sentido de rotação seja invertido. Para voltar ao sentido de giro original, basta abrir a mesma chave.

No modo remoto, o comando JOG também é aplicado com o motor parado. Ao fechar a chave interligada ao conector 20 em XC1, motor girará de acordo com a velocidade configurada no parâmetro P0122. Abrindo-se a chave, o motor voltará gradativamente a inércia.

A velocidade do motor pode ser alterada variando-se a resistência do potenciômetro presente na bancada didática. Este potenciômetro é responsável pelo comando remoto da referência de velocidade.

Figura 5.2- Conexões em XC1 para acionamento 2



Fonte: Elaborado pela autora

5.1.3 Acionamento 3

Neste acionamento é feita a habilitação da função gira/para por meio dos comandos *start* e *stop*. Assim como nos acionamentos anteriores, se conecta a chave responsável por liberar os disparos da ponte da armadura na entrada digital 1, e a configura como “Habilita Geral”. Os comandos *start* (liga/gira) e *stop* (desliga/stop) devem ser realizados por botoeiras pulsantes (sem retenção), NA (normalmente aberta) e NF (normalmente fechada), respectivamente.

Os parâmetros do CTW900 que devem ser programados são:

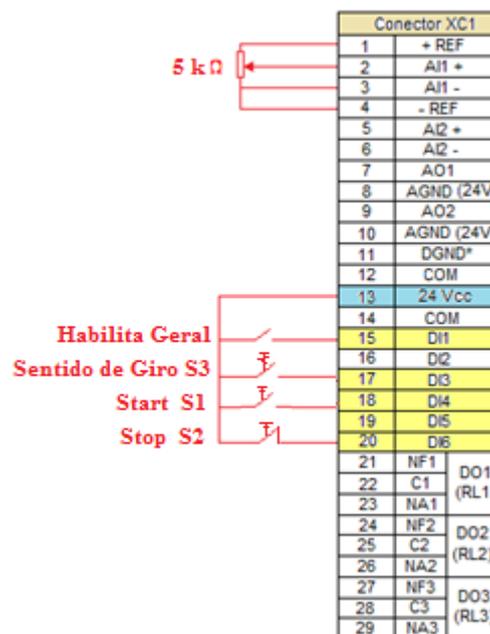
- Tipo de realimentação: P0202= 0 (fcem)
- Seleção fonte (modo local ou remoto): P0220= 3 (tecla LR – REM) ou P0220=1 (sempre REM)
- Configuração das entradas digitais:
 - DI1: P0263= 2 (Habilita Geral)
 - DI2: P0264= 0 (Sem Função)
 - DI3: P0265= 8 (Sentido de Giro)
 - DI4: P0266=6 (Start)

DI5: P0267= 7 (Stop)

DI6: P0268= 0 (Sem Função)

Com base na Figura 5.3, o acionamento do motor CC neste experimento é feito, primeiramente, fechando-se a chave NA com retenção ligada a entrada digital 1 configurada como “Habilita Geral”. Em seguida, ao pressionar a botoeira S1 (*start*), o motor entra em rotação. Apertando-se o botão S2 (*stop*), a velocidade de rotação do motor cai gradativamente até a sua parada. A chave S3 tem a função de inverter o sentido de giro da máquina, de horário para anti-horário, e vice-versa. Variando-se a resistência do potenciômetro inserido na bancada didática, é possível controlar a velocidade de rotação do motor.

Figura 5.3- Conexões em XC1 para acionamento 3



Fonte: Elaborado pela autora

5.1.4 Acionamento 4

Neste acionamento, o sentido de rotação do motor é definido pelas entradas digitais do conversor ajustadas como ‘avanço’ e ‘retorno’. Como pode ser observado a partir da Figura 5.4, o conector 17 em XC1 (entrada digital 3 – DI3) é configurado com a função avanço, e o conector 18 (entrada digital 4 – DI4) com a função retorno. Ajusta-se a entrada digital 1 (conector 15 em XC1) com a função habilita geral, onde serão liberados os disparos da ponte da armadura.

Os parâmetros do CTW900 devem ser programados da seguinte maneira:

- Tipo de realimentação: P0202 = 0 (fcem)
- Seleção fonte (modo local ou remoto): P0220=3 (tecla LR – REM) ou P0220=1
- Configuração das entradas digitais:
 - DI1: P0263= 2 (Habilita Geral)
 - DI2: P0264= 0 (Sem Função)
 - DI3: P0265= 4 (Avanço)
 - DI4: P0266= 5 (Retorno)
 - DI5: P0267= 0 (Sem Função)
 - DI6: P0268= 0 (Sem Função)

Como nos acionamentos precedentes, inicialmente, fecha-se a chave conectada à entrada digital 1 configurada como “Habilita geral”, de modo a liberar os disparos da ponte da armadura. Posteriormente, de acordo com a Figura 5.4, fechando-se a chave S1, configurada com a função avanço, e mantendo a chave S2 aberta (retorno), é possível observar o motor girando no sentido horário. Abrindo-se a chave S1, e fechando-se a chave S2, ajustada com a função retorno, o motor passa a girar no sentido de rotação anti-horário.

Como já foi dito anteriormente, com a chave ‘avanço’ fechada e a ‘retorno’ aberta, o motor girará no sentido de rotação horário. Porém, se com esta configuração, a chave configurada com a função retorno também for fechada, o motor continuará girando no sentido de rotação original, de modo a evitar conflito de comandos.

Utilizando os acionamentos típicos citados anteriormente para se fazer o controle da velocidade de giro do motor, é possível observar algumas das funções do conversor CA/CC CTW900, como por exemplo, a função *multispeed*. A próxima seção mostrará com mais detalhes a respeito das propriedades dessa função.

Figura 5.4- Conexões em XC1 para acionamento 4

Conector XC1		
1	+ REF	
2	A11 +	
3	A11 -	
4	- REF	
5	A12 +	
6	A12 -	
7	A01	
8	AGND (24V)	
9	A02	
10	AGND (24V)	
11	DGND*	
12	COM	
13	24 Vcc	
14	COM	
15	DI1	
16	DI2	
17	DI3	
18	DI4	
19	DI5	
20	DI6	
21	NF1	DO1
22	C1	(RL1)
23	NA1	
24	NF2	DO2
25	C2	(RL2)
26	NA2	
27	NF3	DO3
28	C3	(RL3)
29	NA3	

Fonte: Elaborado pela autora

5.2 Função *Multispeed*

Uma das funções do conversor CA/CC CTW900 é a função *multispeed*. Ela traz como vantagens a estabilidade das referências fixas pré-programadas e a imunidade contra ruídos elétricos (entradas digitais isoladas). Esta função é ativada configurando o parâmetro de Seleção de Referência LOC P0221=8 (*Multispeed*).

Com a função *multispeed* é possível ter até 8 velocidades pré-programadas por meio dos parâmetros P0124 a P0131 (referência *multispeed*). Estas velocidades são comandadas através da combinação de três entradas digitais do conversor, as quais podem ser acionadas por meio de chaves NA com retenção, conforme mostra a Figura 5.5. Para a observação da função *multispeed*, seleciona-se o modo de operação do conversor como local (P0220=2 (tecla LR – LOC) ou P0220=0 (sempre LOC)), e configura-se as entradas digitais em XC1 da seguinte maneira:

- Configuração das entradas digitais:
 - DI1: P0263= 2 (Habilita Geral)
 - DI2: P0264= 1 (Gira/Para)

- DI3: P0265= 8 (Sentido de Giro)
 DI4: P0266= 13 (Multispeed)
 DI5: P0267= 13 (Multispeed)
 DI6: P0268= 13 (Multispeed)

Cada um dos parâmetros de referência de velocidade *multispeed* podem ser configurados com a velocidade desejada. Utilizou-se a programação padrão de fábrica conforme se segue:

- P0124 = 90 rpm
- P0125 = 300 rpm
- P0126 = 600 rpm
- P0127 = 900 rpm
- P0128 = 1200 rpm
- P0129 = 1500 rpm
- P0130 = 1800 rpm
- P0131=1650 rpm

Figura 5.5- Conexões em XC1 para acionamento *multispeed*

Conector XC1		
1	+ REF	
2	A11 +	
3	A11 -	
4	- REF	
5	A12 +	
6	A12 -	
7	A01	
8	AGND (24V)	
9	A02	
10	AGND (24V)	
11	DGND*	
12	COM	
13	24 Vcc	
14	COM	
15	DI1	
16	DI2	
17	DI3	
18	DI4	
19	DI5	
20	DI6	
21	NF1	DO1
22	C1	(RL1)
23	NA1	
24	NF2	DO2
25	C2	(RL2)
26	NA2	
27	NF3	DO3
28	C3	(RL3)
29	NA3	

Fonte: Elaborado pela autora

As referências de velocidade *multispeed* selecionadas vão variar conforme os estados das entradas digitais, como mostra a tabela a seguir:

Tabela 5.1- Referências *Multispeed* selecionadas conforme estado das DI's

DI4	DI5	DI6	Referência de Velocidade
0V	0V	0V	P0124
24V	0V	0V	P0125
0V	24V	0V	P0126
24V	24V	0V	P0127
0V	0V	24V	P0128
24V	0V	24V	P0129
0V	24V	24V	P0130
24V	24V	24V	P0131

Fonte: CTW900- CONVERSOR CA/CC: Manual do Usuário, p.81 (20)

A Tabela 5.1 mostra todas as combinações possíveis de abertura e fechamento das chaves e suas respectivas velocidades equivalentes. Nota-se que, a chave aberta corresponde ao nível lógico 0 (0V), e a chave fechada ao nível lógico 1 (24V). Observa-se que a velocidade de rotação do motor CC variará de acordo com a comutação das chaves ligadas às entradas digitais 4, 5 e 6. Por exemplo, quando todas as chaves estiverem abertas, o motor girará conforme for a velocidade programada no parâmetro P0124. Quando apenas a chave conectada a entrada digital 4 estiver fechada e as outras abertas, a velocidade de rotação será aproximadamente igual a configurada no parâmetro P0125.

Além da função *multispeed*, o CTW900 oferece ainda, a possibilidade de alteração dos tempos de aceleração e desaceleração do motor CC, por meio das funções de rampa do conversor. Com base nisso, a próxima seção exibirá o comportamento do motor, mediante a modificação dos valores desses tempos.

5.3 Funções de Rampa

As funções de rampa do conversor permitem que o motor acelere e desacelere de forma mais rápida ou mais lenta, ou ainda segundo algum perfil específico. Isso significa que os

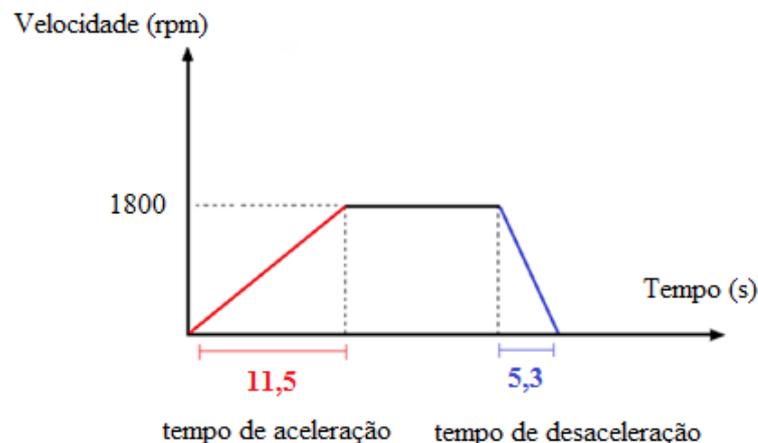
tempos de aceleração e desaceleração podem ser alterados de modo a se adequarem as características do motor utilizado.

A partir dos parâmetros P0100 e P0101, é possível configurar os tempos de aceleração e desaceleração, respectivamente, do motor CC. P0100 define o tempo para acelerar linearmente de 0 até a velocidade máxima (definida em P0134), e P0101 para desacelerar linearmente da velocidade máxima até 0. Para P0100 e P0101 ajustados em 0.0s significa que a rampa está desabilitada.

Para a observação das funções de rampa do CTW900, basta utilizar qualquer um dos acionamentos citados na seção 5.1 deste capítulo, e configurar os parâmetros P100 e P101 com os valores desejados.

A princípio, utilizando o acionamento 1 apresentado na seção 5.1.1, parametrizou-se o tempo de aceleração em 12s e o de desaceleração em 6s. Em seguida, acionou-se o motor, e observou-se o tempo que o mesmo levava para sair da inércia até atingir a velocidade de 1800 rpm, e o tempo gasto para que sua velocidade decaia de 1800 rpm até 0rpm. A rampa de aceleração e desaceleração obtida pode ser observada na Figura 5.6.

Figura 5.6- Rampa de aceleração e desaceleração para velocidade nominal de 1800 rpm

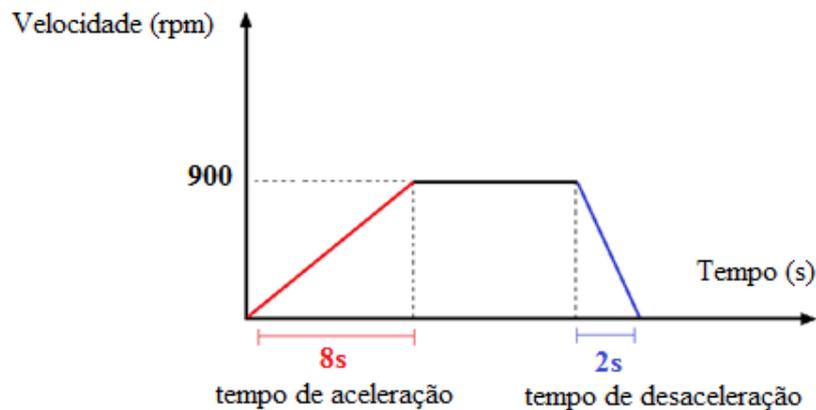


Fonte: Elaborado pela autora

Com base no gráfico apresentado na Figura 5.6, observa-se que o tempo gasto para o motor atingir a velocidade final (1800 rpm) foi de aproximadamente 11,5 s, e o tempo gasto para o motor decair sua velocidade até a parada total foi de 5,3 s. Nota-se que os valores obtidos na prática foram bem próximos dos configurados.

Utilizando o potenciômetro, reduziu-se a velocidade final de 1800 rpm para a metade, 900 rpm, porém, manteve-se os tempos de aceleração e desaceleração em 12s e 6s, respectivamente. Assim como no experimento anterior, observou-se o tempo necessário para motor atingir a velocidade nominal (900 rpm), e o tempo gasto para sair de 900 rpm até a inércia. A Figura 5.7 ilustra a rampa de aceleração e desaceleração para esta situação.

Figura 5.7- Rampa de aceleração e desaceleração para velocidade nominal de 900 rpm



Fonte: Elaborado pela autora

Ao reduzir a velocidade nominal do motor pela metade, os tempos de aceleração e desaceleração diminuiriam consideravelmente em relação aos valores configurados para os mesmos. Isto pode ser entendido analisando as Equações 2.10 e 2.11 do Capítulo 2. Como já foi mostrado anteriormente, os tempos de aceleração (t_a) e desaceleração (t_d) são funções da variação de velocidade, ou seja, a diferença entre a velocidade nominal e a velocidade inicial ou de parada, $\omega_2 - \omega_1$.

Considerando ω_2 como a velocidade nominal e ω_1 como a velocidade inicial ou de parada, ou seja, zero, as equações 2.10 e 2.11 ficam conforme mostra as equações 5.1 e 5.2. Constata-se que os tempos de aceleração e desaceleração do motor variam conforme for a velocidade nominal.

$$t_a = J \frac{\omega_2}{C_{am}} \quad (5.1)$$

$$t_d = J \frac{\omega_2}{C_{rm}} \quad (5.2)$$

A configuração dos parâmetros para a realização dos experimentos mostrados até agora nas seções anteriores, era feita a partir da HMI do CTW900. Porém, como já foi dito neste trabalho, esse ajuste também pode ser realizado utilizando-se o *software* de programação e monitoração SuperDrive G2.

5.4 Testes Práticos Utilizando o SuperDrive G2

Com o intuito de observar o funcionamento da função *trace* e se fazer a aquisição de alguns dados a respeito do motor CC, foram realizados testes práticos utilizando o *software* SuperDrive G2. A seguir serão citados alguns destes testes, e apresentados os resultados obtidos.

5.4.1 Teste 1

Neste primeiro teste, considerou-se como sendo a fonte de *trigger*, a ‘tensão de armadura’, e ajustou-se o valor a ser comparado com ela em 0%. Definiu-se como condição inicial para a aquisição dos sinais, o momento em que a tensão da armadura for diferente do valor de *trigger* para o *trace* declarado (0V). Considerou-se um período de amostragem de 0,5s.

O tipo de acionamento utilizado para realizar este experimento foi o Acionamento 1 (seção 5.1.1), no qual pode-se conseguir a velocidade desejada apenas manipulando as teclas da HMI. No entanto, qualquer um dos outros modos de acionar o motor CC citados na seção 5.1 podem ser usados. Para a realização deste teste, os parâmetros do CTW900 devem ser configurados da seguinte maneira:

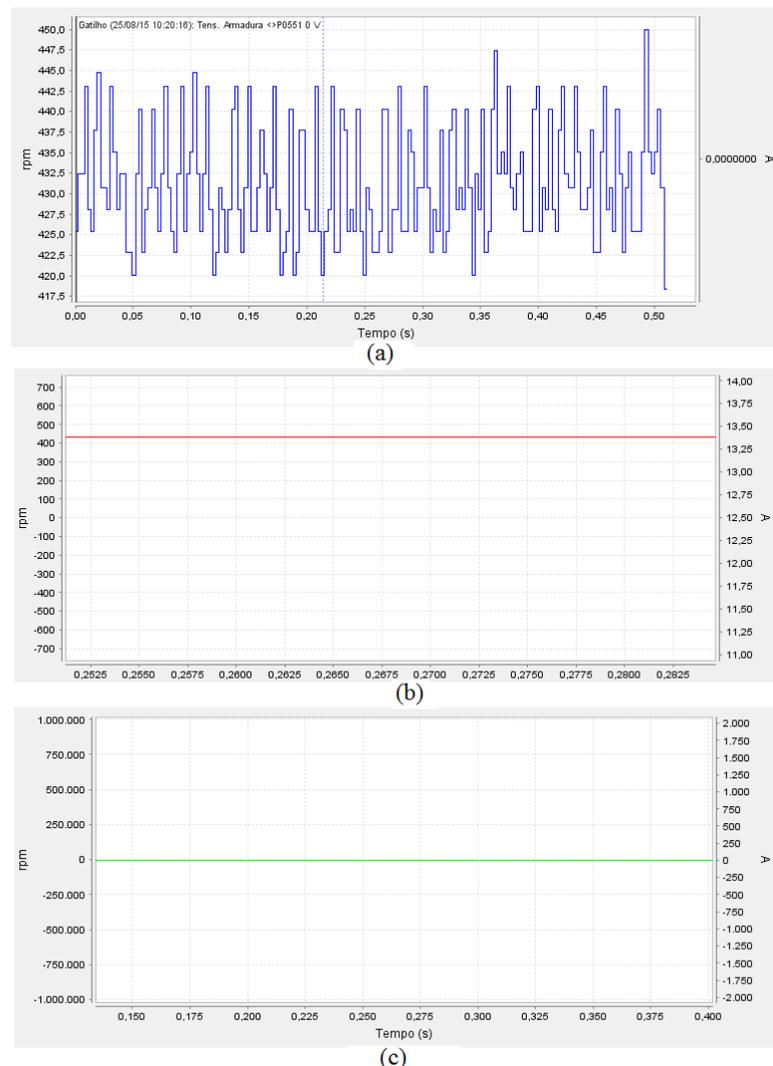
Tabela 5.2- Configuração dos Parâmetros teste 1

Parâmetro	Descrição do Parâmetro	Opção
P0550	Fonte de Trigger para o Trace	4 = Tensão de Armadura
P0551	Valor de Trigger para o Trace	0.0%
P0552	Condição de Trigger para o Trace	1 = P0550 < > P0551
P0553	Período de Amostragem do Trace	1
P0559	Memória Máxima para o Trace	100%
P0561	CH1: Canal 1 do Trace	1= Referência Total
P0562	CH2: Canal 2 do Trace	2= Velocidade Atual
P0563	CH3: Canal 3 do Trace	3= Corrente de Armadura
P0564	CH4: Canal 4 do Trace	0= Inativo

De acordo com a configuração dos parâmetros proposta (Tabela 5.2), o “gatilho” (*trigger*) é disparado quando a tensão de armadura for diferente de 0V, o que implica que a condição de *trigger* para o *trace* é respeitada assim que o motor começa a girar. Os gráficos da Figura 5.8 mostram os sinais da velocidade atual, da referência total e da corrente de armadura no momento do gatilho.

Por meio da Figura 5.8-(b) observa-se que, no momento de disparo do *trigger*, a velocidade de referência foi de aproximadamente 430 rpm. Durante o intervalo de amostragem de 0,5 s, constata-se que a velocidade de rotação do motor oscilou de 420 a 445 rpm, como ilustra a Figura 5.8-(a). A corrente de armadura (Figura 5.8-(c)) foi 0 A. Supõe-se que isso ocorreu em consequência do tipo de realimentação de velocidade utilizada (realimentação por *fcm*), que necessita de uma compensação interna de corrente e resistência na armadura.

Figura 5.8- Sinais de saída teste 1 para: (a) velocidade atual; (b) referência total; (c) corrente de armadura



Fonte: Elaborado pela autora

5.4.2 Teste 2

No segundo teste, também considerou-se a tensão de armadura como sendo a fonte de *trigger*. O valor a ser comparado com essa tensão foi ajustado de modo que o “gatilho” fosse disparado quando a fonte de *trigger* fosse maior que 132V, que corresponde a 60% da tensão nominal da armadura (220V). O período de amostragem definido foi de 4s. Assim como no primeiro teste, o tipo de acionamento utilizado foi o ‘acionamento 1’.

A configuração dos parâmetros deve ser feita conforme mostra a Tabela 5.3.

Tabela 5.3- Programação dos parâmetros teste 2

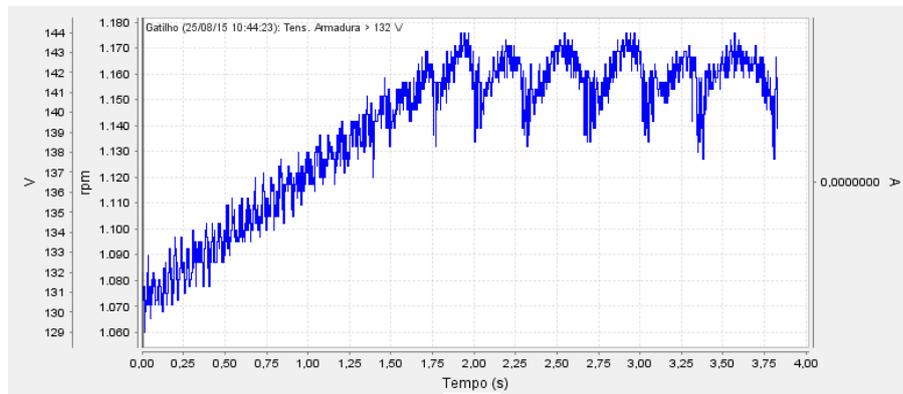
Parâmetro	Descrição do Parâmetro	Opção
P0550	Fonte de Trigger para o Trace	4 = Tensão de Armadura
P0551	Valor de Trigger para o Trace	60%
P0552	Condição de Trigger para o Trace	2 = P0550 > P0551
P0553	Período de Amostragem do Trace	10
P0559	Memória Máxima para o Trace	100%
P0561	CH1: Canal 1 do Trace	1= Referência Total
P0562	CH2: Canal 2 do Trace	2= Velocidade Atual
P0563	CH3: Canal 3 do Trace	3= Corrente de Armadura
P0564	CH4: Canal 4 do Trace	4= Tensão de Armadura

Como mostra os gráficos da Figura 5.9, depois de iniciada a função *trace*, o *trigger* ocorre somente quando a tensão de armadura atinge 60% do valor especificado para a tensão nominal da armadura a partir do parâmetro P0400, que no caso foi 220 V.

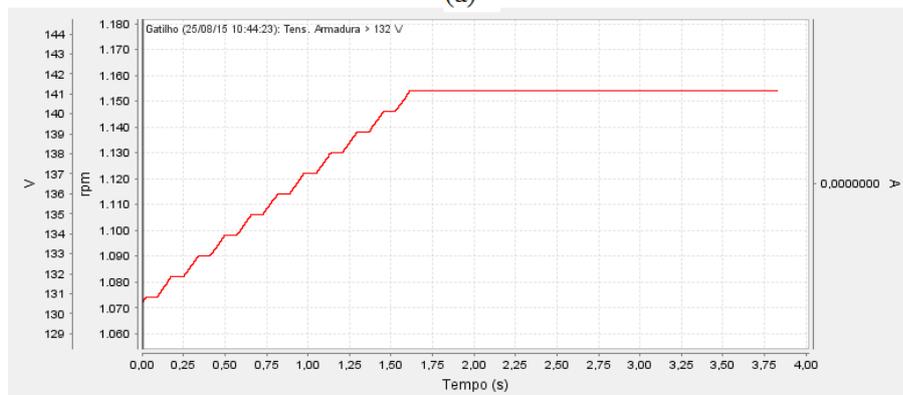
Observa-se que a velocidade atual do motor, a tensão de armadura, e a referência total (Figura 5.9-(a), Figura 5.9-(d), Figura 5.9-(b), respectivamente) só tenderam a se estabilizar por volta dos 1,75 s, o que permitiu a visualização da rampa de aceleração do motor. A rampa de desaceleração não pôde ser vista, porque a aquisição dos dados se encerrou em 4s, que foi o tempo especificado para o período de amostragem.

Assim como no primeiro teste, a corrente de armadura também foi 0A devido ao tipo de realimentação utilizada (*fcem*).

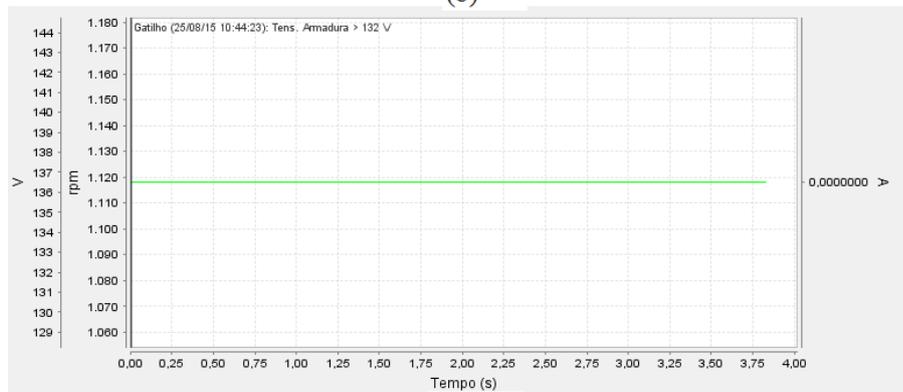
Figura 5.9- Sinais de saída teste 2 para: (a) velocidade atual; (b) referência total; (c) corrente de armadura; (d) tensão de armadura



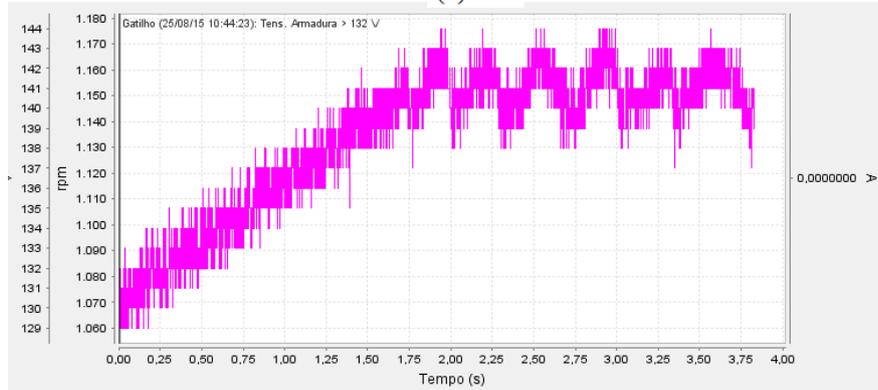
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaborado pela autora

5.4.3 Teste 3

O intuito do terceiro teste foi visualizar o que ocorreria com o sinal de saída das variáveis correspondentes aos canais do *trace*, quando, no momento do *trigger*, houvesse a comutação da velocidade do motor e, conseqüentemente da tensão de armadura (fonte de *trigger trace*), de um dado valor para outro maior, utilizando a função *multispeed*. Para tanto, especificou-se que o gatilho ocorreria no instante em que a tensão de armadura fosse maior que 30 % do valor especificado no parâmetro P0400 (Tensão nominal da armadura – 220V).

Para que fosse possível se fazer esta comutação de velocidade e ainda observar os sinais de saída das variáveis, optou-se por ajustar o tempo de amostragem dos dados para um valor maior, que no caso foram 40 s.

A programação dos parâmetros para este teste é a seguinte:

Tabela 5.4- Programação dos parâmetros teste 3

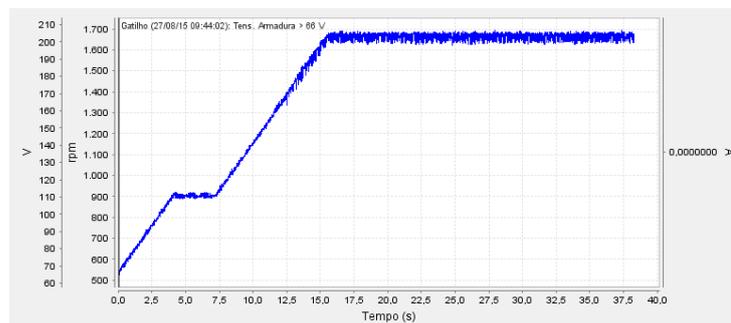
Parâmetro	Descrição do Parâmetro	Opção
P0550	Fonte de Trigger para o Trace	4 = Tensão de Armadura
P0551	Valor de Trigger para o Trace	30%
P0552	Condição de Trigger para o Trace	2 = P0550 > P0551
P0553	Período de Amostragem do Trace	100
P0559	Memória Máxima para o Trace	100%
P0561	CH1: Canal 1 do Trace	1= Referência Total
P0562	CH2: Canal 2 do Trace	2= Velocidade Atual
P0563	CH3: Canal 3 do Trace	3= Corrente de Armadura
P0564	CH4: Canal 4 do Trace	4= Tensão de Armadura

Os sinais de saída da velocidade atual do motor, da referência total, da tensão e da corrente de armadura, podem ser vistos a partir da Figura 5.10. Nota-se que o *trigger* foi disparado quando a tensão de armadura atingiu 66 V, o que corresponde a 30% de 220V (tensão nominal da armadura).

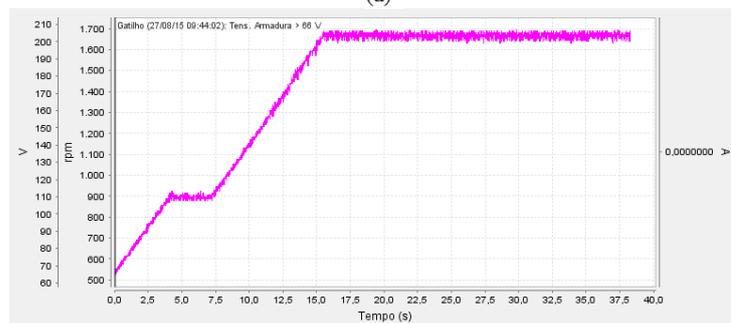
No instante em se iniciou a aquisição dos dados, ajustou-se a velocidade de rotação do motor em 900 rpm e, observou-se que o tempo gasto pelo motor para atingir essa velocidade

foi de aproximadamente 4 s. Quando já haviam se passado aproximadamente 7,5 s desde o início da aquisição dos dados, manipulou-se novamente as chaves a fim de que a velocidade de rotação passasse a ser 1650 rpm. Notou-se que o motor levou aproximadamente 7,5 s para que sua velocidade se estabelecesse em 1650 rpm. Assim como no segundo teste, não foi possível observar o tempo de desaceleração do motor.

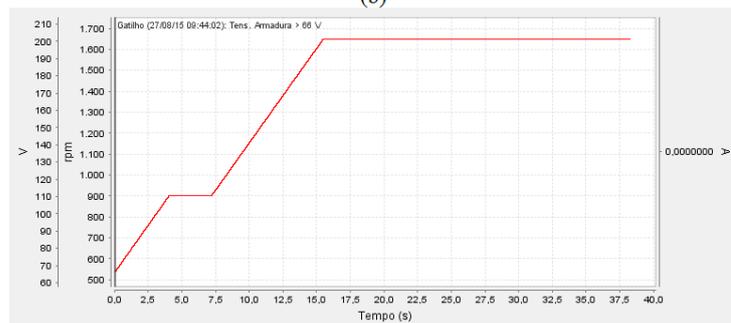
Figura 5.10- Sinais de saída teste 3 para: (a) velocidade atual; (b) tensão de armadura; (c) referência total; (d) corrente de armadura



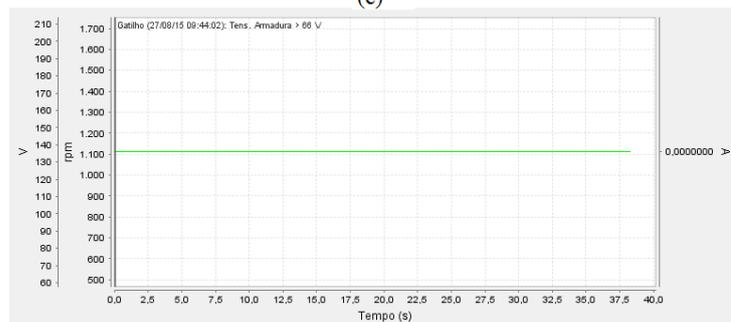
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaborado pela autora

5.4.4 Teste 4

A finalidade do quarto teste foi observar como seria o sinal de saída da velocidade atual do motor, da referência total, da tensão e da corrente de armadura, se no período de aquisição dos dados, a velocidade de rotação do motor CC diminuísse gradualmente. Como o tipo de acionamento utilizado neste experimento foi o ‘Acionamento 1’ em conjunto com a função *multispeed*, a redução da velocidade foi feita através da comutação das chaves.

Assim como no teste 3, o *trigger* foi especificado para o momento em que a tensão de armadura fosse maior que 30 % do valor especificado para a tensão nominal da armadura (220V), e ajustou-se o período de amostragem dos dados em 40 s.

Os parâmetros de equipamento devem ser configurados da seguinte forma:

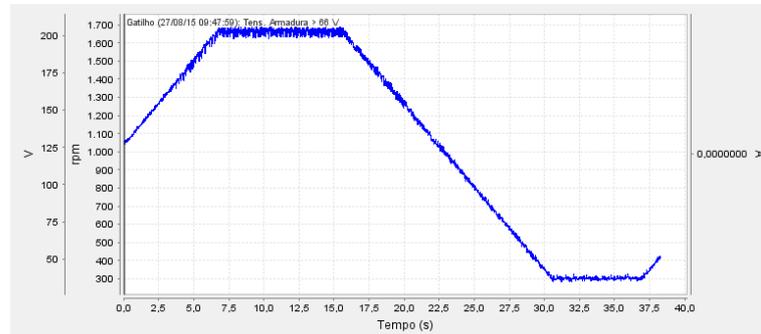
Tabela 5.5- Programação dos parâmetros teste 4

Parâmetro	Descrição do Parâmetro	Opção
P0550	Fonte de Trigger para o Trace	4 = Tensão de Armadura
P0551	Valor de Trigger para o Trace	30%
P0552	Condição de Trigger para o Trace	2 = P0550 > P0551
P0553	Período de Amostragem do Trace	100
P0559	Memória Máxima para o Trace	100%
P0561	CH1: Canal 1 do Trace	1= Referência Total
P0562	CH2: Canal 2 do Trace	2= Velocidade Atual
P0563	CH3: Canal 3 do Trace	3= Corrente de Armadura
P0564	CH4: Canal 4 do Trace	4= Tensão de Armadura

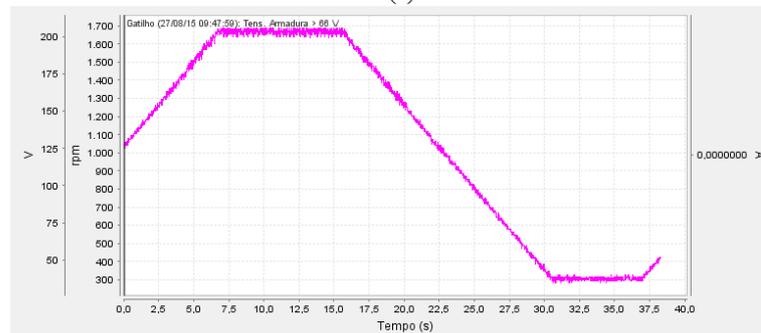
Nota-se a partir dos sinais de saída da velocidade atual do motor, da referência total, da tensão e da corrente de armadura (Figura 5.11) que, no instante em se iniciou a aquisição dos dados, manipulou-se as chaves conectadas às entradas digitais do conversor de modo que, a velocidade comutasse para 1650 rpm. Passados 15 s após o início da obtenção dos sinais, comutou-se novamente a velocidade de rotação do motor de 1650 rpm para 300 rpm.

É possível observar por meio dos gráficos da Figura 5.11 - (a, b e c) o tempo de aceleração do motor, quando ajustou-se a velocidade em 1650 rpm, e o tempo de desaceleração, quando a velocidade é comutada para 300 rpm.

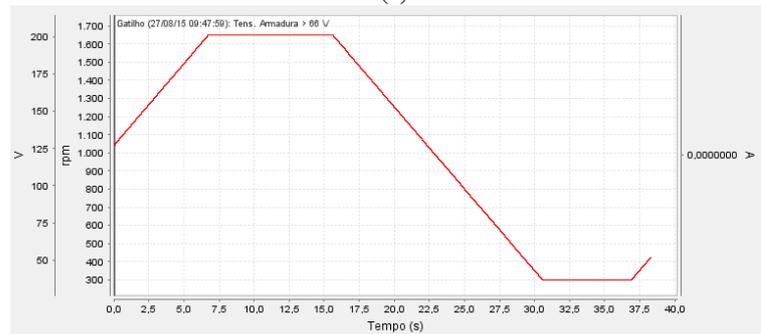
Figura 5.11- Sinais de saída teste 4 para: (a) velocidade atual; (b) tensão de armadura; (c) referência total; (d) corrente de armadura



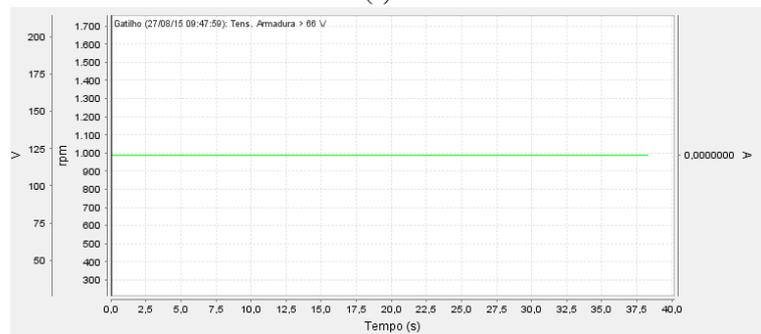
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaborado pela autora

5.4.5 Teste 5

O objetivo deste teste foi observar como seriam os sinais de saída da velocidade atual, da referência total, da tensão e da corrente de armadura, quando a condição de *trigger* para *trace*

fosse uma falha nas entradas digitais do conversor. Para tanto, conectou-se uma chave com retenção normalmente fechada no conector 17 do equipamento, e configurou-se o parâmetro P0265, correspondente a essa entrada digital, como sendo “sem falha externa”, o que significa que, quando essa chave for aberta, será simulada uma falha nessa entrada digital do CTW900.

Quando a condição de *trigger* para o *trace* for uma falha no sistema, não é necessário que haja uma “fonte de disparo”, uma vez que, independentemente do valor da tensão de armadura, que foi a fonte de trigger dos testes anteriores, o “gatilho” só será disparado mediante falha.

O tipo de acionamento utilizado neste teste foi o ‘acionamento 1’ juntamente com a função *multispeed*. Assim sendo, as conexões em XC1 ficam conforme ilustra a Figura 5.12.

Para a realização deste teste, deve-se configurar tanto as entradas digitais quanto os parâmetros da função *trace*.

a. Entradas Digitais

Tabela 5.6- Programação entradas digitais teste 5

Parâmetro	Descrição do Parâmetro	Opção
P0263	Entrada Digital 1 (DI1)	2= Habilita Geral
P0264	Entrada Digital 2 (DI2)	1= Gira/Para
P0265	Entrada Digital 3 (DI3)	19= Sem falha externa
P0266	Entrada Digital 4 (DI4)	13= Multispeed
P0267	Entrada Digital 5 (DI5)	13= Multispeed
P0268	Entrada Digital 6 (DI6)	13= Multispeed

b. Função *Trace*

Tabela 5.7- Programação dos parâmetros função trace teste 5

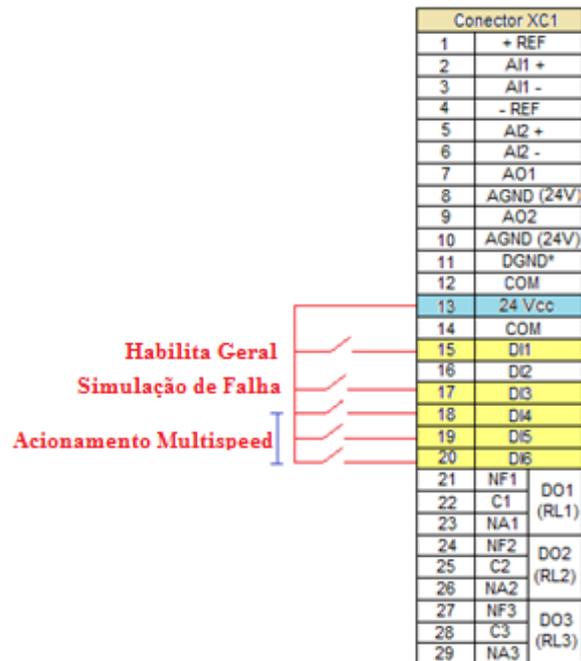
Parâmetro	Descrição do Parâmetro	Opção
P0550	Fonte de Trigger para o Trace	0 = Inativo
P0551	Valor de Trigger para o Trace	0%
P0552	Condição de Trigger para o Trace	5 = Falha
P0553	Período de Amostragem do Trace	10
P0559	Memória Máxima para o Trace	100%
P0561	CH1: Canal 1 do Trace	1= Referência Total
P0562	CH2: Canal 2 do Trace	2= Velocidade Atual
P0563	CH3: Canal 3 do Trace	3= Corrente de Armadura
P0564	CH4: Canal 4 do Trace	4= Tensão de Armadura

Neste teste, constatou-se que o momento de disparo do *trigger*, se deu quando a chave conectada à entrada digital 3 do conversor, configurada como “Sem falha externa” foi aberta, indicando uma falha no sistema, como era esperado. Nesse mesmo instante, apareceu a seguinte mensagem na HMI: F091. De acordo com a tabela de falhas/alarmes presente no catálogo do CTW900, essa falta atua, justamente, quando alguma entrada digital programada para “Sem Falha Externa” estiver aberta.

A Figura 5.13 ilustra os sinais obtidos durante a aquisição dos dados. Nota-se que, tanto a velocidade atual do conversor quanto a tensão de armadura vão diminuindo gradativamente. Isso acontece porque, no instante da falha, o motor para, de modo que, os sinais observados dizem respeito ao sinal correspondente ao tempo de desaceleração da máquina.

Como mostra a Figura 5.13-(c), o sinal obtido para a referência total se manteve em 0, pois, diferentemente dos outros testes, a condição de *trigger* para o *trace* não foi a tensão de armadura. No entanto, como previsto, a corrente de armadura se manteve em 0 A, como nos demais experimentos.

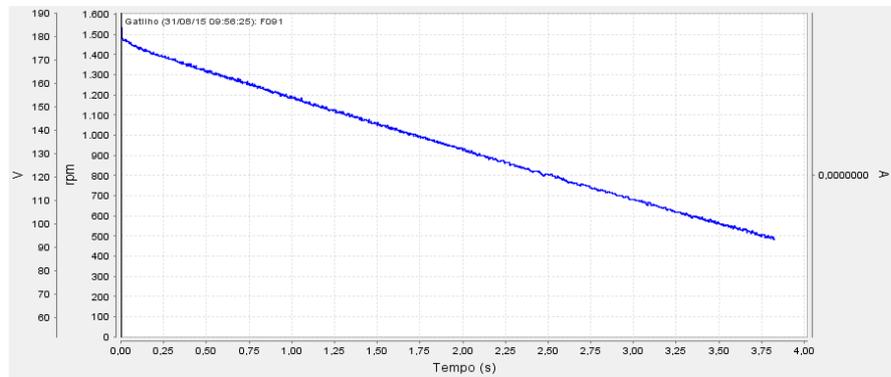
Figura 5.12 -Conexões em XC1 teste 5



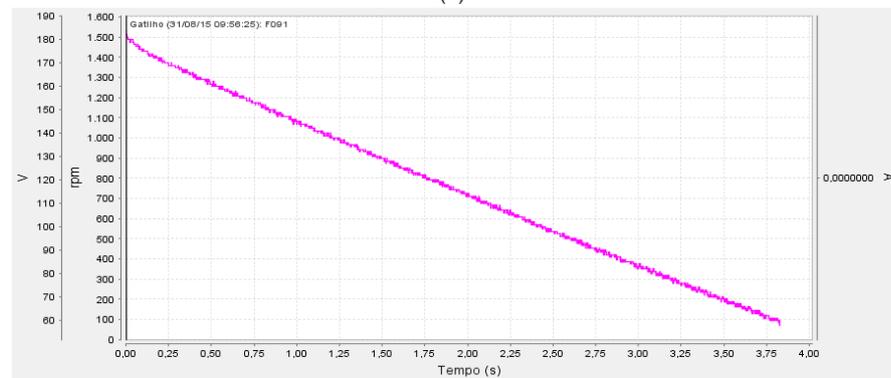
Fonte: Elaborado pela autora

Como foi mostrado neste capítulo, foram realizados uma série de experimentos utilizando as funções presentes no CTW900. Como consequência do tipo de realimentação utilizada (realimentação por f_{cem}), constatou-se que não foi possível a observação do sinal referente a corrente de armadura. Isso pode ter ocorrido devido à adição de uma “compensação de resistência interna” IR (corrente de armadura x resistência de armadura) de modo a suprir as perdas de resistência interna na armadura do motor ocorridas devido a realimentação por f_{cem} . No entanto, este empecilho não comprometeu no funcionamento do motor, sendo possível acionar e controlar a velocidade do mesmo, além de poder visualizar os sinais referentes a outras variáveis, como por exemplo, a velocidade atual da máquina e a tensão de armadura.

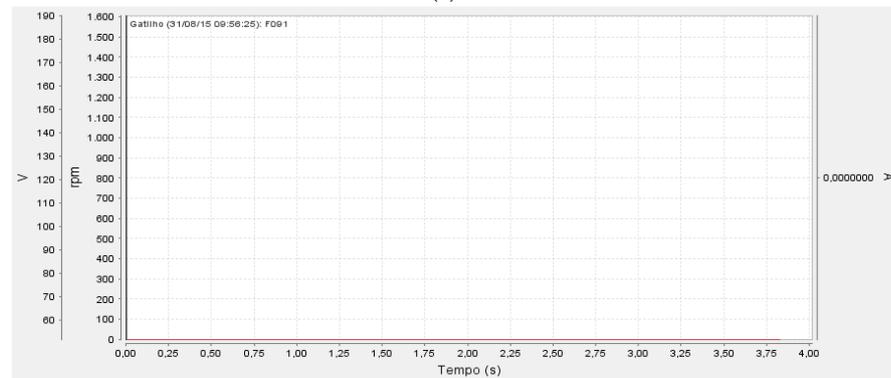
Figura 5.13- Sinais de saída teste 5 para: (a) velocidade atual; (b) tensão de armadura; (c) referência total; (d) corrente de armadura



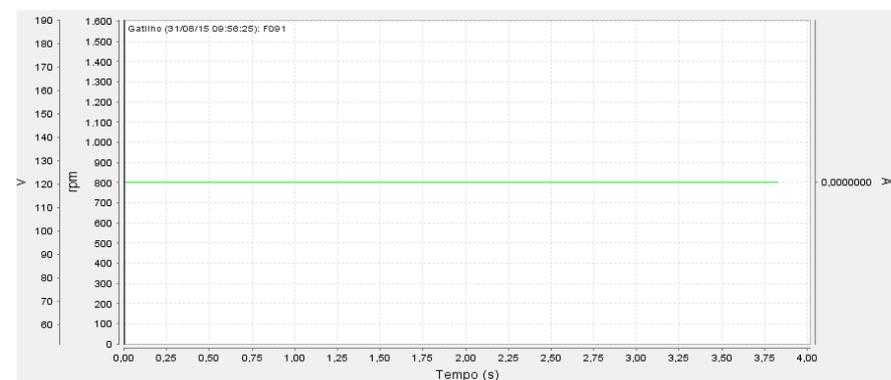
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaborado pela autora

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho foi realizado sob a expectativa de mostrar e compreender como ocorre o controle da velocidade de rotação de um motor de corrente contínua utilizando o conversor CA/CC CTW900.

O estudo possibilitou ainda verificar, de acordo com os objetivos propostos, qual o princípio de funcionamento do conversor, além de mostrar uma forma alternativa de se acionar e controlar a velocidade de rotação do motor CC ainda que não se tenha algumas das placas componentes do kit, fazendo a realimentação de velocidade utilizando a força contra eletromotriz gerada na armadura do motor, em vez de utilizar um sensor de velocidade como o taco gerador e o encoder. Também foi possível observar as principais funções do conversor CA/CC, assim como também, assimilar como é feita a configuração dos parâmetros do equipamento para diferentes tipos de acionamento.

Contudo, pode-se dizer que, fazendo-se a realimentação por f_{cem} (força contra eletromotriz), em consequência da ausência do taco-gerador e do encoder, observou-se que alguns problemas associados a este tipo de *feedback* estão relacionados com certas características do motor CC. Um dos empecilhos é que, quando o motor tem uma carga acoplada em seu eixo, caso da máquina utilizada nos experimentos, ainda que a tensão de armadura esteja constante, a velocidade do motor tende a oscilar, ou até mesmo decair um pouco. Isso ocorre devido a perdas de “resistência interna” na armadura do motor, e para suprir essa redução, acontece a adição de uma “compensação de resistência interna” de $I_a R_a$, fato este que, pode ter sido a razão da não visualização da corrente de armadura nos experimentos realizados. Porém, caso deseje-se observá-la, deve-se compensar através de ajuste proporcional a corrente de armadura e a queda na resistência da armadura, a partir dos parâmetros do CTW900, ou então, conectar um multímetro em série com o enrolamento da armadura.

Durante o trabalho, também foi possível verificar algumas das vantagens de se fazer o controle da velocidade de rotação de um motor CC utilizando um conversor CA/CC. Dentre elas, cabe citar o fato de que é possível acionar, parar e inverter o sentido de giro do motor apenas pressionando-se as teclas da IHM (interface homem máquina) do equipamento, além de ser possível observar o valor atual de qualquer variável desejada, como por exemplo, a velocidade de rotação do motor, a tensão de armadura e a corrente de armadura, dentre outros.

Utilizando o software SuperDrive G2, o usuário consegue configurar os parâmetros desejados por meio do próprio PC, uma vez que, o CTW900 apresenta uma entrada USB, de onde é possível se fazer a comunicação do equipamento com o computador. Através deste software também é permitido visualizar o sinal de saída de uma variável desejada (ex. velocidade atual, tensão de armadura) em diferentes situações, seja ela uma falha ou acréscimo da tensão de armadura, por exemplo.

Para trabalhos futuros, sugere-se a verificação de algumas das funções do conversor que não puderam ser vistas, como por exemplo a SoftPLC, a qual permite que o CTW900 execute funções características de um CLP (Controlador Lógico Programável). Com ela podem ser criadas lógicas de inter travamento entre entradas e saídas, possibilitando a execução de sequências específicas de acionamento do motor. Sugere-se também a elaboração de uma lógica de acionamento do motor CC utilizando as placas do kit, para os novos diagramas desenvolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Motores Elétricos. Mecatrônica Atual, n. 7, Dez. 2013. Disponível em: < <http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1051-motores-eltricos> >. Acesso em 18 nov. 2015.
2. HECKLER, R.S. Comparativo das Aplicações de Motores CC e Motores de Indução Trifásicos. Universidade do Vale do Rio do Peixe.
3. BRAGA, N. Como funciona o motor de corrente contínua (ART476). Disponível em: < <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/3414-art476a> >. Acesso em 30 nov. 2015.
4. BRAIN, M. Como funciona um motor elétrico sem escovas. Hsw. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/motor-sem-escovas.htm> > Acesso em 29 nov. 2015.
5. GARCIA, F.R. Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência. IESA. Disponível em: < http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosSEPCap.pdf >. Acesso em 29 nov. 2015.
6. FUENTES, R.C. Apostila de Automação Industrial. Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2005. Disponível em: < http://w3.ufsm.br/fuentes/index_arquivos/CA05.pdf >. Acesso em 18 nov. 2015.
7. MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA. Ecatalog. Disponível em: < <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-corrente-continua-50005370-catalogo-portugues-br.pdf> >. Acesso em: 24 set. 2015.
8. COSTA, E.V. Motor CC. Senai/Fiemg. Disponível em: < <http://jomar.pro.br/wp/wp-content/uploads/2015/04/33-Apresenta%C3%A7%C3%A3o-Motores-CC.pdf> >. Acesso em: 24 set. 2015.
9. DT-3: CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA E CONVERSORES CA/CC. Ecatalog. Disponível em: < <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-3-caracteristicas-e-especificacoes-de-motores-de-corrente-continua-conversores-ca-cc-artigo-tecnico-portugues-br.pdf> >. Acesso em: 24 set. 2015.
10. KOSOW, I.L. Máquinas elétricas e transformadores. Tradução de Felipe Luiz Ribeiro Daiello e Percy Antônio Pinto Soares. 15 ed. São Paulo: Globo, 2005.

11. CUNHA, L. Radiografia - Motores elétricos: movendo o mundo. O Setor Elétrico, 43 ed, ago. 2009. Disponível em: < <http://www.osestoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/132-radiografia-motores-eletricos-movendo-o-mundo.html> >. Acesso em 18 jan 2016
12. GHIRARDELLO, A. Eletrônica Industrial: Apostila sobre Motores CC. Colégio Politec.
13. SILVA, E.F. Apostila de Máquinas Elétricas: Capítulo II – Partida e Aceleração.
14. MARQUES, L; SAMBAQUI, A; DUARTE, J. Apostila de Máquinas Elétricas. Instituto Federal de Santa Catarina, Jul. 2013. Disponível em: < http://www.joinville.ifsc.edu.br/~camila.bastos/MQE/Apostila_Maquinas.pdf >. Acesso em 18 jan 2016
15. POMILIO, J.A. Conversores CC-CC para acionamento de máquinas de corrente contínua. UNICAMP, 2014. Disponível em: < <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/eltpot/cap4.pdf> >. Acesso em 24 set. 2015.
16. CORRADI JUNIOR, R. Eletrônica de Potência. 2011. Disponível em: < http://www.corradi.junior.nom.br/eli_2011_apo.pdf >. Acesso em 24 set. 2015.
17. AMARAL, C. Aula 2: Sistema de Controle. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.
18. MOTOR CONTROL BASICS: DRIVE OPERATING MODES. Corotron. Disponível em: < <http://www.carotron.com/applications/csag-d/> >. Acesso em 24 set. 2015.
19. CTW900- CONVERSOR CA/CC:Manual do Usuário. Weg, 2014. 141p.
20. CTW900- CONVERSOR CA/CC. Ecatalog. Disponível em: < <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-ctw900-50036034-catalogo-portugues-br.pdf> >. Acesso em 24 set. 2015.
21. SUPER DRIVE – Software de Parametrização de Drives. Weg. Disponível em: < <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Software/SuperDrive-Software-de-Parametrizacao-de-Drives> >. Acesso em 19 nov. 2015.
22. WEG. Disponível em: < <http://www.weg.net/br> >. Acesso em 28 jan. 2016.

23. MVW-01- INVERSOR DE FEREQUÊNCIA DE MÉDIA TENSÃO. Manual do Usuário. Ecatalog. Disponível em: < <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-mvw-01-inversor-de-frequencia-de-media-tensao-0899.5101-3.2-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em 24 set. 2015.

ANEXO I – Diagramas de montagem sugeridos pelo fabricante

