

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

JARED FIRME LEITE

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA
SUBSTITUIÇÃO DO CONTROLADOR DO MÓDULO MC183
DA FEEDBACK INSTRUMENTS LIMITED**

VITÓRIA – ES
AGOSTO/2017

JARED FIRME LEITE

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA SUBSTITUIÇÃO DO
CONTROLADOR DO MÓDULO MC183 DA FEEDBACK
INSTRUMENTS LIMITED**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Jared Firme Leite**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti

VITÓRIA – ES
AGOSTO/2017

JARED FIRME LEITE

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA SUBSTITUIÇÃO DO
CONTROLADOR DO MÓDULO MC183 DA FEEDBACK
INSTRUMENTS LIMITED**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Jared Firme Leite**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 02, de agosto de 2017.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
Orientador

Prof. Dr. José Luiz de Freitas Vieira
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
Examinador

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
Examinador

“[...]e todas as coisas mostram que existe um Deus; sim, até mesmo a Terra e tudo que existe sobre a sua face, sim, e seu movimento, sim, e também todos os planetas que se movem em sua ordem regular testemunham que existe um Criador Supremo. ”
Alma 30:44

À Deus, fonte de todo o conhecimento.
À minha esposa, a quem amo.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes. ”
Isaac Newton

Agradeço ao meu orientador pela paciência e por todo auxílio prestado. Agradeço também aos professores e alunos do LEPAC pela ajuda e apoio. Agradeço a meus pais, que me orientaram e apoiaram em todas as fases de meus estudos. E finalmente, agradeço a todos professores, amigos e familiares que participaram de alguma forma em meu processo de formação.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento do protótipo de controlador de um motor CC desenvolvido com intuito de substituir o MC183, módulo didático fabricado na década de 70 por Feedback Instruments Ltd. Foi desenvolvido um sistema microcontrolado que além do acionamento por controle de fase, encontrado no MC183, traz o acionamento por PWM. Além de incluir outro modo de acionamento, o protótipo desenvolvido neste trabalho aumenta o potencial didático do MC183 trazendo uma interface que apresenta informações sobre grandezas envolvidas no acionamento como por exemplo: corrente de armadura, ângulo de disparo ou tensão de alimentação. Propôs-se também um método de controle de velocidade do eixo do motor, em malha fechada, realimentando o sistema com uma estimativa da velocidade, calculada a partir da leitura de um sensor de corrente e do valor da tensão média de alimentação do motor. São apresentados os fundamentos teóricos e os princípios relacionados ao funcionamento da máquina CC e dos componentes utilizados para seu acionamento. Também foram apresentados: as decisões de projeto e suas justificativas, os resultados e as dificuldades que se apresentaram no decorrer do trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diodo Ideal e Seu Circuito Equivalente.	18
Figura 2 – Característica Estática do Diodo Ideal.	19
Figura 3 – Diodo Real: Circuito Equivalente.	19
Figura 4 – Característica Estática de um Diodo Real.	20
Figura 5 – Circuito com Característica Indutiva, Alimentado por Fonte de Tensão CA.	20
Figura 6 – Comportamento da Corrente no Diodo Devido à Carga com Característica Indutiva.	21
Figura 7 – Simbologia de um Tiristor.	21
Figura 8 – Retificador a Tiristor, Alimentando Carga Resistiva.	22
Figura 9 – Formas de Onda da Tensão da Fonte e Carga Resistiva, Alimentada por Retificador a Tiristor.	22
Figura 10 – Disparo por Degrau de Tensão.	23
Figura 11 – Simbologia: Transistores de Potência.	24
Figura 12 – Máquina CC: Esquemas de Ligação.	26
Figura 13 – Circuito Equivalente de Motor CC de Excitação Independente.	28
Figura 14 – Diagrama de Blocos: Motor CC de Excitação Independente, Modelo Completo.	29
Figura 15 – Modelo: Motor CC Acionado por Ponte de Tiristores de Onda Completa, Monofásica.	30
Figura 16 – Variação da Tensão de Carga.	30
Figura 17 – Modelo: Motor CC Acionado por Meia Ponte H.	31
Figura 18 – Tensão de Saída PWM: Variação de Carga no Eixo do Motor.	32
Figura 19 - – Tensão de Saída PWM: Carga Constante.	33
Figura 20 – Diagrama de Blocos: Sistemas de Controle: (a) em Malha Aberta e (b) em Malha Fechada.	34
Figura 21 – Composição de um Controlador PID.	35
Figura 22 – Motor Utilizado.	37
Figura 23 – MC183.	37
Figura 24 – Painel do Protótipo.	39
Figura 25 – Apresentação dos Dados na Tela LCD.	42
Figura 26 – Protótipo Inicial: Rotina Principal.	42
Figura 27 – Protótipo Inicial: Interrupções.	43

Figura 28 – Circuito: Primeiro Protótipo.....	44
Figura 29 – Bloco ZCD.	45
Figura 30 – Forma de Onda ZCD.	46
Figura 31 – ZCD: Largura do Puslo.	46
Figura 32 – Bloco SCR_DRIVE.	47
Figura 33 – Tensão e Corrente para Situações de Operação	49
Figura 34 – Tensão Média: β menor ou igual a 180°	51
Figura 35 – Tensão Média: β maior que 180°	51
Figura 36 – Tensão Média: modo contínuo.....	52
Figura 37 – Àbaco de Puschlowski.	53
Figura 38 – Segundo Protótipo: Rotina Principal e Interrupção.....	55
Figura 39 – Circuito: Segundo Protótipo.....	56
Figura 40 – Bloco: PWM_DRIVE.	57
Figura 41 – Circuito: Protótipo Final.	60
Figura 42 – Definição do Usuário.	62
Figura 43 – Tela01.....	62
Figura 44 – Tela02.....	62
Figura 45 – Tela03.....	63
Figura 46 – Tela04.....	63
Figura 47 – Apresentação dos Dados: Fonte Ext., PWM.....	63
Figura 48 – Apresentação dos Dados: Fonte Ext., Controle de Fase.	64
Figura 49 – Apresentação dos Dados: Controle do Motor, Controle de Fase.	64
Figura 50 – Apresentação dos Dados: Controle do Motor em MA, PWM.	65
Figura 51 – Apresentação dos Dados: Controle do Motor em MF.....	65
Figura 52 – Rotina Principal.....	66
Figura 53 – Fluxogramas das Operações com Controle de Fase.....	67
Figura 54 – Interrupções das Operações com Controle de Fase.....	67
Figura 55 – Operações PWM: Fonte Externa e Motor em MA.....	68
Figura 56 – Interrupção das Operações PWM: Fonte Externa e Motor em MA.....	68
Figura 57 – Operação Controle de Velocidade e Respectiva Interrupção.....	69
Figura 58 – Funcionamento da Proteção.	70
Figura 59 – Ensaio: Esquema Elétrico.....	72
Figura 60 – Resposta Transitória de Corrente: Degrau de 20 V.....	72
Figura 61 – Resposta Transitória de Corrente: Degrau de 25 V.....	73

Figura 62 – Ábaco 1 – $i(2. t1)i(t1) \times \tau m \tau a$.	76
Figura 63 – Ábaco 2 – $t1 \tau a \times \tau m \tau a$.	77
Figura 64 – Ábaco 1 - $K'=1 - i(2. t1)i(t1) \times \tau m \tau a$.	78
Figura 65 – Ábaco 2 - $K'=1 - t1 \tau a \times \tau m \tau a$.	78
Figura 66 – Simulação: Amostra do Sinal de Alimentação do Motor.	80
Figura 67 – Diagrama de Blocos: Sistema "Real".	81
Figura 68 – Diagrama de Blocos: Sistema Contínuo (Ideal).	82
Figura 69 – Comportamento de I_a .	83
Figura 70 – Comparação entre Sistema Ideal e "Real".	84
Figura 71 – Comparação entre Sistema Ideal e "Real": Detalhe	84
Figura 72 – Simulação com Perturbações de -0,05 a 0,05 N.m.	86
Figura 73 – Resposta da Corrente: Perturbações de -0,05 a 0,05 N.m	86
Figura 74 – Simulação com Perturbações de -0,2 a 0,2 N.m.	87
Figura 75 – Resposta da Corrente: Perturbações de -0,2 a 0,2 N.m	87
Figura 76 – Placa do Motor.	120
Figura 77 – Notas Acerca do Funcionamento do MC183.	121
Figura 78 – MC183: Circuito Interno.	122

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação Entre as Principais Chaves de Potência.....	25
Quadro 2 – Especificações técnicas: Arduino Pro Mini 5V.....	41
Quadro 3 – Componentes: Protótipo Inicial.....	43
Quadro 4 – Componentes: ZCD.....	45
Quadro 5 – Componentes: SCR_DRIVE.....	47
Quadro 6 – Segundo Protótipo: Lista de Comandos.....	54
Quadro 7 – Componentes: Segundo Protótipo.....	56
Quadro 8 – Componentes: PWM_DRIVE.....	57
Quadro 9 – Componentes: Protótipo Final.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Método de Pasek: Medições.	73
Tabela 2 – Método de Pasek: Parâmetros1.....	75
Tabela 3 – Método de Pasek: Parâmetros2.....	79
Tabela 4 – Comparação dos Parâmetros.....	79
Tabela 5 – Valores Adotados.....	80
Tabela 6 – Comparação entre Sistema Ideal e “Real”.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BJT	Transistor de junção bipolar (<i>Bipolar Junction Transistor</i>)
CA	Adjetivo “de corrente alternada”
CC	Adjetivo “de corrente contínua”
CI	Circuito integrado
IGBT	Transistor bipolar de porta isolada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
LEPAC	Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico
MA	Malha aberta
MF	Malha fechada
MOSFET	Transistor de efeito de campo (<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>)
PI	Proporcional e integral
PID	Proporcional, integral e derivativo
PWM	Modulação por largura de pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
R	Resistiva
RC	Resistivo e capacitivo
RLE	Resistiva, indutiva e com fonte de tensão contínua
SI	Sistema Internacional de Unidades
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
ZCD	Detector de passagem por zero (<i>Zero Crossing Detector</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

V_F	Tensão de polarização direta do diodo (V)
I_F	Corrente que percorre diodo (A)
V_{BK}	Tensão reversa máxima do diodo e tiristor (V)
V_{TO}	Tensão de barreira (V)
r_T	Resistência intrínseca do diodo e tiristor (Ω)
V_f	Tensão da fonte (V)
V_l	Tensão na carga (V)
I_l	Corrente de carga (A)
V_T	Tensão de polarização do tiristor (V)
I_T	Corrente que percorre tiristor (A)
I_G	Corrente de <i>gate</i> (A)
V_{AK}	Diferença de potência entre anodo e catodo (V)
V_{DRM}	Tensão de ruptura máxima (V)
i_C	Corrente instantânea no capacitor (A)
v_C	Tensão instantânea sobre o capacitor (V)
C	Valor da capacitância do capacitor (F)
T_m	Torque mecânico desenvolvido pela máquina CC (motor) ou aplicado a ela (gerador) (N.m)
R_a	Resistência de armadura (Ω)
E_a	Tensão de armadura (V)
I_a	Corrente de armadura (A)
V	Tensão nos terminais da máquina CC (V)
Φ_d	Fluxo magnético devido ao circuito de campo do motor (wb)
ω_m	Velocidade angular do eixo da máquina (rad/s)
k_t	Constante de torque da máquina CC (V.s/(rad.wb))
k_e	Constante da força contra eletromotriz da máquina CC (V.s/(rad.wb))
k_a	Constante de torque e da força contra eletromotriz da máquina CC, quando apresentados no SI (V.s/(rad.wb))
K_t	Produto de Φ_d e k_t (V.s/rad)
K_e	Produto de Φ_d e k_e (V.s/rad)
T_f	Torque aplicado ao eixo do motor (N.m)
L_a	Indutância de armadura (H)

J	Momento de inércia (N.m.s ²)
B	Coefficiente de atrito viscoso (N.m.s)
α	Ângulo de disparo do tiristor (°)
β	Ângulo de extinção da corrente (°)
T _{off}	Tempo do ciclo, de um sinal PWM, em que a saída está em nível lógico alto (s)
T _{on}	Tempo do ciclo, de um sinal PWM, em que a saída está em nível lógico baixo (s)
T	Período do ciclo do sinal PWM (s)
k _p	Ganho proporcional
k _i	Ganho integral
k _d	Ganho derivativo
T _d	Tempo derivativo (s)
V _{cm}	Valor médio de tensão sobre carga RLE (V)
V _{cm1}	Componente de V _{cm} , devido à fonte senoidal (V)
V _{cm2}	Componente de V _{cm} , devido à tensão da carga RLE (V)
V _e	Tensão eficaz da fonte senoidal (V)
i(t)	Valor instantâneo de corrente no tempo 't' (A)
t _l	Tempo em que ocorre o valor máximo de corrente (s)
I _{ss} '	Valor de corrente em regime (A)
T _s	Período de amostragem (s)
V	Tensão aplicada aos terminais do motor (V)
T _N	Torque nominal da máquina (N.m)
P _N	Potência nominal da máquina (W)
ω_N	Velocidade angular nominal da máquina (rad/s)
T _B	Torque devido ao atrito viscoso (N.m)
t _{dz}	Intervalo de tempo entre a energização e início do movimento do rotor (s)
I _{sc}	Corrente de curto circuito de armadura (A)
K	Fator de amortecimento
K'	Fator de atrito
τ_a	Constante de tempo elétrica da armadura (s)
τ_b	Constante de tempo de amortecimento do motor (s)
τ_m	Constante de tempo mecânica (ou inercial) do motor (s)
ω_f '	Velocidade angular final (rad/s)
V _{BE}	Tensão entre base e emissor de um BJT (V)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo	16
1.1.1	Levantamento das Funcionalidades da Placa Atual	17
1.1.2	Desenvolvimento de um Sistema Capaz de Realizar Todas as Funcionalidades do Sistema Atual	17
1.1.3	Realização de testes e análises	17
1.2	Conteúdo do Trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	Semicondutores de Potência.....	18
2.1.1	Diodo	18
2.1.2	Tiristor.....	21
2.1.3	Transistores de Potência	24
2.2	Máquina de Corrente Contínua	26
2.3	Controle por Fase e Controle PWM.....	29
2.4	Controle em Malha Aberta e em Malha Fechada.....	33
2.4.1	Controlador PID	34
3	O SISTEMA ATUAL	37
3.1	Motor	37
3.2	MC183.....	37
4	DESENVOLVIMENTO	39
4.1	Funcionalidades e Modos de Operação.....	39
4.2	Interface e Operação.....	39
4.3	O Arduino.....	40
4.4	Protótipo Inicial	41
4.4.1	Circuito do Protótipo Inicial.....	43
4.4.1.1	Fonte 12 V (FONTE_12V).....	45
4.4.1.2	Detector de Passagem por Zero (ZCD)	45
4.4.1.3	Circuito de Disparo do Tiristor (SCR_DRIVE).....	46
4.4.1.4	Sensor de Corrente	47
4.4.2	Resultados Iniciais.....	47

4.5	Influência da Carga na Tensão de Saída do Protótipo Inicial	48
4.5.1	Tensão Média na Carga	49
4.5.1.1	Ângulo de extinção da corrente (β) menor ou igual a 180°	50
4.5.1.2	Ângulo de extinção da corrente (β) maior que 180°	51
4.5.1.3	Modo contínuo	52
4.5.1.4	Obtenção de β	52
4.6	Acionamento PWM	54
4.6.1	Circuito do Segundo Protótipo	55
4.6.1.1	Circuito de Disparo (PWM_DRIVE)	56
4.6.2	Resultados	57
4.7	Estimador de Velocidade	58
4.8	Protótipo Final	58
4.8.1	Circuito do Protótipo Final	59
4.8.2	Operação do Protótipo	61
4.8.2.1	Fonte Externa com Sinal PWM	63
4.8.2.2	Fonte Externa com Controle de Fase	64
4.8.2.3	Controlador do Motor por Ângulo de Disparo	64
4.8.2.4	Controle da Velocidade do Motor	64
4.8.2.5	Controlador do Motor em MA	65
4.8.3	Funcionamento	65
5	ENSAIOS	71
5.1	Obtenção dos Parâmetros do Motor	71
5.2	Simulação do Controle de Velocidade em Malha Fechada	80
6	CONCLUSÕES	88
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	APÊNDICE A – CÓDIGO: PROTÓTIPO FINAL	91
	ANEXO A – DADOS DOS FABRICANTES DO MOTOR E DO MC183	120

1 INTRODUÇÃO

A máquina CC foi, por muito tempo, a opção mais usada para solução em sistemas que exigissem ampla faixa de velocidade ou controle preciso da posição ou velocidade do motor. Avanços tecnológicos no acionamento CA têm permitido a substituição da máquina CC por sistemas CA. Porém, a versatilidade e simplicidade do sistema de acionamento das máquinas CC irão garantir seu uso em diversas aplicações (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2006, p. 343). Por esse motivo, as máquinas CC possuem grande importância e estão presentes ainda hoje na grade curricular de cursos técnicos e de engenharia elétrica.

Neste trabalho abordam-se características do motor CC e seu acionamento. Um dos módulos didáticos, composto de um motor CC e o módulo de controle MC183 (fabricado por Feedback Instruments Limited), que se encontra no Laboratório de Máquinas Elétricas da UFES, tem apresentado problemas.

O problema do equipamento está na placa de controle que, ao ser usada, rapidamente sobreaquece e tem seu funcionamento interrompido. O sistema da placa é antigo (década de 70) e tem sua lógica baseada em eletrônica analógica.

Algumas desvantagens do uso de um controle analógico para esta aplicação são: a análise do circuito não é trivial, pois devido a quantidade de elementos e de sua lógica não discreta torna-se difícil entender a função de cada componente e a interação entre eles; outra dificuldade é a de manutenção do equipamento, existem muitos componentes que fazem parte da lógica de controle e, se algum deles for danificado sua identificação e troca torna-se complexa.

A tempos substitui-se a lógica analógica pela digital, que traz melhorias significativas tais como facilidade e flexibilidade no desenvolvimento dos controladores; reduções na quantidade de componentes, no consumo de energia e do aquecimento do equipamento. Logo, é possível resolver o problema do MC183 e ainda melhorá-lo com o uso de um sistema microcontrolado.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma placa de controle que substitua o controlador do MC183, sendo a lógica do novo acionamento desenvolvida em um sistema microcontrolado. Para atingir a meta final do trabalho, objetivos específicos foram definidos, são eles:

- Levantar funcionalidades da placa atual;
- Desenvolver sistema capaz de realizar todas as funcionalidades da placa atual;
- Realização de testes e análises.

1.1.1 Levantamento das Funcionalidades da Placa Atual

Para que o protótipo seja capaz de substituir com sucesso o atual controlador, é necessário conhecer o funcionamento do módulo de controle atual. Tal conhecimento inclui exame do material disponibilizado pelo fabricante e testes em laboratório.

1.1.2 Desenvolvimento de um Sistema Capaz de Realizar Todas as Funcionalidades do Sistema Atual

Após análise do MC183, e listadas as suas funcionalidades; o próximo objetivo é projetar e montar um sistema capaz de realizar todas elas. O projeto visa uma melhora do sistema atual: eliminação do aquecimento excessivo no circuito de controle; possibilidade de inclusão de novas funcionalidades que aumentem a capacidade didática do MC183, por exemplo, acesso às informações de alimentação do motor. Sendo que, as novas funções dependem da “capacidade livre” do controlador, ou seja, de portas e memória não consumidas pelas tarefas básicas já realizadas pelo MC183.

1.1.3 Realização de testes e análises

O protótipo deverá ser testado para avaliação de seu funcionamento e verificação das melhorias almejadas. O teste terá também o objetivo de orientar: ajustes para adequação do projeto e futuros projetos relacionados ao MC183 ou ao acionamento de motores CC.

1.2 Conteúdo do Trabalho

Após este primeiro capítulo, de introdução e apresentação geral, vem a fundamentação teórica no capítulo 2, nele é apresentada a base para o desenvolvimento deste trabalho. O capítulo 3 contém as informações levantadas sobre as funcionalidades do MC183 e dados do motor que o acompanha. O processo de desenvolvimento até o protótipo final encontra-se no capítulo 4; o capítulo 5 compreende ensaios e simulações, referentes ao sistema atual e ao protótipo. Por fim, no capítulo 6 é feito o encerramento do trabalho, nele são comentados os resultados obtidos no mesmo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Semicondutores de Potência

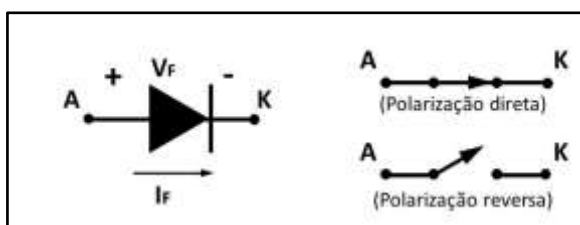
Também conhecidos como chaves semicondutoras de potência, ou somente chaves de potência, os semicondutores de potência são os elementos mais importantes em circuitos de eletrônica de potência (AHMED, 2000, pp. 18-19); por meio deles é possível realizar diversas conversões, transformando-se, assim, as grandezas disponíveis em grandezas adequadas às diversas aplicações. Um bom exemplo da aplicação dos semicondutores de potência é a retificação de uma tensão senoidal, por meio de uma ponte de diodos ou de tiristores, para alimentação de um motor CC.

Há uma diversidade de chaves de potência e de conversores compostos pelas mesmas, porém, neste trabalho aborda-se apenas os que foram utilizados no protótipo ou que foram considerados de interesse para o desenvolvimento do mesmo.

2.1.1 Diodo

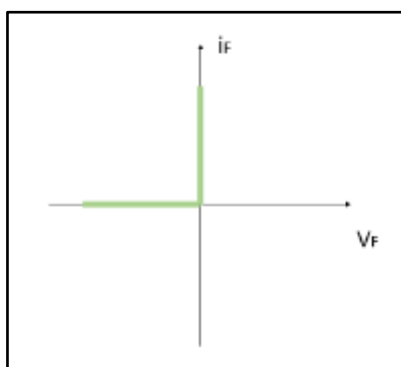
O diodo ideal, representado na figura 1, possui como característica estática uma resistência nula para valores $V_F > 0$ V (polarização direta) e uma resistência infinita para valores de $V_F < 0$ V (polarização reversa) (BARBI, 2006, pp. 5-7). Tal comportamento é representado na figura 2. Dessa forma, o diodo ideal bloquearia qualquer valor de tensão reversa e, ao conduzir não apresenta perdas. Logo, o diodo ideal pode ser comparado a uma chave cuja abertura ou fechamento está ligado à polarização do mesmo (AHMED, 2000, pp. 33-34).

Figura 1 – Diodo Ideal e Seu Circuito Equivalente.



Fonte: AHMED, 2000, p. 34.

Figura 2 – Característica Estática do Diodo Ideal.

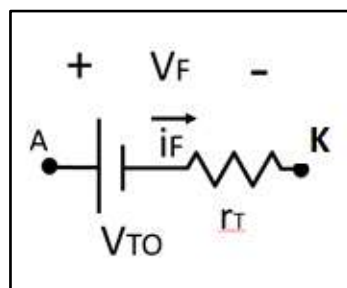


Fonte: BARBI, 2006, p. 5.

Um diodo real possui um valor de tensão reversa máxima (V_{BK}) que é capaz de bloquear, ultrapassar esse valor fará com que o mesmo conduza no sentido reverso e o danificará (BARBI, 2006, pp. 5-7). Para ser posto em condução a tensão V_F aplicada ao diodo precisa ser superior a V_{TO} , onde V_{TO} é um valor que varia de acordo com o material utilizado na fabricação do diodo; os diodos mais comuns (silício) apresentam V_{TO} próximo de 0,7 V.

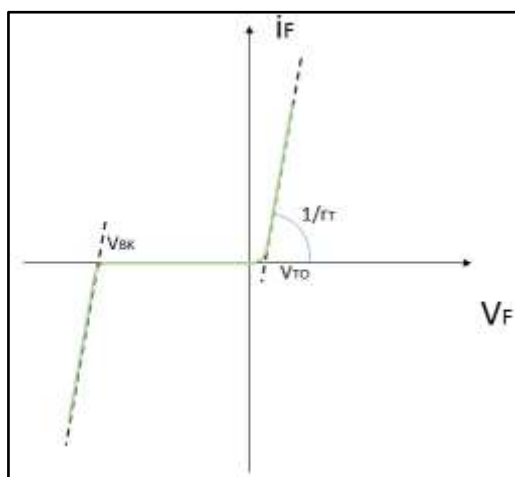
Quando em condução, um diodo real pode ser modelado por uma força-eletromotriz (V_{TO}) em série com uma resistência (r_T), figura 3. A curva da figura 4 apresenta a característica estática de um diodo real (BARBI, 2006, pp. 5-7).

Figura 3 – Diodo Real: Circuito Equivalente.



Fonte: BARBI, 2006, p.6.

Figura 4 – Característica Estática de um Diodo Real.



Fonte: BARBI, 2006, p. 6.

O diodo é um retificador, possui a característica de permitir a condução somente em um sentido e ser capaz de bloquear a condução no sentido contrário; e também é um elemento não controlado, isto porque nele não é possível controlar as transições bloqueio-condução (disparo) nem condução-bloqueio. O disparo se dá quando $V_F > V_{TO}$, já o bloqueio ocorrerá quando $V_F < V_{TO}$ e $I \approx 0$ A. Logo, é possível que um diodo conduza mesmo estando inversamente polarizado, esta é uma importante característica dinâmica do diodo (ARAGÃO FILHO, 2012, pp. 12, 20-21). Um exemplo clássico de condução sob tensão reversa é um circuito série diodo e uma carga indutiva, alimentado por uma tensão CA, figuras 5 e 6.

Figura 5 – Circuito com Característica Indutiva, Alimentado por Fonte de Tensão CA.

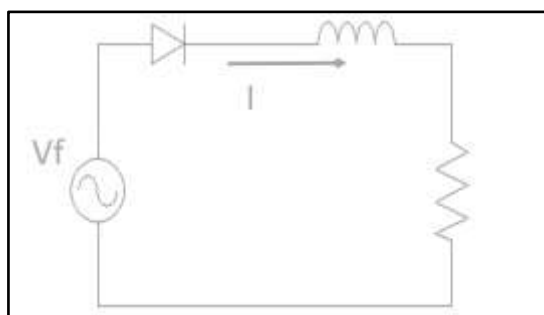
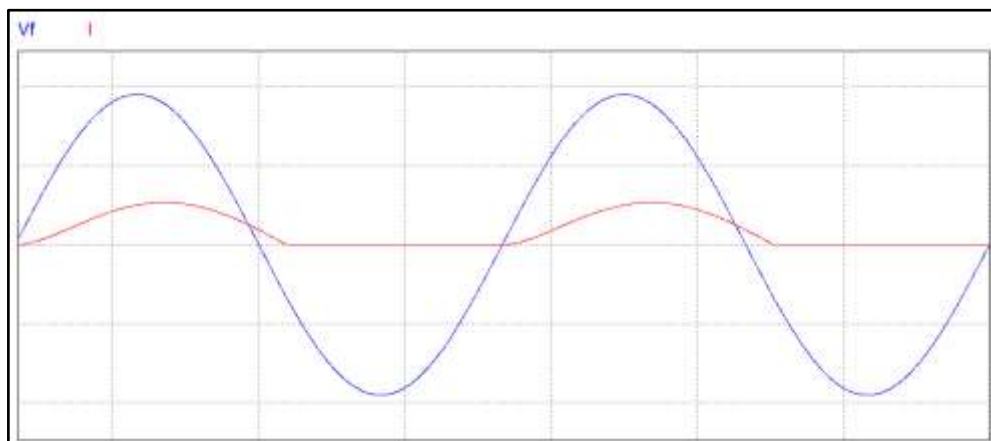


Figura 6 – Comportamento da Corrente no Diodo Devido à Carga com Característica Indutiva.



Nota-se que apesar da tensão sobre o conjunto carga e diodo ser negativa há condução de corrente.

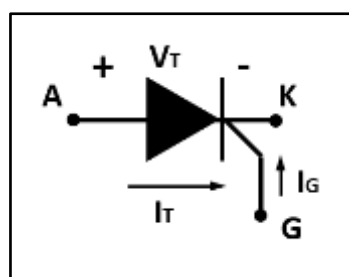
Em eletrônica de potência, ao se trabalhar com tensões e correntes elevadas e baixas frequências como a da rede, as perdas e quedas de tensão no diodo são desprezíveis (AHMED, 2000, p. 33).

2.1.2 Tiristor

Tal como o diodo, o tiristor é um elemento retificador, porém, o tiristor é um retificador semicontrolado, significando que com ele é possível controlar o momento em que entrará em condução, mas não o momento em que deixará de conduzir (ARAGÃO FILHO, 2012, p. 11).

O tiristor, cuja simbologia está representada na figura 7, possui os mesmos terminais anodo (A) e catodo (K) presentes em um diodo, porém, apresenta um terceiro terminal conhecido como *gate* (G) ou gatilho, por meio do qual é possível efetuar o disparo. A figura 8 apresenta um circuito fonte CA-tiristor-carga R, se o terminal *gate* é ativado no máximo de tensão da fonte, diz-se que o ângulo de disparo α é de 90° , e a tensão na carga R é aquela representada na figura 9 (V_i).

Figura 7 – Simbologia de um Tiristor.



Fonte: BARBI, 2006, p. 14.

Figura 8 – Retificador a Tiristor, Alimentando Carga Resistiva.

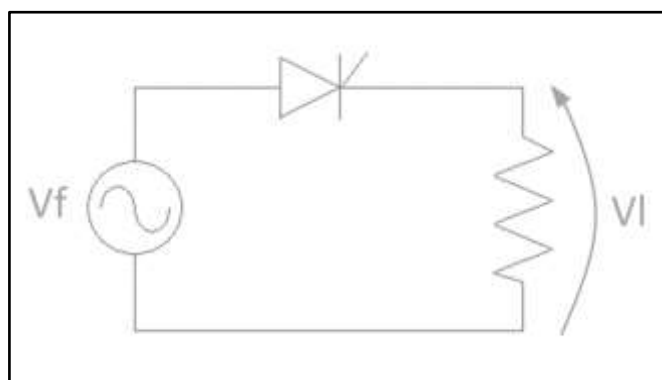
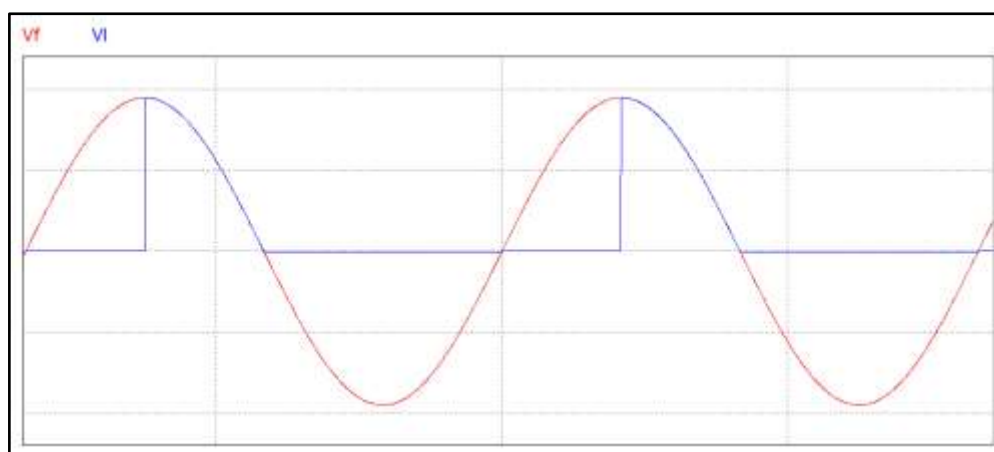


Figura 9 – Formas de Onda da Tensão da Fonte e Carga Resistiva, Alimentada por Retificador a Tiristor.



Em relação aos modelos ideal e real, o tiristor possui os mesmos de um diodo, seu comportamento para $V_T < V_{TO}$ também é o mesmo. O que diferencia o tiristor de um diodo é seu comportamento para $V_T > V_{TO}$, pois um tiristor só entrará em condução quando I_G for maior que um valor mínimo (que varia para cada modelo); um tiristor ideal seria capaz de bloquear qualquer valor de tensão direta ou reversa, porém, um elemento real possui limitações (BARBI, 2006, p. 15). Um tiristor submetido a uma tensão inversa superior à nominal conduzirá e será danificado (tal como um diodo); se submetido a uma tensão direta superior a um V_{AC} máximo entrará em condução, porém tal situação deve ser evitada pois reduz a vida útil do componente (CORRADI JÚNIOR, 2005, p.11).

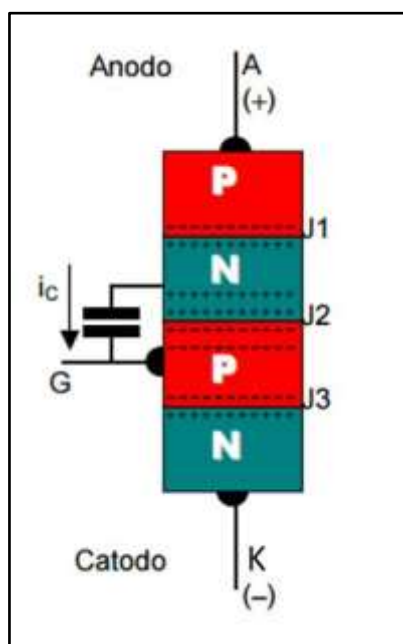
O disparo de um tiristor pode se dar de diversas formas, porém, o procedimento normal é o disparo por meio de um sinal de corrente no *gate* quando $V_{AC} > 0$ V. As outras formas de disparo devem ser evitadas, são elas: sobretensão, sobretensão, degrau de tensão dv/dt , luz ou radiação (CORRADI JÚNIOR, 2005, pp. 9-12).

Se energia luminosa (luz) ou radiante (fótons, raios gama, nêutrons, prótons, elétrons ou raios X) penetrarem nas junções do semiconductor haverá um aumento na corrente de fuga, o que pode levar o tiristor ao estado de condução; o mesmo se dá para um aumento brusco de temperatura ou uma tensão V_{AC} superior à sua tensão de ruptura direta máxima (V_{DRM}) (CORRADI JÚNIOR, 2005, p.12).

O disparo por degrau de tensão dv/dt pode ocorrer pois, em polarização direta, a junção J_2 se comporta como um capacitor carregado (figura 10), e em um capacitor a corrente se relaciona com a tensão pela expressão (CORRADI JÚNIOR, 2005, p.12):

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} \quad (1)$$

Figura 10 – Disparo por Degrau de Tensão.



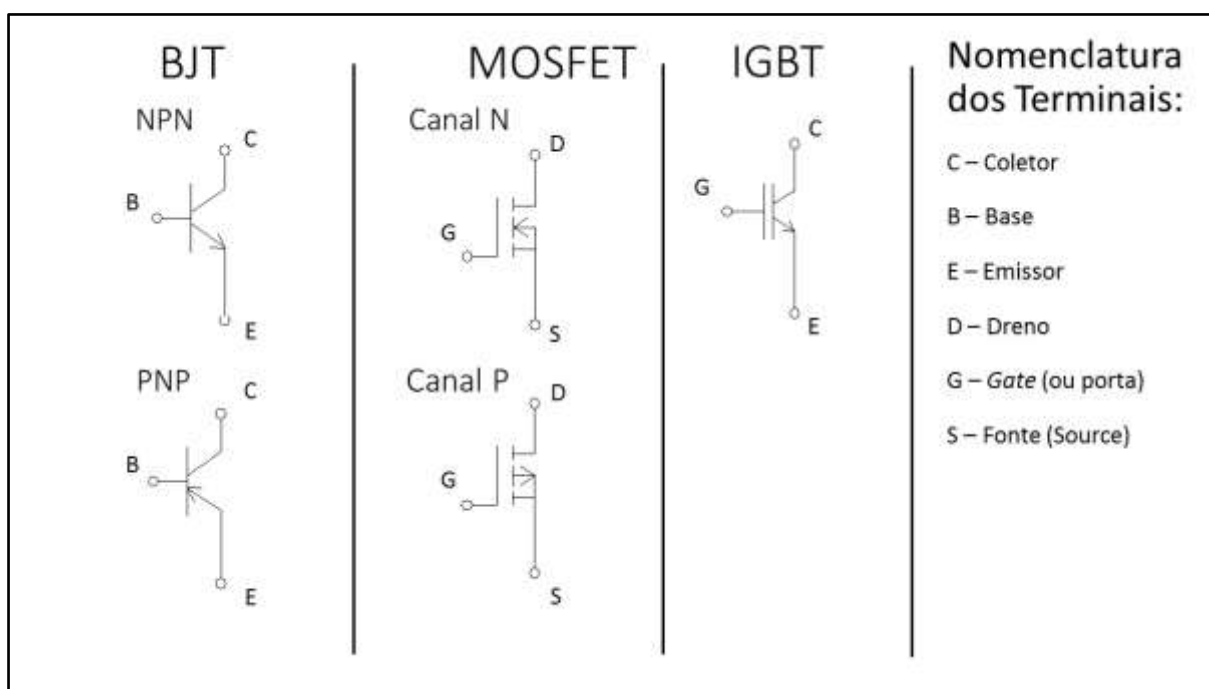
Detalhe construtivo de um tiristor e seu comportamento sob polarização direta.
Fonte: CORRADI JÚNIOR, 2005, p. 12.

Desta forma, quando aplicada uma tensão V_{AK} a capacitância da junção J_2 fará com que uma corrente circule no *gate*, esta será proporcional à variação de V_{AC} no tempo (dv/dt). Esta corrente pode fazer com que o tiristor entre em condução (CORRADI JÚNIOR, 2005, p.12).

2.1.3 Transistores de Potência

Os transistores de potência mais comuns são: transistor de junção bipolar (*Bipolar Junction Transistor - BJT*), MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) e IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Na figura 11 encontram-se as respectivas simbologias e nomenclatura de seus terminais (AHMED, 2000, pp. 54-86).

Figura 11 – Simbologia: Transistores de Potência.



Apesar de diferenças em suas estruturas, todos eles possuem funcionamento bem semelhante: podem funcionar como chaves (saturação) ou amplificadores (região linear), sendo mais comum seu uso como chaves de potência; são elementos totalmente controlados cuja condução está ligada a um sinal, de tensão ou corrente, no terminal de base (BJT) ou *gate* (MOSFET e IGBT). Diferentemente dos diodos e tiristores, não suportam tensões reversas. Os MOSFETs, porque possuem um diodo antiparalelo intrínseco; os BJT, porque podem conduzir reversamente se estiver com v_{BE} polarizado; e os IGBTs porque se danificam.

Ao se comparar um BJT e um MOSFET com valores nominais semelhantes, percebe-se: que a velocidade de chaveamento do BJT é muitas vezes mais lenta; pelo fato do BJT ser controlado por um sinal de corrente em sua base, exige-se uma maior corrente de controle, já o MOSFET

é controlado por um sinal de tensão; no estado ligado, o MOSFET apresenta maior queda de tensão (AHMED, 2000, pp. 54-86).

O IGBT foi inventado posteriormente ao BJT e ao MOSFET; a intenção era de se obter um semicondutor que aliasse as características positivas de ambos. O IGBT apresenta velocidades de chaveamento relativamente altas, e baixas perdas para tensões e correntes elevadas (relacionadas à queda de tensão quando no estado ligado) (AHMED, 2000, pp. 82-86). O quadro 1 apresenta um resumo das características apresentadas e considerações práticas.

Quadro 1 – Comparação Entre as Principais Chaves de Potência.

	BJT	MOSFET	IGBT
Sinal de Controle	Corrente	Tensão	Tensão
Frequência de Chaveamento*	Baixa 10kHz	Muito Alta 100kHz	Alta 40kHz
Queda de Tensão: estado ligado	Baixa	Alta	Média
Tensão nominal máxima*	1,5 kV	1kV	3,5kV
Vantagens	Baixa queda de tensão no estado ligado.	Maior velocidade de chaveamento e baixas perdas no chaveamento	Baixa potência dissipada no <i>gate</i> .
Considerações práticas	Vem sendo substituído pelo MOSFET e IGBT.	Normalmente usados para aplicações de até 400 V e baixas potências (da ordem de 100 W).	Geralmente usados em aplicações com tensões e potências elevadas (acima de 400V e 1kW).

* Valores Típicos

Fontes: RYSSEL, 2010; ASSEF.

As informações contidas neste trabalho levam em conta as chaves de potência produzidas com silício. Apesar do silício ser a matéria prima mais utilizada no desenvolvimento de semicondutores, suas limitações têm incentivado o estudo de um novo grupo de elementos e compostos conhecidos por semicondutores de banda larga (WBS, *wide band semiconductors*). Os WBS mais conhecidos são: o Carboneto de Silício (Silcon Carbide – SiC), o nitreto de gálio (Gallium Nitride – GaN) e o diamante (BUENO; SILVA, 2014).

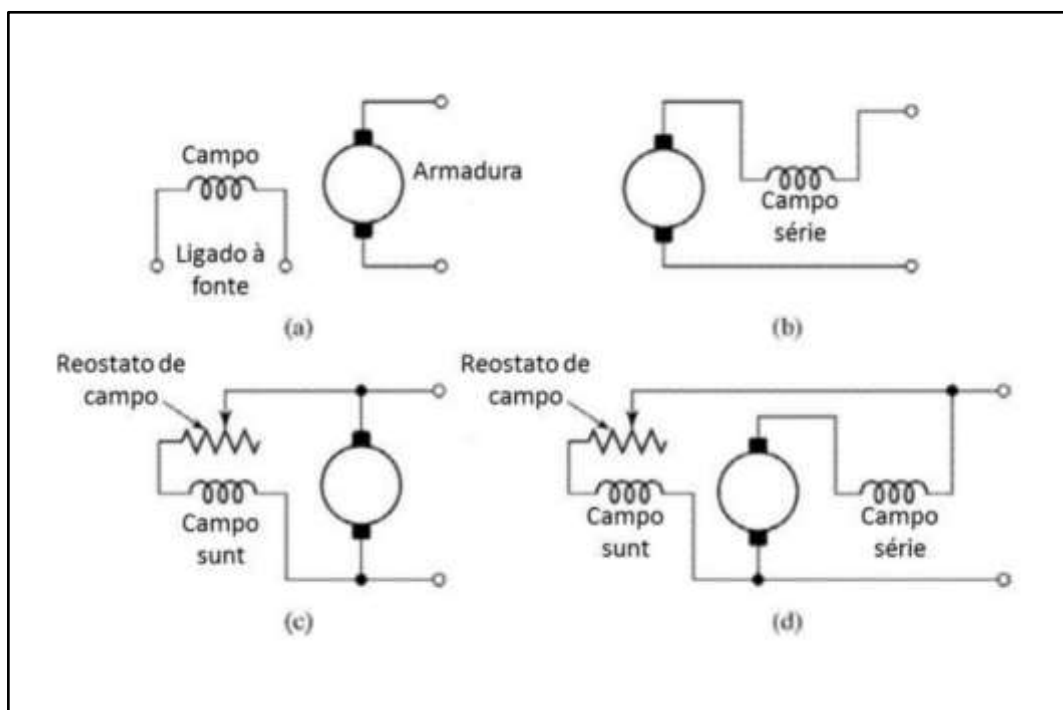
Os WBS têm apresentado melhor rendimento em relação ao manuseio de tensão e potência, à redução de perdas, ao incremento da velocidade de comutação. Essas melhorias têm tornado possível a produção de chaves mais eficientes, sendo o transistor MOSFET de SiC o mais promissor e considerado o melhor sucessor do IGBT de silício (BUENO; SILVA, 2014).

2.2 Máquina de Corrente Contínua

A máquina CC possui dois circuitos: armadura e campo. A forma de ligação entre eles resulta nos quatro modos de operação: excitação independente, shunt, série e composto (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2006, p. 343-381).

A figura 12 representa as formas de ligação entre circuitos de armadura e de campo de um motor CC.

Figura 12 – Máquina CC: Esquemas de Ligação.



Fonte: SEN, 1996, p.145. Tradução do próprio autor.

- Nota:
- (a) modo de excitação independente
 - (b) modo série
 - (c) modo shunt ou paralelo
 - (d) modo composto (shunt longo).

Segundo FITZGERALD, KINGSLEY JR. e UMANS (2006, p. 355), as equações que regem o comportamento das máquinas CC em regime permanente são:

$$T_m = k_a \times \Phi_d \times I_a \quad (2)$$

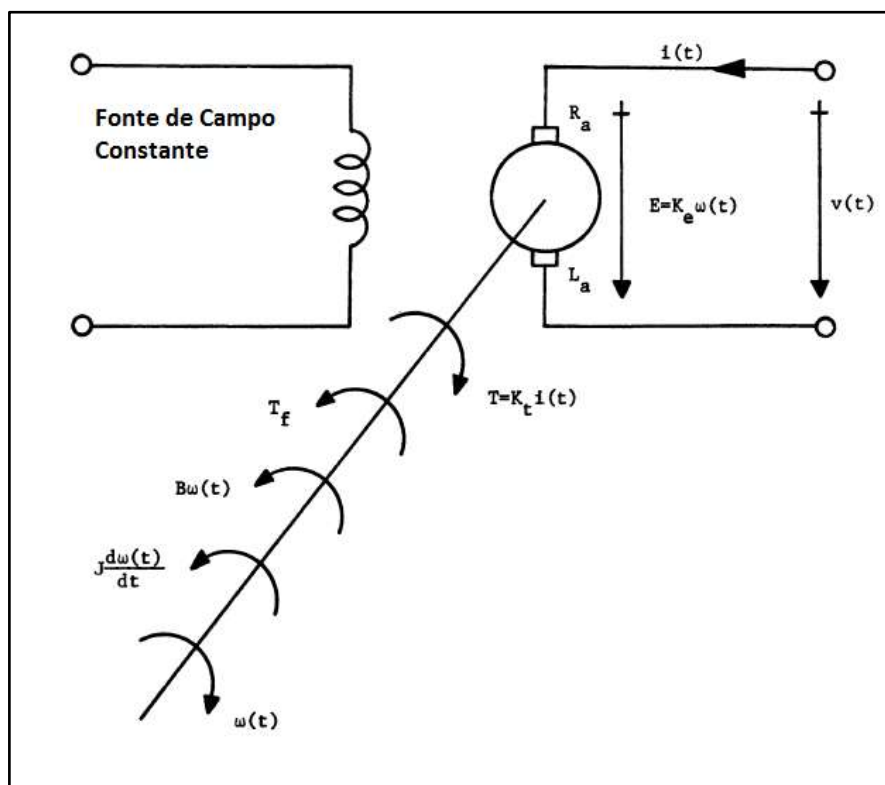
$$E_a = k_a \times \Phi_d \times \omega_m \quad (3)$$

$$V_a = E_a + R_a \times I_a \quad (4)$$

Onde: T_m é o torque mecânico desenvolvido pela máquina (motor) ou aplicado a ela (gerador); R_a a resistência de armadura; E_a e V respectivamente as tensões de armadura (força contra eletromotriz ou eletromotriz, no funcionamento da máquina como motor ou gerador respectivamente) e externa; I_a a corrente de armadura; Φ_d é o fluxo magnético advindo do circuito de campo do motor; ω_m é a velocidade de rotação do eixo da máquina; a constante k_a , presente nas equações 1 e 2, se origina de duas constantes distintas: k_e (constante da força contra eletromotriz) e k_t (constante de torque), mas, ao se trabalhar com todas as grandezas no SI, k_e e k_t são iguais (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2006, p. 343-381).

Como citado anteriormente, o uso do motor CC se dá principalmente quando há necessidade de uma variação ampla de velocidade ou um controle preciso da mesma; ao controlar a velocidade, pode-se tornar necessário controlar não só a velocidade em regime, mas também a de transição para se evitar variações abruptas que possam a vir a danificar o motor, a carga ou mesmo a fonte. A figura 13 representa um modelo de um motor CC com circuito de campo independente e grandezas a serem consideradas para seu controle.

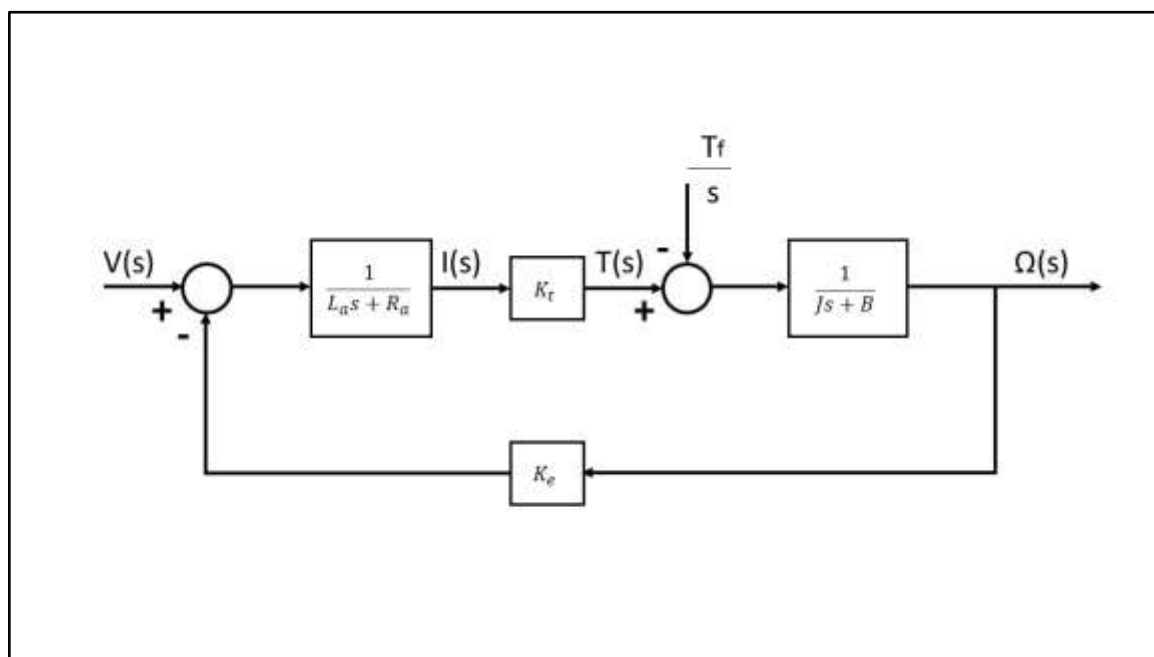
Figura 13 – Circuito Equivalente de Motor CC de Excitação Independente.



Fonte: LORD; HWANG, 1977. Tradução do próprio autor.

Levando em consideração o modelo da figura 13, pode-se modelar o comportamento do motor de acordo com o diagrama de blocos da figura 14 (LORD; HWANG, 1977); o referido diagrama de blocos representa um modelo completo, sendo possível algumas simplificações de acordo com os valores dos parâmetros e a exatidão desejada (LORD; HWANG, 1977).

Figura 14 – Diagrama de Blocos: Motor CC de Excitação Independente, Modelo Completo.



Fonte: LORD; HWANG, 1977.

2.3 Controle por Fase e Controle PWM

O controle por fase se dá em um conversor CA-CC (retificador), em que se controla o ângulo de disparo, daí o nome controle por fase. Estes conversores fazem uso de tiristores e podem possuir diversas topologias. A figura 15 representa um motor CC acionado por retificador monofásico de onda completa e na figura 16 podem-se observar as formas de onda de tensão no motor e na fonte, e da corrente de armadura, para diferentes situações de carga no eixo do motor apresentado na figura 15. Nas análises a seguir considera-se sempre o motor CC com excitação independente, devido a isso, o enrolamento de campo será omitido na representação.

Na obtenção das curvas da figura 16: o ângulo de disparo e a tensão da fonte CA foram mantidos constantes, $\alpha = 90^\circ$ e $V_f = 180 \cdot \cos(377 \cdot t)$ V; variou-se o valor da tensão de armadura como forma de simular a operação em diferentes velocidades. Tais variações são resultantes de diferentes torques aplicados ao eixo do motor. Fez-se $E_a = 130$ V para simular o motor à vazio, resultando nas formas de onda da figura 16 (a); como que se acoplando uma carga a este motor, usou-se $E_a = 80$ V e obtiveram-se as formas de onda mostradas na figura 16 (b); por fim, a figura 16 (c) foi obtida fazendo-se $E_a = 40$ V, simulando um aumento na carga anterior.

Figura 15 – Modelo: Motor CC Acionado por Ponte de Tiristores de Onda Completa, Monofásica.

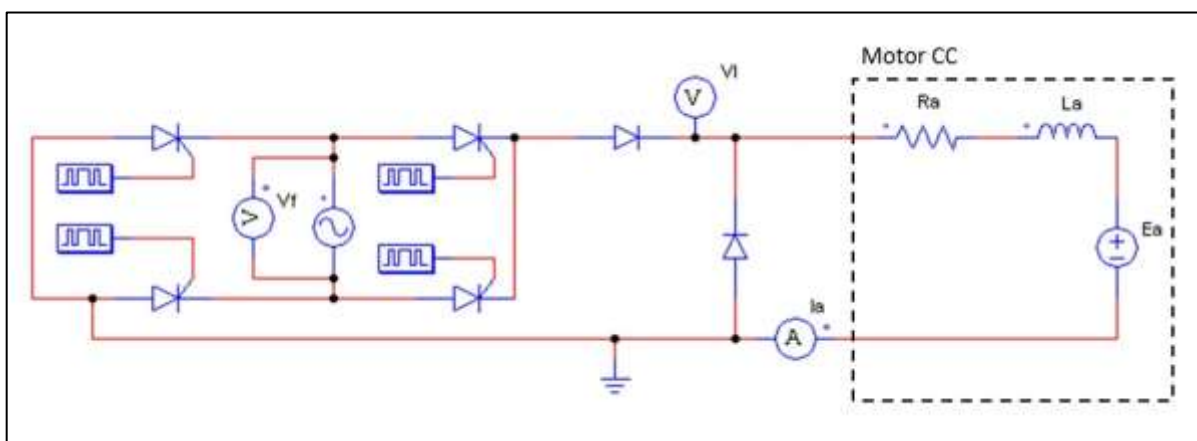
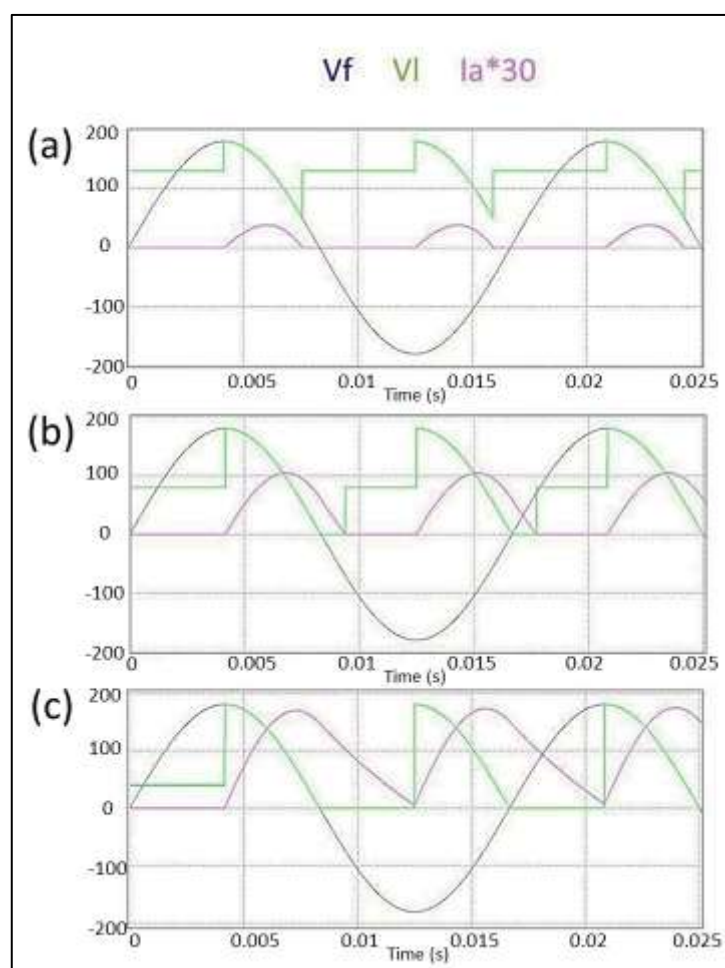


Figura 16 – Variação da Tensão de Carga.



Na figura 16 observa-se que para um mesmo conversor e mesmo ângulo de disparo (α) ocorrem variações na tensão de saída devido ao ângulo de extinção (β) e tensão de armadura (E_a), que varia para cada situação. De acordo com CORRADI JÚNIOR (2011): “Esta dependência do

valor médio da tensão na carga, com a própria carga, torna-se um grande inconveniente para esta estrutura retificadora”. Mais detalhes sobre o cálculo do valor médio para o conversor da figura 16 são apresentados no tópico 4.5.1.

PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*, significa modulação por largura de pulso; em um motor CC o controle PWM se dá por meio de um conversor CC-CC (chopper), o qual pode variar a tensão de saída a partir de uma fonte de tensão fixa (AHMED, 2000, pp. 308-309).

A tensão de saída de um modulador PWM é obtida por meio da abertura e fechamento de uma ou mais chaves nos tempos T_{off} e T_{on} respectivamente, neste caso trabalha-se com um período fixo T , em que T é dado por (AHMED, 2000, pp. 308-310):

$$T = T_{off} + T_{on} \quad (5)$$

A figura 17 representa um motor CC acionado por um par de MOSFETs que formam uma meia ponte H e, na figura 18 encontram-se as respectivas formas de onda de tensão e corrente no motor para diferentes situações de operação, quais sejam: (a) motor à vazio ($E_a = 130$ V), (b) motor com carga ($E_a = 80$ V) e (c) motor com carga ainda maior ($E_a = 40$ V), onde mantiveram-se constantes o valor de V_f e a relação T_{on}/T_{off} , respectivamente iguais a 180 V e 0,833.

Figura 17 – Modelo: Motor CC Acionado por Meia Ponte H.

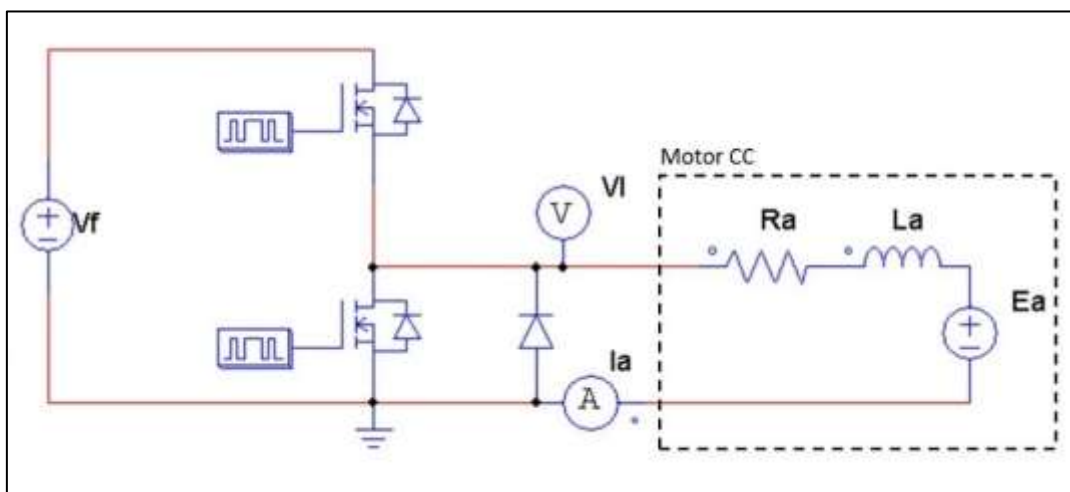
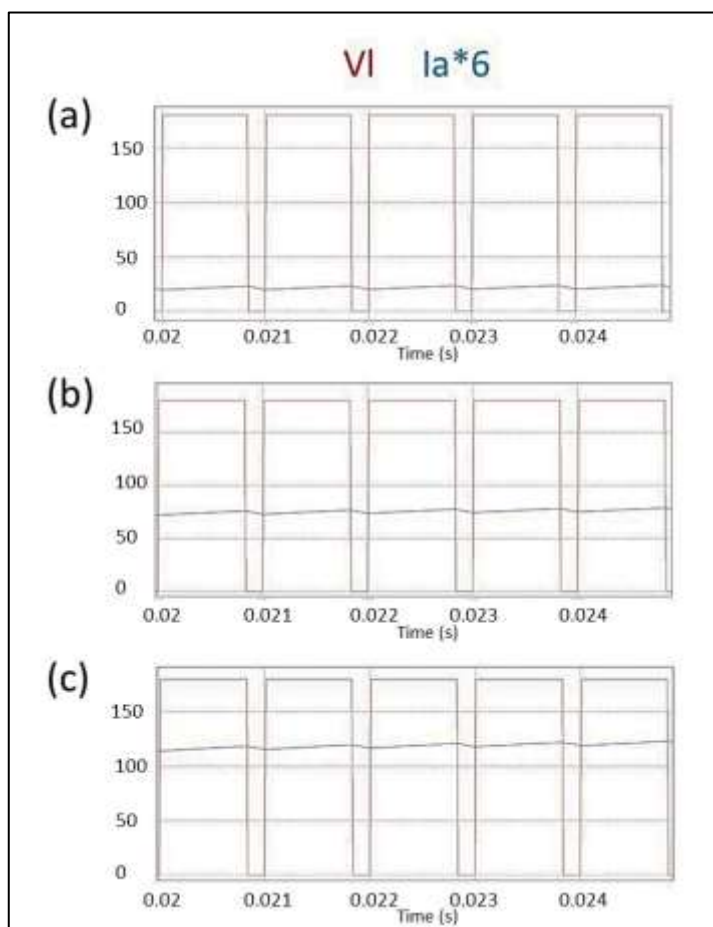


Figura 18 – Tensão de Saída PWM: Variação de Carga no Eixo do Motor.

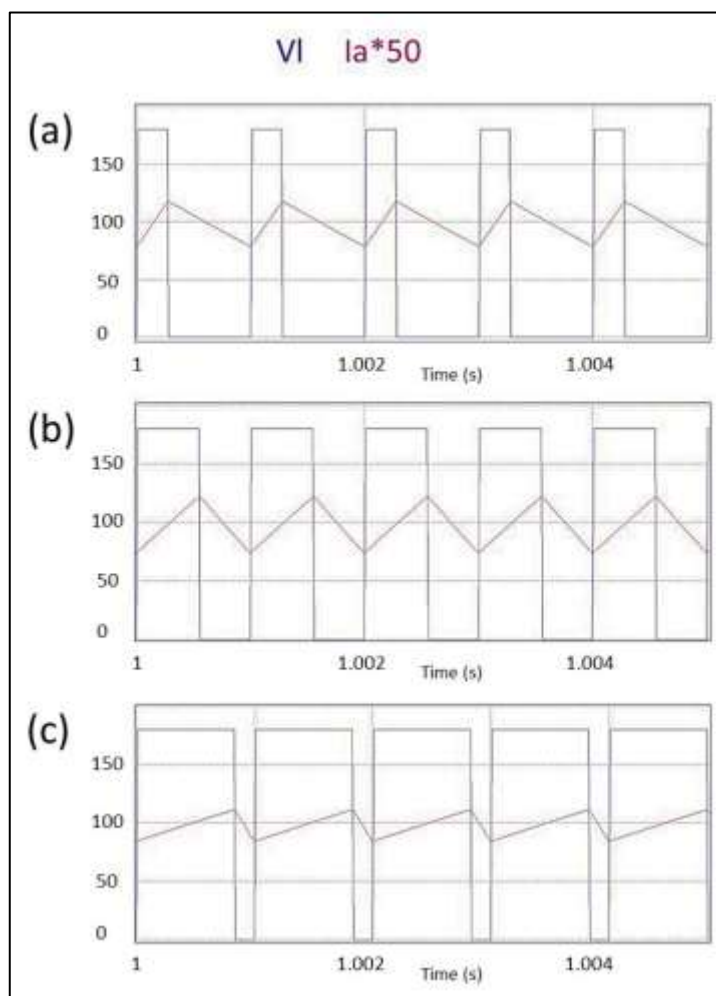


Este segundo conversor apresenta a grande vantagem de que a tensão aplicada à carga não depende da mesma; outra grande vantagem é que essa tensão é facilmente calculada (SEN, 1996, pp. 539-541):

$$V_l = V_f \left(\frac{T_{on}}{T} \right) \quad (6)$$

Na figura 19 estão representadas as curvas de tensão de alimentação e corrente de armadura do motor, nas três situações as cargas demandam um mesmo torque, o que resulta em um mesmo valor médio de I_a , 1,95 A. Em (a) $V_1 = 50$ V e $E_a = 40$ V, em (b) $V_1 = 100$ V e $E_a = 90$ V e finalmente em (c) $V_1 = 150$ V e $E_a = 140$ V. Apesar de manter o torque constante, de (a) até (c) a velocidade é crescente, demonstrando assim a possibilidade do controle de velocidade do motor, mantendo o torque constante.

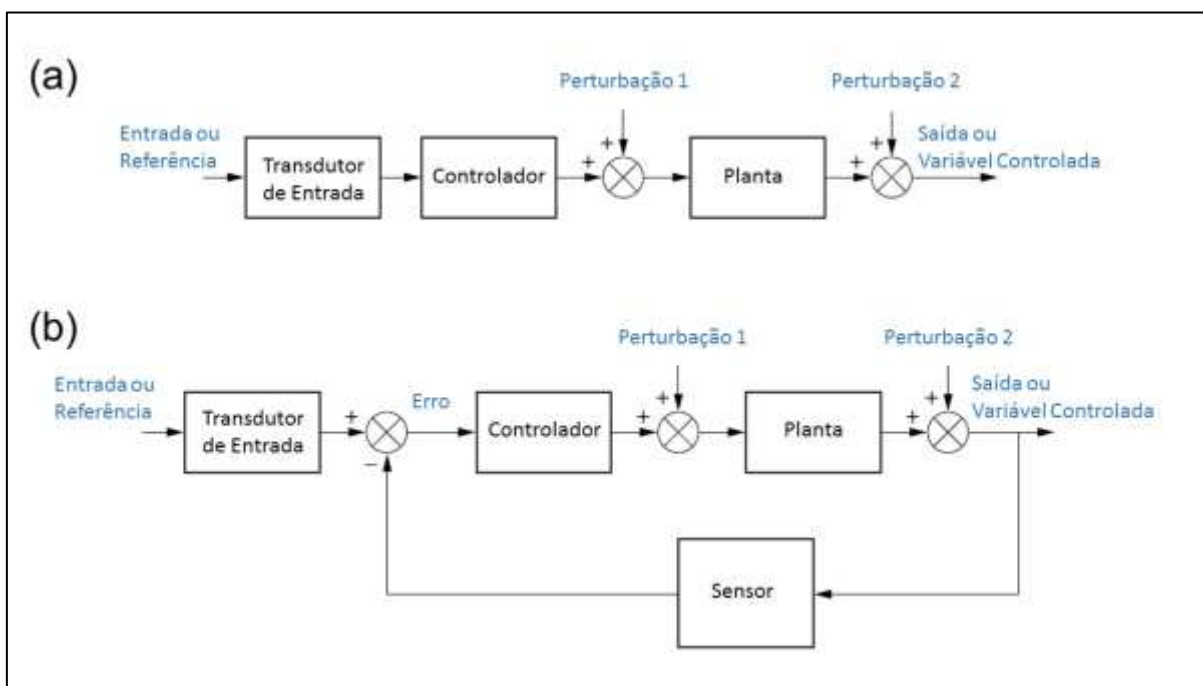
Figura 19 - – Tensão de Saída PWM: Carga Constante.



2.4 Controle em Malha Aberta e em Malha Fechada

Um sistema em malha aberta (sistema direto) opera sem retroação e gera diretamente a saída em resposta a um sinal de entrada (DORF; BISHOP, 2001, p. 140). Como exemplo de um sistema em malha aberta pode-se citar um motor CC ligado a uma fonte de tensão CC variável; sabe-se que para aumentar ou reduzir a velocidade do motor é necessário aumentar ou diminuir, respectivamente, a tensão de alimentação. Mas, sem mais aparatos, não é possível ter um controle preciso de sua velocidade, nem a manter constante frente a uma variação na carga em seu eixo. A figura 20(a) representa um sistema direto genérico.

Figura 20 – Diagrama de Blocos: Sistemas de Controle: (a) em Malha Aberta e (b) em Malha Fechada.



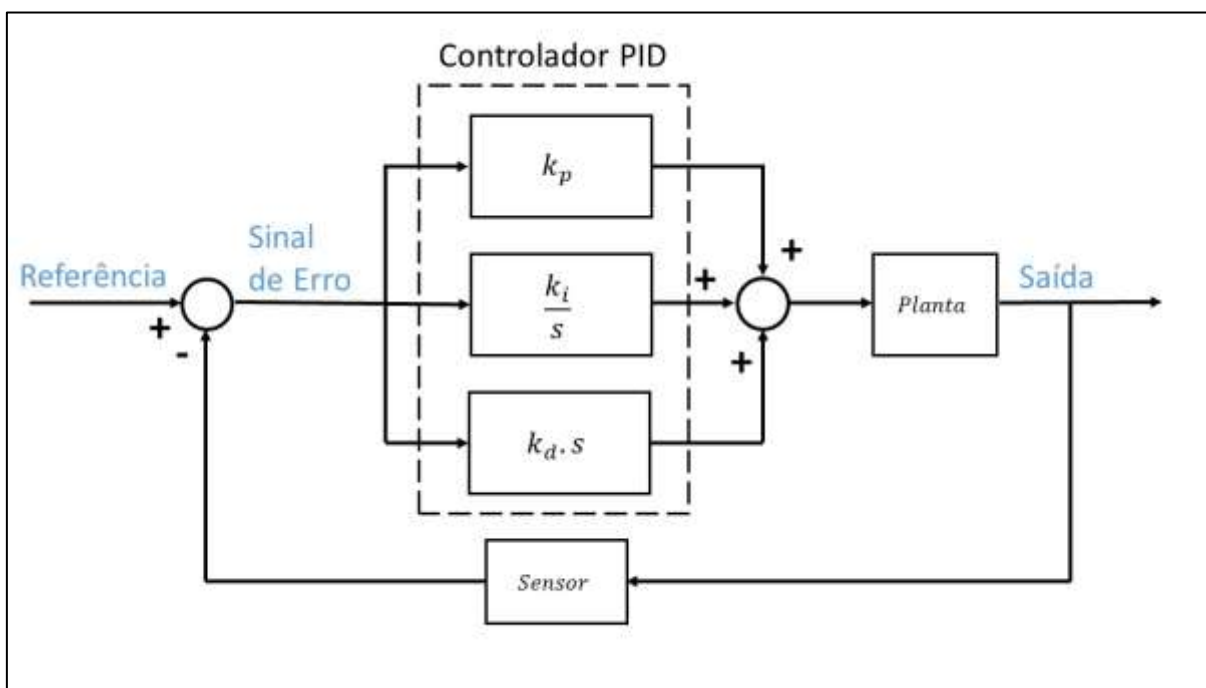
Fonte: NISE, 2011, p.8. Tradução do próprio autor.

De acordo com DORF e BISHOP (2001, p. 140): “Um sistema de malha fechada usa uma medida do sinal de saída e a comparação com a saída desejada para gerar um sinal de erro que é aplicado ao atuador”. Para se ter um sistema de controle em malha fechada (figura 20(b)) são necessários: sensoriamento, responsável pela realimentação, e controlador, o qual promove a adequação do sinal de alimentação da planta de acordo com a diferença entre os sinais de referência e medido.

2.4.1 Controlador PID

Um controlador muito difundido é o PID, proporcional integral derivativo. Como o próprio nome sugere, este controlador, mostrado na figura 21, é composto pelas três ações de controle que lhe conferem seu nome (DORF; BISHOP, 2001, p. 545).

Figura 21 – Composição de um Controlador PID.



OGATA, 2000, pp.180-190.

Em um controlador proporcional, a razão entre a saída e a entrada é igual a uma constante conhecida por ganho proporcional (k_p). O ganho proporcional determina a taxa de resposta de saída para o sinal de erro, em geral o aumento de k_p aumenta a velocidade de resposta do sistema de controle; porém, um k_p muito elevado fará com que a saída do sistema tenha grandes oscilações, podendo leva-lo à instabilidade (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011).

No controle proporcional há um erro em regime estacionário, erro residual, na resposta a um degrau. Com a inclusão de um controlador com ação integral é possível eliminar esse erro. No controle integral, o sinal de controle é proporcional à somatória ao sinal de erro até aquele instante. A ação do controle integral, apesar de remover o erro residual em regime estacionário, pode resultar em uma resposta oscilatória com amplitude lentamente decrescente ou mesmo crescente (tornando o sistema instável) (OGATA, 2000, pp. 180-190). Os efeitos da ação do controle integral podem ser maximizados ou minimizados por meio do aumento ou redução, respectivamente, do ganho integral (k_i).

O controle derivativo é proporcional à taxa de variação do sinal de erro do sistema e ao ganho derivativo (k_d). Em controladores digitais a derivada do sinal de erro é calculada por aproximação: a derivada de resposta é proporcional à variação da variável de processo em um

intervalo de tempo conhecido por tempo derivativo (T_d). Aumentar o parâmetro do tempo derivativo (T_d) fará com que o sistema de controle reaja mais fortemente às mudanças no parâmetro de erro aumentando a velocidade da resposta global de controle do sistema. Na prática, a maioria dos sistemas de controle utilizam o tempo T_d muito pequeno, pois a derivada de resposta é muito sensível ao ruído no sinal da variável de processo. Se o sinal de *feedback* do sensor é ruidoso ou se a taxa de malha de controle é muito lenta, a derivada de resposta pode tornar o sistema de controle instável (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011).

3 O SISTEMA ATUAL

3.1 Motor

O motor que acompanha o MC183 é um motor CC, de excitação independente, mostrado na figura 22. Suas características nominais são: 0,33 HP; 180 V; 2,1 A; 3000 RPM. O motor foi fabricado por Normand Electrical Co. Ltd. Informações adicionais se encontram no ANEXO A.

Figura 22 – Motor Utilizado.



3.2 MC183

O controlador MC183, mostrado na figura 23, pode funcionar tanto como fonte externa como controlador do motor, onde a seleção é feita por meio de uma chave no painel. A velocidade é ajustada por meio de um reostato. O funcionamento do controlador é baseado em uma lógica analógica que utiliza principalmente transistores e resistores.

Figura 23 – MC183.



O controle de velocidade é feito por meio do controle de fase (ângulo de disparo). Uma característica interessante do controlador é que há apenas um tiristor em conjunto com uma ponte de diodos de onda completa, tal composição funciona como uma ponte de onda completa de tiristores. O circuito de campo do motor é alimentado diretamente pela ponte de diodos, quando o MC183 está funcionando como controlador do motor; já o motor está em série com o tiristor e tem sua tensão controlado por ele.

O conjunto utilizado apresenta como desvantagem uma queda de tensão em um elemento a mais se comparado com uma ponte de tiristores, porém essa queda é desprezível (por volta de 0,7 V); em contrapartida a escolha de se usar apenas um tiristor tem a grande vantagem de necessitar de apenas um circuito de disparo ao invés dos quatro necessários para a ponte de tiristores; tal escolha ainda reduz consideravelmente a quantidade de componentes e reduz em muito os custos e peso do projeto, visto que se faz uso de transformadores de pulso para se isolar o circuito de potência do de controle.

O disparo depende da constante de tempo de um circuito RC e da tensão sobre ele aplicada, esta última é proporcional à diferença entre a fonte CC e a força contra eletromotriz. Assim, quando o motor estiver a uma velocidade constante, um aumento de carga em seu eixo fará com que sua velocidade e força eletromotriz decaiam, a tensão sobre o circuito de disparo aumentará fazendo com que a tensão aplicada ao motor também aumente, compensando assim a queda na velocidade, dessa forma, o motor se estabilizará em uma nova velocidade.

Outro mecanismo existente é uma proteção contra sobre carga, alguns resistores (de baixo valor, aproximadamente 1Ω no total) estão em série com o motor. A tensão sobre eles (que depende da corrente do motor) ao atingir certo valor inibe o disparo, protegendo assim o motor.

Há bornes que estão ligados paralelamente à armadura do motor, eles podem ter duas funções: quando o MC183 está funcionando como controlador, servem para se observar a forma de onda da tensão sobre o motor (por meio de um osciloscópio); quando estiver funcionando como fonte, os bornes são os terminais da fonte.

Para mais detalhes do circuito e do funcionamento do MC183, no ANEXO A encontram-se as informações do fabricante do mesmo.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Funcionalidades e Modos de Operação

O novo protótipo foi projetado para ser usado como controlador do motor ou como fonte externa; foram mantidos os bornes no painel que servem para conexão de uma carga externa ou para monitoramento da tensão no motor, ver figura 24.

O controle por fase, via tiristor, foi mantido e foi acrescentado o acionamento por PWM, via par de MOSFETs (meia ponte H). Além do modo de operação, controle por fase ou PWM, também foi disponibilizado ao usuário a opção de escolher o sentido de giro do motor.

O controlador desenvolvido faz uso de um sensor de corrente. Para a proteção da carga e controlador foram desenvolvidas proteções de curto-circuito e sobrecarga que atuam como um disjuntor virtual.

4.2 Interface e Operação

Foram feitas mudanças significativas no painel para tornar o controlador mais didático e fácil de ser configurado, são elas: inserção de uma tela *LCD* para exibição de informações relevantes; substituição de chaves e reostatos, responsáveis pela configuração, por apenas três botões multifuncionais que estão apresentados na figura 24.

Figura 24 – Painel do Protótipo.



No canto direito do painel do protótipo, apresentado na figura 24, existem 3 botões: botão de incremento, identificado por “^” e doravante chamado de B+; botão de decremento, identificado pelo símbolo “v” e daqui em diante conhecido por B-; botão de seleção, identificado

como “select” e a partir de agora chamado de B_{select} . Esses botões são multifuncionais, pois são utilizados tanto na configuração da operação (disponível apenas no protótipo final) quanto na variação da grandeza controlada que dependendo da operação selecionada poderá ser: ângulo de disparo, tensão ou velocidade angular.

O botão B_{select} sempre é acionado ao ser pressionado e mantido assim por meio segundo; B+ e B- são acionados ao serem pressionados, mas, se mantidos pressionados por meio segundo, têm sua ação repetida em maior velocidade, tal opção foi inserida para se obter variações na variável de controle de forma mais rápida.

Durante a configuração, o usuário deve escolher entre algumas opções, mais detalhadas no tópico 4.8.2; as opções são disponibilizadas na tela *LCD*, sempre de duas em duas; para alternar entre as opções, o usuário deve acionar B+ ou B-, para efetuar a seleção deve-se acionar B_{select} . Em certo momento, o usuário poderá alterar o valor da variável de controle, para isso os botões B+ e B- devem ser habilitados acionando-se o botão B_{select} ; ao se habilitar B+ e B-, a variável de controle começará a piscar, então B+ e B- exercerão a ação de incrementar e decrementar, respectivamente, a variável de controle. A alteração só será efetivada após B_{select} ser acionada novamente, desabilitando as ações de B+ e B-, após o que a variável de controle para de piscar e recebe seu novo valor.

4.3 O Arduino

De acordo com (ARDUINO, 2017): O Arduino é uma plataforma eletrônica, *open-source*, para prototipagem que se baseia em *hardware* e *software* flexíveis e de fácil utilização. Atualmente é usado por: artistas, designers, hobbistas e qualquer pessoa interessada em criar objetos ou ambientes interativos. O Arduino possui uma linguagem de programação que se assemelha ao C#.

Há no mercado diversos modelos que possuem uma gama de configurações. Para o desenvolvimento do projeto foi utilizado um modelo similar ao Arduino Pro Mini 5V, o modelo escolhido possui a configuração descrita no quadro 2.

Quadro 2 – Especificações técnicas: Arduino Pro Mini 5V.

Microcontrolador	ATmega328
Fonte de alimentação da placa	5-12 V
Tensão de operação do circuito	5 V
Pinos digitais de entrada/saída	14
Pinos PWM	6
UART	1
SPI	1
I2C	1
Pinos de entrada analógica	6
Interrupções externas	2
Corrente CC por pino entrada/saída	40 mA
Memória Flash	32 KB dos quais 2 KB são usados pelo bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frequência de Clock	16 MHz

Fonte: ARDUINO, 2017. Tradução do próprio autor.

O modelo foi escolhido por apresentar uma configuração suficiente às tarefas propostas e por ser o menor modelo encontrado no mercado; deste ponto em diante o termo “Arduino” refere-se ao modelo recém descrito.

4.4 Protótipo Inicial

Neste primeiro protótipo foram desenvolvidos: a interface e o acionamento por controle de fase ou por ângulo de disparo (α). O acionamento por controle de ângulo de disparo é composto pelos blocos: fonte de tensão CC, detector de passagem por zero (ZCD), sensor de corrente, circuito de disparo (tiristor) e microcontrolador.

O protótipo é ligado ou desligado por meio da chave alavanca, encontrada no canto esquerdo do painel da figura 24. Ao ser ligado, o motor é acionado por meio de uma rampa de tensão até atingir um valor mediano de tensão, α variando de 138° a 100° ; a partir de então o usuário tem a liberdade de definir o ângulo de disparo. É importante destacar que o novo valor de α não é aplicado de forma instantânea, mas, em forma de uma rampa. A partir do momento de

energização do sistema, a tela *LCD* é ligada mostrando as informações de ângulo de disparo e corrente de armadura, como apresentado na figura 25.

Figura 25 – Apresentação dos Dados na Tela *LCD*.



Uma rotina principal é executada, ela é responsável pelas leituras de teclado e de corrente, e pela escrita na tela *LCD*; as interrupções são responsáveis pelo controle do disparo. O funcionamento é descrito pelos fluxogramas das figuras 26 e 27.

Figura 26 – Protótipo Inicial: Rotina Principal.

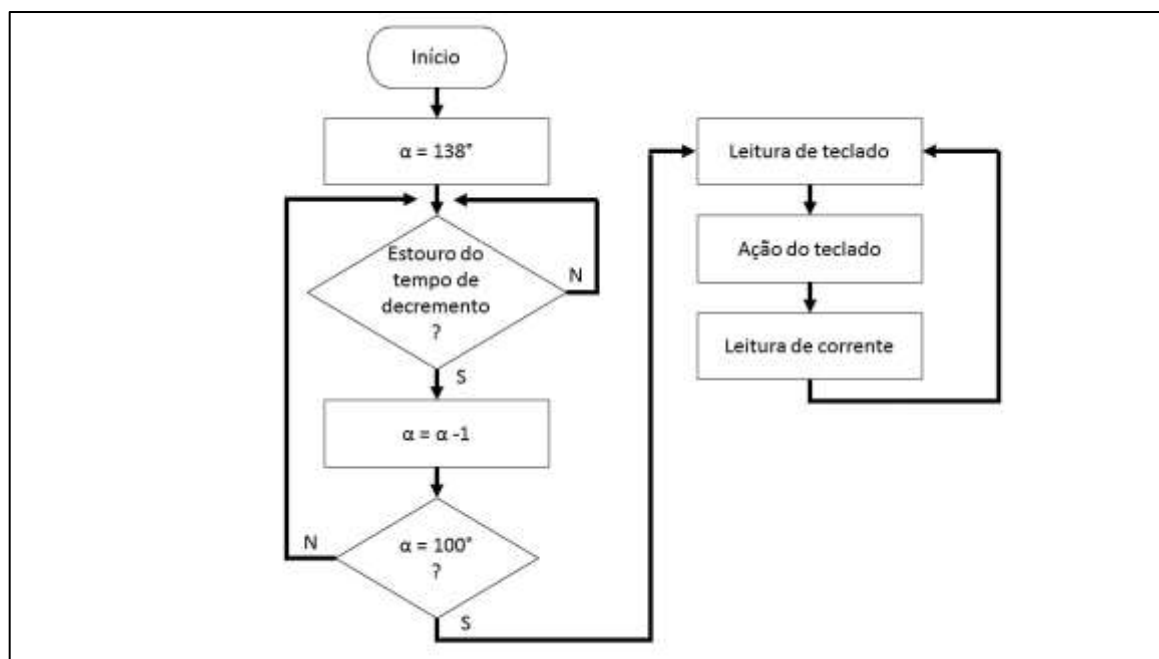
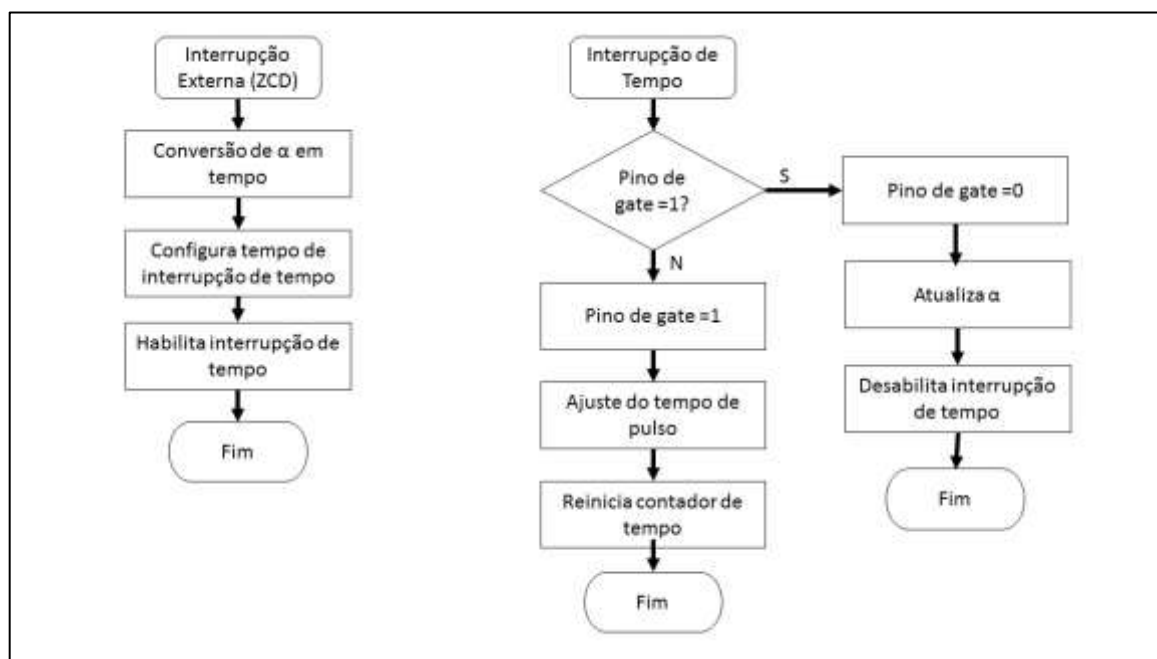


Figura 27 – Protótipo Inicial: Interrupções.



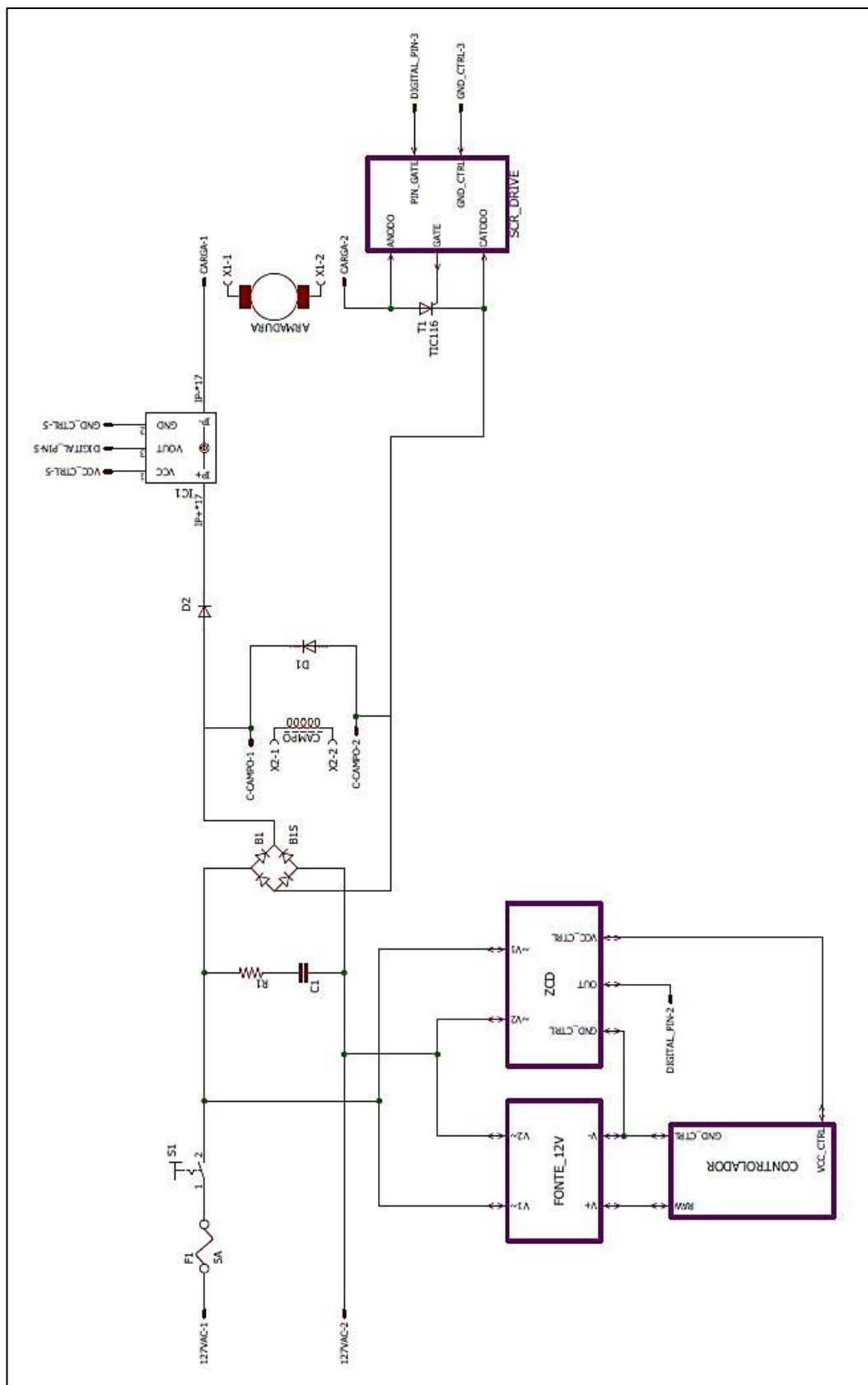
4.4.1 Circuito do Protótipo Inicial

O primeiro protótipo, cujo circuito está representado na figura 28, começou com o mesmo circuito de potência do MC183 (ver ANEXO A), já os circuitos de controle analógico e de disparo foram substituídos pelo Arduino, circuito detector de passagem por zero, sensor de corrente e um *driver* de disparo do tiristor. Nota-se que além dos blocos, poucos são os componentes usados, e que os valores e as características dos componentes, que estão no quadro 3, são bem próximos aos utilizados no controlador original, disponíveis no ANEXO A.

Quadro 3 – Componentes: Protótipo Inicial.

Código	Componente	Características	Observação
R1	Resistor	4,7 Ω , 5 W	Comprado, comércio local
C1	Capacitor	2,2 μF , 250 V	Comprado, comércio local
F1	Fusível	5 A	Disponível no LEPAC
B1	Ponte retificadora	TU808, 8 A, 600 V	Comprado, comércio local
D1	Diodo	1N4004, 1 A, 400 V	Disponível no LEPAC
D2	Diodo	XA1106, 10 A, 600 V	Comprado, comércio local
IC1	Sensor de Corrente	ACS712 -30 A a +30 A	Comprado, São Paulo
T1	Tiristor	TIC116	Comprado, comércio local

Figura 28 – Circuito: Primeiro Protótipo.



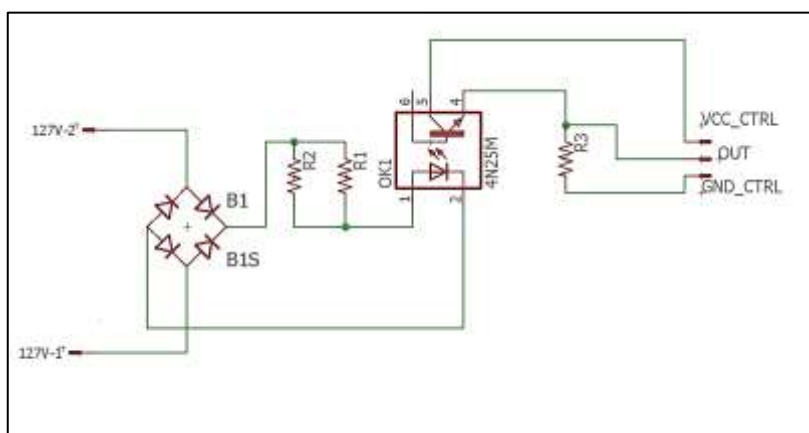
4.4.1.1 Fonte 12 V (FONTE_12V)

Esta é uma fonte chaveada comum de 12 V, reaproveitada de outro equipamento. Sua corrente máxima é de 1 A.

4.4.1.2 Detector de Passagem por Zero (ZCD)

Este circuito, mostrado na figura 29, é o responsável por ser uma referência de quando o sinal senoidal da fonte passa por zero. Seu funcionamento é bem simples: enquanto o sinal da fonte for grande o suficiente para vencer a queda de tensão do diodo interno do 4N25, os pinos 4 e 5 do mesmo estão sob o mesmo potencial, fazendo com que a saída seja igual a 5 V; quando o sinal da fonte está muito perto de zero, não há condução no diodo interno, assim, os pinos 5 e 4 ficam isolados, fazendo com que a saída seja 0 V. As formas de onda da tensão da rede e saída do ZCD estão apresentadas nas figuras 30 e 31. Este bloco é então ligado a uma porta do Arduino que percebe esta mudança, e gera uma interrupção. No quadro 4 estão listados os componentes do bloco ZCD.

Figura 29 – Bloco ZCD.



Quadro 4 – Componentes: ZCD.

Código	Componente	Características	Observação
R1	Resistor	22 k Ω , 5 W	Comprado, comércio local
R2	Resistor	15 k Ω , 10 W	Comprado, comércio local
R3	Resistor	3,3 k Ω , 1/4 W	Disponível no LEPAC
B1	Ponte retificadora	1,5 A, 400 V	Comprado, comércio local
OK1	Opto acoplador	4N25	Comprado, comércio local

Figura 30 – Forma de Onda ZCD.

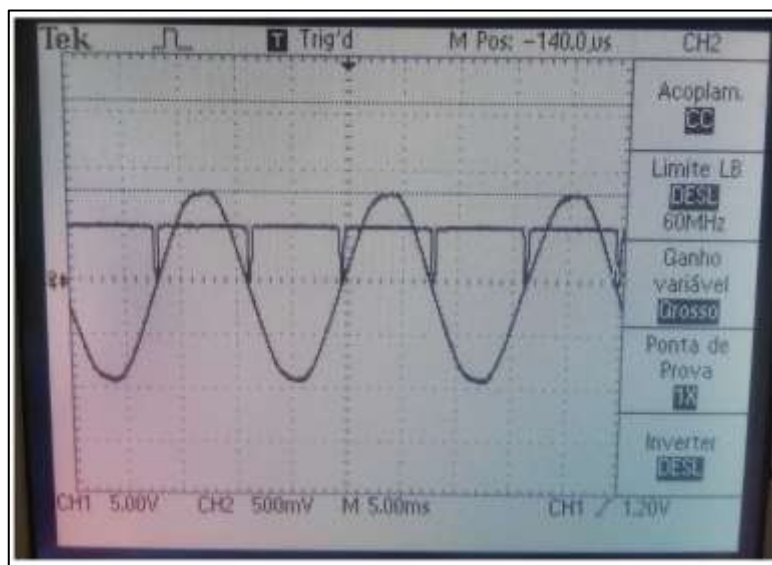
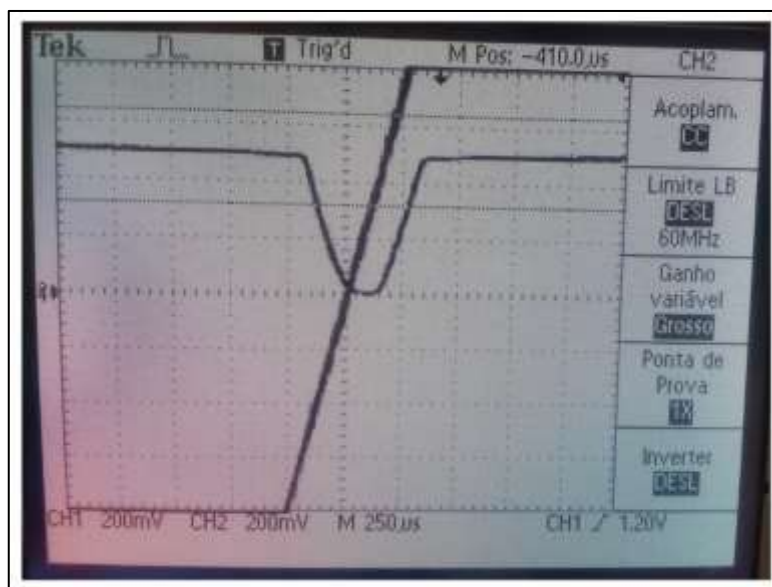


Figura 31 – ZCD: Largura do Pulso.



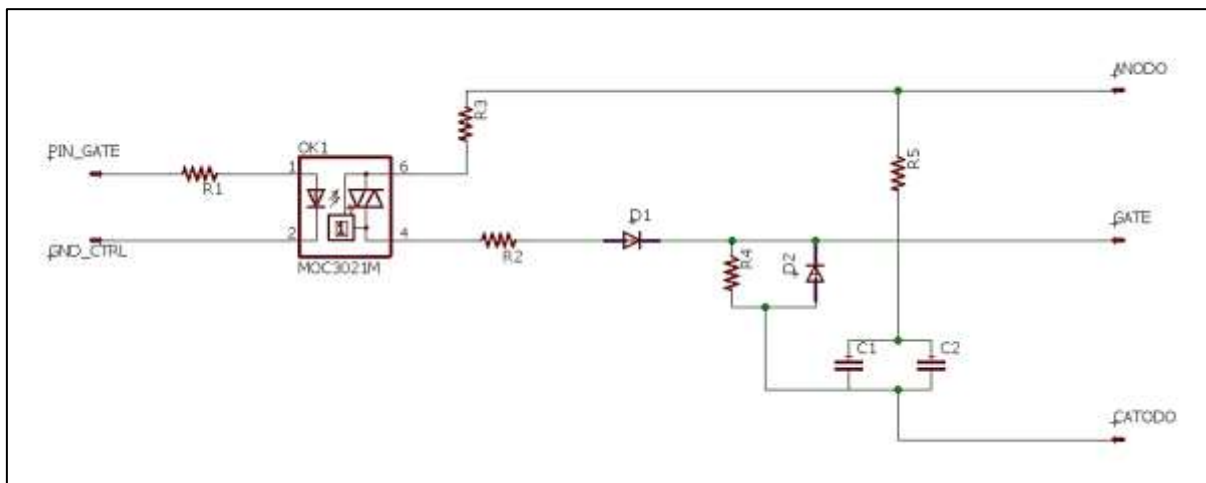
Na figura 31 nota-se que a largura do “pulso” gerado pelo bloco ZCD é de aproximadamente 500 μ s, este tempo é levado em conta para ajuste da referência do grau zero.

4.4.1.3 Circuito de Disparo do Tiristor (SCR_DRIVE)

Este bloco, cujo circuito encontra-se na figura 32 sendo que os componentes estão especificados no quadro 5, tem duas finalidades: isolar o sinal de gatilho vindo do Arduino para o tiristor e evitar o disparo acidental do tiristor por variação abrupta de tensão. A isolamento entre circuito de controle e circuito de potência é feita pelo opto acoplador, a segunda função deste bloco é

exercida pelo circuito *snubber* composto por: C1, C2 e R5, este por sua vez foi utilizado de acordo com o circuito original do MC183 (ver ANEXO A).

Figura 32 – Bloco SCR_DRIVE.



Quadro 5 – Componentes: SCR_DRIVE.

Código	Componente	Características	Observação
R1	Resistor	390 Ω , 1/4 W	Disponível no LEPAC
R2	Resistor	5,6 k Ω , 1/4 W	Disponível no LEPAC
R3 e R4	Resistor	82 Ω , 1/4 W	Disponível no LEPAC
R5	Resistor	10 Ω , 5 W	Comprado, comércio local
C1 e C2	Capacitor	47 nF, 630 V	Comprado, comércio local
D1 e D2	Diodo	1N4004, 1 A, 400 V	Disponível no LEPAC
OK1	Opto acoplador	MOC3021	Comprado, comércio local

4.4.1.4 Sensor de Corrente

O sensor de corrente utilizado possui uma relação de saída de 66 mV/A. O conversor A/D do Arduino é de 1024 bits e a tensão de referência é de 5 V, logo, o Arduino têm uma resolução de 4,88 mV. Desta forma, o sinal de corrente será discretizado pelo Arduino e sua resolução será de aproximadamente 74 mA.

4.4.2 Resultados Iniciais

A simples substituição dos circuitos supracitados já trouxeram grandes vantagens: o código no Arduino pode ser mudado e melhorado, o que torna o projeto mais flexível; o sensor de corrente,

utilizado no lugar de resistores em série com a carga, faz com que as perdas sejam diminuídas; o *driver* de disparo do tiristor usa um opto acoplador no lugar do transformador de pulso, reduzindo peso e perdas.

Mesmo no início o projeto já se mostra interessante, pois traz uma tela *LCD* para mostrar a leitura de corrente e o ângulo de disparo aplicado à carga.

Os testes e os programas iniciais foram realizados tendo uma lâmpada incandescente como carga, isto para proteger o motor de eventuais falhas no programa. A lâmpada se mostrou uma boa carga de teste, pois era possível perceber variações na tensão conforme a variação de sua luminosidade.

Após o teste inicial com a lâmpada, usou-se um multímetro para conferir e ajustar o programa para que a tensão de saída coincidissem com o ângulo de disparo do tiristor.

4.5 Influência da Carga na Tensão de Saída do Protótipo Inicial

O primeiro protótipo era capaz de substituir com eficiência o MC183, porém o Arduino ainda possuía muitos recursos (memória e portas) não utilizados. Outro incentivo à melhora do primeiro protótipo era de se utilizar o sensor de corrente para fechar a malha do sistema trazendo assim um resultado mais satisfatório. O MC183 não trazia um controle preciso da velocidade, fazia apenas uma compensação, aumentando a tensão diante um aumento da corrente.

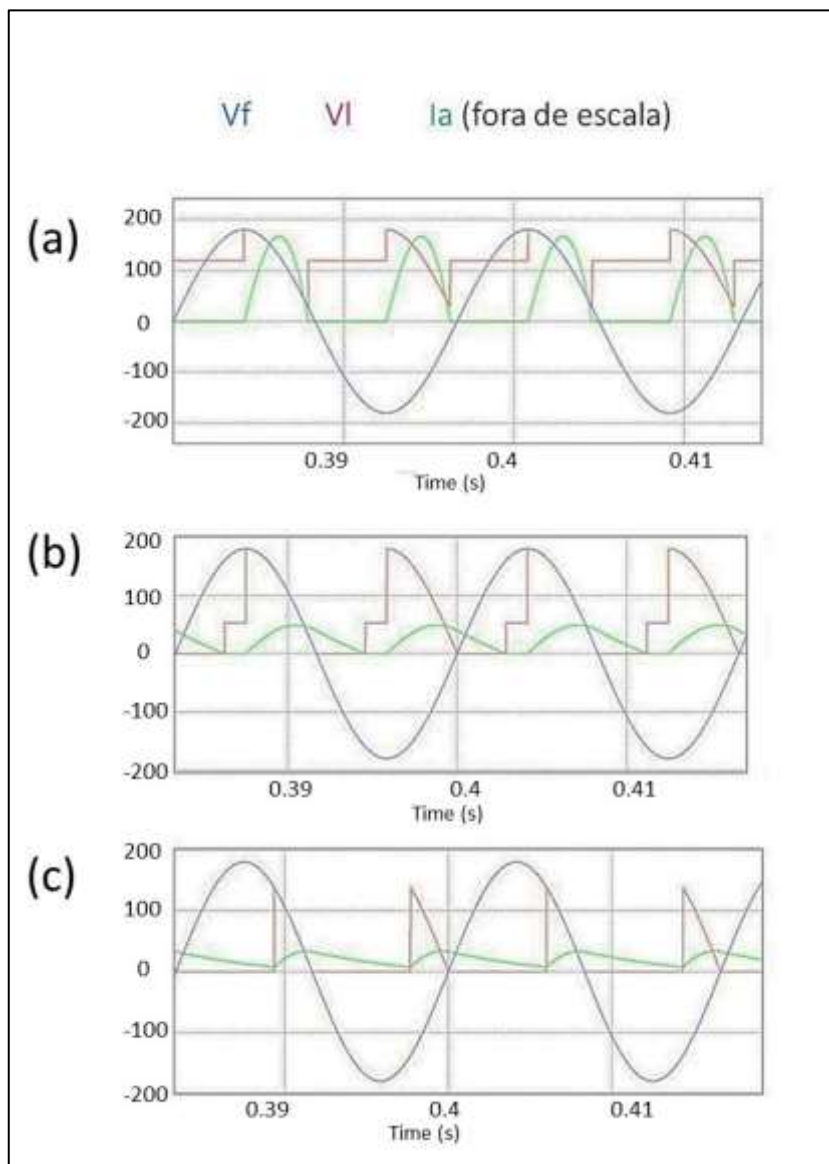
Ao se tentar fazer um controle utilizando apenas o sensor de corrente encontrou-se um problema: apesar de se ter uma boa leitura da corrente (tópico 4.4.1.4), a tensão aplicada ao motor não é uma variável fácil de se obter.

O sistema montado no protótipo inicial pode ser modelado como um motor CC, alimentado por uma ponte de tiristores monofásica de onda completa e de excitação independente e constante. O motor, por sua vez, pode ser modelado pelo circuito série formado por uma fonte de tensão (E_a), resistência (R_a) e uma indutância (L_a) (ver figura 15); os valores R_a e L_a foram obtidos por meio de ensaios (tópico 5.1).

Para o modelo apresentado pode-se ter três situações de funcionamento: ângulo de extinção da corrente (β) menor ou igual a 180° , β maior que 180° ou modo contínuo (quando não há extinção

da corrente); a figura 33 apresenta as formas de onda da tensão e corrente para as situações citadas, onde: na figura 33 (a) apresenta-se a situação em que β é menor que 180° , na figura 33 (b) em que β é maior que 180° e na figura 33 (c) operação em modo contínuo.

Figura 33 – Tensão e Corrente para Situações de Operação



4.5.1 Tensão Média na Carga

Cada situação de funcionamento apresenta formas de onda de tensão com características distintas, apresentando assim, diferentes fórmulas para obtenção da tensão média.

De acordo com ARAGÃO FILHO (2012, pp.42-43) a tensão média em uma carga RLE (V_{cm}) pode ser interpretada como a composição de duas partes: o efeito médio da fonte de tensão CC (neste caso a tensão de armadura do motor) e o efeito médio da tensão da rede. Assim:

$$V_{cm} = V_{cm1} + V_{cm2} \quad (7)$$

A componente V_{cm1} representa o efeito médio da rede e, apresenta o formato de um trecho senoidal. Seguindo o que é exposto por ARAGÃO FILHO (2012, pp.43) e, levando em consideração que o ciclo de V_{cm} é de π radianos, V_{cm1} é dado pela equação:

$$V_{cm1} = \frac{1}{\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{2} \cdot V_e \cdot \text{sen}(\omega t) d(\omega t) \approx 0,45 \cdot V_e \cdot (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (8)$$

Onde: V_e é o valor eficaz da fonte senoidal, θ_1 e θ_2 representam respectivamente o início e o fim do trecho senoidal de V_{cm1} .

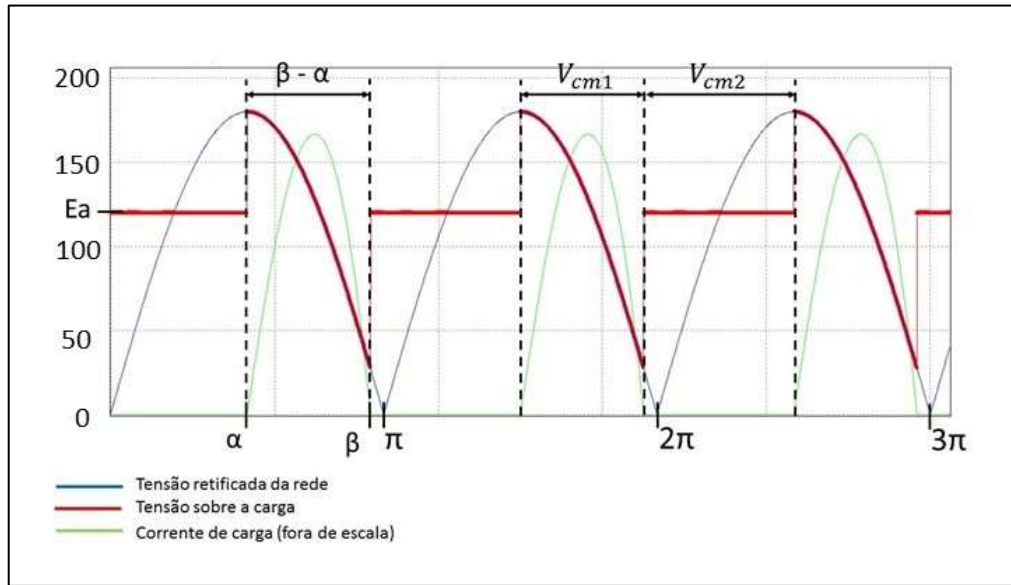
Já a componente V_{cm2} representa o efeito médio devido à tensão de armadura do motor (E_a) e, é facilmente obtida observando-se o comportamento da curva de tensão média. A seguir, estão demonstradas as expressões que fornecem os valores das componentes V_{cm1} e V_{cm2} de cada situação.

4.5.1.1 Ângulo de extinção da corrente (β) menor ou igual a 180°

Na figura 34, observa-se que a componente senoidal tem início em α e se encerra em β ; a outra componente assume apenas o valor de E_a . Assim, os valores médios das componentes são:

$$V_{cm1} = 0,45 \cdot V_e \cdot (\cos \alpha - \cos \beta) \quad (9)$$

$$V_{cm2} = E_a \left(\frac{\pi + \alpha - \beta}{\pi} \right) = E_a \left(\frac{180^\circ + \alpha - \beta}{180^\circ} \right) \quad (10)$$

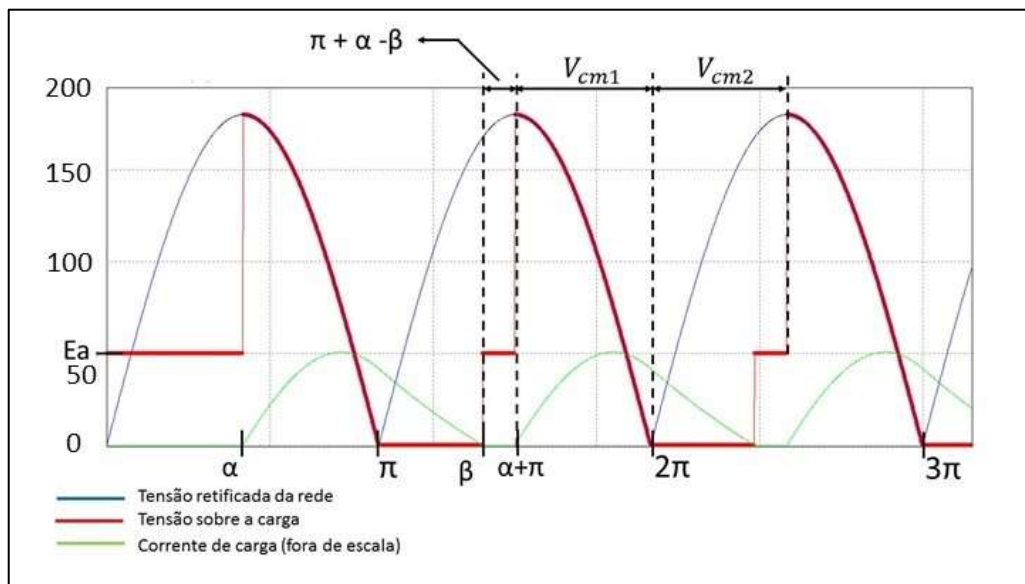
Figura 34 – Tensão Média: β menor ou igual a 180° .

4.5.1.2 Ângulo de extinção da corrente (β) maior que 180°

Para o caso de β maior que 180° , figura 35, percebe-se que a componente senoidal se encerra em π (180°) e não mais em β ; e a outra componente apresenta dois valores: zero e E_a . Assim, os valores de V_{cm1} e V_{cm2} são:

$$V_{cm1} = 0,45 \cdot V_e \cdot (\cos \alpha - \cos \pi) = 0,45 \cdot V_e \cdot (\cos \alpha + 1) \quad (11)$$

$$V_{cm2} = E_a \left(\frac{\pi + \alpha - \beta}{\pi} \right) = E_a \left(\frac{180^\circ + \alpha - \beta}{180^\circ} \right) \quad (12)$$

Figura 35 – Tensão Média: β maior que 180° .

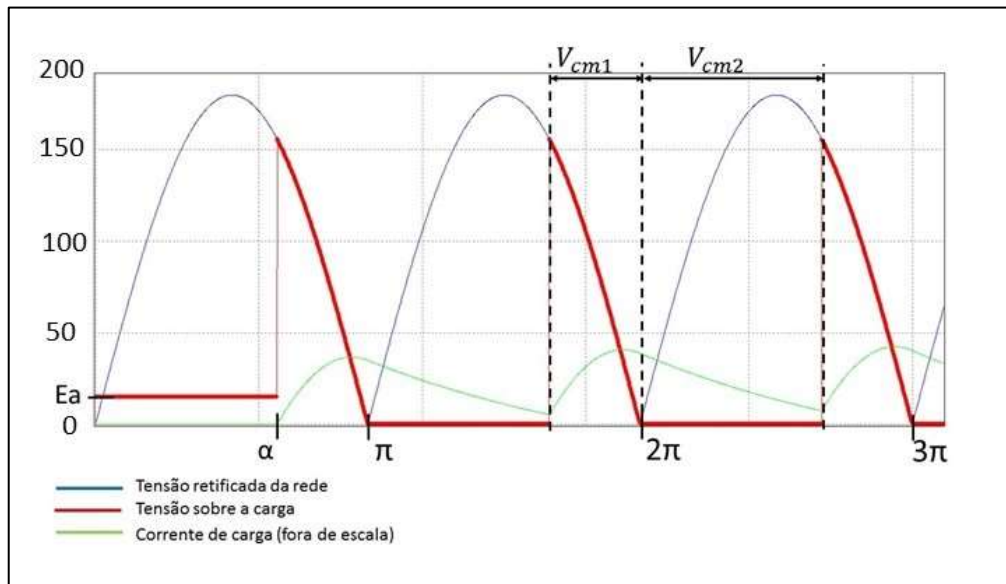
4.5.1.3 Modo contínuo

Em modo contínuo não há interrupção da corrente de carga, logo, não há β . A situação é mostrada na figura 36. Percebe-se que semelhantemente ao caso anterior a componente que surge por efeito da tensão da rede tem início no disparo (α) e se encerra a cada π radianos; já a outra componente é nula. Assim:

$$V_{cm1} = 0,45 \cdot V_e \cdot (\cos \alpha + 1) \quad (13)$$

$$V_{cm2} = 0 \quad (14)$$

Figura 36 – Tensão Média: modo contínuo.



4.5.1.4 Obtenção de β

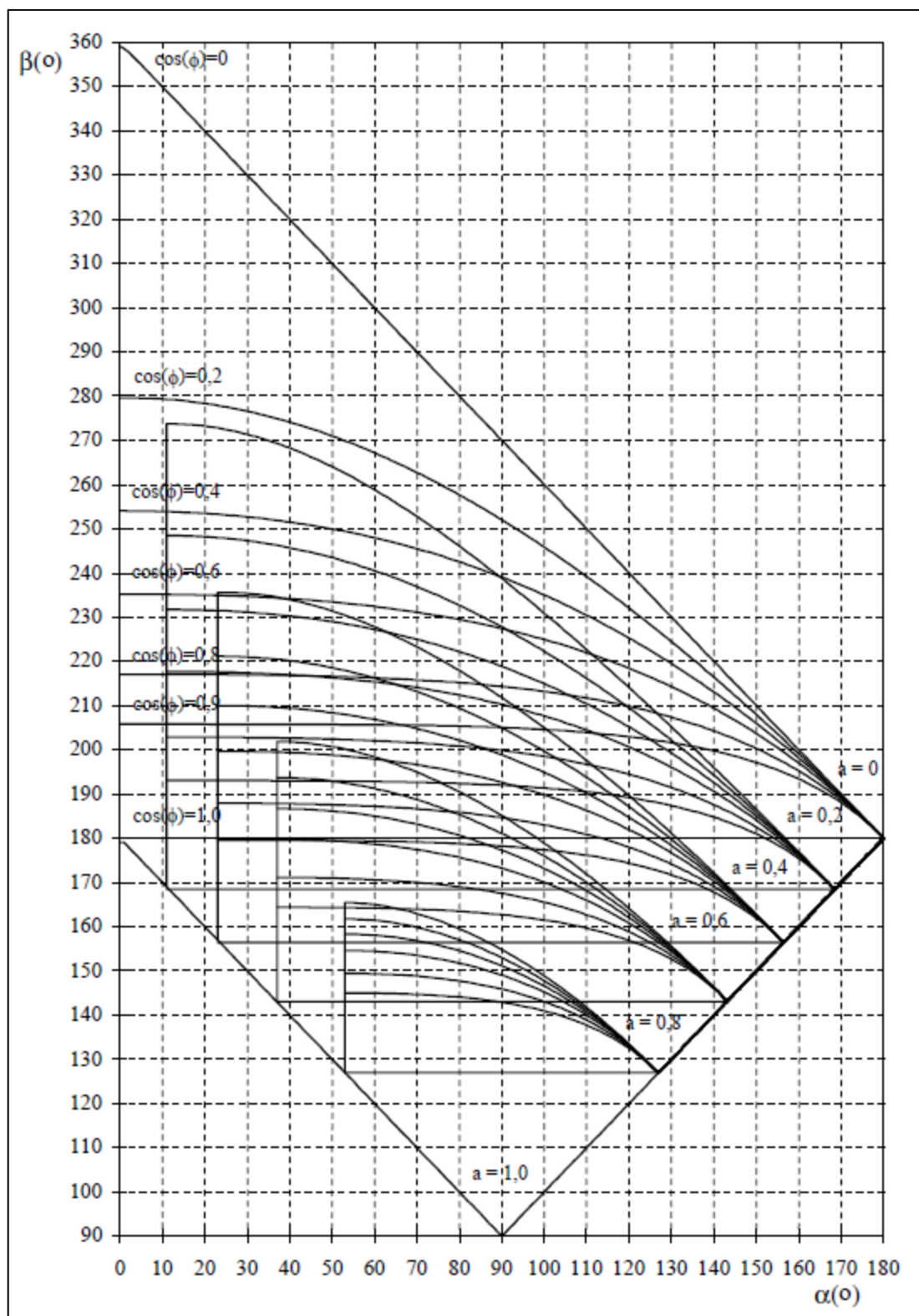
Após as demonstrações anteriores, fica evidente que a tensão aplicada ao motor não depende apenas do ângulo de disparo (α), ela varia também com o ângulo de extinção da corrente (β) e tensão de armadura (E_a).

Através do Ábaco de Puschlowski, figura 37, é possível encontrar o β de um circuito, mas para tal é necessário conhecer o $\cos(\Phi)$ do circuito e a relação $a = E_a/V_e$.

O valor do $\cos(\Phi)$ é fixo e trivial de ser calculado; porém, a relação E_a/V_e pode variar mesmo para um α fixo (E_a varia com velocidade do motor, que varia com a carga em seu eixo). O que torna complexa a tarefa de obter β ; e ainda que E_a fosse constante, implementar um algoritmo

(no Arduino) capaz de encontrar β por meio do Ábaco de Puschlowski seria demasiado complexo.

Figura 37 – Ábaco de Puschlowski.



Fonte: BARBI, 2006.

4.6 Acionamento PWM

A ideia de se fazer um controle preciso de velocidade com o primeiro protótipo tornou-se mais distante, devido às complexidades citadas anteriormente. Outra solução prevista seria a inserção de um sensor de tensão instalado nos terminais do motor ou um sensor de velocidade.

Apesar do interesse de se fazer um controle mais preciso, a ideia de inserir um sensor de velocidade ou de tensão foi descartada, pois traria custos elevados. Uma outra ideia seria utilizar um sinal PWM para alimentar o motor, dessa forma a tensão de alimentação do motor não dependeria da carga e seria facilmente obtida pela equação 6, tópico 2.3.

Assim, foi desenvolvido um segundo protótipo com intuito de se testar o acionamento PWM, logo, não houve a preocupação de criar uma interface elaborada, visto que o único a operar foi o próprio desenvolvedor. Os comandos eram enviados para o controlador de um computador via porta USB. O acionamento é feito por um sinal PWM de 1kHz aplicado a uma meia ponte H, esta é composta de um circuito isolador e dois MOSFETs.

O protótipo é ligado ou desligado por meio da chave alavanca. Ao ser ligado, a tensão inicial é zero; o valor da tensão é ajustado por meio de comandos enviados à porta serial do Arduino, os comandos definidos estão listados no quadro 6.

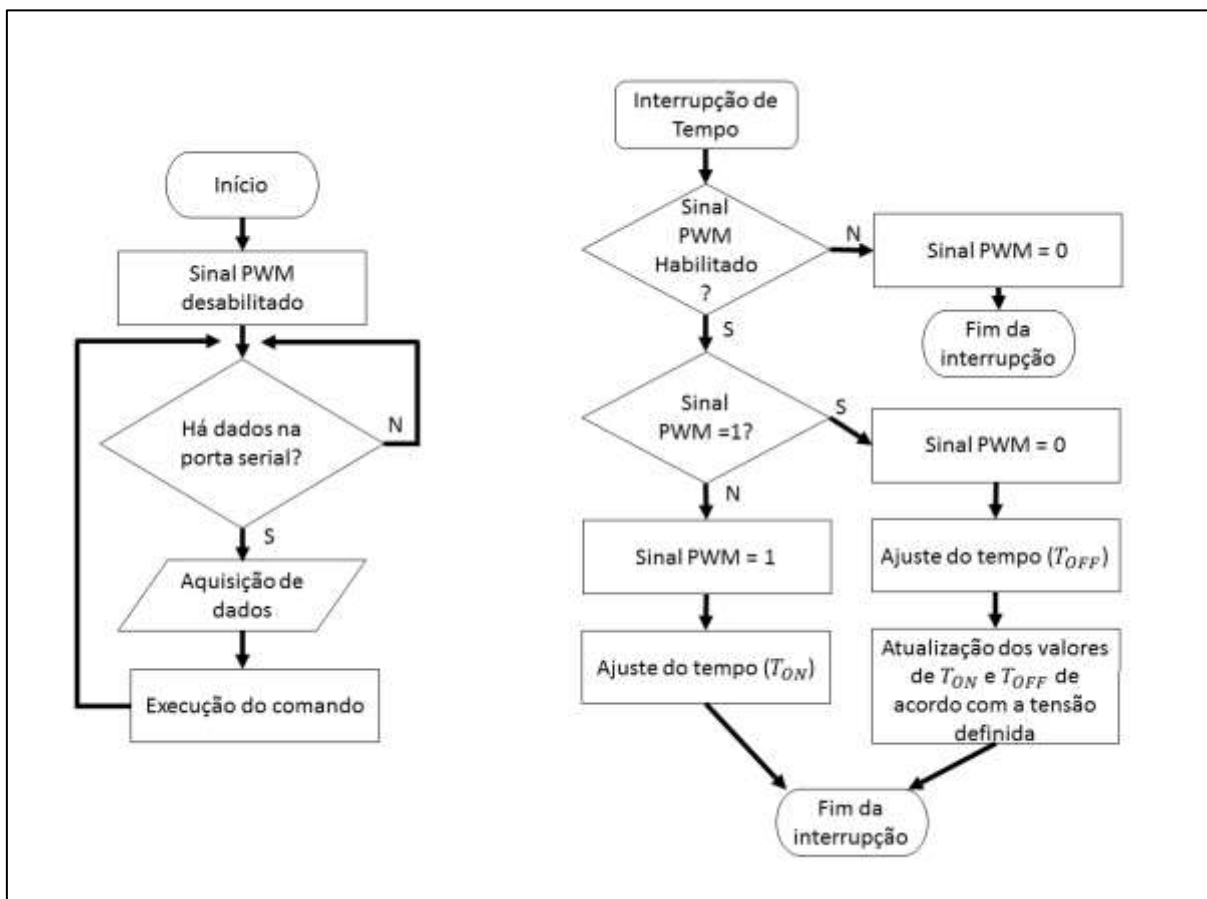
Quadro 6 – Segundo Protótipo: Lista de Comandos.

Comando	Ação
'S' ou 's'	Habilita ou desabilita sinal PWM
'Q'	Incrementa 5 V à tensão de referência
'q'	Decrementa 5 V da tensão de referência
'A'	Incrementa 20 V à tensão de referência
'a'	Decrementa 20 V da tensão de referência
'Z'	Incrementa 50 V à tensão de referência
'z'	Decrementa 50 V da tensão de referência

O programa deste controlador roda uma rotina principal que recebe e executa os comandos do usuário, e em segundo plano roda a interrupção de tempo que gera o sinal PWM. Apesar do

Arduino possuir uma função PWM pronta (biblioteca), optou-se por implementar uma função própria, pois dessa forma pode-se fazer processamento de informações dentro da interrupção. O funcionamento é descrito pelo fluxograma apresentado na figura 38.

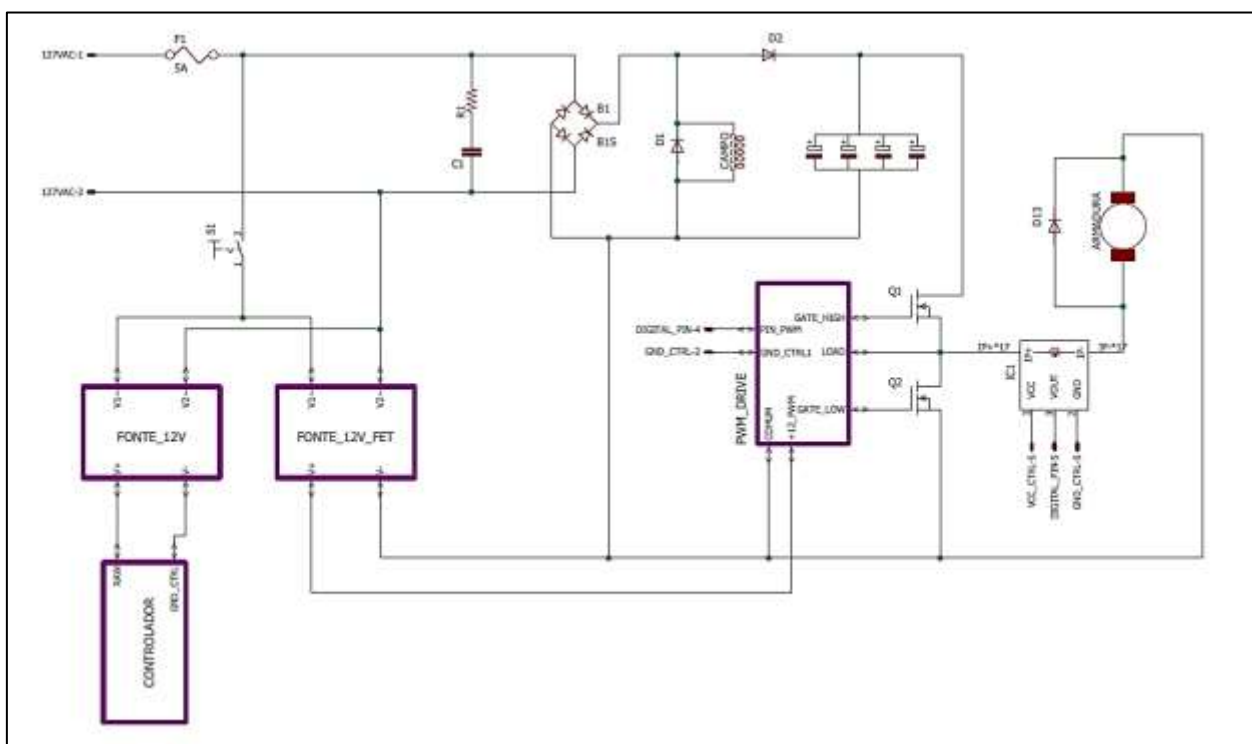
Figura 38 – Segundo Protótipo: Rotina Principal e Interrupção.



4.6.1 Circuito do Segundo Protótipo

O circuito está representado na figura 39: a fonte CC que alimenta a meia ponte H é a tensão da rede retificada por uma ponte de diodos, em paralelo com um banco de capacitores. Estes capacitores foram reutilizados de fontes de computadores, a capacitância total do banco é de 3,34 mF. A tensão média da fonte é de 179,6 V. O circuito de disparo necessitou de uma fonte de 12 V que foi montada a partir de duas fontes chaveadas em série, reutilizadas de outros aparelhos, a corrente máxima das fontes é de 300 mA. Uma descrição mais detalhada dos componentes encontra-se no quadro 7.

Figura 39 – Circuito: Segundo Protótipo.



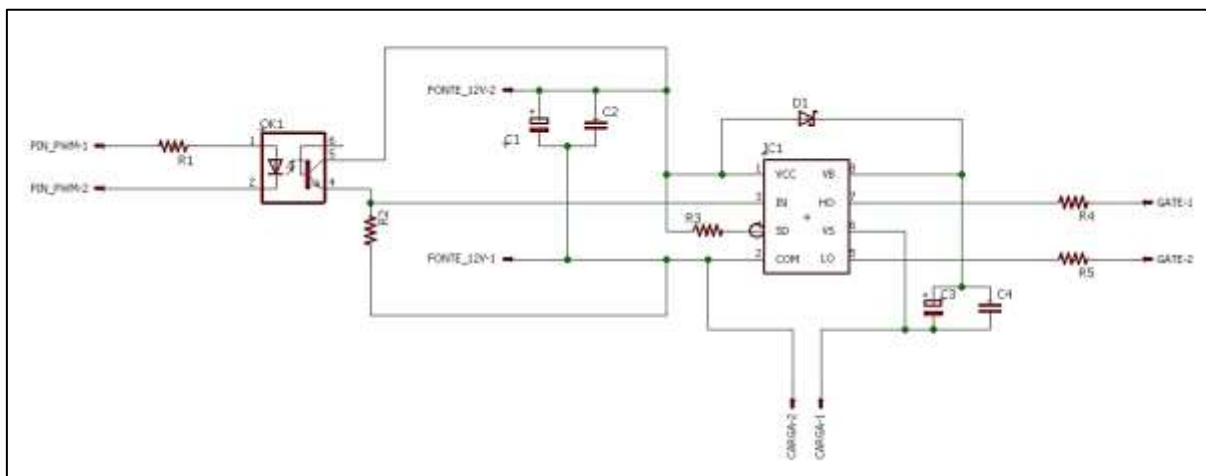
Quadro 7 – Componentes: Segundo Protótipo.

Código	Componente	Características	Observação
R1	Resistor	4,7 Ω , 5 W	Comprado, comércio local
C1	Capacitor	2,2 μ F, 250 V	Comprado, comércio local
F1	Fusível	5 A	Disponível no LEPAC
B1	Ponte retificadora	TU808, 8 A, 600 V	Comprado, comércio local
D1	Diodo	1N4004, 1 A, 400 V	Disponível no LEPAC
D2	Diodo	XA1106, 10 A, 600 V	Comprado, comércio local
IC1	Sensor de Corrente	ACS712 -30 A a +30 A	Comprado, São Paulo
Q1 e Q2	MOSFET	IRFP250	Comprado, São Paulo
D13	Diodo	XA1106, 10 A, 600 V	Comprado, comércio local

4.6.1.1 Circuito de Disparo (PWM_DRIVE)

Neste circuito, figura 40, lançou-se mão de um opto acoplador a fim de isolar o sinal PWM do Arduino do circuito de potência, fez-se uso também do CI IR2104 que é um drive para meia ponte H, os outros componentes seguiram a orientações do fabricante do CI e estão listados no quadro 8.

Figura 40 – Bloco: PWM_DRIVE.



Quadro 8 – Componentes: PWM_DRIVE.

Código	Componente	Características	Observação
R1	Resistor	470 Ω , 1/4 W	Disponível no LEPAC
R2	Resistor	1 k Ω , 1/4 W	Disponível no LEPAC
R3	Resistor	10 k Ω , 1/4 W	Disponível no LEPAC
R4 e R5	Resistor	390 Ω , 1/4 W	Disponível no LEPAC
OK1	Opto acoplador	4N25	Comprado, comércio local
C1 e C3	Capacitor	10 μ F, 25 V	Disponível no LEPAC
C2	Capacitor	0,1 μ F, 500 V	Disponível no LEPAC
C4	Capacitor	47 pF, 500 V	Disponível no LEPAC
D1	Diodo ultrarrápido	1 A, 600 V	Comprado, comércio local
K1	CI	IR2104	Comprado, São Paulo

4.6.2 Resultados

Como antes, foi usada uma lâmpada incandescente como carga, após testes e ajustes no programa conectou-se o motor. Verificou-se, com o auxílio de um multímetro, que a tensão de saída do controlador, para um mesmo ajuste, foi a mesma para a lâmpada e para o motor, fato que não acontecia para protótipo inicial.

4.7 Estimador de Velocidade

Com resultado positivo do acionamento por PWM, a possibilidade de fechar a malha do sistema se tornou real. O ideal seria realimentar o sistema com o sinal da medição da variável a ser controlada, neste caso a velocidade do eixo do motor. Porém, o protótipo possui apenas um sensor de corrente; o sinal que realimenta o sistema é uma aproximação do sinal de velocidade, calculado a partir da medição da corrente e do valor de tensão aplicado ao motor (que é conhecido). Do circuito do modelo do motor CC (figura 14) obtêm-se a equação 15 e dela chega-se à equação 16 discretizando a anterior.

$$\omega_m = \frac{E_a}{K_e} = \frac{1}{K_e} \cdot \left[V - \left(R_a \cdot I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \right) \right] \quad (15)$$

$$\omega_m[k] = \frac{1}{K_e} \cdot \left\{ V[k] - \left(R_a \cdot I_a[k] + L_a \frac{I_a[k] - I_a[k-1]}{T_s} \right) \right\} \quad (16)$$

Onde T_s é o período de amostragem.

Os parâmetros: K_e , R_a , e L_a foram obtidos por meio de ensaios demonstrados no capítulo 5. A equação 16 pode ser facilmente escrita em código e sua utilização será mais eficaz se implementada dentro da interrupção de tempo, pois assim será executada a uma frequência fixa definida (1 kHz).

4.8 Protótipo Final

Com o intuito de utilizar o resultado obtido nos primeiros protótipos, teve-se a ideia de usar relés para que se pudesse optar entre o acionamento por controle de fase ou PWM. Apesar do circuito ter-se tornado maior, sua compreensão não fica comprometida, visto que o circuito global é subdividido em blocos de circuitos com funções específicas; o fato do controlador poder utilizar os dois métodos de acionamentos aumenta ainda mais o potencial didático do mesmo.

Durante os testes de funcionamento iniciais do protótipo, tendo uma lâmpada como carga, o Arduino queimou; uma tentativa de se fazer um adaptador para outro microcontrolador não foi bem-sucedida, danificando o outro microcontrolador disponível. Como a montagem do protótipo foi realizada com recursos escassos, foram utilizados materiais reaproveitados ou

similares aos originais, e as placas de circuito impresso e conexões foram feitas de forma artesanal. Tais situações podem ter gerado problemas de mau contato ou mau funcionamento de algum bloco. Para não estender a conclusão deste trabalho, optou-se por finalizá-lo com os resultados obtidos até o momento.

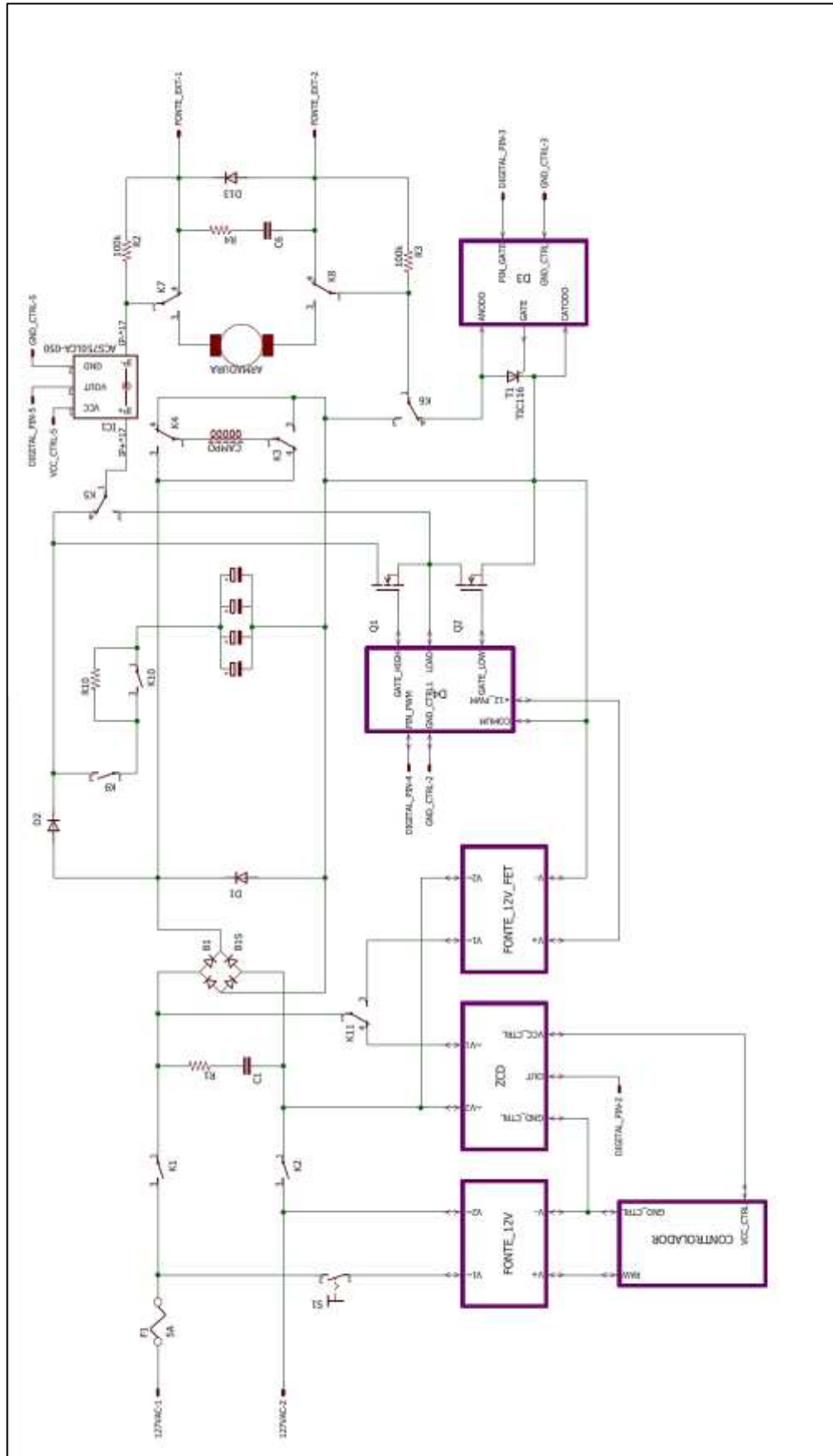
4.8.1 Circuito do Protótipo Final

Até o momento do problema haviam sido implementadas apenas as funcionalidades de fonte externa (PWM e controle por ângulo de disparo). O que se deve ressaltar é que a implementação das outras funcionalidades depende apenas de inclusão no código, pois o circuito montado, apresentado na figura 41, suporta todas as funções planejadas: operação como controlador ou fonte externa, acionamento por controle de ângulo de disparo ou sinal PWM, escolha do sentido de giro do motor, controle em malha aberta e fechada (somente para sinal PWM). No quadro 9 estão listados os componentes do circuito da figura 41.

Quadro 9 – Componentes: Protótipo Final.

Código	Componente	Características	Observação
R1	Resistor	4,7 Ω , 5 W	Comprado, comércio local
C1	Capacitor	2,2 μ F, 250 V	Comprado, comércio local
F1	Fusível	5 A	Disponível no LEPAC
B1	Ponte retificadora	TU808, 8 A, 600 V	Comprado, comércio local
D1	Diodo	1N4004, 1 A, 400 V	Disponível no LEPAC
D2	Diodo	XA1106, 10 A, 600 V	Comprado, comércio local
IC1	Sensor de Corrente	ACS712 -30 A a +30 A	Comprado, São Paulo
Q1 e Q2	MOSFET	IRFP250	Comprado, São Paulo
D13	Diodo	XA1106, 10 A, 600 V	Comprado, comércio local
T1	Tiristor	TIC116	Comprado, comércio local
R4	Resistor	10 Ω , 5 W	Comprado, comércio local
C6	Capacitor	94 nF (2x 47 nF em paralelo), 630 V	Comprado, comércio local
-	Capacitores (Banco)	330 μ F ou 470 μ F, 200 V	Reaproveitado (Fontes de Computadores)
K1 a K11	Relés	2 posições, 4 ou 5 terminais, 12 V	Reaproveitado (Fontes de Computadores e Micro-ondas)

Figura 41 – Circuito: Protótipo Final.



Foram utilizados no total 11 relés. K1 e K2 funcionam como chaves do circuito de potência, eles ligam e desligam o sistema de potência e são utilizados para desenergizá-lo em caso de sobrecarga ou curto-circuito.

É importante destacar que K1 e K2 só serão acionados após o chaveamento dos relés responsáveis pela seleção do tipo de acionamento, sentido de giro do motor (que se dá mudança da polaridade do circuito de campo), carga a ser alimentada (motor ou fonte externa). Dessa forma o circuito de potência só será energizado quando as devidas conexões já estiverem sido estabelecidas.

Os demais relés são utilizados para efetuar as interligações de acordo com as seleções de operação. K3 e K4 selecionam o sentido de giro do motor, através do sentido da corrente no circuito de campo. K5 e K6 fazem as ligações de acordo com o tipo do sinal de acionamento. K7 e K8 são responsáveis por direcionar a saída do sinal para o motor ou para os bornes de fonte externa.

Foram utilizados dois relés para se efetuar a ligação do banco capacitivo. K9 é responsável por ligar o banco de capacitores quando selecionado o acionamento por PWM. K10 foi inserido para fazer um *by-pass* no resistor limitador (R10), este resistor impede que a corrente de carga do capacitor seja excessiva. K11 faz a seleção entre o uso do drive do MOSFET ou ZCD.

4.8.2 Operação do Protótipo

A primeira parte da operação do protótipo é a escolha por parte do usuário das opções que lhe são dadas. As opções são disponibilizadas na tela *LCD* e a seleção é feita por meio dos botões multifuncionais como apresentado no tópico 4.2. O processo de seleção segue o caminho apresentado no fluxograma da figura 42, e as figuras de 43 a 46 representam as telas apresentadas ao usuário e identificadas no fluxograma supracitado.

Figura 42 – Definição do Usuário.

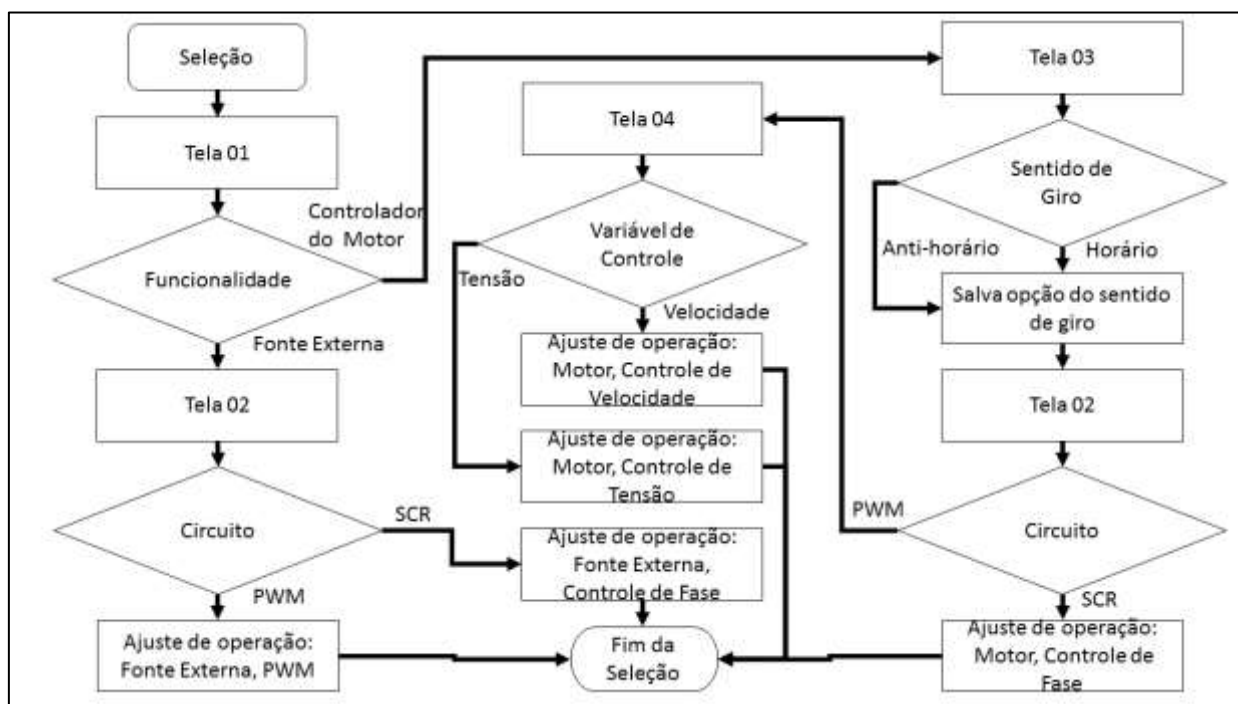


Figura 43 – Tela01.



Figura 44 – Tela02.



Figura 45 – Tela03.



Figura 46 – Tela04.



Após as seleções do usuário, o protótipo estará pronto para trabalhar em um dos cinco modos de operação: fonte externa com sinal PWM, fonte externa com controle de fase, controlador do motor por ângulo de disparo, controle da velocidade do motor com sinal PWM em MF, controlador do motor com sinal PWM em MA (ajuste de tensão). Exceto para o controle em MF, o valor da variável alterada pelo usuário aumenta ou diminui em forma de rampa. Cada modo de operação apresentará na tela uma identificação da operação e informações relativas a ela, tal qual apresentado nas figuras 47 a 51.

4.8.2.1 Fonte Externa com Sinal PWM

Quando selecionada a funcionalidade de fonte externa serão alimentados somente os terminais disponíveis na parte frontal do protótipo, estando os circuitos de campo e de armadura do motor em aberto. O sinal disponibilizado será do tipo PWM, e o ajuste disponível ao usuário será o valor da tensão de saída (15-150 V).

Figura 47 – Apresentação dos Dados: Fonte Ext., PWM.



4.8.2.2 Fonte Externa com Controle de Fase

Neste caso o funcionamento se dá como no anterior; diferenciando-se somente no tipo do sinal que será, como o próprio nome diz, por controle de fase. Ao usuário estará disponível a opção de alterar o valor de α entre 50 e 170°.

Figura 48 – Apresentação dos Dados: Fonte Ext., Controle de Fase.



4.8.2.3 Controlador do Motor por Ângulo de Disparo

Quando a funcionalidade “controlador” for escolhida o protótipo alimentará o motor. O circuito de campo sempre será alimentado com o sinal retificado da rede (127 V), por meio de uma ponte de diodos de onda completa; isto para qualquer que seja o tipo de acionamento ou controle. A alimentação da armadura poderá ser por controle de ângulo de disparo ou PWM. Neste modo, será por controle de fase.

Figura 49 – Apresentação dos Dados: Controle do Motor, Controle de Fase.



4.8.2.4 Controle da Velocidade do Motor

Nesta modalidade o sinal de alimentação do motor (armadura) será do tipo PWM, pois só assim será possível ter o valor de tensão nos terminais do motor (ver tópico 4.6). Ao usuário caberá definir o valor de referência de velocidade do eixo do motor, e o sistema estará em MF tendo um controlador PID implementado no código e realimentação feita pela aproximação de velocidade (tópico 4.7).

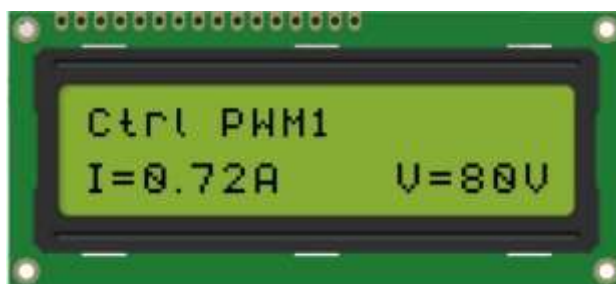
Figura 50 – Apresentação dos Dados: Controle do Motor em MA, PWM.



4.8.2.5 Controlador do Motor em MA

Neste modo de operação o motor será energizado com um sinal PWM, ao ser energizado o motor será alimentado com uma rampa suave, após isto, o usuário estará apto a ajustar o valor de tensão a ser aplicado ao motor.

Figura 51 – Apresentação dos Dados: Controle do Motor em MF.



4.8.3 Funcionamento

O Funcionamento inicia com o usuário fazendo a seleção de como irá utilizar o protótipo, essa seleção resultará em uma das cinco configurações apresentadas, sendo que cada uma contará com sua própria rotina de operação e interrupções. Logo, o fluxograma apresentado na figura 52 é comum a todas as configurações.

Figura 52 – Rotina Principal.



A seleção está descrita tópicos 4.8.2; a configuração consiste na interligação feita pelos relés e na escolha feita pelo programa das rotinas de operação e de interrupções a serem utilizadas.

As operações com controle de fase possuem rotinas principais muito parecidas, representadas pelo fluxograma da figura 53, a diferença é que para o motor há o procedimento de partida em rampa, enquanto para fonte externa a saída inicia com $\alpha = 138^\circ$ e sua alteração pode ser feita tão logo selecionado este modo de operação.

Na figura 54, estão representados os fluxogramas das interrupções: de tempo e externa, que são comuns às operações com controle de α . A interrupção externa está ligada ao ZCD e é a referência de ângulo zero, a interrupção de tempo se encarrega dos tempos relativos a α e ao pulso de disparo.

Figura 53 – Fluxogramas das Operações com Controle de Fase.

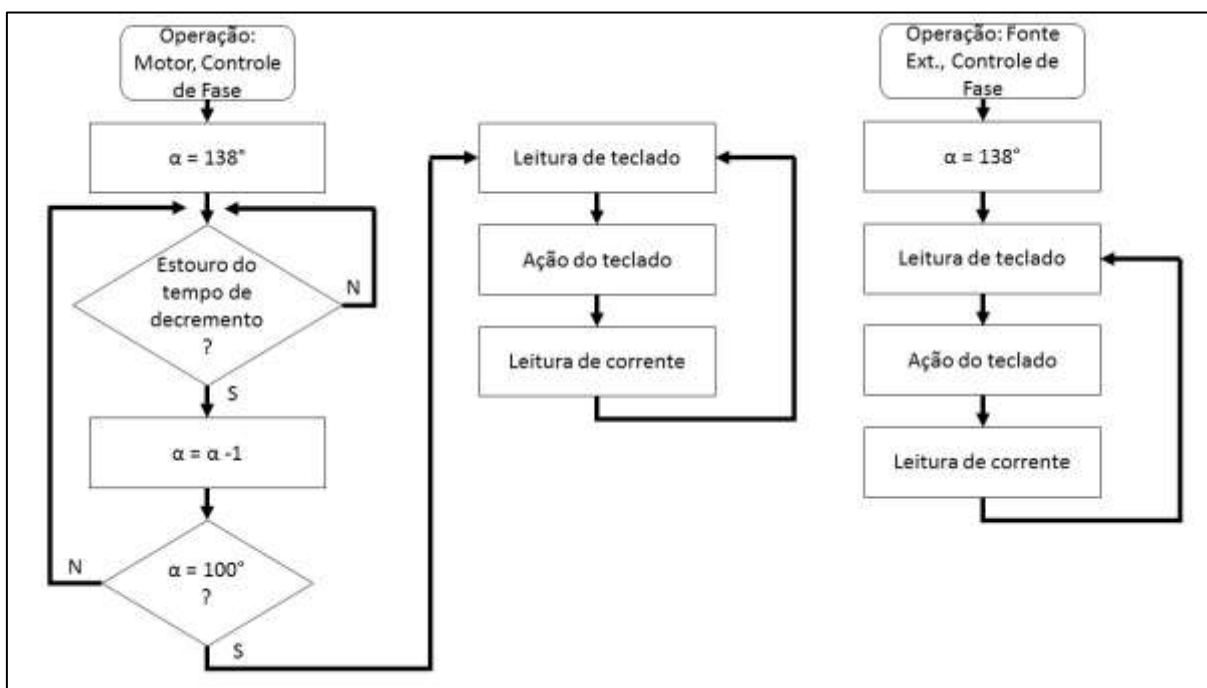
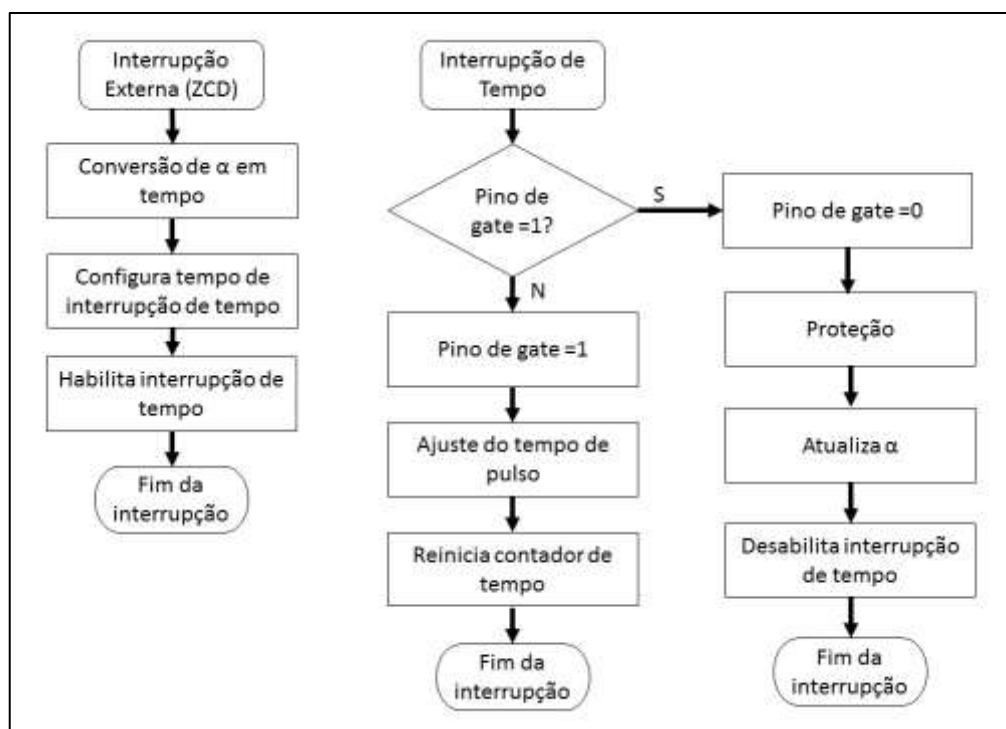


Figura 54 – Interrupções das Operações com Controle de Fase.



As operações com sinal PWM em MA e fonte externa têm o funcionamento bem semelhante, a única diferença está na rotina principal, cujo fluxograma pode ser visto na figura 55. Para o controlador do motor, antes de se habilitar a variação de tensão por parte do usuário, ocorre o

processo de partida em rampa. A rotina de interrupção, figura 56, é a mesma para os 2 casos, ela é responsável por gerar o sinal PWM, e dentro dela faz-se o processamento de informações como por exemplo a atualização dos tempos T_{on} e T_{off} .

Figura 55 – Operações PWM: Fonte Externa e Motor em MA.

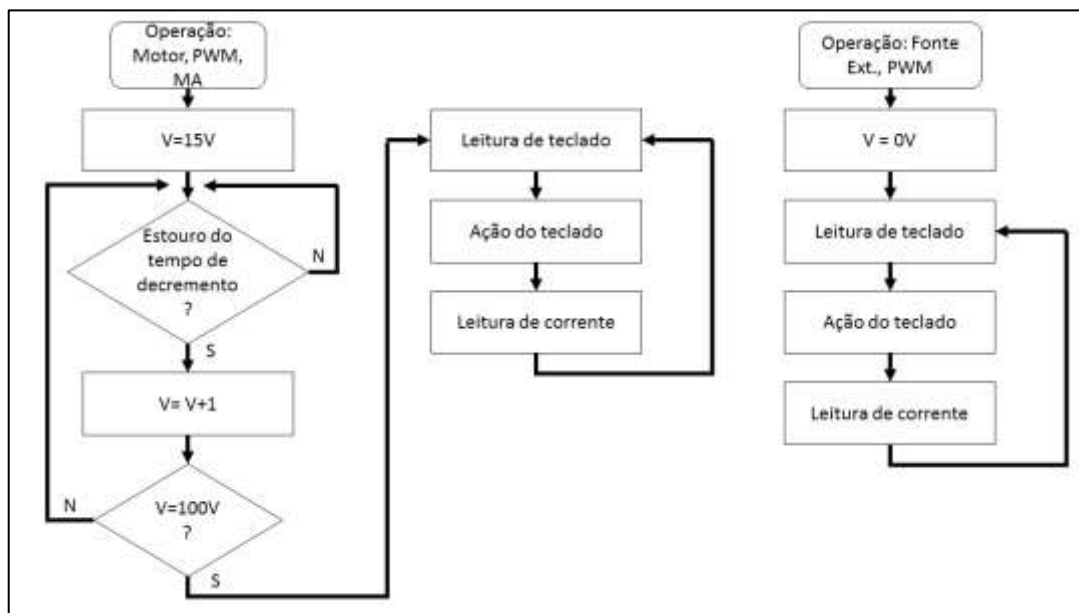
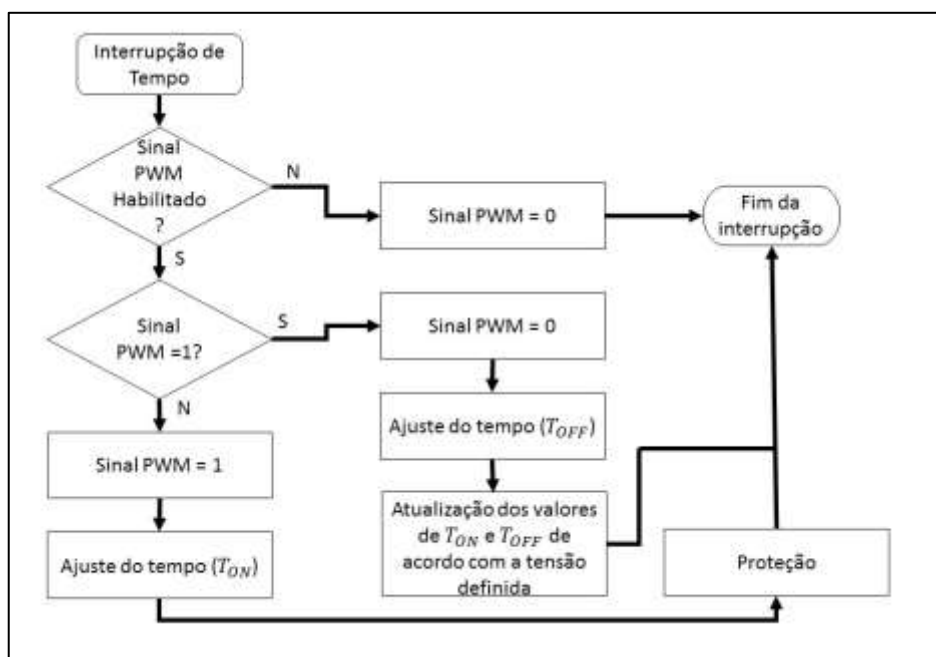


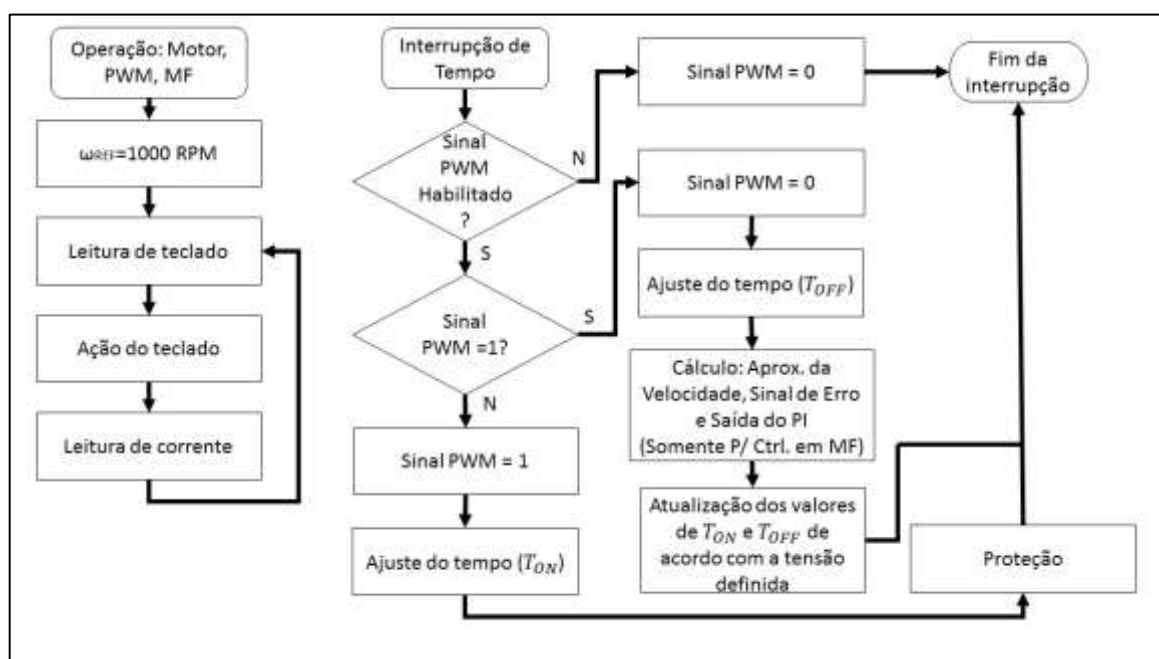
Figura 56 – Interrupção das Operações PWM: Fonte Externa e Motor em MA.



A operação de controle de velocidade, inicia com uma referência de 1000 RPM, porém, logo que escolhida já permite ao usuário a alteração de seu valor. A rotina em primeiro plano lida

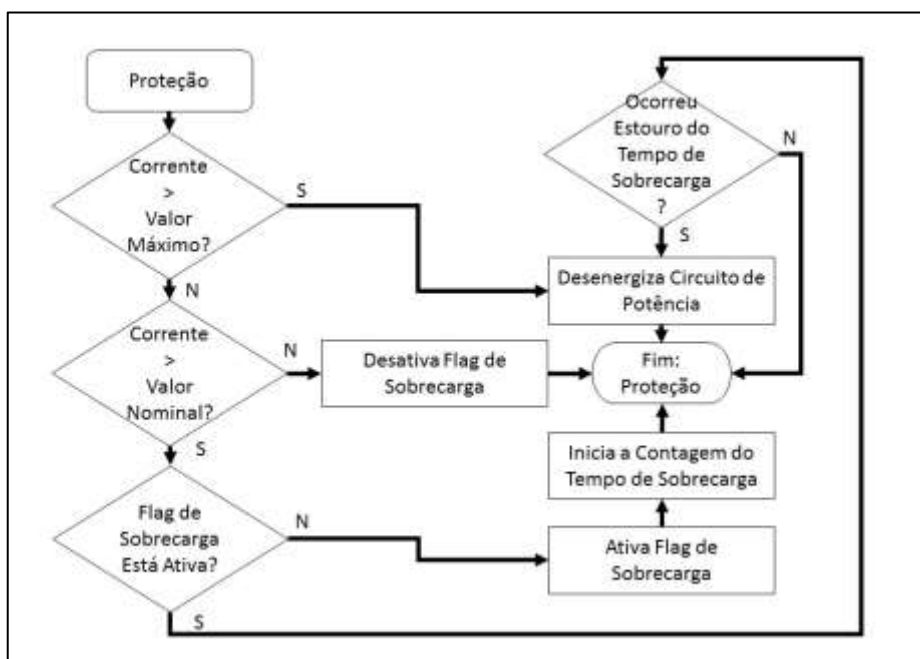
principalmente com a interface e na interrupção o sinal PWM é gerado, e os sinais são processados: cálculo da velocidade aproximada, cálculo do sinal de erro e da saída do controlador, atualização dos tempos T_{on} e T_{off} . Na figura 57 encontram os fluxogramas das rotinas descritas.

Figura 57 – Operação Controle de Velocidade e Respectiva Interrupção.



A proteção, cujo fluxograma está apresentado na figura 58, foi projetada para proteção do motor e do controlador, a corrente é constantemente comparada a 2 valores: valor máximo, caracterizando como curto-circuito correntes que resulte em valores maiores que o mesmo; valor de corrente nominal, valores médios da corrente (ver item 5.2) entre esses valores serão permitidos por um curto espaço de tempo. Os valores de corrente nominal e máximo bem como o tempo de sobrecarga foram definidos tendo como parâmetros de orientação os resultados das simulações apresentadas no tópico 5.2 e são: corrente nominal de 1,9 A, corrente máxima de 3,5 A e tempo de sobrecarga de 2 s. Se a corrente atingir um valor superior ao máximo ou se for constatado sobrecarga, então o circuito de potência será desligado. Esta função de proteção funciona como um disjuntor, porém virtual.

Figura 58 – Funcionamento da Proteção.



O código do programa desenvolvido, e alguns comentários sobre decisões quanto à programação estão inclusas no APÊNDICE A.

5 ENSAIOS

O primeiro ensaio realizado foi para caracterizar o motor a ser controlado, tal ensaio foi procedido de acordo com as diretrizes de LORD e HWANG (1977). Os demais ensaios seriam para demonstração do funcionamento do controlador; com a falha ocorrida no processo de desenvolvimento, não houveram ensaios do protótipo final e, nos intermediários foram feitas apenas medições de tensão com um multímetro.

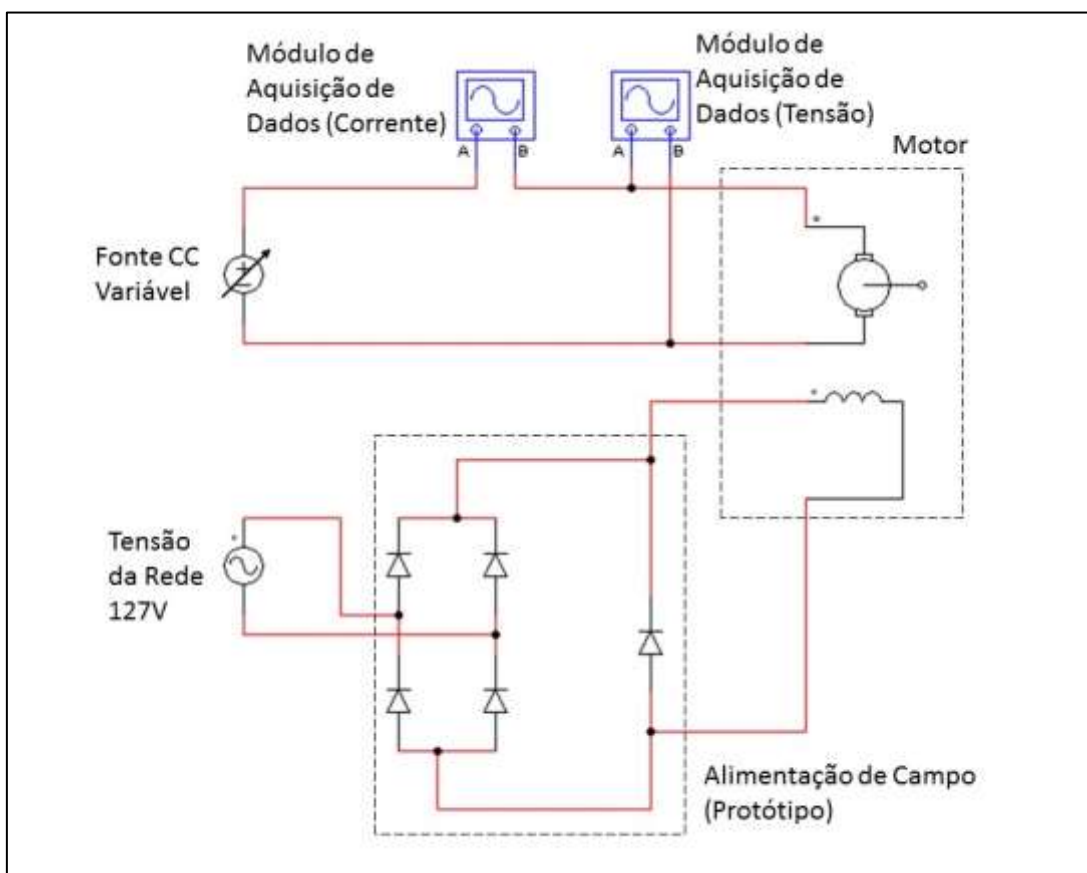
O controle em malha fechada não chegou a ser implementado, mas, foi simulado. Na simulação do controle em malha fechada levou-se em conta as características do motor e limitações que viria a ter o protótipo.

5.1 Obtenção dos Parâmetros do Motor

O ensaio teve como objetivo encontrar os parâmetros do motor necessários para seu controle em malha fechada. Estes parâmetros são os que estão representados na figura 14 (tópico 2.2). O método utilizado é conhecido como o método de Pasek; este método consiste em se aplicar um degrau de tensão e calcular os parâmetros por meio da análise da curva de corrente e velocidade do motor em regime. No método de Pasek, a proposta é obtenção de todos os parâmetros com apenas um único ensaio.

Para o ensaio foram utilizados: o motor, o protótipo inicial, bancada LabVolt com os módulos de aquisição de dados e de fonte CC variável. O protótipo serviu apenas para alimentar o campo do motor; a alimentação da armadura e obtenção dos dados ficaram por conta da bancada. O esquema da ligação do ensaio encontra-se na figura 59.

Figura 59 – Ensaio: Esquema Elétrico.



O ensaio foi realizado duas vezes, tendo como degraus os valores de 20 e 25 V. Optou-se por fazer duas medições para verificar se haveriam diferenças significativas nos parâmetros. A seguir têm-se as curvas obtidas.

Figura 60 – Resposta Transitória de Corrente: Degrau de 20 V.

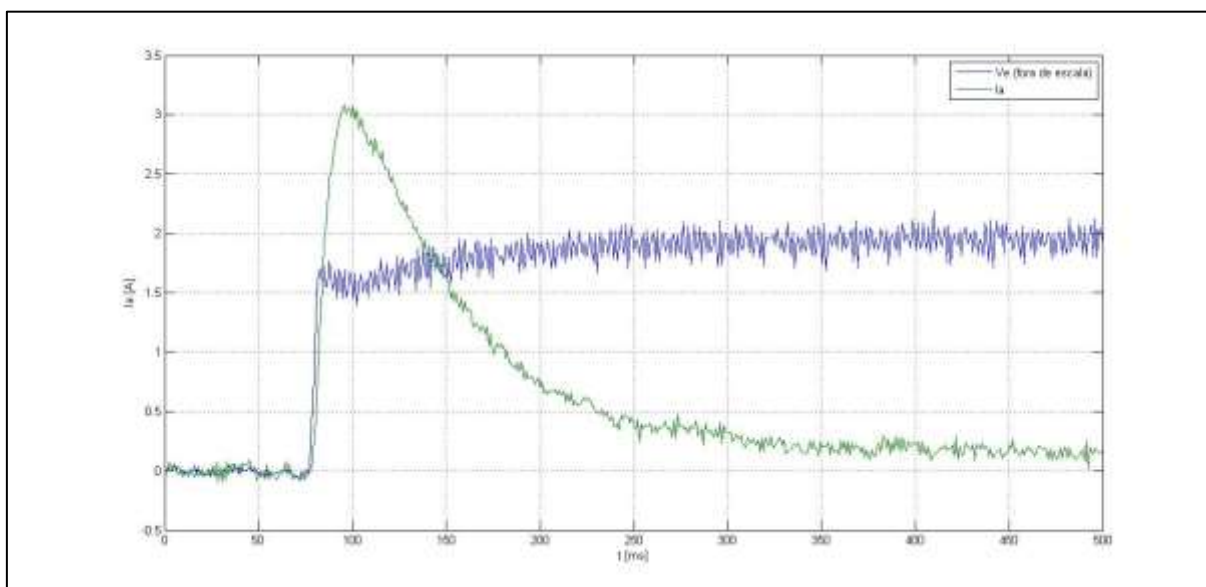
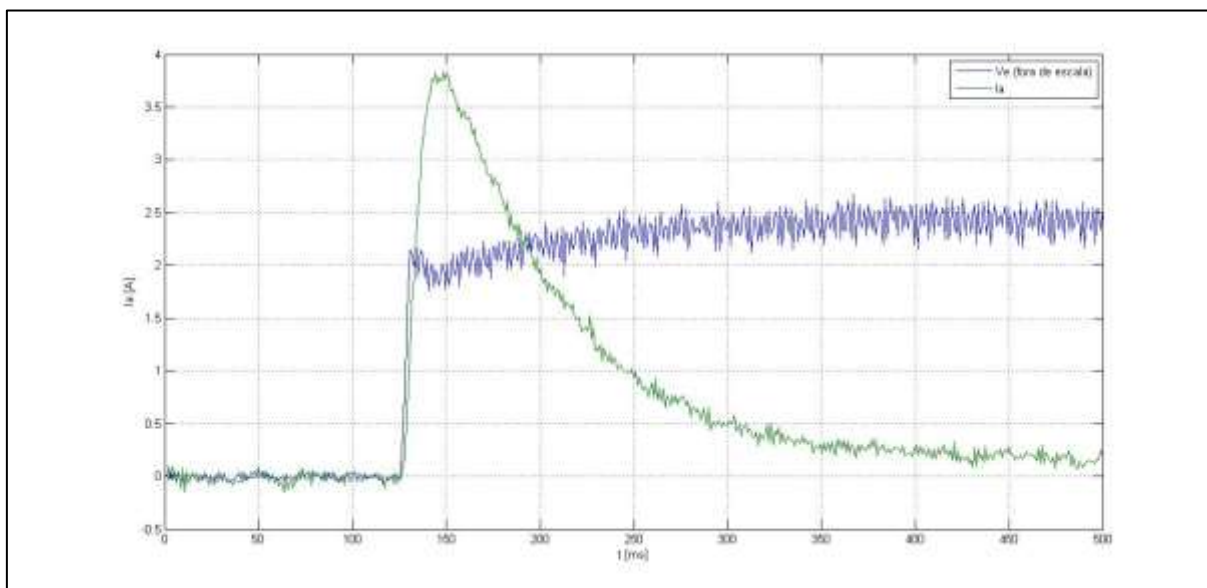


Figura 61 – Resposta Transitória de Corrente: Degrau de 25 V.



Por meio dos ensaios, foram obtidos os seguintes dados:

Tabela 1 – Método de Pasek: Medições.

	V = 20 V	V = 25 V
$i(t_1)$ (A)	3,12	3,83
$i(2.t_1)$ (A)	2,45	2,88
t_1 (ms)	20,0	23,4
I_{ss}'' (A)	0,1589	0,1832
ω_m (RPM)	860	1081
ω_m (rad/s)	90,06	113,20

$i(t_1)$: Valor instantâneo da corrente no instante de tempo t_1 ;

$i(2.t_1)$: Valor instantâneo da corrente no tempo instante de $2.t_1$;

t_1 : Instante de tempo onde a corrente atinge seu valor máximo;

I_{ss}'' : Corrente em regime;

ω_m : Velocidade do motor em regime.

LORD e HWANG (1977) definem oito modelagens diferentes para um motor, o modelo escolhido é o modelo mais completo que corresponde ao da figura 14. Para este modelo faltou um dado a ser levantado que é o tempo entre a energização e o início do movimento do rotor (t_{dz}); como não havia uma ferramenta adequada para tal medição, e o início do movimento se

dava tão logo o motor era energizado, considerou-se t_{dz} nulo, logo $i(t_{dz})$ também é nula. A seguir encontram-se as equações necessárias aos cálculos dos parâmetros (LORD; HWANG, 1977):

$$\frac{i(2 \cdot t_1)}{i(t_1)} = \frac{i(t_1)}{I_{sc}} \quad (17)$$

$$K \cdot K' = 1 - \frac{I_{ss}''}{I_{sc}} \quad (18)$$

$$K' = 1 - \frac{T_f}{K_t \cdot I_{sc}} \quad (19)$$

$$K = \frac{K \cdot K'}{K'} \quad (20)$$

$$\tau_m = \frac{(K \cdot \tau_m)}{K} \quad (21)$$

$$\tau_b = \frac{K}{1 - K} \tau_m \quad (22)$$

$$R_a = \frac{V}{I_{sc}} \quad (23)$$

$$K_e = \frac{K \cdot K' \cdot V}{\omega_f''} \quad (24)$$

$$K_t = K_e \text{ no sistema MKS de unidades} \quad (25)$$

$$J = \frac{\tau_m \cdot K_e \cdot K_t}{R_a} \quad (26)$$

$$B = \frac{J}{\tau_b} \quad (27)$$

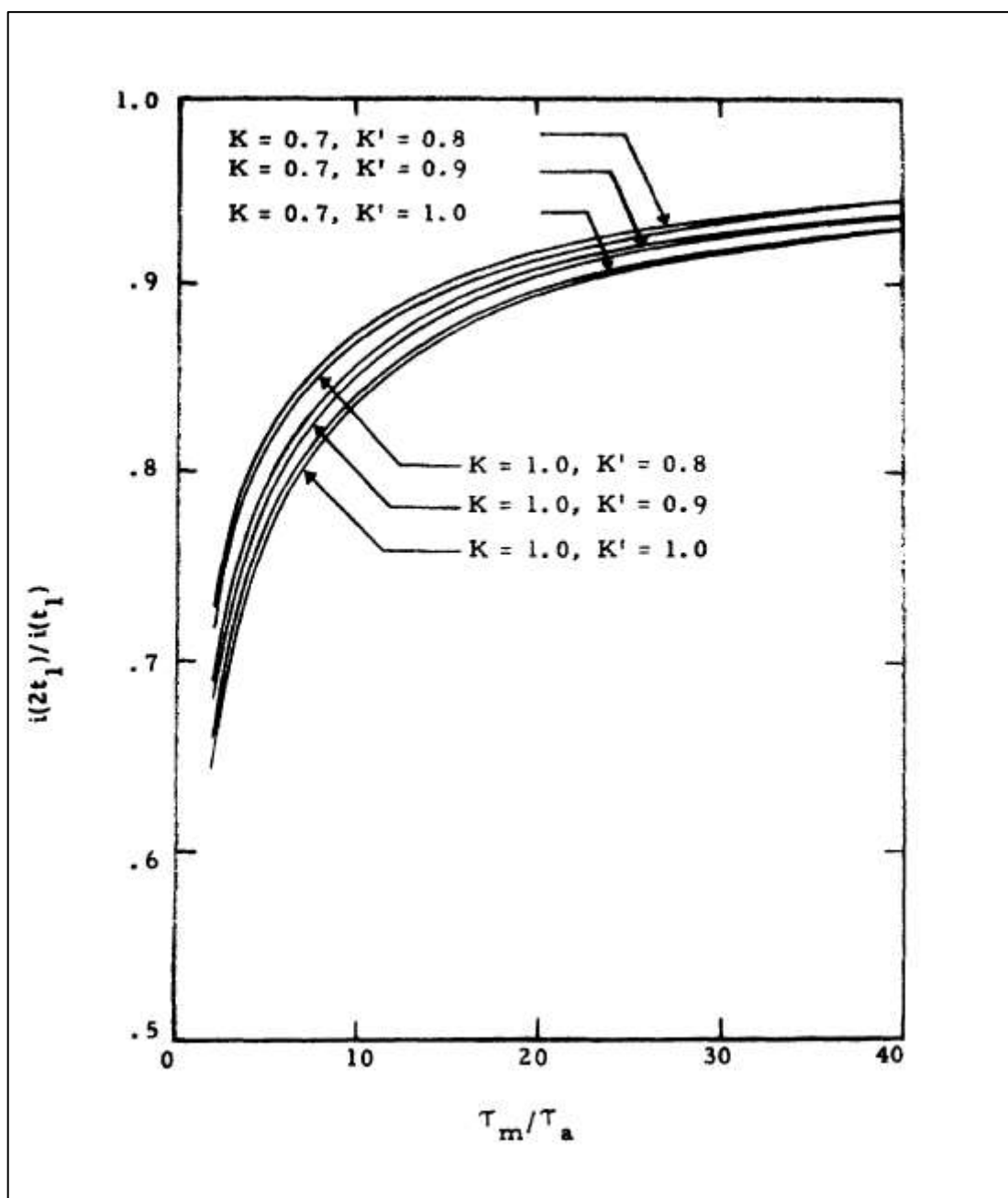
$$T_f = K_t \left(\frac{T_f}{K_t} \right) = K_t \cdot i(t_{dz}) \quad (28)$$

Com os dados levantados, considerações e as equações: 17 –20, 23 – 25 e 28; obtiveram-se os seguintes valores:

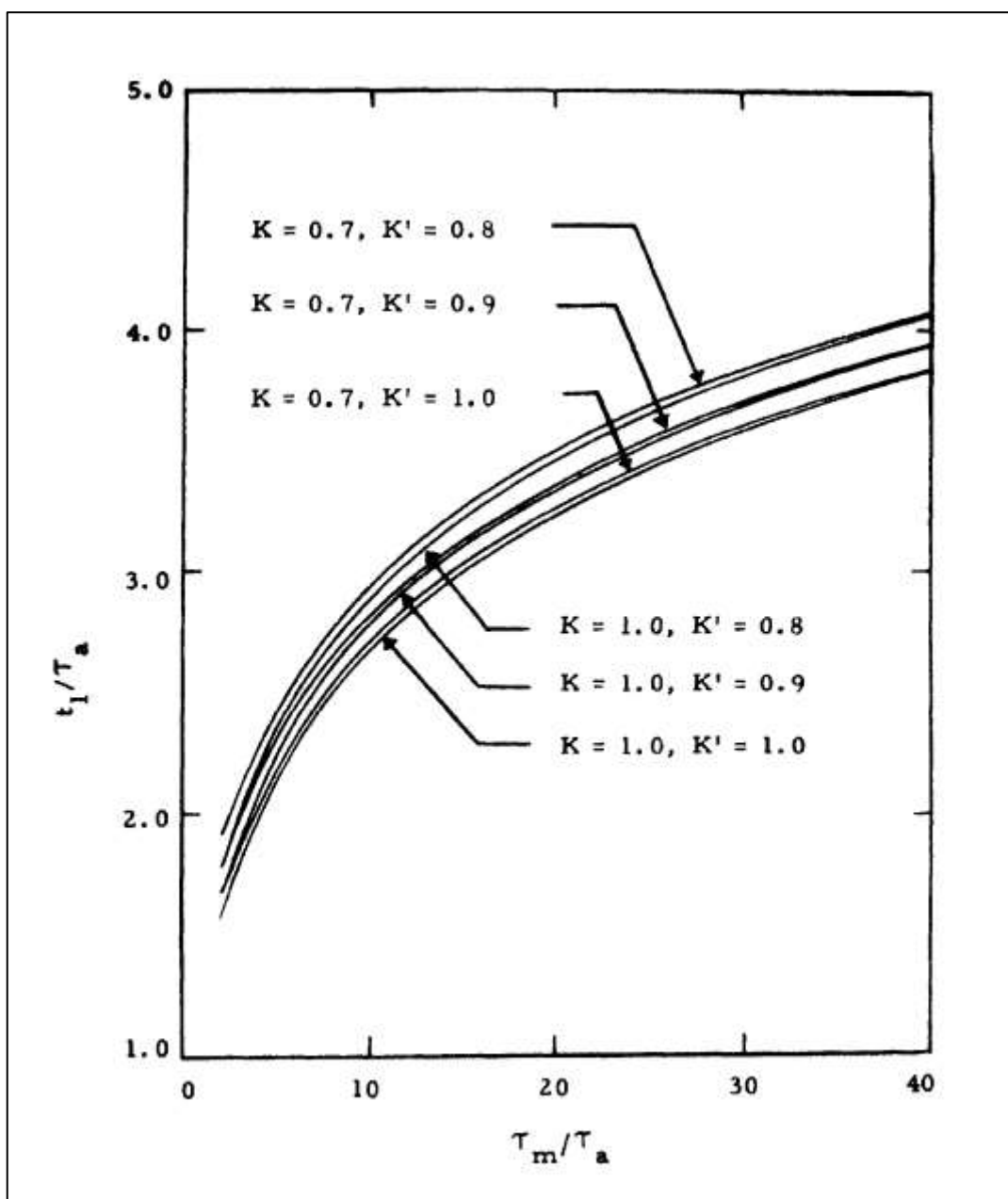
Tabela 2 – Método de Pasek: Parâmetros 1.

	V = 20 V	V = 25 V
Isc (A)	3,973	5,106
Tf (N.m)	0	0
K'	1	1
K	0,960	0,964
Ra (Ω)	5,034	4,896
Kt = Ke (V.s/rad)	0,213	0,213

Para se aplicar as demais equações são necessárias informações dos valores de τ_a , τ_b e τ_m ; tais informações são obtidas através de dois ábacos, o primeiro é um gráfico de $i(2.t_1)/i(t_1)$ em função de τ_m/τ_a , o segundo de t_1/τ_a em função de τ_m/τ_a . Os ábacos estão mostrados nas figuras 62 e 63.

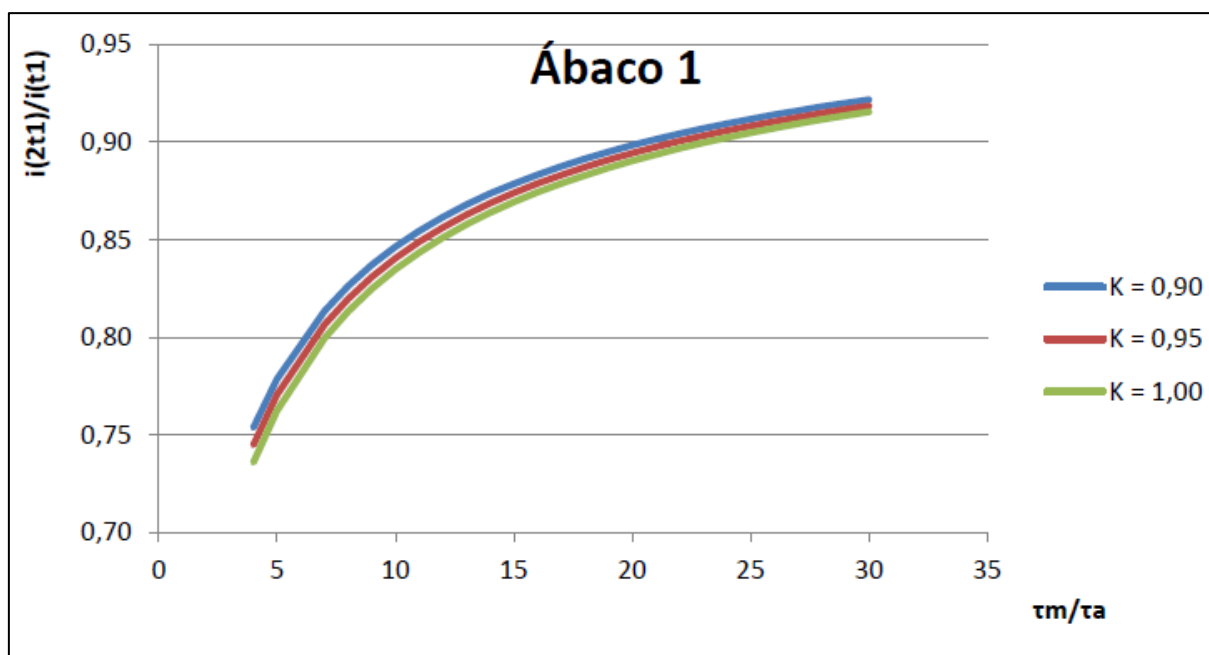
Figura 62 – Ábaco 1 – $i(2.t_1)/i(t_1) \times \tau_m/\tau_a$.

Fonte: LORD; HWANG, 1977.

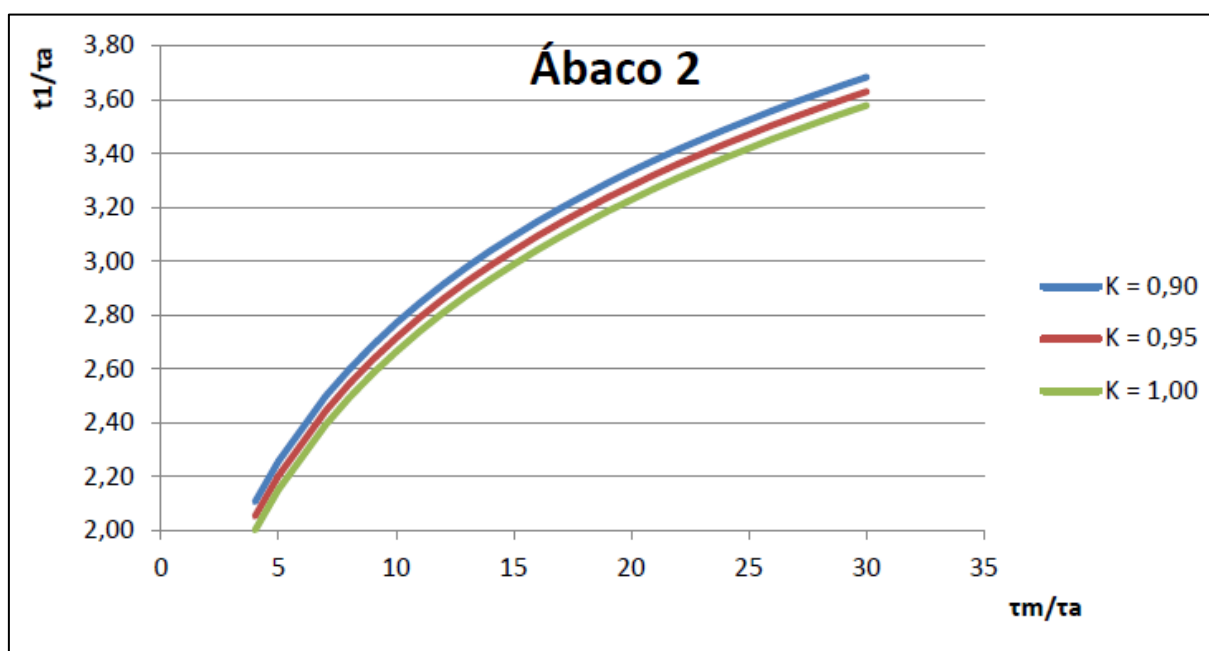
Figura 63 – Ábaco 2 – $t_1/\tau_a \times \tau_m/\tau_a$.

Fonte: LORD; HWANG, 1977.

Assim, com a relação $i(2.t_1)/i(t_1)$ é possível obter as variáveis restantes. As relações $i(2.t_1)/i(t_1)$ obtidas são 0,785 e 0,751 para 20 e 25 V respectivamente, tendo-se $K'=1$ e valores de K de 0,960 e 0,964 para 20 e 25 V de tensão de entrada. Observa-se que para os dados referidos, os ábacos são imprecisos, porém LORD e HWANG (1977) dão as diretrizes para se traçar as curvas dos ábacos. As figuras 64 e 65 apresentam as curvas dos ábacos 1 e 2 para K' unitário e valores K mais próximos.

Figura 64 – Ábaco 1 - $K'=1 - i(2.t_1)/i(t_1) \times \tau_m/\tau_a$.

Fonte: RODRIGUES; DALVI; DIAS, 2014.

Figura 65 – Ábaco 2 - $K'=1 - t_1/\tau_a \times \tau_m/\tau_a$.

Fonte: RODRIGUES; DALVI; DIAS, 2014.

Por meio dos ábacos, foram obtidas as relações τ_m/τ_a e t_1/τ_a , e os demais parâmetros foram calculados.

Tabela 3 – Método de Pasek: Parâmetros2.

	V = 20 V	V = 25 V
τ_m/τ_a	5,9	4,2
t_1/τ_a	2,3	2,1
τ_a (s)	0,00870	0,01114
τ_m (s)	0,05130	0,04680
La (mH)	43,77	54,56
J (N.m.s ²).10 ³	0,522903	0,447316
τ_b (s)	1,232	1,258
B (N.m.s).10 ³	0,425	0,356

Os dados que apresentaram as maiores diferenças percentuais foram os que dependeram dos dados obtidos via ábacos, o que é bem previsível, visto que é um método empírico e há pequenas variações entre os dados dos ábacos e os reais; por exemplo, usou-se a curva de $K = 0,95$, enquanto os valores reais eram 0,960 e 0,964, isto sem contar a imprecisão na obtenção dos dados dos ábacos.

Tabela 4 – Comparação dos Parâmetros.

	Diferença (%)
Ra	2,73
Kt = Ke	0,13
La	24,65
J	14,46
B	16,22

Apesar das diferenças, nota-se que a ordem de grandeza é mantida para todos os dados, e as grandezas medidas são muito pequenas; tais diferenças ou erros poderiam ocorrer em leituras obtidas mesmo com medidores específicos. Um bom exemplo é a indutância, dado que apresentou maior diferença percentual, apesar da diferença percentual ser maior que 20% a diferença real é menor que 12 mH.

Optou-se por estabelecer como parâmetros a média dos dados obtidos nos dois ensaios, assim, o erro seria a metade da diferença entre ambos. Dessa forma, todos os dados do modelo foram obtidos.

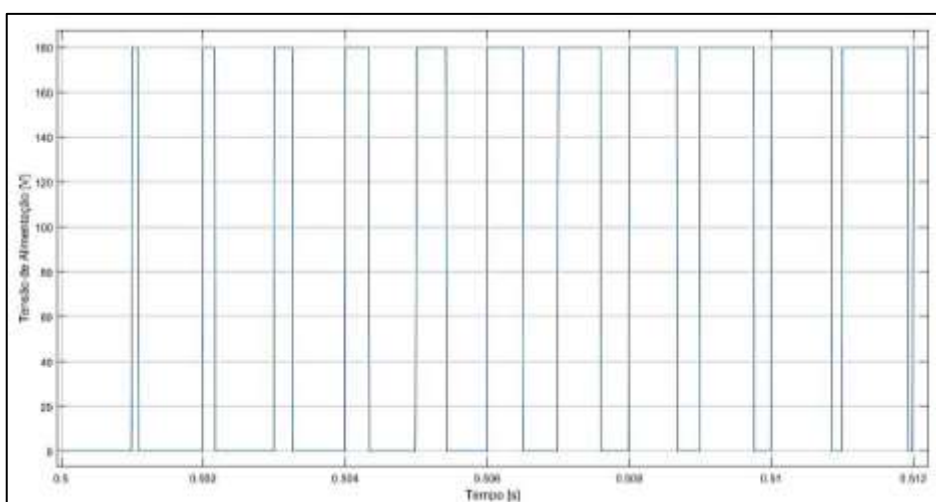
Tabela 5 – Valores Adotados.

	Valor Adotado	Erro(%)
Ra	4,965 Ω	1,36
Kt = Ke	0,213 V.s/rad	0,07
La	49,17 mH	12,32
J	$0,485110 \cdot 10^{-3} \cdot \text{N.m.s}^2$	7,23
B	$0,390154 \cdot 10^{-3} \cdot \text{N.m.s}$	8,11

5.2 Simulação do Controle de Velocidade em Malha Fechada

Com o resultado do ensaio anterior foi possível simular o controle do motor em malha fechada. Ao modelo do motor, representado na figura 14, foi incluído um controlador PID (descrito no item 2.4.1) e o sistema teve sua malha fechada. O primeiro passo foi montar um diagrama de blocos que pudesse simular características e limitações que o protótipo apresentaria; assim, foram incluídos: blocos de amostragem, limitações no sinal de saída do controlador, blocos de quantização e blocos de operações matemáticas. Como forma de tornar a simulação mais realista foi inserido à saída do controlador um conversor PWM, formado por um sinal dente de serra, um comparador e um amplificador, a figura 66 apresenta um exemplo do sinal que alimenta o motor. O digrama de blocos do sistema “real” pode ser visto na figura 67.

Figura 66 – Simulação: Amostra do Sinal de Alimentação do Motor.

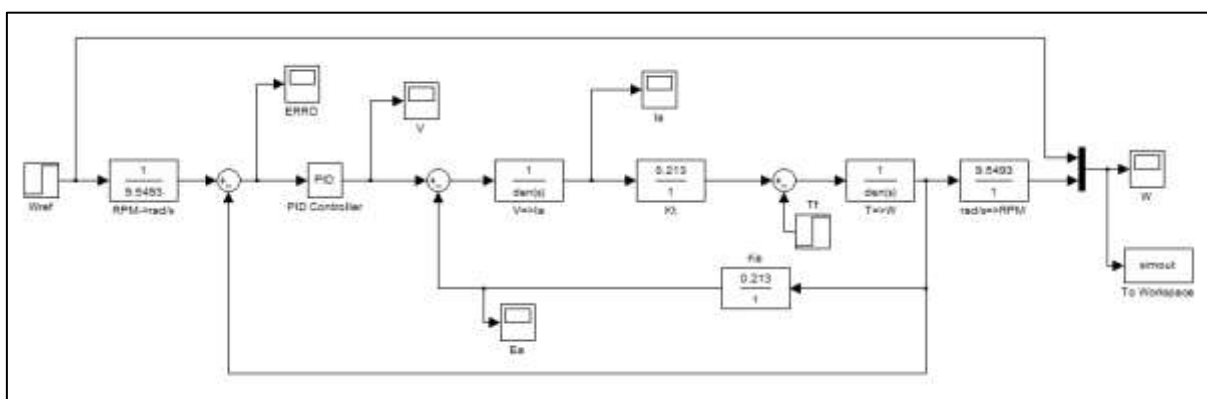


O bloco de amostragem (Zero-Order Hold) tem a função de simular a captura dos dados pelo Arduino, a amostragem é feita a cada 1ms; o bloco de quantização (Quantizer) tem a função de simular a leitura de corrente, cuja precisão depende da sensibilidade do sensor de corrente e da resolução do conversor A/D, sendo que foi adotado um valor de 75 mA para o intervalo de quantificação.

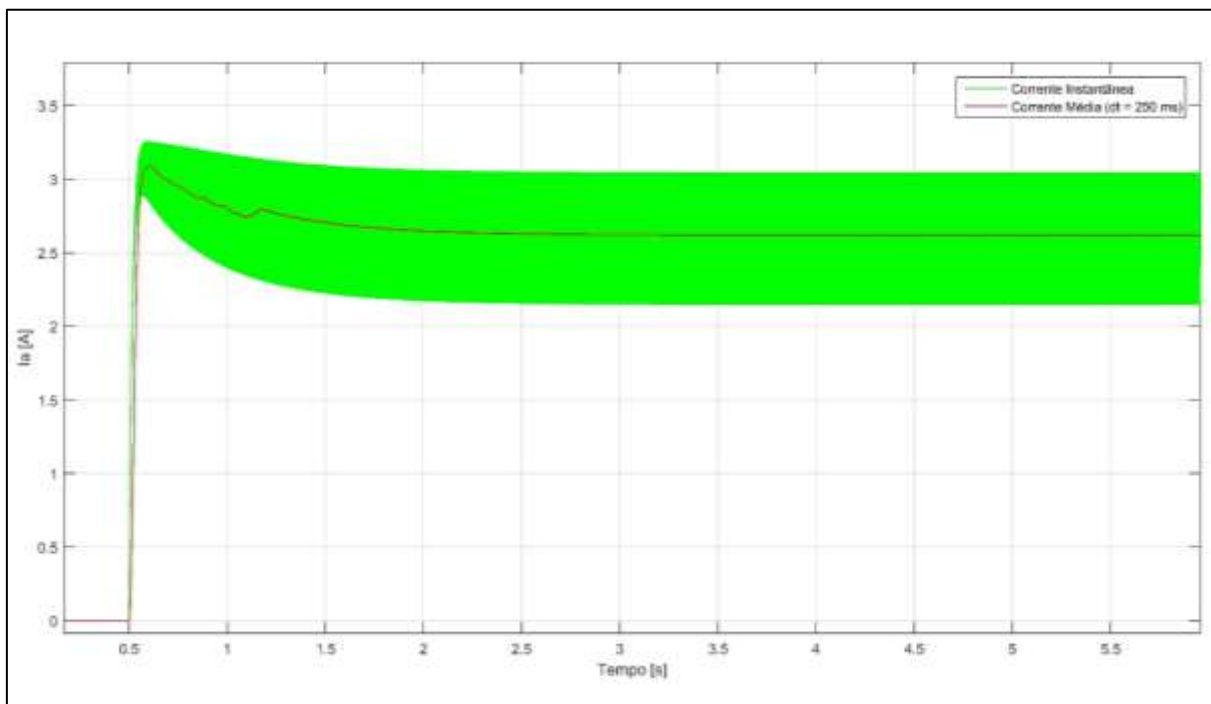
Para simular o fechamento da malha com a estimação de velocidade, como mencionado no tópico 4.7, foram utilizados blocos matemáticos para realizar o cálculo da aproximação descrito pela equação 16.

Para se ter uma referência, foi montado um diagrama de blocos que modela o mesmo sistema PID e motor, porém, este sendo um modelo ideal (figura 68). Testes foram realizados com os dois modelos, sendo ambos ajustados com os mesmos ganhos e recebendo os mesmos sinais de excitação (velocidade de referência e torque no eixo do motor).

Figura 68 – Diagrama de Blocos: Sistema Contínuo (Ideal).



A sintonia foi feita por meio de tentativa e erro, avaliando-se o tempo de resposta e também o comportamento da corrente de armadura, sendo este último considerado o mais importante. Durante as simulações para a sintonia foi considerada a situação em que se demanda a maior potência do motor: torque máximo e velocidade máxima. O torque máximo pode ser calculado por meio do produto entre a corrente de armadura máxima e K_t , por segurança usou-se como corrente máxima (em regime) 90% da corrente nominal do motor, ou seja 1,9 A; assim o torque máximo é de 0,405 N.m. A alimentação é aplicada em $t = 0,5$ s, e a corrente obtida pode ser vista na figura 69; na figura 69 a qual também inclui a curva da corrente média, de intervalo de 250 ms.

Figura 69 – Comportamento de I_a .

Em relação ao torque, duas observações devem ser feitas: o torque nominal da máquina é maior que o máximo calculado para este protótipo, pois o valor nominal é de 0,784 N.m (obtido pela equação 29), isto porque a excitação de campo é menor que a nominal (maiores detalhes podem ser encontrados no tópico 4.6 e no ANEXO A). É importante lembrar que além do torque desenvolvido para mover a carga, uma parcela do torque é “perdida” devido ao atrito viscoso (equação 30).

$$T_N = \frac{P_N}{\omega_N} \quad (29)$$

$$T_m = K_t \cdot I_a = T_f + T_B = T_f + B \cdot \omega_m \quad (30)$$

Na figura 69 percebe-se que a corrente em regime é maior do que a máxima definida, isto porque a parcela do torque devido ao atrito viscoso se soma ao torque da carga (que é o máximo). Neste teste as informações mais importantes são: o valor de pico de corrente e o tempo que ela leva para se estabilizar, a saber 3,1 A e cerca de 2 s; tais dados servirão para regular as proteções de curto-circuito e sobrecarga do protótipo (ver tópico 4.8.3).

A sintonia que gerou resultados satisfatórios foi a de um controlador PI; a componente derivativa apesar de aumentar a velocidade de resposta do sistema o tornava mais oscilatório. Os ganhos do controlador foram: $k_p = 0,03$ e $k_i = 0,5$. Após a sintonia, foram feitas simulações simultâneas de ambos sistemas de forma a verificar o funcionamento do sistema “real”, mostrados nas figuras 70 e 71.

Figura 70 – Comparação entre Sistema Ideal e "Real"

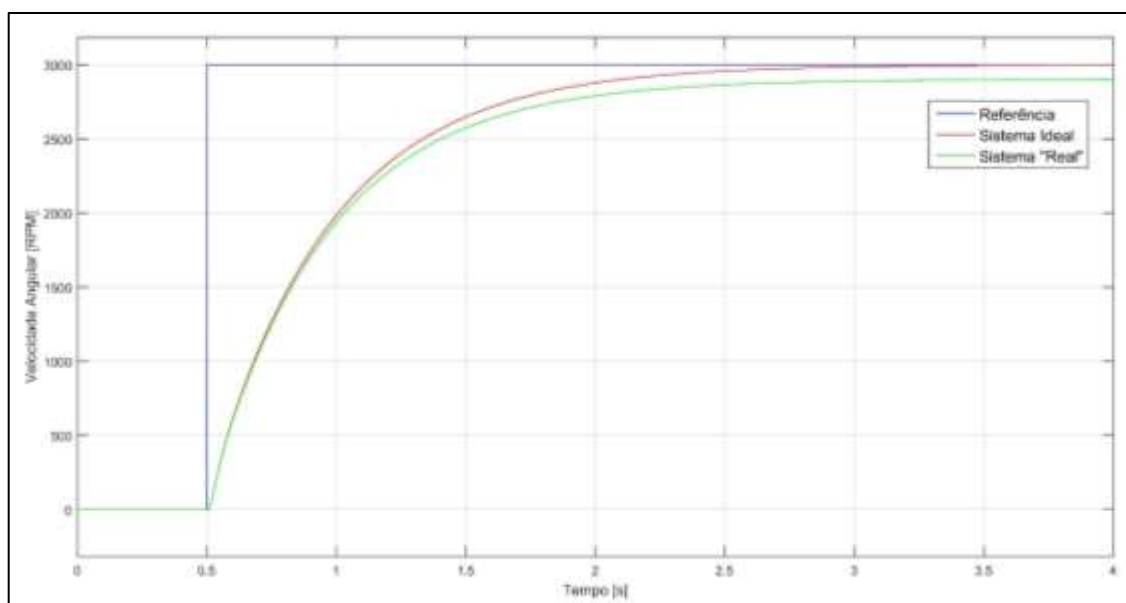
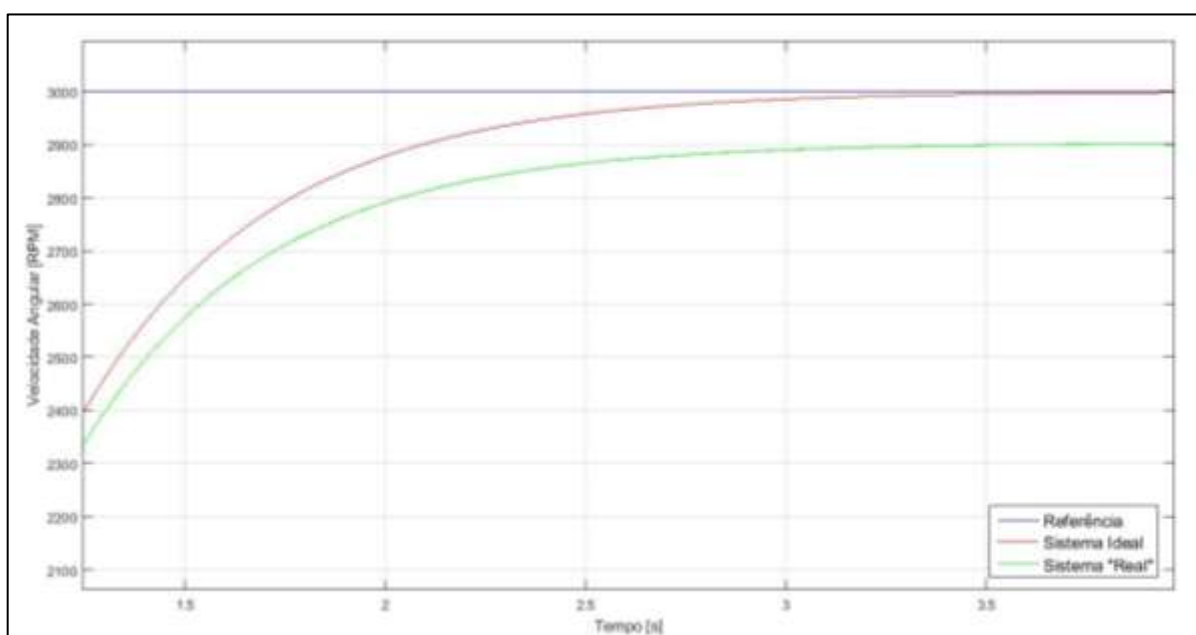


Figura 71 – Comparação entre Sistema Ideal e "Real": Detalhe



Na figura 70 percebe-se que a resposta do sistema que simula as limitações reais do protótipo está bem próxima do sistema ideal. Na figura 71 percebe-se um pequeno erro estacionário. Nas figuras 70 e 71 a simulação foi feita com $\omega_{\text{referência}} = 3000$ RPM (velocidade considerada máxima, por segurança) e $T_f = 0,405$ N.m, apresentando um erro de 3,29%; o erro máximo percentual encontrado foi de 5,44%, que está em um ótimo patamar. Na tabela 6 encontra-se o levantamento feito do erro estacionário para diversas situações:

Tabela 6 – Comparação entre Sistema Ideal e “Real”.

$\omega_{\text{referência}}$ (RPM)	T_f (N.m)	Erro Estacionário (%)
1000	0,0	4,41
1000	0,1	4,82
1000	0,2	5,02
1000	0,3	5,44
2000	0,0	3,78
2000	0,1	3,88
2000	0,2	4,08
2000	0,3	4,18
3000	0,0	3,21
3000	0,1	3,21
3000	0,2	3,28
3000	0,3	3,27

Além da simulação de resposta a um degrau, foram feitos testes para se verificar a reação do sistema a variações aleatórias. A seguir são apresentados os comportamentos de velocidade e corrente de duas simulações: a primeira com uma referência de 3000 RPM, T_f composto por um degrau fixo de 0,2 N.m somado a um sinal aleatório entre -0,05 a 0,05 N.m com uma taxa de variação de 0,1 s; a segunda com os mesmos parâmetros da anterior, porém, com T_f composto por um degrau fixo de 0,1 N.m e por um sinal aleatório variando entre -0,2 e 0,2 N.m.

Figura 72 – Simulação com Perturbações de -0,05 a 0,05 N.m

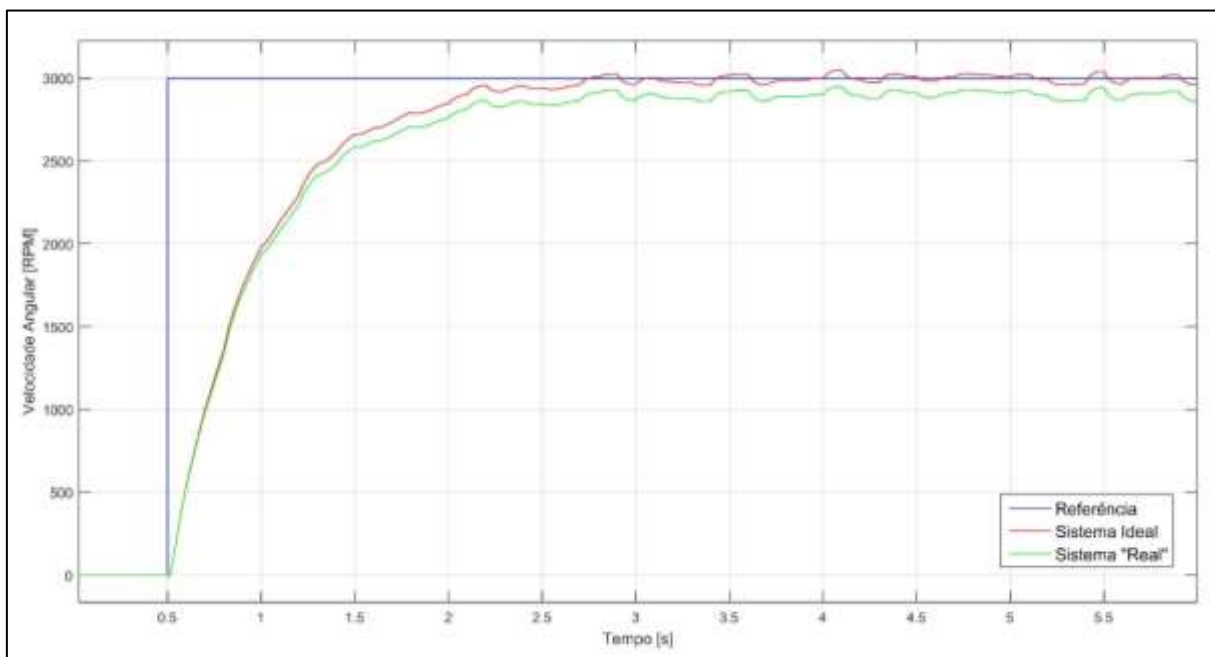


Figura 73 – Resposta da Corrente: Perturbações de -0,05 a 0,05 N.m

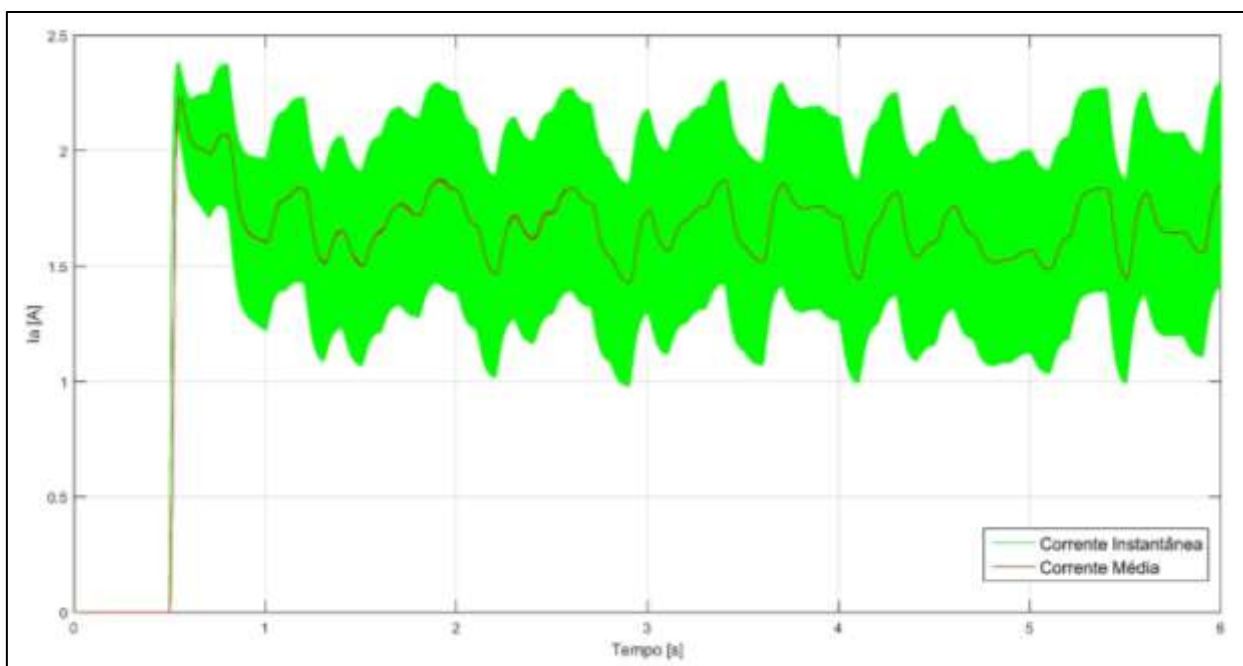


Figura 74 – Simulação com Perturbações de -0,2 a 0,2 N.m

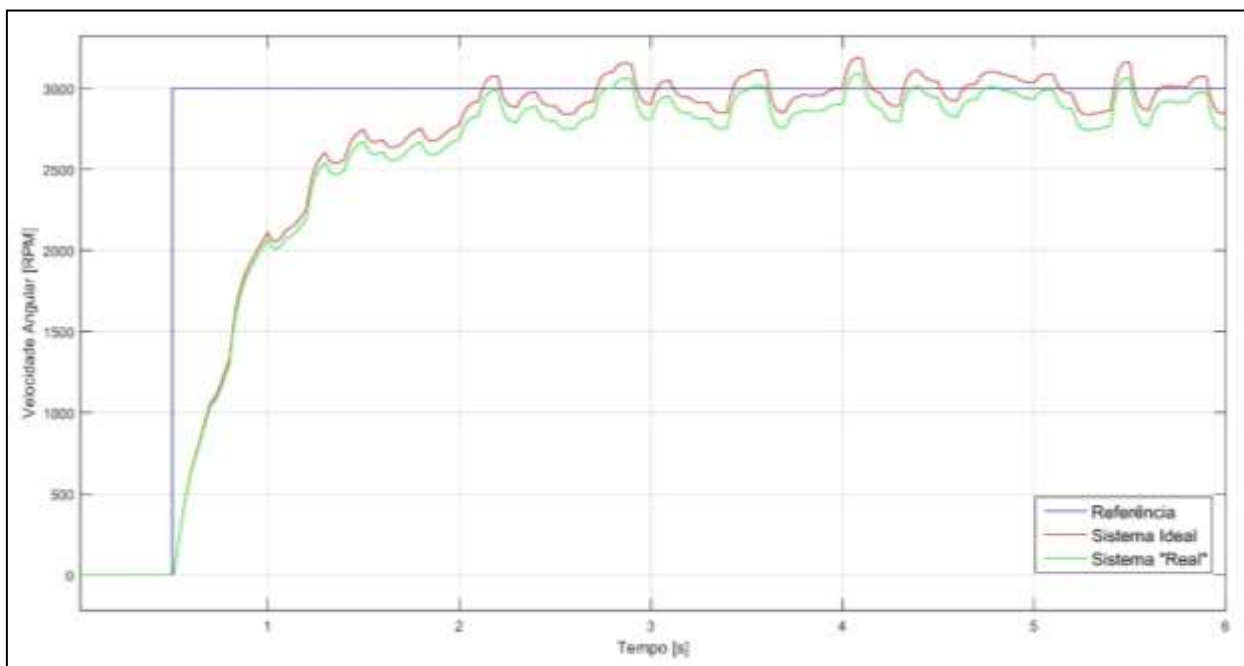
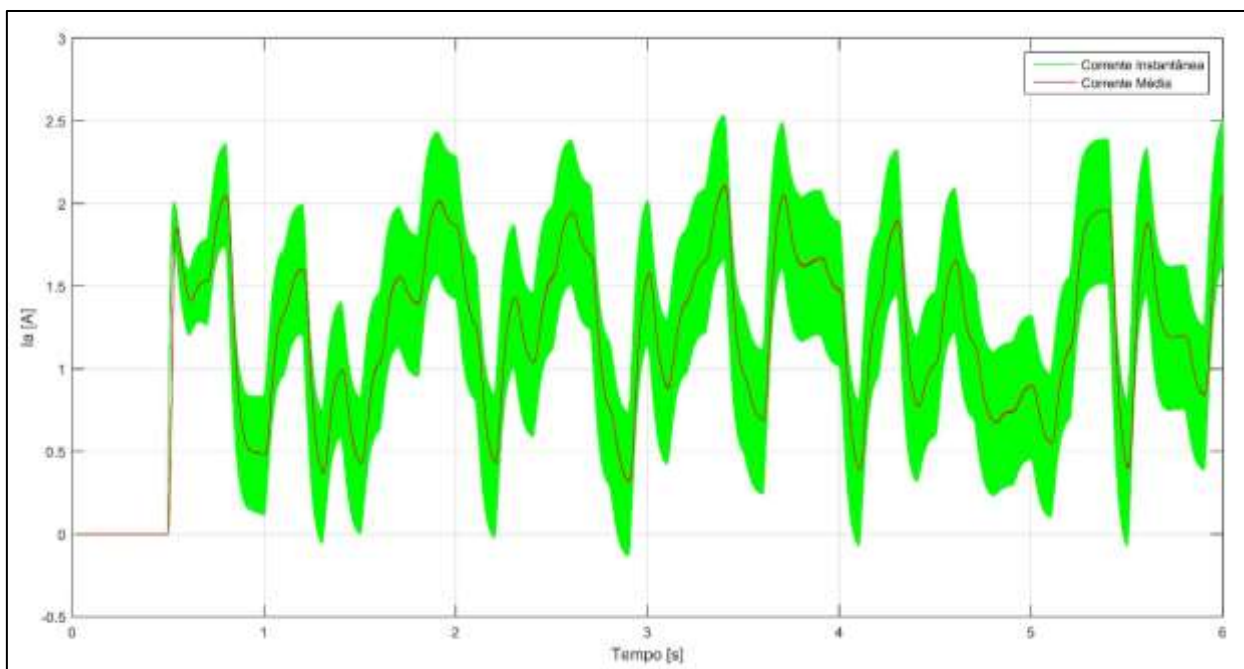


Figura 75 – Resposta da Corrente: Perturbações de -0,2 a 0,2 N.m



6 CONCLUSÕES

Neste documento foram apresentados projetos de protótipos com o intuito de substituir o MC183; apesar da versão final ter apresentado problemas, a simulação da mesma mostrou resultados satisfatórios.

A inclusão da tela *LCD* tornou possível a apresentação de variáveis ao usuário, isto é, a opção de uso dos dois métodos de acionamento (controle de fase e PWM) aumentaram o potencial didático do protótipo final ante ao MC183.

Foram abordados também pontos da teoria por trás do funcionamento dos projetos, como também decisões de cunho prático, como a isolação dos circuitos de potência dos de controle por meio de opto acopladores.

Um resultado interessante, apresentado neste trabalho, foi o controle em MF do motor tendo como sinal de realimentação uma aproximação do valor da velocidade, obtida por meio do conhecimento do valor da tensão (do sinal PWM) e medição da corrente.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, ASHFAQ. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Prentice Hall. 2000.

ARAGÃO FILHO, WILSON CORREIA PINTO DE. **Eletrônica de Potência I: retificadores monofásicos e trifásicos**. 1. Ed. Vitória, ES: Edição do Autor. 2012.

ARDUINO. **Site Oficial Arduino**. Disponível em: < <https://www.arduino.cc>>. Acesso em: 08 maio 2017.

ASSEF, AMAURI. **Disciplina Eletrônica de Potência - ET66B: Aula 20 – Chaves Eletrônicas**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Eletrotécnica Curso de Engenharia Industrial Elétrica. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/amauriassef/disciplinas/eletronica-de-potencia/apresentacoes/Elctr_Pot1_20.pdf/at_download/file>. Acesso em: 24 nov. 2016.

BARBI, IVO. **Eletrônica de Potência**. 6. Ed. Florianópolis: Edição do Autor. 2006.

CORRADI JÚNIOR, ROMEU. **Tiristor SCR: Retificador Controlado de Silício**. 1. Ed. Campinas: Edição do Autor. 2005. Disponível em: <http://www.corradi.junior.nom.br/Apostila_Tiristor_SCR.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2016.

BUENO, DIEGO A. ACEVEDO; SILVA, EDISON R. CABRAL DA. Dispositivos de Carboneto de Silício na Eletrônica de Potência: Uma Revisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 20 a 24, setembro, 2014, Belo Horizonte. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática**. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/CBA2014/anais/PDF/1569936787.pdf>>. Acesso em: 04 ago. 2017.

DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H. **Sistemas de Controle Modernos**. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2001.

FEEDBACK INSTRUMENTS LIMITED. **Electrical Machines Tutor Laboratory EMT 180C: Laboratory Handbook**. Crowborough. [197-?].

FITZGERALD, E. A.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência.** 6. Ed. Porto Alegre: Bookman Companhia. 2006.

LORD, W; G HWANG, J.G. **DC Servomotors Modeling and Parameter Determination.** IEEE Trans. on Ind. Application, Vol.IA 13, N° O3, May/June 1977.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Explicando a Teoria PID.** Publicado em 13 dez. 2011.
Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

NISE, NORMAN S. **Control Systems Engineering.** 6nd Ed. USA: John Wiley & Sons, Inc. 2011.

OGATA, KATSUHIKO. **Engenharia de Controle Moderno.** 3. Ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2000.

RODRIGUES, PATRICK TRIVILIN; DALVI, RODOLFO DE FIGUEIREDO; DIAS, THALES LOPEZ. **Determinação dos Parâmetros de um Motor CC.** 2014. Relatório (Graduação em Engenharia Elétrica) – Disciplina de Acionamentos de Máquinas Elétricas, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/240630708/Rel-Parametros-MCC-Patrick-Rodolfo-e-Thales-IEE9>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

RYSSEL, HEINER. **IGBT's – TECHNOLOGIES AND CHARACTERISTICS.** INDO GERMAN WINTER ACADEMY. Nuremberg, Alemanha. 2010. Disponível em: <<http://www.leb.eei.uni-erlangen.de/winterakademie/2010/report/content/course03/pdf/0310.pdf> >. Acesso em: 24 nov. 2016.

SEN, P. C. **Principles of electric machines and power electronics.** 2nd Ed. USA: John Wiley & Sons, Inc. 1996.

APÊNDICE A – Código: Protótipo Final

Antes da apresentação do código propriamente dito, algumas informações são de valia para o entendimento do mesmo. O Arduino é muito difundido e por isso possui muitas bibliotecas prontas para várias funções, como por exemplo: escrita em *LCD* e sinal PWM; mas, ao se trabalhar em um projeto em que se necessita de precisão ou se trabalha com várias interrupções, as bibliotecas prontas podem não ser adequadas.

Apesar de existirem funções e bibliotecas prontas, elas não foram usadas (sem adaptação) para escrita em *LCD* e para se gerar um sinal PWM. A biblioteca para escrita em *LCD* (LiquidCrystal), por exemplo, usa um *delay* de 100 μ s em uma rotina repetitiva, isto atrapalhava a leitura da corrente. A solução encontrada foi modificar LiquidCrystal que foi rebatizada de LiquidCrystalJared, nesta última esse *delay* repetitivo foi substituído pela chamada de uma função externa, de tempo próximo a 100 μ s, a saber a leitura de corrente.

Optou-se por gerar um sinal PWM utilizando a interrupção de tempo, dessa forma pode-se evitar que a interrupção ocorra no momento de cálculos essenciais ao bom funcionamento do controlador, colocando-os dentro da interrupção. Apresentado isto, segue o código.

```
#include <LiquidCrystalJared.h>
LiquidCrystalJared lcd(13, 12, 11, 10, 9, 8, &LeCorrente);

int Botao_UP = 7;
int Botao_DOWN = 6;
int Botao_MODE = 5;

int SensorCorrente = A7;

//Saidas dos controladores
int scrGATE = 3;
int pwmGATE = 4;

//Grupos de Reles
int RelesGERAL = A0;
int RelesFUNC = A1; //motor ou fonte ext
int RelesGIRO = A2;
int RelesCCTO = A3; //SCR ou PWM
int RelesCAPACITOR = A4;
```

```

boolean _LeituraBotao = LOW;

//Estado da ultima leitura dos botoes
boolean _LastStateUP =LOW;
boolean _LastStateDOWN =LOW;
boolean _LastStateMODE =LOW;

//Estado atual dos botoes
boolean _StateUP =LOW;
boolean _StateDOWN =LOW;
boolean _StateMODE =LOW;

//Variavel de Tempo auxiliar para o Debounce
unsigned long _LastTimeUP =0;
unsigned long _LastTimeDOWN =0;
unsigned long _LastTimeMODE =0;

//Constante de Tempo de Debounce
const int DebounceTime = 46;// tempo em ms

//Variaveis de deteccao de botoes pressionados por tempo prolongado
boolean _flagHOLD = LOW;
boolean _flagAuxHOLD = LOW;
boolean _flagSELECT = LOW; /*sinaliza se as teclas DOWN e UP estao habilitadas para
incremento e decremento*/
unsigned long _LastTimeHOLD = 0;
const int TimeHOLD = 800; /*tempo para se assumir que o usuario esta segurando
o botao por vontade propria*/
const int timeStillHOLDING = 80; //tempo de repeticao do comando do botao
//pressionado

/*Variavel que indicara em qual estado o programa esta funcionando, indicara também:
* qual mensagem deve aparecer no LCD;
* quais funcionalidades dos botes estarao habilitadas.
*/
uint8_t Tela = 0;

boolean _flagINICIALIZA = LOW;
boolean _flagSTOP = LOW;

```

```

//Variaveis definicoes SCR e PWM
const uint8_t SCRanguloMIN = 50; //Graus
const uint8_t SCRanguloMAX = 170; //Graus

const uint8_t PWMvoltsMIN = 15; //Volts
const uint8_t PWMvoltsMAX = 150; //Volts

const uint8_t PWMvelocMIN = 60; //veloc = VAR* 20 (RPM)
const uint8_t PWMvelocMAX = 150; //veloc = VAR* 20 (RPM)

uint8_t SCR_DISPARO = 138; //angulo de disparo atual
uint8_t SCR_S_DISPARO = 138; //angulo de disparo selecionado

uint8_t PWM_VOLTS = 15; //Tensao atual
uint8_t PWM_S_VOLTS = 15; //Tensao selecionada

uint8_t PWM_VELOC = 60; //Velocidade atual: veloc = VAR* 20 (RPM)
uint8_t PWM_S_VELOC = 60; //Velocidade selecionada: veloc = VAR* 20 (RPM)

boolean _flagCICLOpwm = LOW; // 1-> ciclo ON , 0-> ciclo OFF
int pwmPERIODO = 1000; //tempo em us //f = 1kHz
int _pwmTON = 0; //tempo em us
int _pwmTOFF = pwmPERIODO; //tempo em us
float TensaoRetificada = 179.6; //127*sqrt(2)
unsigned long _LastTimeAtualTENSAO = 0;

int TimeAtualTENSAO = 1500; //tempo em ms;

unsigned int Time_SCR_ZERO_GRAU = 64936; //400us
//Tempo de ajuste (delay) entre o Zero Crossing detector e o Zero real da onda
//Inicialmente ajustado p/ TIMER1: 400us
//Prescaler = 8
/* (tam do cont.)- (clock/prescaler)*(periodo)
(16 bits) - (16MHz /8) * 400us
65536 -(16MHz/8)*400us = 64736 = 0xFCE0
*/
unsigned int Time_SCR_PULSO = 64736; //ajuste p/ TIMER1: 400us
unsigned int _Time_Aux_SCR = (unsigned int) (SCR_DISPARO * 92.593);
unsigned int _Time_SCR_DISPARO = Time_SCR_ZERO_GRAU - _Time_Aux_SCR;
//T = (DISPARO/360)*1 000 000 /60; // tempo em micro segundos

```

```

//
//T = DISPARO * 46.296 (micro segundos/graus)
//
//Ajuste do time para TIMER1
/*(tam do cont.)- (clock/prescaler)*(periodo)
(16 bits) - (16MHz /8) * T (us)
65536 -(16MHz/8)*T(us) = 65536 -(16MHz/8)*T(us) = 65536 - 2 * T (us)
65536 - 2*(DISPARO * 46.296)
Ainda tem o ajuste de zero...
TimeZero - DISPARO * 92.593
*/
const int ConstAtualizaDisparo = 700;
boolean _flagATUALIZA_DISPARO = HIGH;
//HIGH Atualizacao feita (atualizacao feita de 1 em 1,
//esta flag se refere a mudanca de 1 grau)
//LOW Atualizacao em espera (atualizacao feita de 1 em 1)
float _auxATUALIZA_DISPARO;
int _contATUALIZA_DISPARO = 0;
boolean _flag_SCR_GATE = LOW; //sinaliza ocorrencia de disparo
unsigned long _timeSCRauxATUALIZA = 0;
int _timeSCRauxATUALIZAlimite = 0;
boolean _aux_SCR_TimerInterrupt = LOW;
uint8_t _cont_SCR_TimerInterrupt = 0;

float PWM_Ajuste_Mult = 1.20;
float PWM_Ajuste_Sub = 10;

//Variaveis para atualizacao do LCD
boolean _flagPISCA = LOW;
unsigned long _LastTimePISCA = 0;
const int TimePISCA = 250; //constante de tempo para piscar LCD em ms
boolean _flagPosTELA = LOW;
boolean _flagTRANSICAOtela = LOW;
int _colunaPISCA = 12;
int _linhaPISCA = 1;
int _colunaCORRENTE = 2;
int _linhaCORRENTE = 1;
const int TimeMostraCORRENTE = 250;
unsigned long _LastTimeCORRENTE = 0;

```

```
unsigned long _TimeCORRENTE = 0;
boolean _flagMostraCORRENTE = LOW;

//Variaveis de escolha de definicoes
boolean flagFUNC = LOW;
boolean flagGIRO = LOW;
boolean flagCCTO = LOW;
boolean flagCTRL = LOW;

float CORRENTE = 2.9543;

//Ponteiros de funcoes a serem setados de acordo com as definicoes do usuario
void (*TimeInterrupt)();
void (*LeituraCorrente)();
void (*Operacao)();

long int TesteAux =0;

boolean _flagInicioLeituraCorrente = LOW;
boolean _flagFimLeituraCorrente = LOW;
boolean _flagInterrupt = LOW;
float _Acumulador_S_CORRENTE = 0;
float _AcumuladorCORRENTE = 0;
int _contAcumuladorCORRENTE = 0;
int _cont_S_AcumuladorCORRENTE = 0;

unsigned long _LastTimeSobreCarga = 0;
boolean _flagSobreCarga = LOW;
unsigned long TimeSobreCarga = 2000; //Tempo de sobrecarga em us

boolean _auxPWMop = LOW;
boolean _auxSCRop = LOW;

uint8_t cont_ZCD = 0;

void setup() {
```



```

lcd.begin(16, 2);

Serial.begin(9600);    // set up Serial library at 9600 bps

pinMode(Botao_UP, INPUT);
pinMode(Botao_DOWN, INPUT);
pinMode(Botao_MODE, INPUT);

pinMode(pwmGATE, OUTPUT);
pinMode(scrGATE, OUTPUT);

pinMode(RelesGERAL, OUTPUT);
pinMode(RelesFUNC, OUTPUT);
pinMode(RelesGIRO, OUTPUT);
pinMode(RelesCCTO, OUTPUT);
pinMode(RelesCAPACITOR, OUTPUT);

TimeInterrupt = &Nada;
// Configuração do timer1

TCCR1A = 0;    //confira timer para operação normal pinos OC1A e OC1B desconectados
TCCR1B = 0;    //limpa registrador
TCCR1B |= (1<<CS10); // configura prescaler para : CS10 = 1, sem prescaler
TCNT1 = _TIMEtoINTERRUPT(pwmPERIODO);
TIMSK1 |= (1 << TOIE1); // habilita a interrupção do TIMER1

TIMSK1 &= ~(1 << TOIE1); // Desabilita interrupcao de tempo
TCCR1B = 0;
TCCR1B &= ~(1<<CS10); //Isto em conjunto com demais configuracoes: stop counter

//fim: Configuração do timer1

}

void loop(){
  if( !_flagINICIALIZA){ //INICALIZACAO

```

```

digitalWrite(RelesGERAL, LOW);
LeBotoes();
AcaoBotoes();
AtualizaLCDmenu();
_TransicaoTELAS();
}else{          //FIM DA INICALIZACAO
LeBotoes();
AcaoBotoes();
Operacao();
switch(Tela){
case 4:
AtualizaLCD(PWM_VOLTS, PWM_S_VOLTS);
break;

case 5:
AtualizaLCD(PWM_VELOC, PWM_S_VELOC);
break;

case 6:
AtualizaLCD(SCR_DISPARO, SCR_S_DISPARO);
break;

case 7:
AtualizaLCD(PWM_VOLTS, PWM_S_VOLTS);
break;

case 8:
AtualizaLCD(SCR_DISPARO, SCR_S_DISPARO);
break;

default:
break;
}
}
}
/*#####
LEITURA DE CORRENTE
#####
*/

```

```

void LeCorrente(){
  int _leituraCORRENTE;
  float _valor;
  if(!_flagInicioLeituraCorrente){
    _flagInicioLeituraCorrente = HIGH;
    _flagFimLeituraCorrente = LOW;
  }else{
    while(!_flagFimLeituraCorrente){
      _flagInterrupt = LOW;
      _leituraCORRENTE= analogRead(SensorCorrente);
      _valor = (float) _leituraCORRENTE;
      _valor = _valor * 5000.00 /1024.00;
      _valor = _valor - 2515.00; //ajuste de zero
      _valor = _valor/66.00 ;
      if(_valor >= 3.5){
        digitalWrite(pwmGATE, LOW);
        digitalWrite(scrGATE, LOW);
        _flagSTOP = HIGH;
      }
      else{
        if(_valor > 1.9){
          if(!_flagSobreCarga){
            _LastTimeSobreCarga = millis();
            _flagSobreCarga = HIGH;
          }else{
            if(millis()-_LastTimeSobreCarga > TimeSobreCarga){
              digitalWrite(pwmGATE, LOW);
              digitalWrite(scrGATE, LOW);
              _flagSTOP = HIGH;
            }
          }
        }
        else{
          _flagSobreCarga = LOW;
        }
      }
      //
      _AcumuladorCORRENTE += _valor;
      _contAcumuladorCORRENTE++;
      if(!_flagInterrupt){

```

```

_Acumulador_S_CORRENTE = _AcumuladorCORRENTE;
_cont_S_AcumuladorCORRENTE = _contAcumuladorCORRENTE;
if(!_flagInterrupt){
    _flagInicioLeituraCorrente = LOW;
    _flagFimLeituraCorrente = HIGH;
}else{
    _Acumulador_S_CORRENTE = _AcumuladorCORRENTE;
    _cont_S_AcumuladorCORRENTE = _contAcumuladorCORRENTE;
    _flagInicioLeituraCorrente = LOW;
    _flagFimLeituraCorrente = HIGH;
}
}else{
    _AcumuladorCORRENTE = _Acumulador_S_CORRENTE;
    _contAcumuladorCORRENTE = _cont_S_AcumuladorCORRENTE;
}
}
}
}
}
/*#####
LEITURA DOS BOTOES
#####
*/
void LeBotoes(){
    _LeituraBotao = digitalRead(Botao_UP);
    if (_LeituraBotao != _LastStateUP){
        _LastTimeUP = millis();
    }
    if (millis() - _LastTimeUP > DebounceTime){
        if (_LeituraBotao != _StateUP){
            _StateUP = _LeituraBotao;
        }
    }
    _LastStateUP = _LeituraBotao;
    _LeituraBotao = digitalRead(Botao_DOWN);
    if (_LeituraBotao != _LastStateDOWN){
        _LastTimeDOWN = millis();
    }
    if (millis() - _LastTimeDOWN > DebounceTime){
        if (_LeituraBotao != _StateDOWN){
            _StateDOWN = _LeituraBotao;
        }
    }
}

```

```

    }
}
_LastStateDOWN = _LeituraBotao;
_LeituraBotao = digitalRead(Botao_MODE);
if (_LeituraBotao != _LastStateMODE){
    _LastTimeMODE = millis();
}
if (millis() - _LastTimeMODE > DebounceTime){
    if (_LeituraBotao != _StateMODE){
        _StateMODE = _LeituraBotao;
    }
}
_LastStateMODE = _LeituraBotao;
}
/*#####
EXECUTA ACOES DOS BOTOES
#####
*/
void AcaoBotoes(){
    if (!_StateDOWN & !_StateUP & !_StateMODE){
        _flagHOLD = 0;
        _flagAuxHOLD = 0;
    }
    else {
        if (_StateDOWN & !_StateUP & !_StateMODE){
            AcaoDOWN();
        }
        if (_StateUP & !_StateDOWN & !_StateMODE){
            AcaoUP();
        }
        if(_StateMODE ){
            AcaoMODE();
        }
    }
}
/*#####
ACAO BOTAO DOWN
#####
*/
void AcaoDOWN(){

```

```
switch(Tela){

    case 0:
        TrocaOPCAO();
        break;

    case 1:
        TrocaOPCAO();
        break;

    case 2:
        TrocaOPCAO();
        break;

    case 3:
        TrocaOPCAO();
        break;

    case 4:
        if(_flagSELECT & (PWM_S_VOLTS > PWMvoltsMIN)){
            Decremento(PWM_S_VOLTS);
        }
        break;

    case 5:
        if(_flagSELECT & (PWM_S_VELOC > PWMvelocMIN)){
            Decremento(PWM_S_VELOC);
        }
        break;

    case 6:
        if(_flagSELECT & (SCR_S_DISPARO > SCRanguloMIN)){
            Decremento(SCR_S_DISPARO);
        }
        break;

    case 7:
        if(_flagSELECT & (PWM_S_VOLTS > PWMvoltsMIN)){
            Decremento(PWM_S_VOLTS);
```

```

}
break;

case 8:
if(_flagSELECT & (SCR_S_DISPARO > SCRanguloMIN)){
    Decremento(SCR_S_DISPARO);
}
break;

default:
break;
}
}

/*#####
ACAO BOTAO UP
#####
*/

void AcaoUP(){
switch(Tela){

    case 0:
TrocaOPCAO();
break;

    case 1:
TrocaOPCAO();
break;

    case 2:
TrocaOPCAO();
break;

    case 3:
TrocaOPCAO();
break;

    case 4:
if(_flagSELECT & (PWM_S_VOLTS < PWMvoltsMAX)){
    Incremento(PWM_S_VOLTS);
}
}
}

```

```

break;

case 5:
if(_flagSELECT & (PWM_S_VELOC < PWMvelocMAX)){
    Incremento(PWM_S_VELOC);
}
break;

case 6:
if(_flagSELECT & (SCR_S_DISPARO < SCRanguloMAX)){
    Incremento(SCR_S_DISPARO);
}
break;

case 7:
if(_flagSELECT & (PWM_S_VOLTS < PWMvoltsMAX)){
    Incremento(PWM_S_VOLTS);
}
break;

case 8:
if(_flagSELECT & (SCR_S_DISPARO < SCRanguloMAX)){
    Incremento(SCR_S_DISPARO);
}
break;

default:
break;
}
}
/*#####
ACAO BOTAO MODE: HABILITA/DESABILITA SELECAO
#####
*/
void AcaoMODE(){
if (!_flagHOLD){
    _flagHOLD = 1;
    _LastTimeHOLD = millis();
}
}

```



```

else{
  if (!_flagAuxHOLD){
    if (millis() - _LastTimeHOLD > TimeHOLD){
      _flagAuxHOLD = 1;
      _flagSELECT = !_flagSELECT;
    }
  }
}
}
/*#####
ACAO BOTAO DOWN: DECREMENTO
#####
*/
void Decremento(uint8_t &VAR){
  if (!_flagHOLD){
    VAR --;
    _flagHOLD = 1;
    _LastTimeHOLD = millis();
  }
  else{ //o botao esta pressionado
    if (!_flagAuxHOLD){
      if (millis() - _LastTimeHOLD > TimeHOLD){ //teste p/ saber se o usuario esta
        _flagAuxHOLD = 1; //mantendo pressionado por vontade propria
        _LastTimeHOLD = millis();
      }
    }
    else{
      if (millis() - _LastTimeHOLD > timeStillHOLDING){ //repeticao do comando a cada tempo
        VAR--; //timeStillHOLDING em us
        //SCR_S_DISPARO--;
        _LastTimeHOLD = millis();
      }
    }
  }
}
/*#####
ACAO BOTAO UP: INCREMENTO
#####
*/
void Incremento(uint8_t &VAR){

```

```

if (!_flagHOLD){
    VAR++;
    _flagHOLD = 1;
    _LastTimeHOLD = millis();
}
else{

if (!_flagAuxHOLD){

    if (millis() - _LastTimeHOLD > TimeHOLD){
        _flagAuxHOLD = 1;
        _LastTimeHOLD = millis();
    }
}
else{

    if (millis() - _LastTimeHOLD > timeStillHOLDING){
        VAR++;
        _LastTimeHOLD = millis();
    }
}
}

/*#####
ACAO BOTAO DOWN e UP (MENU): Troca Opcao
#####
*/
void TrocaOPCAO(){
    if (!_flagHOLD){
        _flagPosTELA = !_flagPosTELA;
        _flagHOLD = 1;
    }
}
/*#####
ATUALIZA LCD
#####

```

```

*/
void AtualizaLCD(uint8_t VAR, uint8_t S_VAR){
  if (millis() - _LastTimeCORRENTE > TimeMostraCORRENTE){

    //
    CORRENTE = (float)_AcumuladorCORRENTE/_contAcumuladorCORRENTE;
    _AcumuladorCORRENTE = 0;
    _contAcumuladorCORRENTE = 0;
    _Acumulador_S_CORRENTE = 0;
    _cont_S_AcumuladorCORRENTE = 0;

    //

    lcd.setCursor(_colunaCORRENTE, _linhaCORRENTE);
    lcd.print(CORRENTE,2);
    //lcd.setCursor((_colunaCORRENTE + 3), _linhaCORRENTE);
    //lcd.print("A");
    _LastTimeCORRENTE = millis();
  }
  lcd.setCursor(_colunaPISCA, _linhaPISCA); //posiciona cursor pra escrita em 'DISPARO'
  if (_flagSELECT){ //se select ativo, pisca variavel DISPARO, TENSAO ou VELOC
    if (millis() - _LastTimePISCA > TimePISCA){
      _LastTimePISCA = millis();
      _flagPISCA = !_flagPISCA;
    }
    if(flagCTRL){
      if (_flagPISCA){
        lcd.print(" ");
      }
      else{
        lcd.print(S_VAR*20);
        if(S_VAR*20 < 1000){
          lcd.print(" ");
          if (S_VAR*20 < 100){
            lcd.print(" ");
          }
        }
      }
    }
  }
}

```

```

}
else{
  if (_flagPISCA){
    lcd.print(" ");
  }
  else{
    lcd.print(S_VAR);
    if(S_VAR < 100){
      lcd.print(" ");
      if (S_VAR < 10){
        lcd.print(" ");
      }
    }
  }
}
else{
  if(flagCTRL){
    lcd.print(VAR*20);
    if(VAR*20 < 1000){
      lcd.print(" ");
      if (VAR*20 < 100){
        lcd.print(" ");
      }
    }
  }
  else{
    lcd.print(VAR);
    if(VAR < 100){
      lcd.print(" ");
      if (VAR < 10){
        lcd.print(" ");
      }
    }
  }
}
}
/*#####
MSG_LCD: Escreve mensagens pre programadas no LCD
#####

```

```
*/  
void MSG_LCD(uint8_t VAR){  
    switch(VAR){  
        case 0:  
            lcd.setCursor(0, 0);  
            lcd.print("Funcionalidade: ");  
            lcd.setCursor(0, 1);  
            lcd.print("Motor ");  
            lcd.print("Fonte Ext.");  
            break;  
  
        case 1:  
            lcd.setCursor(0, 0);  
            lcd.print("Sentido de giro:");  
            lcd.setCursor(0, 1);  
            lcd.print("Clock ");  
            lcd.print(" Anticlock");  
            break;  
  
        case 2:  
            lcd.setCursor(0, 0);  
            lcd.print("Circuito:  ");  
            lcd.setCursor(0, 1);  
            lcd.print("PWM  ");  
            lcd.print("SCR  ");  
            break;  
  
        case 3:  
            lcd.setCursor(0, 0);  
            lcd.print("Variavel de Ctrl");  
            lcd.setCursor(0, 1);  
            lcd.print("Tensao");  
            lcd.print(" Veloc.  ");  
            break;  
  
        case 4:  
            lcd.setCursor(0, 0);  
            lcd.print("Ctrl PWM1 I=  A");  
            lcd.setCursor(0, 1);  
            lcd.print("w=  RPM V=  V");
```

```

break;

case 5:
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Ctrl PWM2 I= A");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("w= RPM V= V");
break;

case 6:
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Ctrl SCR ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("I= A D= ");
lcd.print((char)223);
break;

case 7:
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Fonte Ext. PWM ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("I= A V= V");
break;

case 8:
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Fonte Ext. SCR ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("I= A D= ");
lcd.print((char)223);
break;

default:
break;
}
}
/*#####
Atualiza LCD (Menu): Escreve msgs e pisca LCD para telas de inicializacao
#####
*/

```

```

void AtualizaLCDmenu(){
  if ( !_flagSELECT){ //se select = LOW, nenhuma opcao foi selecionada
    //pisca opcoes a serem escolhidas
    if (millis() - _LastTimePISCA > TimePISCA){
      _LastTimePISCA = millis();
      _flagPISCA = !_flagPISCA;
    }
    if (_flagPISCA){
      if(!_flagPosTELA){
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("  ");
      }else{
        lcd.setCursor(6, 1);
        lcd.print("  ");
      }
    }
    else{
      MSG_LCD(Tela);
    }
  }
  else{
    MSG_LCD(Tela);
  }
}

/*#####
Transicao de Telas (Menu): Coordena a mudança de telas do menu e
configura as ligacoes, as variaveis e interrupcoes de acordo com
as escolhas do usuario
#####
*/

void _TransicaoTELAS(){
  if(_flagSELECT){
    _flagTRANSICAOTela = HIGH;
  }
  if(_flagTRANSICAOTela & !_StateMODE){
    switch(Tela){
      case 0: //Escolha da Funcionalidade
        flagFUNC = _flagPosTELA; //Funcionalidade salva -> 0 Motor, 1 -> Fonte Ext.
        if(!flagFUNC){
          Tela = 1; //Escolha do Sentido de Giro
        }
    }
  }
}

```

```

}else{
  Tela = 2;      //Escolha do Circuito
}
_flagTRANSICAOfela = LOW;
_flagPosTELA = LOW;
_flagSELECT = LOW;
break;

case 1:      //Escolha do Sentido de Giro
flagGIRO = _flagPosTELA; //Sentido do giro salvo -> 0 Horario, 1 -> Anti Horario
Tela = 2;    //Escolha do Circuito
_flagTRANSICAOfela = LOW;
_flagPosTELA = LOW;
_flagSELECT = LOW;
break;

case 2:      //Escolha do Circuito
flagCCTO = _flagPosTELA; //Tipo de Circuito salvo -> 0 PWM, 1 -> SCR
if(flagFUNC){
  if(!flagCCTO){
    Tela = 7;    //Fonte Ext. PWM
    ConfiguraTELA();
    _flagINICIALIZA = HIGH;
  }else{
    Tela = 8;    //Fonte Ext. SCR
    ConfiguraTELA();
    _flagINICIALIZA = HIGH;
  }
}
}else{
  if(!flagCCTO){
    Tela = 3;    //Escolha da Variavel de Controle (PWM)
  }else{
    Tela = 6;    //Controlador Motor - SCR
    ConfiguraTELA();
    _flagINICIALIZA = HIGH;
  }
}
_flagTRANSICAOfela = LOW;
_flagPosTELA = LOW;
_flagSELECT = LOW;

```



```

break;

case 3:    //Escolha da Variavel de Controle (PWM)
flagCTRL = _flagPosTELA; //Varivel de controle salva -> 0 Tensao, 1 -> Velocidade
if(!flagCTRL){
    Tela = 4; //Controlador Motor - PWM - Tensao
    ConfiguraTELA();
    _flagINICIALIZA = HIGH;
} else{
    Tela = 5; //Controlador Motor - PWM - Velocidade
    ConfiguraTELA();
    _flagINICIALIZA = HIGH;
}
_flagTRANSICAOTela = LOW;
_flagPosTELA = LOW;
_flagSELECT = LOW;
break;

default:
Tela = 0;
_flagTRANSICAOTela = LOW;
_flagPosTELA = LOW;
_flagSELECT = LOW;
break;
}
}
//delay(2000);
//
}
/*#####
ConfiguraTELA: Configuracao Final da aplicacao escolhida pelo usuario
#####
*/
void ConfiguraTELA(){
MSG_LCD(Tela);
switch(Tela){
case 4:
//Ajustes LCD
_colunaCORRENTE = 12;
_linhaCORRENTE = 0;

```

```
//TimeInterrupt = &PWM_TimerInterrupt;
//TimeInterrupt = &Teste;
Operacao = &PWM_Operacao;
//PWM_SetTMR1();
digitalWrite(RelesCCTO, HIGH); //PWM
digitalWrite(RelesFUNC, HIGH); //MOTOR
```

```
break;
```

```
case 5:
```

```
//Ajustes LCD
_colunaPISCA = 2;
_colunaCORRENTE = 12;
_linhaCORRENTE = 0;
```

```
//TimeInterrupt = &PWM_TimerInterrupt;
//TimeInterrupt = &Teste;
Operacao = &PWM_Operacao;
//PWM_SetTMR1();
digitalWrite(RelesCCTO, HIGH); //PWM
digitalWrite(RelesFUNC, HIGH); //MOTOR
```

```
break;
```

```
case 6:
```

```
//Nao necessita de ajustes do LCD
```

```
Operacao = &SCR_Operacao;
```

```
digitalWrite(RelesCCTO, LOW); //SCR
digitalWrite(RelesFUNC, HIGH); //MOTOR
```

```
break;
```

```
case 7:
```

```
//Nao necessita de ajustes do LCD
```

```
Operacao = &PWM_Operacao;
```

```

//TimeInterrupt = &PWM_TimerInterrupt;
//TimeInterrupt = &Teste;
//PWM_SetTMR1();

digitalWrite(RelesCCCTO, HIGH); //PWM
digitalWrite(RelesFUNC, LOW); //FONTE EXT

break;

case 8:
//Nao necessita de ajustes do LCD

Operacao = &SCR_Operacao;

digitalWrite(RelesCCCTO, LOW); //SCR
digitalWrite(RelesFUNC, LOW); //FONTE EXT

break;

default:
break;
}
digitalWrite(RelesGIRO, flagGIRO);
delay(2000);
digitalWrite(RelesGERAL, HIGH); //espera 2 seg e liga o sistema previamente interligado
}
/*#####
INTERRUPCAO TEMPO TIMER1
#####
*/

ISR(TIMER1_OVF_vect) //interrupção do TIMER1
{
_flagInterrupt = HIGH; //sinaliza ocorrencia da interrupcao
TimeInterrupt();
}

/*#####
INTERRUPCAO TEMPO: PWM
#####

```

```

*/
void PWM_TimerInterrupt(){
  if( !_flagINICIALIZA || !_flagSTOP){
    //acao em caso de nao inicializacao ou de STOP
    digitalWrite(pwmGATE, LOW); //OFF
  }else{
    if(_flagCICLOpwm){          //periodo anterior ON? -> Atual TOFF!
      digitalWrite(pwmGATE, LOW); //off
      TCNT1 = _TIMEtoINTERRUPT(_pwmTOFF); //configura timer1 para TOFF
      _pwmTON = round(((PWM_VOLTS
PWM_Ajuste_Sub)/TensaoRetificada*PWM_Ajuste_Mult)*pwmPERIODO);
      _pwmTOFF = pwmPERIODO - _pwmTON;
      _flagCICLOpwm = 0;
    }else{          //periodo anterior OFF? -> Atual TON!
      digitalWrite(pwmGATE, HIGH); //ON
      TCNT1 = _TIMEtoINTERRUPT(_pwmTON); //configura timer1 para TON
      _flagCICLOpwm = 1;
    }
  }
}

/*#####
Converte tempo em us para interrupcao de tempo
#####
*/
unsigned int _TIMEtoINTERRUPT(int time){ //time em us
  return (unsigned int) 65536 - 16*time;
}

/*(Tamanho do contador) - (clock/prescaler)*tempo
2^16 - ((16*10^6)/1)* time*10^-6
65536 - 16*time*/
/*#####
Atualiza Tensao PWM
#####
*/
void _pwmAtualizaTENSAO(){
  if(!_flagSELECT){
    if(millis() - _LastTimeAtualTENSAO > TimeAtualTENSAO){
      if(PWM_VOLTS < PWM_S_VOLTS){
        PWM_VOLTS++;
      }else{

```

```

    if(PWM_VOLTS > PWM_S_VOLTS){
        PWM_VOLTS--;
    }
}
_LastTimeAtualTENSAO = millis();
}
}
}
/*#####
PWM_Operacao: Tarefas a serem executadas quando PWM for escolhido
#####
*/
void PWM_Operacao(){

    if (!_auxPWMop){
        delay(10000);
        digitalWrite(RelesCAPACITOR, HIGH);
        TimeInterrupt = &PWM_TimerInterrupt;
        PWM_SetTMR1();

        _auxPWMop = HIGH;
    }

    _pwmAtualizaTENSAO();
}
/*#####
PWM_SetTMR1
#####
*/
void PWM_SetTMR1(){
    TCNT1 = _TIMEtoINTERRUPT(pwmPERIODO);
    TCCR1B |= (1<<CS10); //Start counter com prescaler = 8
    TIMSK1 |= (1 << TOIE1); // habilita a interrupção do TIMER1
}

/*#####
SCR_Operacao: Tarefas a serem executadas quando SCR for escolhido
#####
*/

```

```

void SCR_Operacao(){
  if (!_auxSCRop){
    delay(1000);
    TimeInterrupt = &SCR_TimerInterrupt;
    SCR_SetTMR1();
    attachInterrupt(0,SCR_ZCDInterrupt,FALLING); //Ativa Interrupcao Externa

    _auxSCRop = HIGH;
  }
  // if(!_flagSELECT){
  // _scrAtualizaDISPARO();
  // }
}

/*#####
SCR_SetTMR1
#####
*/
void SCR_SetTMR1(){
  TCNT1 = _Time_SCR_DISPARO;
  TCCR1B |= (1<<CS11); // configura prescaler para : CS11 = 1
  TIMSK1 |= (1 << TOIE1); // habilita a interrupção do TIMER1

  TIMSK1 &= ~(1 << TOIE1); // Desabilita interrupcao de tempo
  TCCR1B = 0;
  TCCR1B &= ~(1<<CS11); //Isto em conjunto com demais configuracoes: stop counter
}

/*#####
SCR_ZCDInterrupt
#####
*/
void SCR_ZCDInterrupt(){
  _flagInterrupt = HIGH;
  if(_flagINICIALIZA){ //teste dispensavel
    detachInterrupt(0); //desliga interrupcao externa
    TCNT1 = _Time_SCR_DISPARO; //reseta time para angulo de disparo
    TCCR1B |= (1<<CS11); //Start counter com prescaler = 8
    TIMSK1 |= (1 << TOIE1); // habilita a interrupção do TIMER1
    digitalWrite(SCR_GATE, LOW); //Garante fim do disparo
  }
}

```

```

}
}
/*#####
ATUALIZA TEMPO DE DISPARO DO TIRISTOR
#####
*/
void _scrAtualizaDISPARO(){
    _Time_Aux_SCR = (unsigned int) (SCR_DISPARO * 92.593);
    _Time_SCR_DISPARO = Time_SCR_ZERO_GRAU - _Time_Aux_SCR;
    //T = (DISPARO/360)*1 000 000 /60;// tempo em micro segundos
    //
    //T = DISPARO * 46.296 (micro segundos/graus)
    //
    //Ajuste do time para TIMER1
    /*(tam do cont.)- (clock/prescaler)*(periodo)
(16 bits) - (16MHz /8) * T (us)
65536 -(16MHz/8)*T(us) = 65536 -(16MHz/8)*T(us) = 65536 - 2 * T (us)
65536 - 2*(DISPARO * 46.296)
Ainda tem o ajuste de zero...
TimeZero - DISPARO * 92.593
*/
    if (SCR_DISPARO != SCR_S_DISPARO){
        if (_flagATUALIZA_DISPARO){
            _timeSCRauxATUALIZA = millis();
            _timeSCRauxATUALIZAlimite = (int) ConstAtualizaDisparo*sin(SCR_DISPARO*(3.1415/180));
            _flagATUALIZA_DISPARO = LOW;
        }else{
            if( millis() - _timeSCRauxATUALIZA >= _timeSCRauxATUALIZAlimite){
                _flagATUALIZA_DISPARO = HIGH;
                if (SCR_DISPARO > SCR_S_DISPARO){
                    SCR_DISPARO--;
                }else{
                    SCR_DISPARO++;
                }
            }
        }
    }
}
/*#####
INTERRUPCAO TEMPO: SCR

```

```

#####
*/
void SCR_TimerInterrupt(){
  _flagInterrupt = HIGH;
  if(!_aux_SCR_TimerInterrupt){
    _cont_SCR_TimerInterrupt++;
    if(_cont_SCR_TimerInterrupt > 10){
      _aux_SCR_TimerInterrupt = HIGH;
    }
    attachInterrupt(0,SCR_ZCDInterrupt,FALLING); //Religa Interrpcao Ext.
  }
  else{
    if(_flagINICIALIZA && !_flagSTOP){ //CONFIRMAR ISTO
      if (_flag_SCR_GATE == LOW){
        digitalWrite(scrGATE, HIGH); //Efetua disparo
        TCNT1 = Time_SCR_PULSO;
        _flag_SCR_GATE = HIGH;

        if (!_flagSELECT){ //colocar mais uma trava,
          _scrAtualizaDISPARO(); //mudanca na variavel DISPARO
        }
      }else{
        TIMSK1 &= ~(1 << TOIE1); // Desabilita interrupcao de tempo
        TCCR1B = 0;
        //TCCR1B &= ~(1<<CS11); //Isto em conjunto com demais configuracoes: stop counter
        _flag_SCR_GATE = LOW;
        digitalWrite(scrGATE, LOW); //Encerra disparo
        attachInterrupt(0,SCR_ZCDInterrupt,FALLING); //Religa Interrpcao Ext.
      }
    }else{
      digitalWrite(scrGATE, LOW);
    }
  }
}
/*#####
Nada
#####
*/
void Nada(){}
```


ANEXO A – Dados dos fabricantes do MOTOR e DO MC183

Abaixo seguem: fotografia da placa do motor; dados retirados do manual do MC183, que correspondem ao esquema de ligação e explicação de seu funcionamento.

Figura 76 – Placa do Motor.

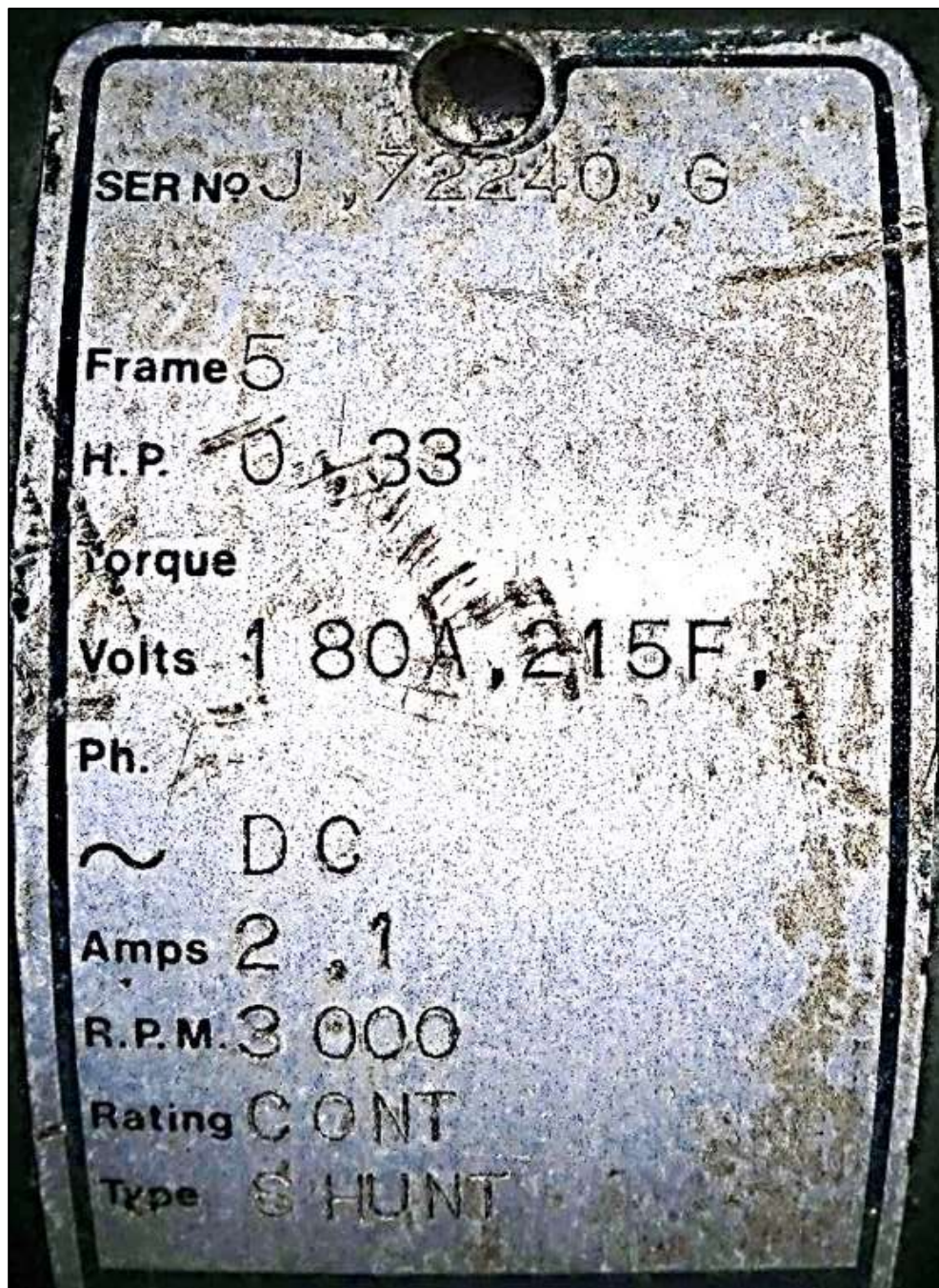


Figura 77 – Notas Acerca do Funcionamento do MC183.

SECTION 5

CIRCUIT NOTES AND MAINTENANCE

Refer to Drawings 3-181-5416 and 3-182-5752

MC183 motor/controller

With the selector switch S3 set to 'internal' the full wave diode bridge supplies 215V mean d.c to the motor field and to the armature via thyristor SCR1. The thyristor is phase controlled by the trigger circuit consisting of the unijunction transistor TR1 and pulse transformer T1. The point on each half cycle at which TR1 will trigger is determined by the time constant R14 C3 and the level of applied voltage set by resistors R8, R11 and preset resistor R10.

The input voltage to the trigger circuit is proportional to the difference between the d.c supply and the back emf of the motor armature. With the motor initially running at a steady speed, an increase in shaft load causes a decrease in speed and a reduction in back emf. This increases the trigger circuit input voltage causing firing to occur earlier in the cycle, so raising the mean d.c applied to the armature and increasing shaft speed to partly compensate for the effect of shaft loading. Diodes D9, D10, resistors R12, R13 and capacitor C2 delay the triggering of TR1 on first switching on.

The overcurrent trip is actuated by the voltage appearing across R5 and R6, and is proportional to the load current of thyristor CSR1. This voltage is added to the d.c level set by resistors R18, R21 and the preset resistor R19. When the sum of these exceeds the peak voltage of unijunction transistor TR2 a trigger pulse will be applied to the gate of thyristor CSR2, grounding TR1 through diode D11. This prevents further operation of the thyristor SCR1 and reduces load current to zero. The overcurrent trip thyristor CSR2 is reset by operation of switch S2 which is integral with the speed control resistor R14.

With switch S3 set to 'internal' the armature voltage may be monitored by an unearthed oscilloscope connected to the 4mm sockets on the front panel. These sockets are connected to the armature supply points through 100k Ω resistors R2 and R3. The power diode D7 is connected across the motor armature to carry the inductive current surge when the thyristor turns off. With the selector switch S3 in the 'external' position the thyristor controlled output voltage is applied through resistor R2 to the two 4mm terminals on the front panels.

Low speed setting - with the speed control resistor R14 set to minimum and with zero shaft loading, adjust the preset R10 to give a shaft speed between 250 and 300 rev/min. (R10 is the front preset, accessible when drive unit is turned on its side.)

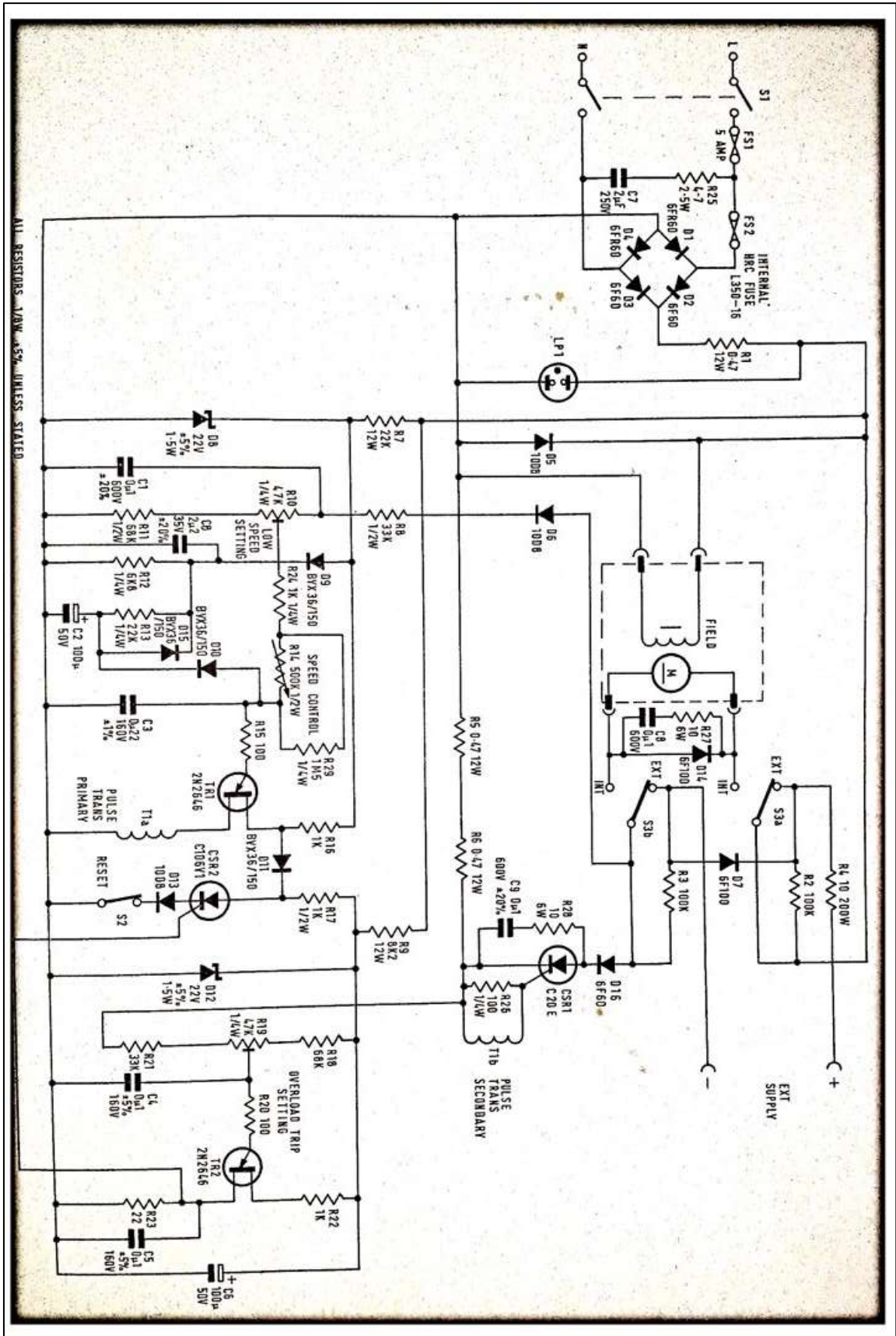
Overcurrent trip - fit the brake pulley to the shaft and prevent its rotation either by hand or by clamping with the friction brake. Connect a 0 - 5A a.c ammeter in the a.c supply line and turn the preset resistor R19 fully counter-clockwise. (R19 is the rear preset, accessible when drive unit is turned on its side.)

Turn the variable speed control clockwise until the input current reaches the desired trip value, normally 4A, then turn the preset R19 clockwise until the trip circuit operates.

Internal HRC fuse link - International Rectifier L350-16. This high speed fuse protects the diode bridge and load thyristor against heavy current overloads.

Panel mounted anti-surge fuse link - Beswick TDC11/5A antisurge. This protects the unit against sustained overcurrents, large enough to cause damage to the motor etc, but within the current rating of the diode bridge and thyristor.

Figura 78 – MC183: Circuito Interno.



Fonte: FEEDBACK INSTRUMENTS LIMITED, [197-?].