

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DANILO CARVALHO DE GOUVEIA
FABRICIO DE ANDRADE
PHELLYPE MAXIMINO BALTAZAR

**ESTUDO E SIMULAÇÃO DE CONTROLE DE TORQUE EM SISTEMAS
SERVOACIONADOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2013

DANILO CARVALHO DE GOUVEIA
FABRICIO DE ANDRADE
PHELLYPE MAXIMINO BALTAZAR

ESTUDO E SIMULAÇÃO DE CONTROLE DE TORQUE EM SISTEMAS SERVOACIONADOS

Trabalho de Conclusão de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2 do Curso Superior de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica - (DAELT) - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Winderson Eugenio dos Santos

CURITIBA

2013

Danilo Carvalho De Gouveia
Fabricio De Andrade
Phellype Maximino Baltazar

Estudo e Simulação de Controle de Torque em Sistemas Servoacionados

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 10 de abril de 2013.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Winderson Eugenio dos Santos, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Winderson Eugenio dos Santos, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Joaquim Eloir Rocha, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Aos nossos pais, por serem responsáveis por nossa formação.

Aos familiares e amigos, por muitos momentos nos fazermos ausentes.

Aos amores, por toda compreensão e carinho despendido.

AGRADECIMENTOS

A Deus por nos dar forças, pelo ânimo em momentos difíceis e na ajuda através das escolhas realizadas.

Ao Dr. Winderson Eugenio dos Santos, por nos orientar e conceder instruções importantes na realização deste trabalho.

À EngeMOVI por nos receber em suas instalações e nos permitir realizar os ensaios e testes relacionados ao servomotor utilizado e a Fernando de Assis, que nos auxiliou nos experimentos, sempre dando apoio técnico e profissional durante os experimentos para a conclusão do estudo.

Aos nossos amigos, familiares e amores por nos apoiar e aconselhar com sabedoria e paciência nos momentos difíceis, fazendo-nos superar os obstáculos.

RESUMO

GOUVEIA, Danilo C.; ANDRADE, Fabricio de; BALTAZAR, Phellype M. Estudo e Simulação de Controle de Torque em Sistemas Servoacionados. 2013. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

O presente estudo propõe demonstrar como é realizado o controle de torque em servomotores com a finalidade de auxiliar no desenvolvimento de um sistema servoacionado. Foi realizada uma revisão bibliográfica dos assuntos de interesse ao desenvolvimento do estudo. A modelagem matemática de um servomotor síncrono de ímãs permanentes é demonstrada a partir do modelo de um motor síncrono convencional, com o objetivo de parametrizar o sistema e fundamentar a simulação do servomotor em *LabVIEW*. Foram obtidas as características físicas do servomotor real para a simulação equivalente do mesmo. Testes em laboratório foram realizados com programação em *Ladder*, para atribuir o controle PID do servoconversor, em conjunto com a instrumentação virtual em *LabVIEW*, para atribuir os parâmetros de funcionamento, com a finalidade de recolher resultados a partir de formas diferentes de controle realizadas. Estes parâmetros foram implementados na simulação e as comparações foram devidamente comentadas. Através das análises e estudo do servomotor a ser utilizado no sistema servoacionado pôde-se conhecer suas características, comportamento e as limitações que ele oferece.

Palavras-chave: Servomotor. *LabVIEW*. Controle de torque.

ABSTRACT

GOUVEIA, Danilo C.; ANDRADE, Fabricio de; BALTAZAR, Phellype M. Study and Simulation of Torque in Servo Driven Systems. 2013. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

The present study proposes to demonstrate how the torque control is performed in servomotors in order to assist in the development of a servo driven system. Literature review was collected on topics of interest to the development of the study. Mathematical modeling of permanent-magnet synchronous servomotor was demonstrated from the model of a conventional synchronous motor, in order to parameterize the system and support the simulation of servomotor in LabVIEW. Were obtained physical characteristics of the real servomotor for the equivalent simulation. Laboratory tests were performed with programming in Ladder, to assign the PID control of the servo controller, together with virtual instrumentation in LabVIEW, for assigning the operating parameters for the purpose to collect the results from different forms of control performed. These parameters were implemented in the simulation and comparisons were duly commented. Through the analysis and study of the servomotor to be used in the servo driven system, we could learn its characteristics, behavior and the limitations that it offers.

Keywords: Servo motor. *LabVIEW*. Torque control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Robô para soldagem com colocação de pino por atrito	16
Figura 2 - Esquemático dos materiais e equipamentos utilizados	17
Figura 3 - Representação de um sistema de controle em malha aberta	21
Figura 4 - Representação de um sistema de controle em malha fechada	22
Figura 5 - Comportamento estável e instável, respectivamente	22
Figura 6 - Diagrama de bloco e equações do PID	24
Figura 7 - PID - $K_p=4$; $T_i=1.5$; $T_d=0.1$ (tracejado), 0.4(pontilhado), 2(contínuo)	24
Figura 8 - Secção longitudinal de um servomotor síncrono com <i>resolver</i> e freio	25
Figura 9 - Vista de corte de um Servomotor CC com ímãs permanentes	28
Figura 10 - Vista de corte do servomotor CC sem escovas	29
Figura 11 - Diagrama simplificado do dispositivo de comutação Efeito Hall (HED) do motor CC sem escovas	30
Figura 12 - Construções do rotor do servomotor síncrono de ímã permanente	32
Figura 13 - Vista explodida de um <i>resolver sem escovas</i>	34
Figura 14 - Princípio de operação do <i>resolver</i>	35
Figura 15 - Extensômetro unidirecional simples	39
Figura 16 - Amplificador operacional genérico	39
Figura 17 - Amplificador de medição industrial	40
Figura 18 - Sistema interno de um servoconversor	41
Figura 19 - Realimentação do sistema	41
Figura 20 - Malhas de controle do servoconversor	42
Figura 21 - Diagrama elétrico de uma partida direta Fonte: Autoria própria	43
Figura 22 - Diagrama <i>Ladder</i> de uma partida direta	43
Figura 23 - Exemplo de VI - Painel Frontal e Diagrama de Blocos	45
Figura 24 - Servomotor WEG SWA	47
Figura 25 - Curva de torque do servomotor modelo SWA-40 WEG de 3000 rpm	47
Figura 26 - Circuito equivalente das equações dinâmicas de um MSIP	51
Figura 27 - Diagrama do controle de corrente	53
Figura 28 - Diagrama do controle instantâneo	53
Figura 29 - Diagrama do controle instantâneo com estimador	54
Figura 30 - Modelo de instrumento virtual	54

Figura 31 - Função Loop WHILE e Loop FOR	55
Figura 32 - Control Design & Simulation	55
Figura 33 - Principais funções da Simulação	56
Figura 34 - Instrumento virtual MB Serial Init	57
Figura 35 - Site National Instruments para download Modbus library for <i>LabVIEW</i> ..	57
Figura 36 - Instrumento virtual MB Serial Master Query Read Coil (poly)	58
Figura 37 - Comunicação do servoconversor com o computador pela USB.	59
Figura 38 - Expansão das conexões.	60
Figura 39 - Bloco de expansão Eco 1.	60
Figura 40 - Ambiente de trabalho do <i>WLP</i>	63
Figura 41 - Modelagem do Movimento.....	65
Figura 42 - Modelagem do torque fornecido pelo servomotor	66
Figura 43 - Modelagem de Id	66
Figura 44 - Modelagem de Iq	66
Figura 45 - Modelagem do posicionamento angular.	67
Figura 46 - Modelagem da alimentação do servomotor	67
Figura 47 - Parâmetros do servomotor MSIP - Painel Frontal.....	69
Figura 48 - VI para levantamento da curva P0067 x Torque - Diagrama de Blocos..	70
Figura 49 - Hierarquia de Sub-VIs do controle de torque	70
Figura 50 - Transformações em VIs	71
Figura 51 - Simulação para gerar o P0067	71
Figura 52 - Arquivamento do sinal.....	71
Figura 53 - Set Point de torque	72
Figura 54 - Leitura do parâmetro simulado P0067	72
Figura 55 - Esquemático global do ensaio	73
Figura 56 - VI ModBUS para levantamento da curva P0067 x Torque - Diagrama de Blocos	74
Figura 57 - VI ModBUS para levantamento da curva P0067 x Torque - Estrutura hierárquica das VIs	74
Figura 58 - Utilização do <i>Wire mode</i>	75
Figura 59 - VI <i>Config WEG</i>	75
Figura 60 - Composição da VI <i>Config WEG</i>	75
Figura 61 - Lógica de Escrita.....	76

Figura 62 - Leitura dos valores.....	76
Figura 63 - Processamento dos dados obtidos	76
Figura 64 - Close VI	77
Figura 65 - Esquemático da Close VI.....	77
Figura 66 - Leitura do parâmetro P0067	77
Figura 67 - Leitura do parâmetro simulado P0067 comparado	78
Figura 68 - VI para levantamento da resposta ao degrau de 0,49 N.m.....	79
Figura 69 - Set Point de torque	79
Figura 70 - Leitura da tensão amplificada	80
Figura 71 - Detalhe da leitura da tensão amplificada	80
Figura 72 - Esquemático global do ensaio prático utilizando osciloscópio digital.....	81
Figura 73 - Tempo de acionamento: chave de entrada (vermelho) saída X1 (azul)..	82
Figura 74 - Sinais de saída: sinal enviado (vermelho) e sinal X1 (azul)	82
Figura 75 - Controle de torque através da Corrente.....	84
Figura 76 - Resultados para o <i>Swept Sine</i>	85
Figura 77 - Controle de torque por controle direto.....	86
Figura 78 - Resultado para o <i>Swept Sine</i> com torque direto.....	87
Figura 79 - <i>Swept sine</i> de 1 minuto.....	88
Figura 80 - <i>Swept sine</i> com variação de 0,6 segundos e 60 Hz.....	89
Figura 81 - Montagem do sistema.....	90
Figura 82 - Programa de supervisão	90
Figura 83 - Programação do modo de execução	91
Figura 84 - Parâmetros do usuário no programa <i>Ladder</i>	92
Figura 85 - PID do programa <i>Ladder</i>	93
Figura 86 - Painel frontal do programa para aplicar os <i>setpoint</i>	94
Figura 87 - Diagrama de blocos do programa para aplicar os <i>setpoints</i>	95
Figura 88 - Parâmetros de usuário do programa <i>Ladder</i> para controle de corrente via célula de carga	96
Figura 89 - PID do programa <i>Ladder</i> para controle de corrente via célula de carga .	97
Figura 90 - Transformação torque em força.....	109
Figura 91 - Vista geral da VI da transformação torque em força	109
Figura 92 - Transformação força (Newton) em força (kgf)	109
Figura 93 - Vista geral da VI da transformação de força (Newton) em força (kgf)...	109

Figura 94 - Transformação força (kgf) em tensão amplificada	110
Figura 95 - Vista geral da VI da transformação de força em tensão amplificada	110
Figura 96 - Transformação tensão amplificada em valor do parâmetro P0067	110
Figura 97 - Vista geral da VI da transformação de tensão amplificada em valor do parâmetro P0067	110
Figura 98 - VI da ponte de IGBT	111
Figura 99 - Detalhamento da VI da ponte de IGBT	111
Figura 100 - VI de geração do PWM	112
Figura 101 - Detalhamento da VI da geração do PWM.....	112
Figura 102 - VI da transformada de Park	112
Figura 103 - Detalhamento da VI da transformada de Park	112
Figura 104 - VI da inversa de Park.....	113
Figura 105 - Detalhes da VI da transformada inversa de Park.....	113
Figura 106 - VI da transformada de Clarke	113
Figura 107 - Detalhe da VI da transformada de Clarke	113

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características de vários tipos de motores em aplicações de controle de movimento	33
Quadro 2 - Comparação <i>Resolver</i> x <i>Encoder</i>	36
Quadro 3 - Especificação da conexão XA122 para RS232.....	61
Quadro 4 - Especificação da conexão XA123 para RS485.....	62
Quadro 5 - Especificação da conexão XA121 para RS232 e RS485	62
Quadro 6 - Resumo da modelagem do MSIP.....	65
Quadro 7 - Características físicas do servomotor.	68
Quadro 8 - Parâmetros dos ganhos do PID.	68
Quadro 9 - Parâmetros dos ganhos.	107

LISTA DE SIGLAS

Al-Ni-Co	Alumínio-níquel-cobalto
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
DC	<i>Direct current</i>
DDT	<i>Differential data transmission</i>
EIA	<i>Electronics Industry Association</i>
HED	<i>Hall effect device</i>
LED	<i>Light-emitting diode</i>
LVDT	<i>Linear variable differential transformer</i>
LVT	<i>Linear velocity transducer</i>
MSIP	Motor síncrono de ímãs permanentes
PID	Proporcional integral derivativo
PMSM	<i>Permanent magnet synchronous motor</i>
PWM	<i>Pulse-width modulation</i>
SDT	<i>Single-ended transmission</i>
ADTs	<i>Angular displacement transducers</i>
VI	<i>Virtual instrument</i>
WLP	<i>WEG Ladder Programmer</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$u(t)$	Sinal de controle
$r(t)$	Sinal de referência
$e(t)$	Sinal de erro
$y(t)$	Saída
K_p	Ganho proporcional
K_i	Ganho integral
K_d	Ganho derivativo
T_i	Constante de tempo integral
T_d	Constante de tempo diferencial
U	Vetor tensão
R	Resistência
I	Corrente
Ψ	Enlace de fluxo magnético
L	Indutância
λ_0	Fluxo do ímã
i_d	Corrente de eixo direto
i_q	Corrente de eixo de quadratura
L_d	Indutância de eixo direto
L_q	Indutância de eixo de quadratura
θ_e	Posição angular elétrica do rotor
ω_e	Velocidade angular elétrica do rotor
ω_r	Velocidade angular mecânica do rotor
e	Força contra-eletromotriz induzida
τ_e	Torque eletromagnético
τ_l	Torque de carga
K	Constante de torque
J	Momento de inércia
P	Potência mecânica do servomotor
N	Número de pares de pólos do servomotor
B	Constante de amortecimento rotacional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. TEMA.....	15
1.1.1. Delimitação do Tema.....	15
1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS.....	15
1.3. OBJETIVOS.....	18
1.3.1. Objetivo Geral.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos.....	18
1.4. JUSTIFICATIVA.....	18
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	19
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1. MÉTODOS DE CONTROLE.....	21
2.2. CONTROLADOR PID.....	23
2.3. SERVOMOTORES.....	25
2.3.1. Estrutura dos servomotores.....	25
2.3.2. Tipos de Servomotores.....	26
2.3.2.1. Servomotor CC a ímãs permanentes.....	27
2.3.2.2. Servomotor CC ímãs permanentes com escovas (<i>Brushed DC motor</i>).....	27
2.3.2.3. Servomotor CC ímãs permanentes sem escovas.....	28
2.3.2.4. Servomotor CA a ímãs permanentes.....	31
2.4. SENSORES DE REALIMENTAÇÃO.....	33
2.4.1. <i>Resolvers</i>	34
2.4.2. Célula de carga.....	36
2.4.2.1. Extensômetros.....	38
2.4.2.2. Circuito amplificador operacional.....	39
2.5. SERVOCONVERSORES.....	40
2.5.1. Programação <i>Ladder</i>	42
2.6. INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL.....	43
2.6.1. <i>Software</i> para instrumentação.....	44

3. APLICAÇÃO.....	46
3.1. SERVOMOTOR UTILIZADO.....	46
3.2. MODELAGEM DE UM SERVOMOTOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES	48
3.2.1. Modelo matemático do servomotor	48
3.2.2. Controle de torque.....	52
3.2.3. Programação em <i>LabVIEW</i>	54
3.2.4. Modelagem em <i>LABVIEW</i>	55
3.2.5. Comunicação em <i>LabVIEW</i>	56
3.3. SERVOCONVERSOR	58
3.3.1. Plataforma <i>WLP</i>	63
4. SIMULAÇÕES, EXPERIMENTOS E RESULTADOS.....	64
4.1. ESCOLHA DO MODELO	64
4.1.1. Elaboração da Máquina MSIP em <i>LabVIEW</i>	64
4.2. OBTENÇÃO DOS DADOS E VALIDAÇÃO DO MODELO	67
4.2.1. Obtenção dos Parâmetros do servomotor MSIP	67
4.2.2. Levantamento da curva P0067 X Torque	69
4.2.3. Resposta ao degrau	79
4.2.4. <i>Swept Sine</i>	83
4.3. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE DE TORQUE	89
5. CONCLUSÃO.....	98
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
REFERÊNCIAS.....	100
APÊNDICE A - TRANSFORMADA DE CLARKE.....	105
APÊNDICE B - TRANSFORMADA DE PARK	106
APÊNDICE C - LEVANTAMENTO DA CURVA P0067 X TORQUE	107
APÊNDICE D - CONVERSÃO DE TORQUE ATÉ O PARÂMETRO P0067	109
APÊNDICE E - DETALHAMENTO DAS VIS UTILIZADAS.....	111

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA

Determinados sistemas robóticos requerem uma força aplicada controlada. Para tal objetivo, utiliza-se frequentemente o servoacionamento com o controle PID. Estes sistemas caracterizam-se, por exemplo, por robôs manipuladores, robôs de soldagem e robôs de corte. Tais aplicações podem ser gerenciadas com a utilização da instrumentação virtual, a qual possibilita o acesso remoto do dispositivo e principalmente simula o comportamento do mesmo.

1.1.1. Delimitação do Tema

Os servomotores são utilizados em processo que necessitam de controle de torque, velocidade, alta precisão de posicionamento, dimensões reduzidas, entre outros fatores (WEG, 2003). Propõe-se realizar o estudo de um sistema servoacionado, gerenciado remotamente por instrumentação virtual, de modo a realizar o controle de torque de um determinado servomotor.

Neste trabalho serão apresentadas as principais características dos servomotores, bem como suas aplicações e funcionamento. Será estudado o modelo matemático do servomotor síncrono de ímãs permanentes e determinado o controle de torque do servomotor. Será ainda realizada a simulação em *LabVIEW* do servomotor com suas características reais, a fim de verificar e comparar seu comportamento com a prática. Espera-se que os resultados contribuam para acelerar o processo de desenvolvimento de sistemas servoacionados.

1.2. PROBLEMAS E PREMISAS

A demanda cada vez maior de produtos industrializados (veículos automotores e ferramentas) bem como serviços de usinagem e soldagem, criou a necessidade de aumento da produção industrial, juntamente com a melhoria dos

níveis de qualidade nos produtos (OTTOBONI, 2002), visto que o mercado se tornava exigente gradativamente. Os servomotores passaram então a ser utilizados em sistemas que necessitam de controle de torque adequado e preciso.

Os controladores de velocidade já eram largamente empregados na indústria há várias décadas, sendo o estado da técnica atual constituído pelos inversores com controle vetorial para acionamento de motores assíncronos. Já quanto ao controle de posição, esta é uma tecnologia que se tornou mais aperfeiçoada na segunda metade do século XX, e principalmente associada ao desenvolvimento de sensores (*encoders e resolvers*¹) assim como dos dispositivos da eletrônica de potência empregadas nos *drivers* (DORAN e GOKHALE, 2011).

Por outro lado, sistemas servoacionados para controle de torque estão em desenvolvimento. Apesar de já existirem diversas aplicações, inclusive comerciais, desta natureza, a ciência por trás desta técnica ainda não é um consenso no meio acadêmico, sendo bastante sigilosa no meio comercial (DORAN e GOKHALE, 2011).

Desta forma, o presente estudo pretendeu analisar o comportamento de um servomotor para um sistema em que o torque aplicado necessita ser controlado de forma precisa, estável e com flexibilidade de movimentos em ambientes críticos de trabalho. Este estudo se baseou no servoacionamento utilizado no robô da Figura 1, batizado de Hexaflex, o qual está atualmente em fase de desenvolvimento pela empresa EngeMOVI de automação e robótica, situada em Curitiba, em parceria com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná e outras instituições de ensino do Brasil.

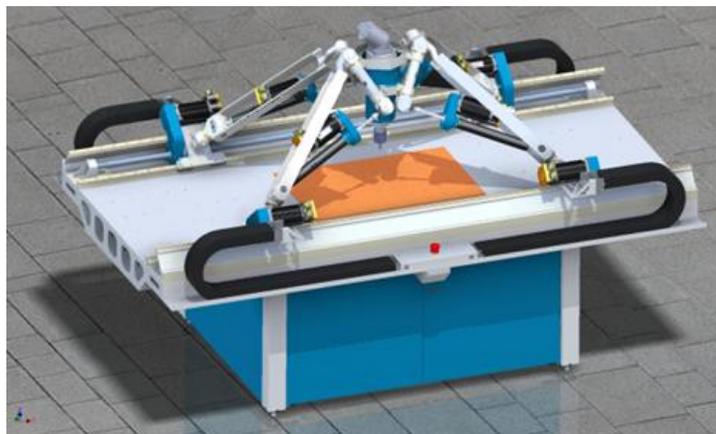


Figura 1 - Robô para soldagem com colocação de pino por atrito
Fonte: (ENGEMOVI, 2011)

¹ Sensores de realimentação comuns em servoacionamentos

Este robô trabalha em cadeia fechada, utiliza oito servomotores do mesmo modelo, dispostos de maneira a formar oito juntas e um total de 6 graus de liberdade. Este projeto de robô será utilizado em processos que requerem aplicação de grande força pontual, como por exemplo, colocação de pinos e soldagens por atrito em dutos, silos e tanques, e, no que se tem notícia, será utilizado pela primeira vez nesses tipos de aplicações (ENGEMOVI, 2011).

Pretendeu-se realizar um ensaio de controle de torque com um dos servomotores desse robô, com o objetivo de levantar informações e limitações de funcionamento. Foram realizadas também simulações, utilizando-se de instrumentação virtual, para análise do comportamento do servomotor². Desta forma, a elaboração desse trabalho contribuirá para a continuidade do projeto em estudo.

Para tais desenvolvimentos é necessária a compreensão do funcionamento do servomecanismo de forma geral (servomotor, servoconversor, sensores de realimentação, programação, instrumentação virtual e rede de comunicação). Os recursos materiais necessários para o trabalho são: um computador, *software* de instrumentação virtual, servomotor, servoconversor, amplificador operacional, célula de torque e cabos para comunicação.



Figura 2 - Esquema dos materiais e equipamentos utilizados
Fonte: Autoria própria.

² As simulações devem ser verificadas com ensaios no servomotor verdadeiro para a validação dos resultados.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Investigar o controle de torque em servoacionamentos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Definir a família de servomotores a ser analisada.
- Conhecer o conceito de instrumentação virtual e *software* de aplicação.
- Identificar plataformas computacionais existentes adequadas para a realização dos testes em bancadas do controle do servomotor.
- Conhecer o funcionamento do servomotor e servoconversor escolhido.
- Conhecer a linguagem de programação *LADDER*.
- Obter a modelagem do servomotor utilizado.
- Conhecer o controle de torque de um servomotor.
- Levantar os parâmetros do servomotor através do servoconversor.
- Simular o modelo do servomotor.
- Realizar experimentos práticos no servomotor.
- Avaliar os resultados obtidos.
- Corrigir eventuais distorções verificadas nos ensaios e simulações.
- Concluir o estudo.

1.4. JUSTIFICATIVA

Para sistemas onde a intensidade de torque é importante para o processo, precisa-se de um controle robusto para evitar erros durante a execução. Desta forma, encontrando o modelo matemático adequado, pode-se realizar a simulação do servomotor, com o objetivo de acelerar o processo de desenvolvimento de sistemas robóticos e mecatrônicos.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste trabalho científico é realizada uma pesquisa sobre controle de torque em servomotores. Neste contexto, organizou-se o estudo em etapas a fim de atingir os objetivos propostos. Assim temos:

- Etapa 1 - Estudo bibliográfico, o qual abordará o princípio de funcionamento dos servomotores e servoconversores, tipos de servomotores de ímãs permanentes, sensores de realimentação, fundamentos de controle, instrumentação virtual e redes de comunicação.
- Etapa 2 - Modelagem matemática do servomotor utilizado.
- Etapa 3 - Simulação do modelo em ambiente computacional.
- Etapa 4 - Experimentos práticos para coleta de dados, comparação e correção de eventuais distorções.

Este trabalho é do tipo bibliográfico e experimental, pois busca conhecer e analisar as principais contribuições teóricas existentes sobre servomotores e controle de torque, realizando a comparação entre o comportamento do servomotor em bancada com o modelo simulado, visando identificar o método de controle de torque de um servomotor. A pesquisa é composta por três fases: pesquisa baseada em referenciais teóricos; análise e comparações, identificando similaridades com as descrições dos referenciais teóricos; e, finalmente, registro formal dos resultados.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é dividido basicamente em cinco seções. A primeira, intitulada Introdução, trata do tema da pesquisa e sua delimitação, objetivos do trabalho, justificativa quanto à escolha do assunto abordado e, por fim, a metodologia adotada. A segunda parte é composta por uma fundamentação teórica, abordando o estado da arte dos servomotores, sensores de realimentação, sistema de controle, servoconversores e instrumentação virtual. Da terceira etapa constam a modelagem do servomotor escolhido e sua programação em um instrumento virtual, seguido de

uma próxima seção com as simulações realizadas em *software*, experimentos e análise dos resultados.

Finalmente, para concluir o trabalho, são feitas as considerações finais do estudo e listadas propostas futuras, seguidas das referências bibliográficas e apêndices.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. MÉTODOS DE CONTROLE

Controle é definido como processo de manipular um objeto, por exemplo, um motor, de modo a fazê-lo servir a um propósito determinado, ou melhor, fazê-lo funcionar sob condições específicas, se necessário (DOTE, 1990).

Já um sistema de controle consiste no agrupamento de plantas ou subsistemas e processos que atuam com o objetivo de controlar as saídas de determinados processos. O sistema de controle que tende a manter uma relação determinada entre saída e entrada de referência, comparando-as e utilizando a diferença como meio de controle é chamado de sistema de controle realimentado. Quando a saída deste sistema for alguma posição mecânica, velocidade ou aceleração, o sistema passa a ser chamado de servomecanismo (NISE, 2002).

O controle propriamente dito de um sistema de controle pode ser realizado em malha aberta ou em malha fechada. Sistemas em malha aberta não corrigem efeitos de perturbações e são controlados unicamente com base na entrada. Assim, a grande desvantagem deste sistema é a sensibilidade a perturbações e a incapacidade de corrigir os efeitos destas perturbações (NISE, 2002).



Figura 3 - Representação de um sistema de controle em malha aberta
Fonte: A autoria própria.

O controle em malha fechada refere-se àquele cujo sinal de saída possui um efeito direto na ação de controle. Estes sistemas são conhecidos também como sistemas realimentados e tal realimentação (*feedback*) tem a finalidade de reduzir o erro do sistema (SILVA, 2000).

Com o objetivo de tornar o sistema mais preciso e sensível às perturbações externas, o sinal de saída é geralmente comparado com um sinal de referência, chamado de *set-point*. Utiliza-se o erro ou desvio entre estes dois sinais para gerar o

signal de controle que deve ser aplicado ao processo. O signal de controle é gerado de maneira a corrigir este erro entre a saída e o *set-point*. O dispositivo que utiliza o signal de erro para determinar ou calcular o signal de controle a ser aplicado à planta recebe a denominação de controlador ou compensador (SILVA, 2000). Em síntese, esse sistema realiza medição e correção do signal de saída.

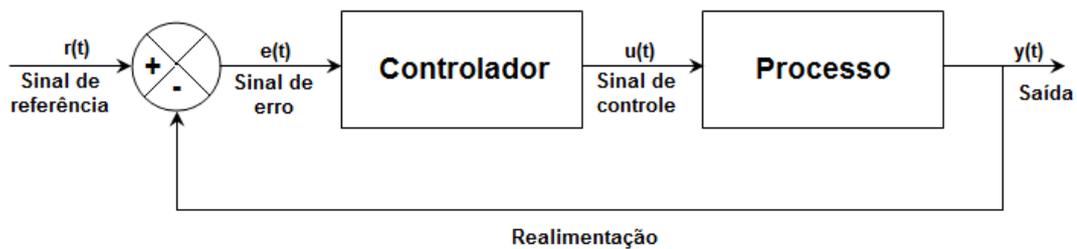


Figura 4 - Representação de um sistema de controle em malha fechada
Fonte: Autoria própria.

Projetos mais complexos utilizam normalmente este controle com retroação diante da vantagem de obter maior precisão do que os sistemas em malha aberta, além de serem menos sensíveis a ruídos, perturbações e mudanças ambientais (NISE, 2002). Nas aplicações residenciais e industriais são encontrados inúmeros sistemas de controle em malha fechada, como por exemplo, todos os servomecanismos e a maioria dos sistemas de controle de processos, como refrigeradores residenciais e aquecedores de água automáticos.

Um requisito básico dos projetos de sistemas de controle é a estabilidade. Sob este ponto de vista, é fácil observar que o controle em malha aberta é mais simples, pois a estabilidade depende apenas do processo. Entretanto, tratando-se de controle em malha fechada, a estabilidade é considerada mais complexa e de maior dificuldade, visto que pode corrigir erros e até mesmo causar oscilações de amplitudes variáveis ou constantes.

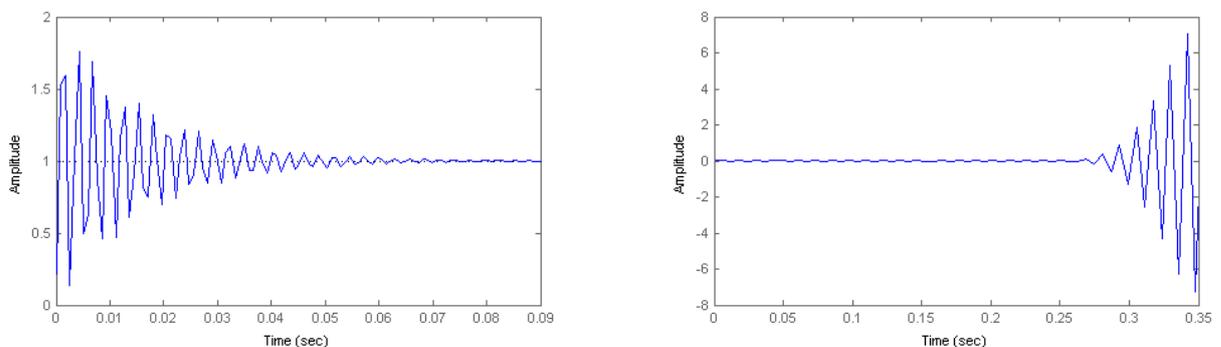


Figura 5 - Comportamento estável e instável, respectivamente
Fonte: Autoria própria via Simulink.

Em resumo, o controle em malha fechada, ou melhor, a utilização da realimentação, proporciona aumento na precisão do sistema (SILVA, 2000), diminui ou até mesmo rejeita o efeito de perturbações externas, melhora a dinâmica do sistema, diminui a sensibilidade do sistema a variações dos parâmetros do processo, o que torna o sistema mais robusto (ANDREA, 2012).

O devido controle e medição de um processo são fundamentais para se obter um melhor resultado ou qualidade do produto final. Assim, quanto mais direto for o controle das variáveis, melhor será a qualidade. Porém, quando isso não for possível, pode-se adotar uma variável secundária, tendo-se em mente que esse controle indireto não terá a mesma eficiência que o controle direto (OGATA, 2003).

Outro aspecto muito importante na teoria de controle são as chamadas funções de transferência. Estas são usadas para caracterizar relações entrada-saída de sistemas lineares invariáveis no tempo, sendo caracterizadas por:

$$\mathbf{G(s)} = \frac{\mathbf{Y(s)}}{\mathbf{X(s)}} = \frac{\mathbf{função\ de\ saída}}{\mathbf{função\ de\ controle}} \quad (1)$$

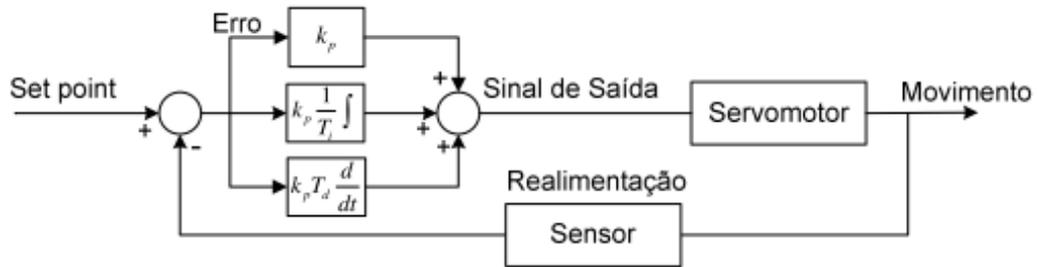
Em outras palavras, a função de transferência consiste em uma expressão matemática que relaciona a saída e a entrada de um sistema linear invariante no tempo em termos do próprio sistema e representa o comportamento do sistema (OGATA, 2003).

2.2. CONTROLADOR PID

Entende-se de controlador o dispositivo capaz de realizar determinadas operações matemáticas sobre o sinal de erro $[e(t)]$ a fim de produzir um sinal $[u(t)]$ a ser aplicado na planta, com a função de satisfazer um determinado objetivo. Tais operações matemáticas constituem as ações de controle, que basicamente correspondem à ação liga-desliga (*on-off*), ação proporcional, ação integral e ação derivativa (SILVA, 2000).

O controlador PID trabalha com os comportamentos do controlador PD e PI. O erro nulo em regime permanente está relacionado com a precisão do sistema ocasionada pela ação integral. A ação integral é contrabalanceada com a ação

derivativa que tem como objetivo aumentar a estabilidade e tornar o sistema mais rápido. O sistema PID é dado por:



$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad \text{No domínio do tempo.}$$

$$U(s) = K_p E(s) \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad \text{No domínio de Laplace.}$$

Figura 6 - Diagrama de bloco e equações do PID
Fonte: (GOMES, F. H., & VINCHI, M. A., 2007).

Considerando-se o mesmo sistema da Figura 6 e fixando-se $K_p=1$ e $T_i=2$, a influência da ação derivativa na resposta do sistema pode ser observada na Figura 7.

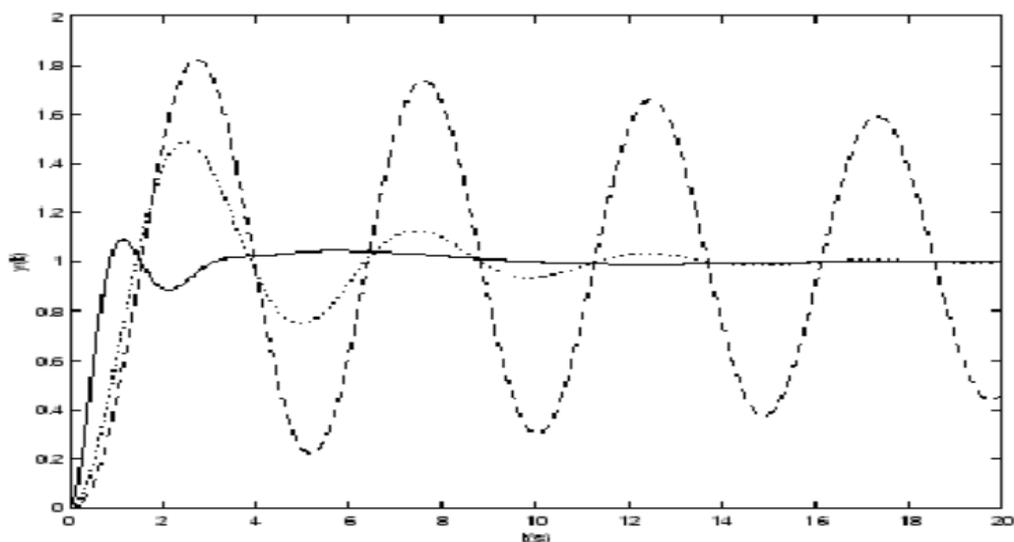


Figura 7 - PID - $K_p=4$; $T_i=1.5$; $T_d=0.1$ (tracejado), 0.4 (pontilhado), 2 (contínuo)
Fonte: (GOMES, F. H., & VINCHI, M. A., 2007).

2.3. SERVOMOTORES

2.3.1. Estrutura dos servomotores

Servomotores são caracterizados por um formato compacto, com alta potência, baixa inércia, e alta eficiência. Devem possuir alto desempenho dinâmico e excelente precisão (FRÄGER, 2009).

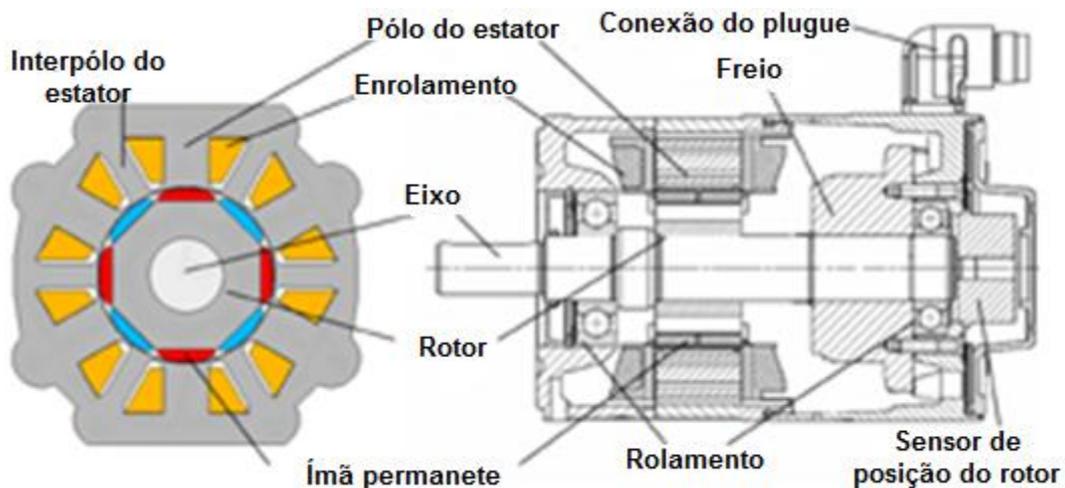


Figura 8 - Secção longitudinal de um servomotor síncrono com *resolver* e freio
 Fonte: (FRÄGER, 2009).

A Figura 8 mostra uma secção transversal de um servomotor síncrono com ímãs, permanente típico, com os componentes ativos para a geração do torque, um *resolver* para medir os ângulos e velocidade e, em alguns casos, é equipado com um freio para manter a posição sem que seja necessário demandar corrente nas bobinas do motor (FRÄGER, 2009).

Um servomotor deve, necessariamente, ter um sistema de potência e outro de controle para poder desempenhar suas funções (ANDOLFATO, 2010).

Uma das suas principais características é possuir torque suficiente com rotação nula para manter a posição fixa de uma determinada carga. Atualmente usam ímã permanente, pois, devido à baixa inércia do servomotor, o ciclo de processo é mais rápido, ou seja, possui alta resposta dinâmica.

Os servomotores são, por natureza, do tipo “*closed loop*”. O motor e/ou a carga devem estar conectados para fornecer uma realimentação precisa.

Usualmente, isso é feito por um *encoder* óptico ou *resolver*. Esse dispositivo de realimentação informa ao controlador onde o motor e a carga estão durante todo o tempo. Eles também proporcionam informações sobre a velocidade (KORDIK, 2003).

Os sistemas de servomotores ajustam constantemente os sinais de comandos baseados em realimentação do motor. Isso lhes permite superarem distúrbios inesperados e serem automaticamente compensados contra ressonância. Eles são eficientes, usando apenas a energia que a carga necessita para ser movida. E são também geralmente silenciosos, dada a distância entre a ressonância e o uso eficiente da potência (KORDIK, 2003).

Contudo, os servomotores precisam ser ajustados para o *loop* de controle e as condições de carga. Um sistema típico de servomotor usa um *loop* de posição PID (Proporcional, Integral, Derivativo). Além disso, existem muitos parâmetros de realimentação e excitação que devem ser usados nos cálculos (KORDIK, 2003).

2.3.2. Tipos de Servomotores

Pretende-se direcionar os estudos para os servomotores com ímã permanente, pois a eliminação da bobina de excitação nos servomotores, além de simplificar a construção e reduzir custos, resulta em melhor desempenho dinâmico em relação aos motores com excitação eletromagnética, visto que estes têm perdas de fluxo magnético (GIERAS, 2010). Além do mais, não há a necessidade de alimentação da bobina de excitação, seja ela no rotor ou no estator. Os demais tipos de servomotores não serão objetos de estudo deste trabalho.

Os servomotores com ímãs permanentes são classificados em corrente contínua com escovas, corrente contínua sem escovas e corrente alternada síncronos (GIERAS, 2010).

Os mais populares servomotores são os servomotores CC com ímãs permanentes (SCLATER e CHIRONIS, 2001). Porém, a maioria dos servomotores atuais são motores CA sem escovas a ímãs permanentes de terras raras, projetados para atender diversas aplicações como: robôs industriais, bobinadeiras, máquinas de corte e solda e máquinas-ferramenta a comando numérico (CORRÊA, 2005). Suas características permitem uma rotação suave e uniforme em todas as velocidades, baixo nível de ruído e vibração, ampla faixa de rotação com torque

constante, baixa manutenção (servomotores sem escovas), elevada capacidade de sobrecarga, baixa inércia e resposta dinâmica instantânea.

A construção de servomotor a ímãs permanentes CC sem escovas é similar à estrutura do servomotor CA síncrono, pois ambos são compostos com estator bobinado e rotor a ímã permanente.

2.3.2.1. Servomotor CC a ímãs permanentes

Estes servomotores podem ser classificados em com escovas e sem escovas. Os servomotores com escovas têm o rotor bobinado e o estator com ímã permanente, enquanto que os sem escovas tem o rotor com ímã permanente e estator bobinado (SCLATER e CHIRONIS, 2001).

2.3.2.2. Servomotor CC ímãs permanentes com escovas (*Brushed DC motor*)

Os estatores, deste tipo de servomotor, são pares de pólos magnéticos. Quando o motor é alimentado, há uma interação entre o campo magnético criado no rotor com o campo fixo do estator, o que resulta em um momento de um binário (torque). Desta forma, rotor pode se movimentar de maneira a alinhar-se com campo do estator. Assim quando o rotor alcança o alinhamento, as escovas energizam o próximo elemento do comutador. Esta sequência continua enquanto existir tensão de excitação no rotor.

A substituição do campo bobinado (convencional) por ímãs permanentes elimina tanto a necessidade de excitação separada e perdas elétricas que ocorrem nos enrolamentos do campo. Tais servomotores podem ter armaduras formadas por bobinas laminadas em formas de disco ou copo. Elas são leves, de baixa inércia, que permitem ao motor acelerar mais rápido.

A força do campo é aumentada pela cerâmica e pelos ímãs feitos em neodímio-ferro-boro em comparação aos antigos alumínio-níquel-cobalto (Al-Ni-Co) (SCLATER e CHIRONIS, 2001).

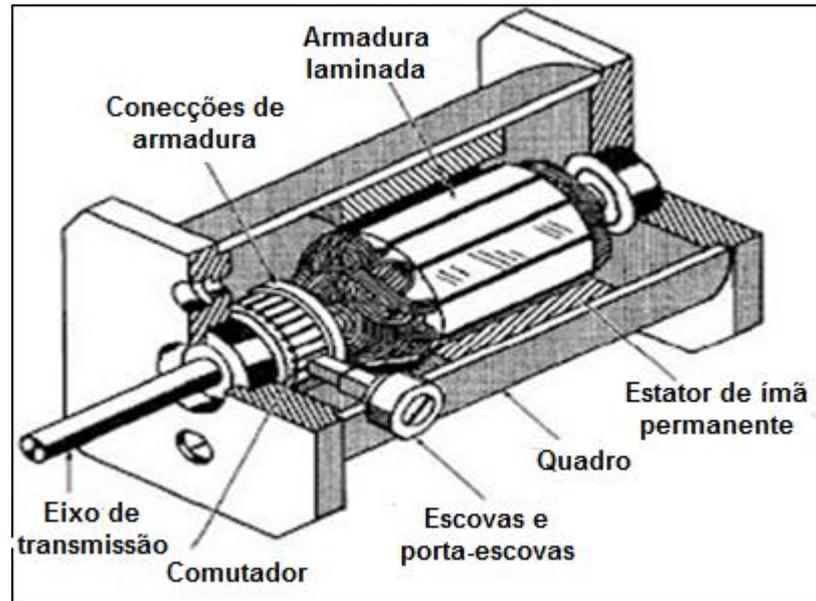


Figura 9 - Vista de corte de um Servomotor CC com ímãs permanentes
Fonte: (SCLATER e CHIRONIS, 2001).

2.3.2.3. Servomotor CC ímãs permanentes sem escovas

Os servomotores CC sem escovas exibem os mesmos padrões de linearidade entre velocidade-torque dos servomotores CC com ímãs permanentes, porém eles são comutados eletronicamente. A construção destes servomotores, como mostrado na Figura 10, difere do típico servomotor CC com escovas, em que eles são "de dentro para fora." Em outras palavras, eles têm rotores magnéticos permanentes, em vez de estatores e os estatores, em vez de os rotores, são enrolados. As escovas mecânicas e o comutador do motor CC são substituídos por sensores eletrônicos, tipicamente dispositivos de Efeito Hall³ (HEDs) nos servomotores sem escovas (SCLATER e CHIRONIS, 2001).

³ Efeito Hall é o aparecimento de uma diferença de potencial, em um condutor elétrico, transversal à corrente e perpendicular ao campo magnético.

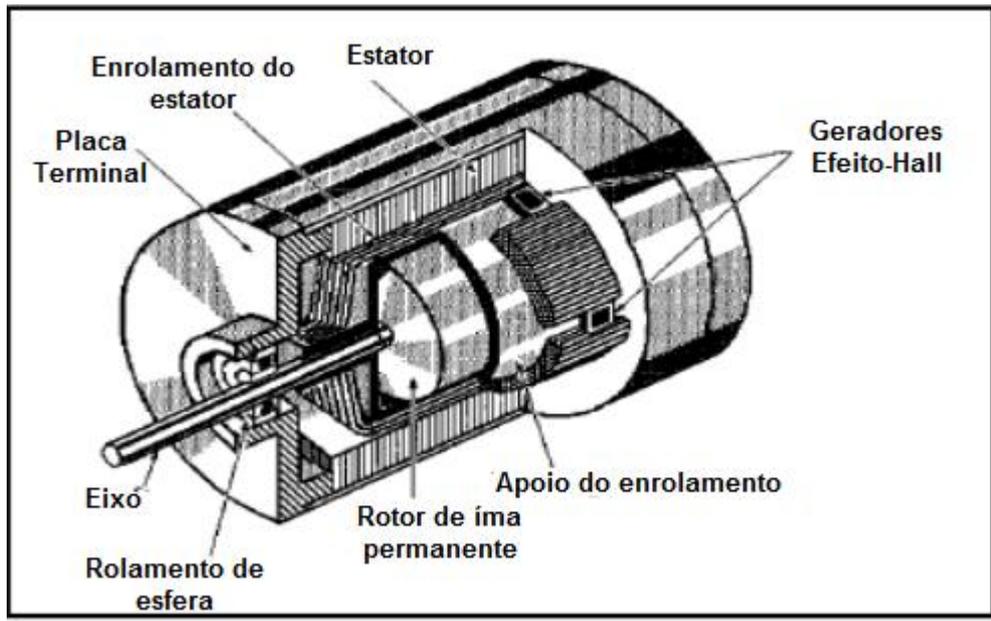


Figura 10 - Vista de corte do servomotor CC sem escovas
Fonte: (SCLATER e CHIRONIS, 2001).

Os rotores magnéticos cilíndricos de motores CC sem escovas são magnetizados lateralmente para formar pólos opostos ao norte e ao sul em torno do rotor. Estes rotores são normalmente feitos de materiais magnéticos neodímio-ferroboro ou samário-cobalto de terras raras, que oferecem maior densidade de fluxo do que ímãs de Al-Ni-Co. Estes materiais permitem um melhor desempenho aos motores. Além disso, rotores magnéticos de terras raras podem ser feitos com diâmetros menores do que os modelos anteriores com ímãs Al-Ni-Co, reduzindo assim a sua inércia. Um diagrama simplificado de um motor CC sem escovas com um dispositivo de efeito Hall (HED) para o comutador eletrônico é mostrado na Figura 11.

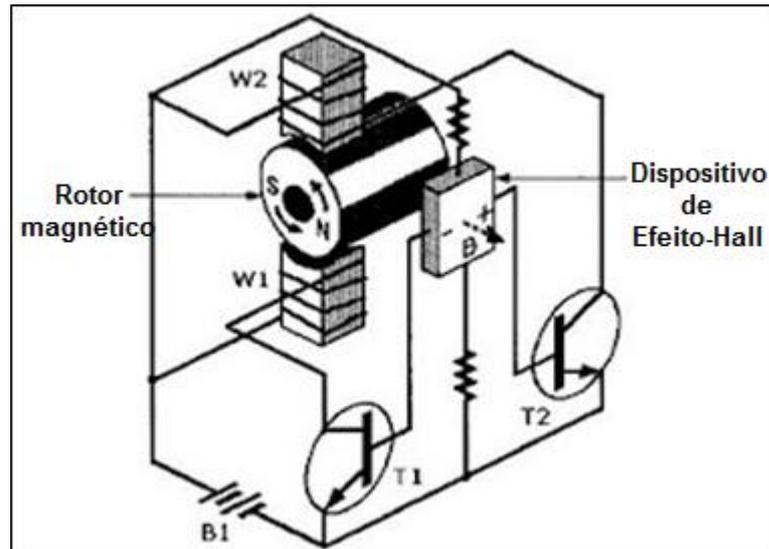


Figura 11 - Diagrama simplificado do dispositivo de comutação Efeito Hall (HED) do motor CC sem escovas.
Fonte: (SCLATER e CHIRONIS, 2001).

O HED é um sensor de efeito Hall integrado com um amplificador de silício. Este sensor é capaz de detectar a polaridade do campo magnético do rotor e, em seguida, o envio de sinais apropriados para transistores de potência T1 e T2 para fazer com que o rotor gire continuamente. Isto é realizado como se segue:

(1) Com o rotor imóvel, o HED detecta o pólo norte do rotor magnético, acionando o transistor T2. Isso faz com que a corrente flua, energizando W2 para formar um pólo sul no estator. Este pólo então atrai o pólo norte do rotor para acioná-lo em um sentido anti-horário.

(2) Pela inércia do rotor, o HED deixa de detectar o pólo norte, passando a detectar o pólo sul do rotor. Em seguida, o transistor T1 é acionado, energizando o enrolamento W1, formando assim um pólo norte no estator, o qual atrai o pólo sul do rotor, o que faz com que ele continue a rodar no sentido anti-horário. Os transistores conduzem a sequência adequada para assegurar que a excitação do estator nos enrolamentos W2 e W1 estejam sempre em coerência com o campo do rotor. Desta forma, um binário necessário é reproduzido para manter o rotor em movimento constante (SCLATER e CHIRONIS, 2001).

2.3.2.4. Servomotor CA a ímãs permanentes

O estator é formado pelas bobinas de campo sendo alimentada por uma fonte trifásica e o rotor é constituído por ímãs permanentes, os quais não só podem melhorar o desempenho do servomotor no estado estacionário, mas também no desempenho dinâmico e na qualidade. As melhorias feitas no campo de semicondutores fizeram com que o controle de servomotores sem escovas tornasse mais fácil e rentável, com a possibilidade de operar o servomotor através de uma ampla gama de velocidades, mantendo boa eficiência (GIERAS, 2010).

Os servomotores desta classe de ímãs permanentes síncronos têm muitas propriedades úteis, tais como (MILLER, 1989):

- Não absorção de energia elétrica pelo sistema de excitação, o que faz com que haja uma melhora na eficiência da máquina;
- Maior densidade de potência e/ou torque na utilização de excitação eletromagnética;
- Simplificação na manutenção;
- Redução de peças da máquina;
- Operação em sub-excitado para a maioria das condições de carga;
- Capacidade de operação em alta velocidade e elevadas temperaturas.

A construção de um servomotor síncrono de ímãs permanentes é próxima a de um servomotor de corrente contínua sem escovas. A diferença refere-se à onda de excitação que no servomotor CC é quadrada enquanto no servomotor síncrono, a excitação é senoidal, fato que elimina a oscilação de torque causada pela comutação (PURANEN, 2006). Três configurações básicas dos servomotores síncronos são apresentadas na Figura 12:

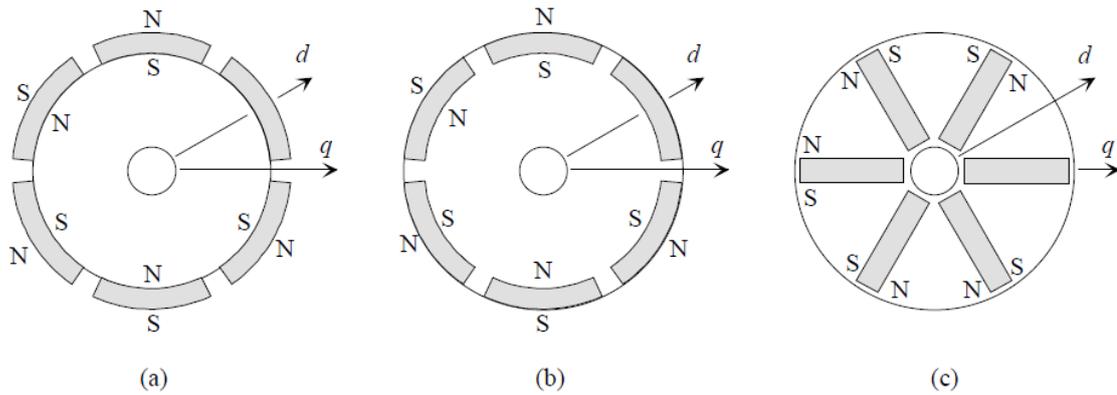


Figura 12 - Construções do rotor do servomotor síncrono de ímã permanente
Fonte: (PURANEN, 2006).

Na Figura 12(a), rotor magnético possui pólo saliente na superfície. Devido à alta relutância eixo do eixo “d”, a indutância “d” é baixa e, conseqüentemente, o binário possui um torque elevado de partida. A Figura 12(b), o rotor possui superfície com ímãs permanentes inseridos, que é basicamente o mesmo que a Figura 12(a). Já Figura 12(c), o rotor com ímãs embutidos possui um valor de indutância elevada e, conseqüentemente, uma menor capacidade de sobrecarga. Porém, suas características de enfraquecimento de campo são muito melhores do que as construções de ímã de superfície (MILLER, 1989).

Quadro 1 - Características de vários tipos de motores em aplicações de controle de movimento

Tipo de servomotor	Servomotor CC com escovas	Servomotor CC sem escovas	Servomotor CA Síncrono de ímã permanente
Vantagens	Boa controlabilidade Curva linear Corrente-torque Baixo <i>ripple</i> (variação) no torque	Alta densidade de potência e torque com relação à inércia Boa dissipação de calor Boa capacidade para sobrecargas	Possível torque suave Alta eficiência Alto torque / volume Alta resposta ao torque Boa dissipação de calor Boa capacidade para sobrecargas
Desvantagens	Baixa confiabilidade Requer manutenção Baixa capacidade para sobre carga Baixa dissipação de calor	Alto custo Tem <i>ripple</i> (variação) no torque Perigo de desmagnetização dos ímãs por enfraquecimento do campo	Alto custo Perigo de desmagnetização dos ímãs por enfraquecimento do campo

Fonte: (PURANEN, 2006).

2.4. SENSORES DE REALIMENTAÇÃO

Um sensor transforma uma variável física em sinal elétrico para utilização pelo controlador. Sensores de realimentação mais comuns são *encoders*, *resolvers* e *linear variable differential transformer* (LVDT), e tacômetros. Dentre eles os menos comuns, mas também em uso como dispositivos de realimentação, são: sensor de torque (*strain gage*), potenciômetros, *Linear Velocity Transducers* (LVTs), *Angular Displacement Transducers* (TADs) e interferômetros a laser (SCLATER e CHIRONIS, 2001).

Nesta seção, abordam-se os sensores de realimentação: *resolvers* e sensor de torque (*strain gage*).

2.4.1. Resolvers

Um *resolver* é essencialmente um transformador rotativo que pode fornecer retorno de posição em um servossistema como uma alternativa para um *encoder*. São sensores que atuam magneticamente, medindo o ângulo entre os enrolamentos no rotor e os do estator. O ângulo e a velocidade são determinados a partir da relação das correntes induzidas. São caracterizados por um elevado nível de robustez. Além disto, *resolvers* retém valores absolutos dentro de um ângulo de revolução e a saída pode também ser usada para gerar a informação de comutação para a regulação de corrente na unidade de servoacionamento (FRÄGER, 2009).

Resolvers assemelham-se a motores de corrente alternada, como mostrado na Figura 13, porém apresenta funcionamento oposto ao do motor, ou seja, funciona como um gerador (OTTOBONI, 2002). Ele gera um sinal elétrico na revolução do seu eixo. O estator é feito por enrolamento de fio de cobre em uma pilha de lâminas de aço fixados à carcaça e o rotor é feito por enrolamento de fio de cobre em uma pilha de lâminas montado sobre o eixo do *resolver* (SCLATER e CHIRONIS, 2001).

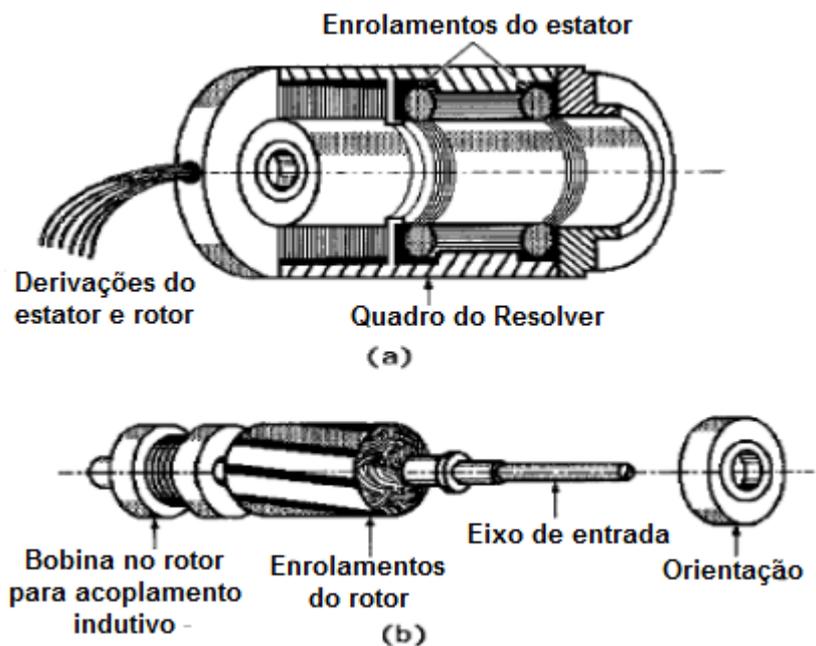
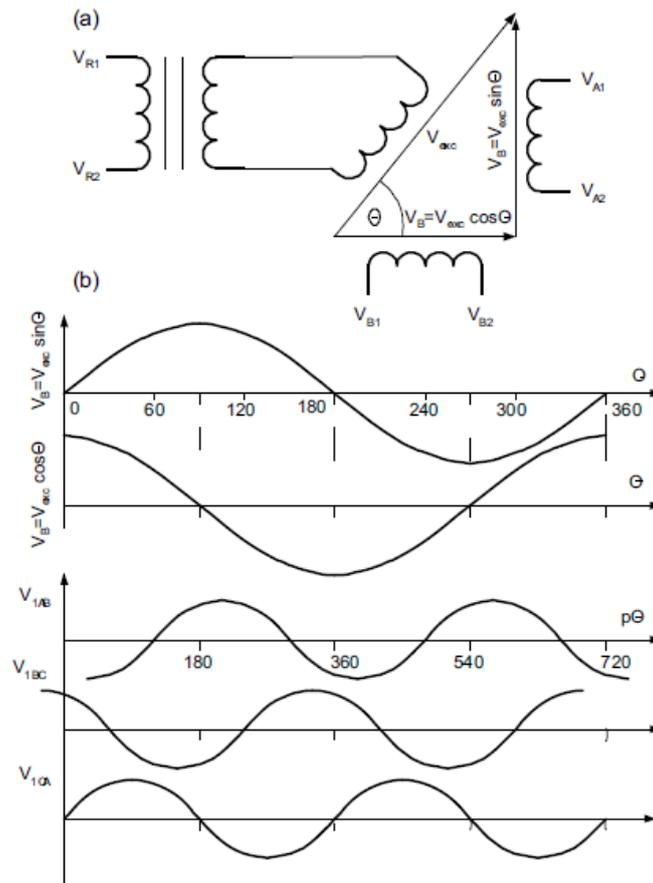


Figura 13 - Vista explodida de um *resolver* sem escovas: a) Carcaça; b) rotor e mancais
 Fonte: (SCLATER e CHIRONIS, 2001).

Para detectar a posição do rotor de motores sem escovas, a excitação é montada sobre o rotor do *resolver* e o enrolamento de saída é enrolado em ângulos

retos entre si sobre o núcleo do estator. Como resultado, os sinais de saída são ondas sinusoidais em quadratura, isto é, uma onda é uma função sinusoidal do θ angular defasada da segunda onda que é uma função cossenoide de θ Figura 14a. Existe um ciclo elétrico para cada revolução do motor Figura 14b (GIERAS, 2010).



**Figura 14 - Princípio de operação do resolver: a) Configuração dos enrolamentos; b) ondas de saída e a tensão de um moto de 4-pólos (O intervalo $0^\circ \leq p\theta \leq 720^\circ$ corresponde a uma revolução mecânica)
Fonte: (GIERAS, 2010).**

Outro ponto a ressaltar é o alinhamento do *resolver*. Por se tratar de um sensor de alta resolução e precisão, o seu alinhamento é algo fundamental para seu perfeito funcionamento. Portanto, é aconselhável não mexer em seu sistema de fixação devido à sua complexidade de montagem, tal regulagem vem ajustada de fábrica e está ligada ao sincronismo do servomotor (OTTOBONI, 2002).

Quando comparado a outros sistemas de realimentações disponíveis no mercado (*encoder* incremental e *encoder* absoluto), o *resolver* tem suas

características ressaltadas, principalmente quanto à sua robustez e insensibilidade às vibrações e altas temperaturas (OTTOBONI, 2002).

Quadro 2 - Comparação Resolver x Encoder

Sistema de Realimentação	Encoder incremental	Encoder absoluto	Resolver
Vantagens	Projeto robusto Grande quantidade de resoluções, tipos de montagens e interface	Dado de posição disponível após falha Alta resolução disponível	Projeto robusto Insensível a vibrações e altas temperaturas Pouca fiação Montado no motor
Desvantagens	Posição é perdida após falha de energia	Alto custo	Montagem mais complexa

Fonte: (OTTOBONI, 2002).

2.4.2. Célula de carga

São estruturas eletromecânicas desenvolvidas para receber esforços e, com isso, se deformar nos limites elásticos a que foram planejados. São compostos por um corpo metálico e sensores instalados para medir a deformação quando é submetido a um esforço. O resultado é um sinal elétrico, na ordem de milivolts, e é alterado proporcionalmente à medida que se aplica esforços na estrutura física da célula de carga.

É comum a utilização de quatro extensômetros⁴ em uma célula de carga ligados entre si segundo a ponte de Wheatstone⁵ e o desequilíbrio da mesma é

⁴ Extensômetro: Instrumento para medir alterações nas dimensões lineares. Também chamado de medidor de deformação. Frequentemente baseado na tecnologia de medidores de deformação.

⁵ Ponte de Wheatstone: É um instrumento de medição usado tradicionalmente na medição de resistências ou impedâncias.

proporcional à força que a provoca. Através dessa medição do desequilíbrio que se obtém o valor da força aplicada (CARRARO, 2010).

Características:

- Sensibilidade

A medição do desbalanceamento na ponte de Wheatstone é obtida pela variação de tensão em função da tensão aplicada na entrada da ponte. Quando uma célula de carga está submetida a uma carga, o valor do sinal recebido varia entre 2 e 3 milivolts por volt aplicado. Isso significa que uma célula de carga com uma capacidade de 50 kg e sensibilidade de 2 mV/V, com uma tensão na entrada de 12 V, quando sujeita a uma força de 50 Kgf fornecerá em sua saída uma variação de 24 mV.

- Formato

O formato da célula de carga é variado e é requerido de acordo com a aplicação. Células de carga tipo viga são utilizadas quando a carga é apoiada. Já as do tipo Z são utilizadas quando a carga é sustentada e do tipo *single point* são aplicadas quando se incide momentos torsões na célula.

- Precisão

Consiste no erro máximo relacionado em divisões da capacidade nominal. Quanto à precisão as células de carga são divididas em:

- Baixa precisão: até 1000 divisões ou 0,1% da capacidade nominal;
- Média precisão: de 3000 a 5000 divisões ou 0,03% a 0,02% da capacidade nominal;
- Alta precisão: 10000 divisões ou 0,01% da capacidade nominal.

2.4.2.1. Extensômetros

O elemento mais importante na composição de uma célula de carga é o extensômetro de resistência elétrica, conhecido também como strain gage, que são dispositivos de medidas que transformam pequenas deformações em variações equivalentes em sua resistência elétrica. São utilizados para medir deformações em diferentes estruturas (ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2004).

As características das medidas com extensômetros são resumidas em:

- Precisão satisfatória.
- Respostas satisfatórias aos fenômenos dinâmicos.
- Excelente linearidade.
- Dimensões e massa baixas.
- Medições possíveis dentro de uma grande faixa de temperatura.
- Usados como elementos transdutores para medidas de variações físicas (força, pressão, torque, aceleração, deslocamento).

Um modelo comum de extensômetro é mostrado na Figura 15, com configuração em formato de grelha, terminais e base. Tais características compõem muitos tipos de extensômetros.

A base do extensômetro tem o objetivo de alojar o resistor, composto por um material eletricamente isolado, em geral, de resina epóxi. Nos terminais soldáveis é feita a aquisição da variação de resistência. A grelha, ou grade, é a região onde sofre a deformação e devido a isso apresenta a mudança geométrica da célula de carga.

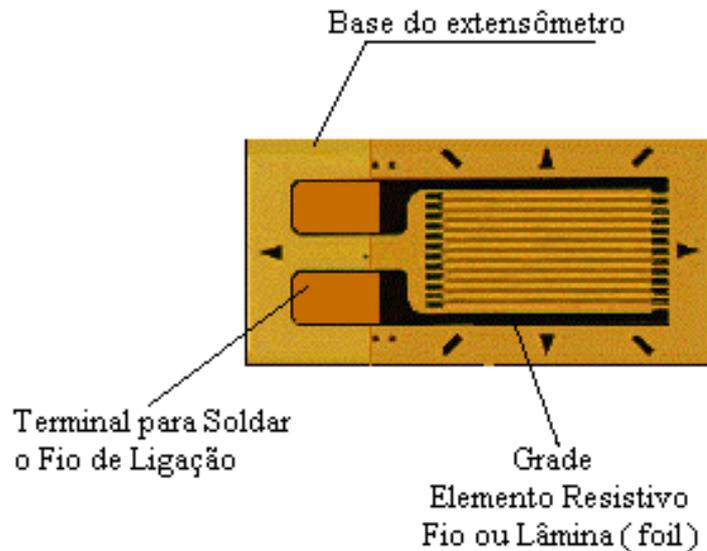


Figura 15 - Extensômetro unidirecional simples
 Fonte: (ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2004).

O modelo acima é chamado de unidirecional simples, ou seja, realiza leitura de deformação em uma única direção. Existem modelos que realizam medições em mais de uma direção simultaneamente e são chamados de rosetas.

2.4.2.2. Circuito amplificador operacional

O sinal na saída do extensômetro é relativamente muito baixo e às vezes impossibilita uma leitura correta e segura das deformações ocorridas dos extensômetros. Para tal operação se utiliza um circuito eletrônico denominado circuito amplificador operacional, Figura 16, que amplifica esses sinais e permite uma leitura mais satisfatória dos sinais.

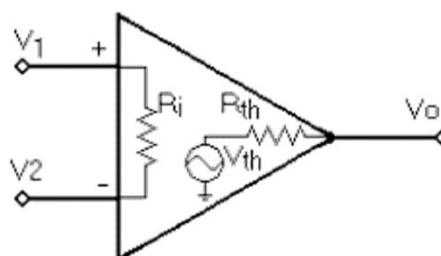


Figura 16 - Amplificador operacional genérico
 Fonte: (FERREIRA, 2006).

O circuito do aparelho é composto por reguladores de tensão que visam fornecer uma tensão estável para a alimentação da ponte de Wheatstone e do amplificador. A utilização do circuito amplificador deve ser seguida de acordo com o manual do mesmo e de acordo com a configuração desejada e possível.



Figura 17 - Amplificador de medição industrial
Fonte: (HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH, 2011).

2.5. SERVOCONVERSORES

O servoconversor, uma unidade eletrônica do sistema de servoacionamento, tem como função principal controlar o servomotor. Esta unidade é utilizada em diversas aplicações industriais em que a elevada dinâmica, precisão de velocidade, posicionamento preciso e controle de torque sejam fatores importantes na produção. Na Figura 18 um exemplo de um servoconversor para Motores Síncronos de Imã Permanente.

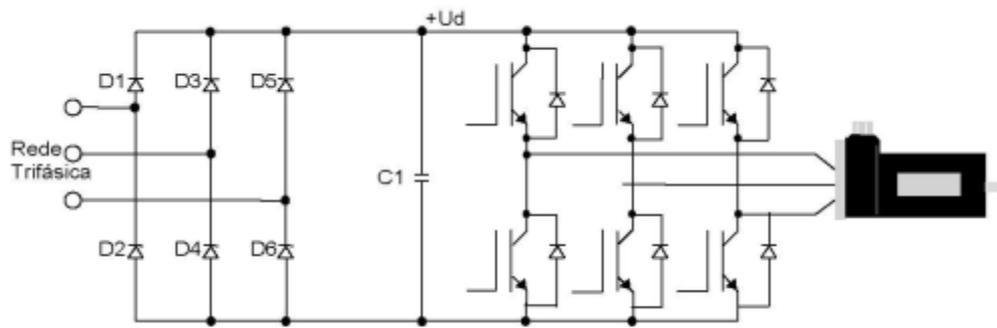


Figura 18 - Sistema interno de um servoconversor
Fonte: (WEG, 2011).

Como visto na Figura 18, a ponte de diodos trabalha como uma retificadora transformando a tensão alternada em contínua sendo filtrada pelo banco de capacitores na parte do circuito intermediário. Em seguida a corrente contínua obtida alimenta os inversores formados pelos IGBTs. Os comandos no “*gate*” dos IGBTs são realizados por um microcontrolador interno do servoconversor obtendo como resultado uma tensão com frequência e amplitude controladas e o formato dos pulsos obedeça à modulação PWM seno-triângulo. A diferença do servoconversor para um inversor simples esta na realimentação mostrada na Figura 19 (WEG, 2011).

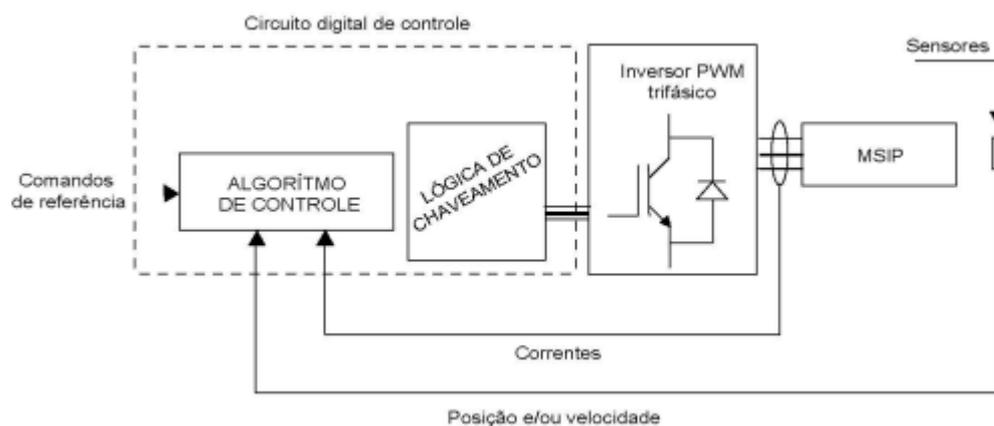


Figura 19 - Realimentação do sistema
Fonte: (WEG, 2011).

O controle do servoconversor é feito por meio de malhas, com malhas internas controlando as variáveis mais rápidas como no caso a corrente, agindo cascata. Existem vantagens neste tipo de controle desde a facilidade de projeto até os procedimentos de diagnósticos de falhas e proteção do sistema.

Quando apenas a malha de controle de corrente está operante, diz-se que o servoconversor está no modo de controle de torque, uma vez que o torque é proporcional à corrente. No modo de controle de velocidade, sobrepõe-se uma malha de controle de velocidade à malha de controle de corrente. Finalmente, no modo de controle de posição, mais uma malha de controle de posição é inserida na estrutura de controle em cascata. Durante o funcionamento, quando a malha de controle de corrente esta ativa, o servoconversor esta em modo de controle de torque. Na Figura 20 demonstra as malhas existentes no servoconversor como as malhas de velocidade e de posicionamento em conjunto com o controle PID.

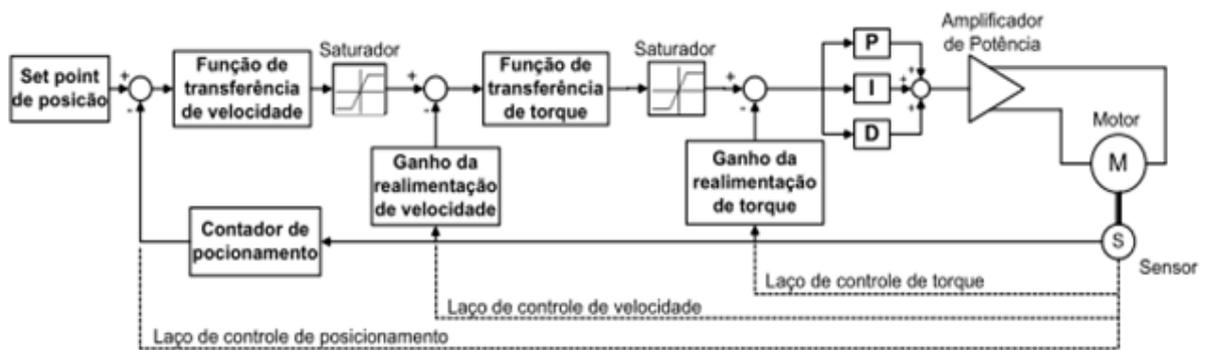


Figura 20 - Malhas de controle do servoconversor
 Fonte: (WEG, 2011).

É aconselhável utilizar o servomotor e servoconversor do mesmo fabricante, pois os dados dos servomotores necessários para operação, principalmente a precisão em posicionamentos, já estão memorizados nos servoconversores, portanto assim torna-se possível obter o melhor desempenho levando em conta o modelamento matemático do servomotor.

2.5.1. Programação *Ladder*

A linguagem *Ladder* foi a primeira a ser utilizada na programação dos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), pois sua lógica esta relacionada aos diagramas elétricos. Com a intenção de evitar ser complicada e ter maior aceitação no mercado da automação, a linguagem *Ladder* também passou a ser utilizada nos

servoconversores para estabelecer os padrões de funcionalidade e os controles diferenciados como a implementação de um PID para o servomotor (WEG, 2012).

O diagrama de contatos consiste em linhas verticais em que são desenhados ramais que possuem chaves ou contatos. Estas podem ser normalmente abertas ou fechadas e representam os estados em K1 visto na Figura 21. Tal diagrama elétrico foi passado para linguagem *Ladder*. Muda-se as colunas para linhas, como se mostra na Figura 22, para o caso de uma simples partida direta.

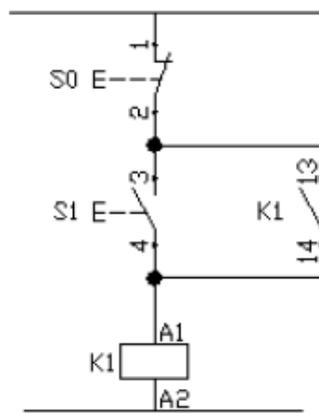


Figura 21 - Diagrama elétrico de uma partida direta
Fonte: Autoria própria.



Figura 22 - Diagrama *Ladder* de uma partida direta
Fonte: Autoria própria.

Baseando-se nessa lógica, toda a programação necessária será feita em um programa para a plataforma de servoacionamento adequado para a situação requerida.

2.6. INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL

Um instrumento virtual é um dispositivo que mostra resultados gráficos a partir de um ambiente de dados, ou a partir de uma unidade em teste, e para exibir informações para um usuário com base nos dados. Tais instrumentos podem representar diversos instrumentos físicos (termômetro, voltímetro e amperímetro) e ainda efetuar análise em dados gerados (SUMATHI e SUREKHA, 2007).

Instrumentação virtual é um campo interdisciplinar que combina detecção, tecnologias de *hardware* e *software*, a fim de criar instrumentos flexíveis e sofisticados para aplicações de controle e monitoramento. O conceito de instrumentação virtual nasceu no final de 1970, quando a tecnologia de processamento possibilitou a elaboração de sistemas de monitoramento de máquinas (SUMATHI e SUREKHA, 2007).

2.6.1. *Software* para instrumentação

Diversos *software* são utilizados para instrumentação virtual como, por exemplo, o *LabVIEW* do desenvolvedor National Instruments, o *VEE* do Agilent e o *Matlab/Simulink* da MathWorks.

LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica muito utilizada para desenvolver laboratórios remotos. O Acrônimo vem de "*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*". O principal campo de aplicação do *LabVIEW* é na técnica de medição e na automatização. A programação é feita através do modelo *data flow*⁶, que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e sua manipulação.

Os programas *LabVIEW* são chamados de Instrumentos virtuais ou simplesmente "IVs". São compostos por dois elementos: o painel frontal que contém a interface e o bloco de diagramas que contém o código gráfico do programa. O programa não é lido por um interpretador, mas sim por um compilador⁷. Deste modo, o seu desempenho é comparável com a das linguagens de programação de alto nível (BOTTENTUIT JR., 2007).

⁶ - *Data Flow* (Fluxo de Dados) - Modelo para a representação e especificação da entrada e saída de dados em um sistema através de diagramas.

⁷ Compilar é o ato de transformar um código-fonte num programa de computador.

Na Figura 23 pode-se perceber um exemplo de aplicação em *LabVIEW* de um VI para simulação de uma planta térmica encontrada através do *Find Example* do *LabVIEW*.

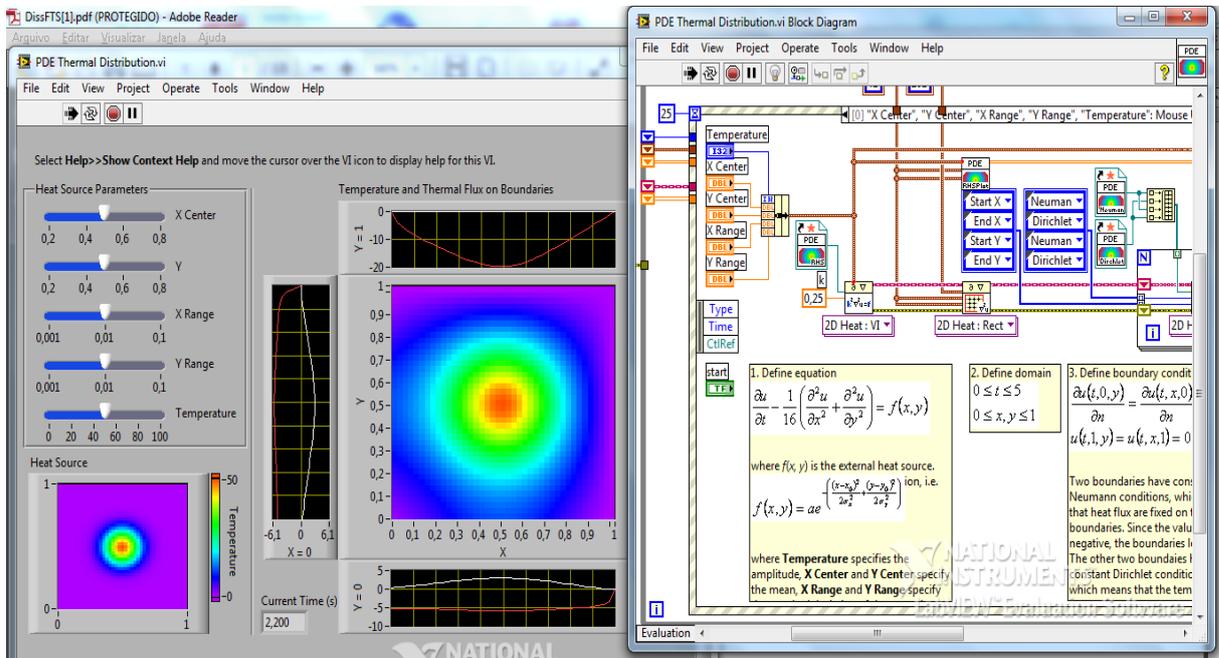


Figura 23 - Exemplo de VI - Painel Frontal e Diagrama de Blocos
 Fonte: *Find Example LabVIEW*.

3. APLICAÇÃO

Tendo como base o levantamento teórico realizado, a disponibilidade de materiais e equipamentos de interesse do projeto do robô desenvolvido pela EngeMOVI, em conjunto com a UTFPR, o servomotor selecionado para estudo foi o de corrente alternada síncrono de ímãs permanentes devido sua viabilidade técnica para a execução da tarefa proposta. Utilizou-se também o servoconversor da mesma família do servomotor e, como ambiente computacional, adotou-se a plataforma *LabVIEW*.

Neste capítulo são abordados conceitos relacionados à modelagem de servomotores síncronos a ímãs permanentes, bem como estratégias para realizar o controle de torque deste servomotor.

3.1. SERVOMOTOR UTILIZADO

Os servomotores CA sem escovas a ímãs permanentes de terras raras (Neodímio-Ferro-Boro) têm características construtivas que permitem uma rotação suave e uniforme em todas as velocidades. Além disso, apresentam baixo nível de ruído e de vibração, ampla faixa de rotação com torque constante, baixa manutenção, elevada capacidade de sobrecarga, baixa inércia, resposta dinâmica rápida, alta resposta ao torque, boa dissipação de calor e, conseqüentemente, alta eficiência energética, bem como capacidade de operar em sobrecarga (MAO e LI, 2010).

Foi escolhido como objeto de estudo o servomotor modelo SWA do fabricante WEG devido às características técnicas citadas, bem como por este ser um servomotor em que a malha de controle de corrente pode ter seus valores alterados através da devida programação do servoconversor em *Ladder*. Além disso, por questões financeiras e logísticas, pode ser obtido com maior facilidade e agilidade por tratar-se de um produto nacional.



Figura 24 - Servomotor WEG SWA
Fonte: (WEG, 2012).

O modelo SWA-40-0.8-30 escolhido possui torque de 0,8 N.m e rotação nominal de 3.000 rpm. Seu grau de proteção IP65⁸ e isolamento Classe F⁹ possibilitam a utilização em ambientes de condições bastante adversas. A realimentação por resolver garante um projeto robusto e insensível a vibrações e elevadas temperaturas. Visando aplicações comerciais variadas, esse servomotor possui formas construtivas adaptáveis e conta com ponta de eixo com chave para apta a conectar outros equipamentos e instrumentos, como por exemplo, uma célula de carga ou eixos de transmissão. Como característica adicional, pode-se observar na Figura 25 que o torque do servomotor SWA-WEG permanece bastante estável numa ampla faixa de rotação.

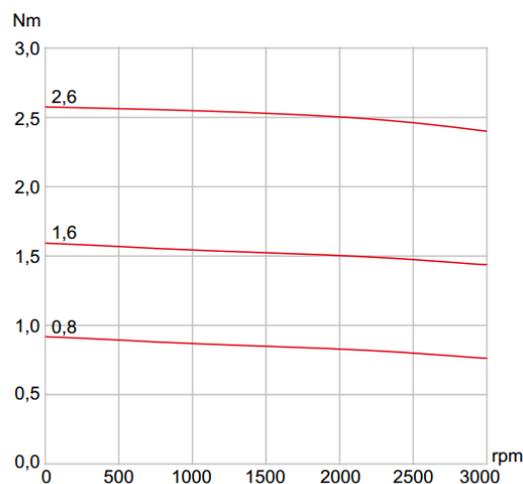


Figura 25 - Curva de torque do servomotor modelo SWA-40 WEG de 3000 rpm
Fonte: (WEG, 2011).

⁸ IP65: totalmente protegido contra poeira e jatos d'água, conforme IEC 60529

⁹ Classe F: limite de temperatura de 155°C, conforme a NBR 7094

3.2. MODELAGEM DE UM SERVOMOTOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES

3.2.1. Modelo matemático do servomotor

Em projetos de sistemas de controle, a simulação é uma etapa muito importante para avaliar o comportamento da planta, bem como a estabilidade do sistema. Desta forma, com os devidos ajustes e correções, o desempenho ótimo pode ser alcançado. Porém, a simulação apenas será possível conhecendo-se o modelo analítico do sistema e os parâmetros fixos e variáveis com o tempo.

Embora haja certa confusão quanto à adoção do correto modelo matemático em cada tipo servomotor, tanto na indústria como no ambiente de pesquisa universitário, sabe-se que um MSIP é muito semelhante a uma máquina síncrona de rotor bobinado padrão, exceto que esse primeiro não possui enrolamentos amortecedores e a excitação é feita através dos ímãs permanentes, em vez de dos enrolamentos de campo. Essa similaridade da matemática do modelo MSIP e do motor síncrono de rotor bobinado é resultado, portanto, do fato de não haver diferença entre a força contra-eletromotriz produzida por um ímã permanente e a força contra-eletromotriz produzida pela excitação de uma bobina (PILLAY e KRISHNA, 1988).

Para que o desenvolvimento do modelo do servomotor síncrono de ímãs permanentes seja verdadeiro, devem ser adotadas as seguintes suposições:

- A saturação é desprezada, embora possa ser levada em conta por alterações de parâmetros.
- A força contra-eletromotriz é senoidal.
- As correntes parasitas e perdas por histerese são desprezíveis.

Diante da possibilidade de se poder representar a dinâmica de máquinas de corrente alternada em diferentes sistemas de coordenadas, como por exemplo, em coordenadas de fase (a, b, c) , coordenadas do estator (α, β) ou ainda pelo sistema de orientação pelo campo do rotor (d, q) (OLIVEIRA JUNIOR, 2007), a dinâmica do servomotor utilizado e a descrição geral dos seus efeitos eletromagnéticos pode ser

derivada a partir das leis físicas básicas que regem seu movimento, conforme as expressões:

$$U = RI + d\Psi/dt \quad (2)$$

$$\Psi = LI + \Psi_m \quad (3)$$

nas quais Ψ, I e U são, respectivamente, vetores de enlaces de fluxo no estator, corrente e tensão, enquanto que R, L e Ψ_m representam as matrizes de resistências, indutâncias e enlaces de fluxo originados pelo ímã permanente do servomotor. Descrevendo as componentes deste fluxo enlaçado no sistema de coordenadas de fase (a, b, c) , tem-se:

$$\Psi_{ma} = \lambda_0 \cos \theta_e \quad (4)$$

$$\Psi_{mb} = \lambda_0 \cos(\theta_e + 2\pi/3) \quad (5)$$

$$\Psi_{mc} = \lambda_0 \cos(\theta_e - 2\pi/3) \quad (6)$$

onde θ_e é a posição angular elétrica do rotor das máquinas e λ_0 é o enlace do fluxo do ímã. Desconsiderando o efeito da relutância (OLIVEIRA JUNIOR, 2007), a parte elétrica de um servomotor síncrono de ímãs permanentes pode ser descrita como:

$$di_a/dt = -(R/L) i_a - (1/L) e_a + (1/L) v_a \quad (7)$$

$$di_b/dt = -(R/L) i_b - (1/L) e_b + (1/L) v_b \quad (8)$$

$$di_c/dt = -(R/L) i_c - (1/L) e_c + (1/L) v_c \quad (9)$$

A resistência do estator é representada por R e a indutância dos enrolamentos por L , enquanto que i_a, i_b, i_c e v_a, v_b, v_c representam as correntes e tensões de fase, respectivamente. A força contra-eletromotriz induzida é então dada por:

$$e_a = d\Psi_{ma}/dt = -\lambda_0 \omega_e \sin \theta_e \quad (10)$$

$$e_b = d\Psi_{mb}/dt = -\lambda_0 \omega_e \sin(\theta_e + 2\pi/3) \quad (11)$$

$$e_c = d\Psi_{mc}/dt = -\lambda_0 \omega_e \sin(\theta_e - 2\pi/3) \quad (12)$$

Já a velocidade angular elétrica do rotor será representada por:

$$\omega_e = d\theta_e/dt \quad (13)$$

Aplicando-se a transformada de Clarke¹⁰ ao sistema (a, b, c) , obtém-se o sistema de coordenadas do estator (α, β) . Assim, a parte elétrica do servomotor neste sistema de coordenadas é descrita por:

$$di_{\alpha}/dt = -R/L i_{\alpha} - 1/L e_{\alpha} + 1/L v_{\alpha} \quad (14)$$

$$di_{\beta}/dt = -R/L i_{\beta} - 1/L e_{\beta} + 1/L v_{\beta} \quad (15)$$

A força contra-eletromotriz (e_{α}, e_{β}) nesse mesmo sistema será:

$$e_{\alpha} = -\lambda_0 \omega_e \sin \theta_e \quad (16)$$

$$e_{\beta} = -\lambda_0 \omega_e \cos \theta_e \quad (17)$$

O modelo do servomotor no sistema de orientação pelo campo do rotor (d, q) , obtido a partir da transformada de Park¹¹, é descrito como:

$$di_d/dt = -R/L_d i_d + \omega_e i_q + 1/L_d v_d \quad (18)$$

$$di_q/dt = -R/L_q i_q - \omega_e i_d - \lambda_0/L_q \omega_e + 1/L_q v_q \quad (19)$$

Neste sistema, as correntes e tensões do estator são respectivamente i_d, i_q e v_d, v_q . As transformações realizadas para levar as variáveis do sistema de coordenadas de fase (a, b, c) para o sistema de orientação pelo campo do rotor (d, q) resultam em forçar que as variações senoidais das indutâncias tornem-se constantes neste sistema (d, q) (PILLAY e KRISHNA, 1988).

A partir dessas equações dinâmicas do MSIP, o circuito equivalente do servomotor pode ser representado conforme Figura 26.

¹⁰ A transformada de Clarke pode ser vista com maiores detalhes no apêndice A.

¹¹ A transformada de Park pode ser vista com maiores detalhes no apêndice B.

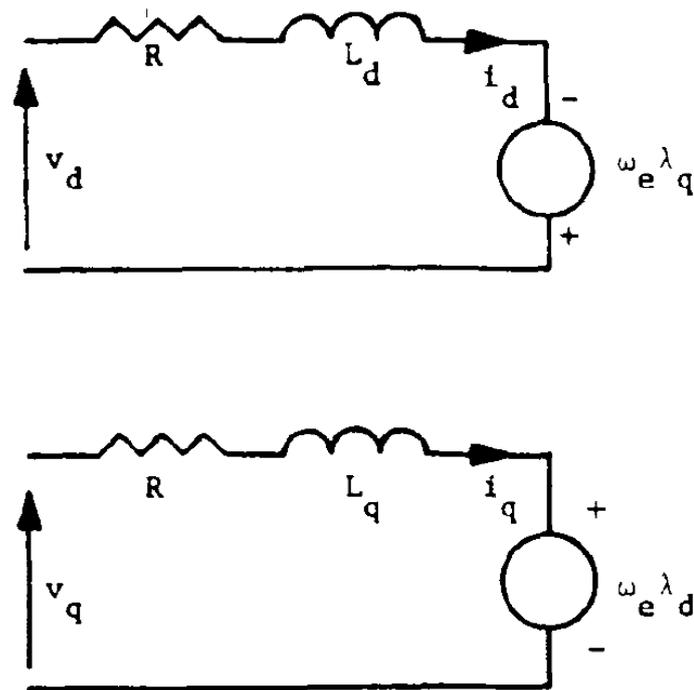


Figura 26 - Circuito equivalente das equações dinâmicas de um MSIP
Fonte: (PILLAY e KRISHNA, 1988).

O torque eletromagnético, dado por τ_e , e a potência mecânica do servomotor P são:

$$\tau_e = 3/2 N [\lambda_0 i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (20)$$

$$P = \tau_e \omega_r \quad (21)$$

A parcela $3/2 N \lambda_0$ representa a constante de torque do motor, simbolizada por K , ω_r a velocidade angular mecânica do rotor e N o número de pares de pólos do servomotor. A equação dinâmica do movimento no sistema de orientação pelo campo do rotor (d, q) será:

$$J d\omega_r/dt = \tau_e - \tau_l - B\omega_r \quad (22)$$

O coeficiente de atrito relativo à velocidade do rotor, também conhecido por constante de amortecimento rotacional, é representado por B e o torque resistente da carga é dado por τ_l (QIU, WU e KOJORI, 2004). Finalmente, o comportamento dinâmico do servomotor em estudo será, resumidamente, representado pelo conjunto de equações:

$$di_d/dt = -R/L_d i_d + N L_q/L_d \omega_r i_q + 1/L_d v_d \quad (23)$$

$$di_q/dt = -R/L_q i_q - N L_d/L_q \omega_r i_d - \lambda_0 N/L_q \omega_r + 1/L_q v_q \quad (24)$$

$$J d\omega_r/dt = 3/2 N [\lambda_0 i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] - \tau_l - B\omega_r \quad (25)$$

$$d\theta_e/dt = N\omega_r \quad (26)$$

$$\tau_e = 3/2 N [\lambda_0 i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (27)$$

As saliências presentes no entreferro do MSIP, devido à disposição dos ímãs no interior do rotor, dão origem ao chamado torque de relutância (FIGUEIREDO e BIM, 2010). Porém, este tipo de torque, representado na parcela $N(L_d - L_q)i_d i_q$, frequentemente é pouco significativo. Fixando-se assim a componente de corrente i_d em zero, com o objetivo de minimizar as perdas da máquina, de modo que somente a corrente i_q seja proporcional ao torque (BOILEAU, LEBOEUF, *et al.*, 2011), será obtido o produto externo dos vetores de fluxo e corrente representados por:

$$J d\omega_r/dt = 3/2 N \lambda_0 i_q - \tau_l - B\omega_r \quad (28)$$

O torque eletromagnético do modelo do servomotor modelado será dado por:

$$\tau_e = 3/2 N \lambda_0 i_q \quad (29)$$

3.2.2. Controle de torque

Geralmente, para realizar o controle deste MSIP, é utilizado o método de regulação por corrente com inversor PWM, o qual fornece uma corrente senoidal ao motor. Para realização do controle do torque aplicado, são definidas três diferentes topologias (CHUNG, KIM, *et al.*, 1998).

A Figura 27 mostra o controle do MSIP utilizando o controle com base pela corrente i_q através da proporcionalidade k_t com o torque.

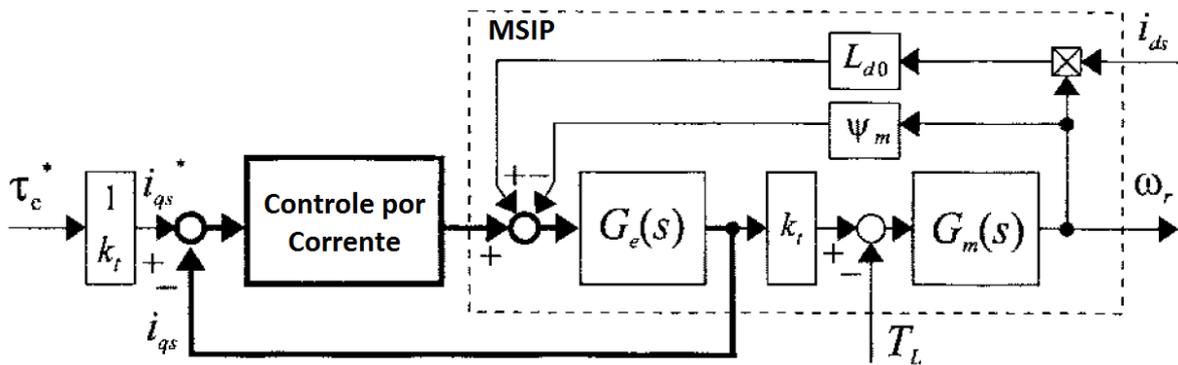


Figura 27 - Diagrama do controle de corrente
Fonte: (CHUNG, KIM, *et al.*, 1998).

Neste método, para o caso em que a distribuição de corrente é perfeitamente senoidal, ele não apresentaria as harmônicas que acabam gerando indesejáveis pulsações de torque. Para acabar com este problema, o controle de torque instantâneo pode ser introduzido, como mostrado na Figura 28. Porém este tipo de solução é bastante cara (CHUNG, KIM, *et al.*, 1998).

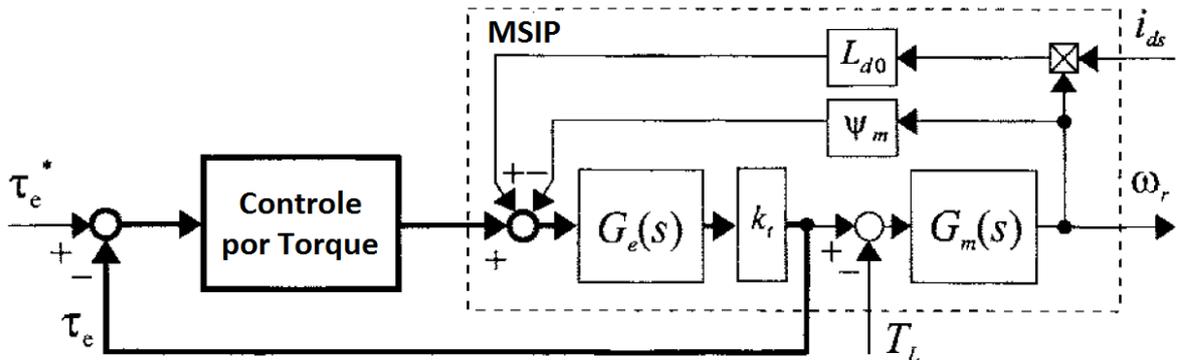


Figura 28 - Diagrama do controle instantâneo
Fonte: (CHUNG, KIM, *et al.*, 1998).

Outra maneira pela qual se pode implementar o método com estimação do torque é através da aquisição de valores, como a corrente e ângulo do rotor, conhecido por controle de torque instantâneo utilizando estimador de torque. Porém, a realização deste método requer uma programação muito aprofundada para a aplicação prática. A maneira de realizá-lo é mostrada na Figura 29:

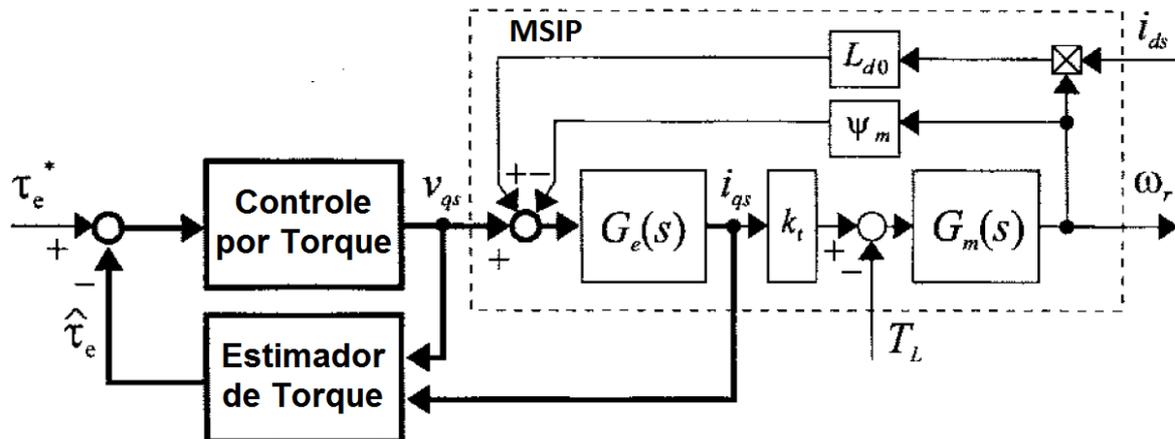


Figura 29 - Diagrama do controle instantâneo com estimador
 Fonte: (CHUNG, KIM, *et al.*, 1998).

3.2.3. Programação em *LabVIEW*

O *LabVIEW* foi a ferramenta utilizada para realizar a interface de programação deste trabalho. Este programa funciona através de linguagem gráfica, comumente chamada de linguagem G, e seus dados são transferidos de um nó a outro, de modo que a execução de um determinado bloco apenas ocorra quando houver a totalidade dos sinais de entrada.

O instrumento virtual (VI), sub-rotinas ou programas, da Figura 30, para que seja acionado, necessita que as entradas A, B e C recebam alguma informação para que haja o processamento e a transferência aos sinais em D e E.

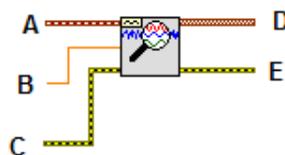


Figura 30 - Modelo de instrumento virtual
 Fonte: Autoria própria via *LabVIEW*

Assim como as demais linguagens de programação, para que uma rotina seja executada de maneira cíclica, o *LabVIEW* dispõe de diversas estruturas que possibilitam tal desempenho, como por exemplo, as funções: “*Loop While*” e “*Loop For*”, apresentadas na Figura 31.

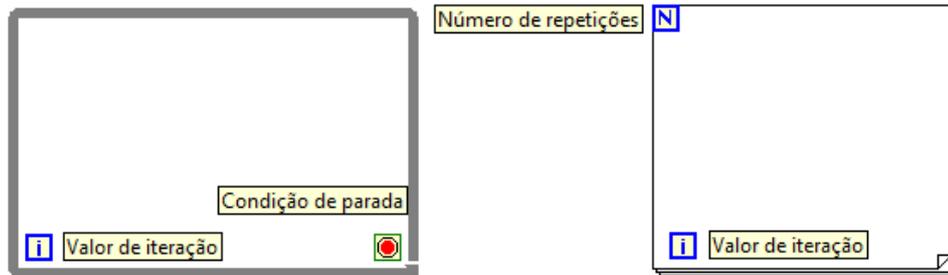


Figura 31 - Função Loop WHILE e Loop FOR
 Fonte: Autoria própria via *LabVIEW*

Esta linguagem de comunicação pelo fato de ser gráfica facilita no entendimento e na elaboração de programas. O *LabVIEW* possui diversos pacotes adicionais que podem auxiliar na resolução de diversos problemas da engenharia. Para este trabalho é necessário pacotes adicionais como o *Control Design & Simulation* e o *NI ModBUS*.

3.2.4. Modelagem em *LABVIEW*

A implementação de um modelo dinâmico, para que seja possível simulação o comportamento da máquina, pode ser realizada através da utilização de um pacote adicional chamado: *Control Design & Simulation*.

Este *Toolkit* (Figura 32) foi desenvolvido pela National Instruments para realizar, através da plataforma *LabVIEW*, simulações de Controle em geral. Pode ser implementado também funções de transferências, PID, FUZZY, estimadores entre outros itens do controle discreto ou contínuo.

As ferramentas da parte do Control Design são utilizadas para construir e analisar sistemas dinâmicos. As Ferramentas do item Simulação são utilizadas para simular os sistemas através de uma malha de controle.

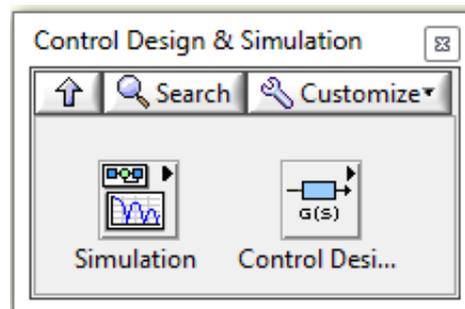


Figura 32 - Control Design & Simulation
 Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

As principais Vis do item de simulação são apresentadas na Figura 33:

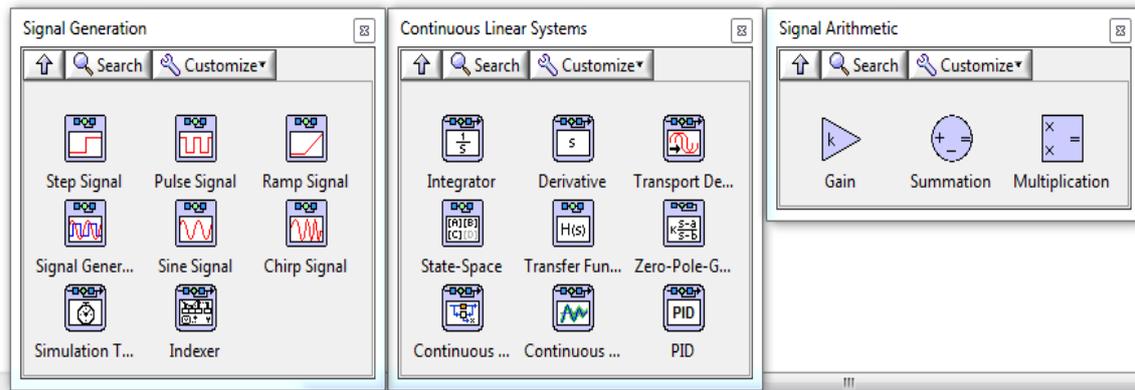


Figura 33 - Principais funções da Simulação
Fonte: Autoria própria via LabVIEW(2012).

Desta forma com a utilização deste é possível construir em *LabVIEW* o servomotor MSIP, bem como simular seu sistema de controle.

3.2.5. Comunicação em *LabVIEW*

Para a realização de comunicação de dados e *LabVIEW* assim como em outras linguagens é preciso seguir uma sequência. Esta lógica de sequenciamento é importante para definir o processo de uma aquisição de sinal. Tal processo segue as seguintes etapas:

- Configuração.
- Escrita.
- Leitura.
- Processamento.
- Fechamento da comunicação.

A construção do sistema de comunicação entre o servomotor e a estrutura de controle remoto depende de um protocolo de comunicação. O servoconversor SCA06 utiliza os protocolos CANopen, Modbus e um protocolo¹² específico do

¹² Protocolo consiste em um conjunto de regras e convenções para conversação, de modo que a comunicação entre dois equipamentos seja definida. Já as sintaxes são definidas nos protocolos e consistem na forma de como os equipamentos irão dispor os dados para que ambos os lados compreendam a informação. [TAN1994] TANENBAUM, Andrew S.. **Redes de computadores**. 2. Ed. Rio de Janeiro : Campus, 1994.

fabricante do servoconversor, entre outros, para realizar a interpretação dos dados transmitidos. Neste trabalho foi adotado o protocolo Modbus.

Como o *software LabVIEW* não possui uma biblioteca previamente instalada, para executar tal protocolo se fez necessário realizar o *Download* e instalação da biblioteca *NI Modbus Library for LabVIEW*, conforme Figura 34.

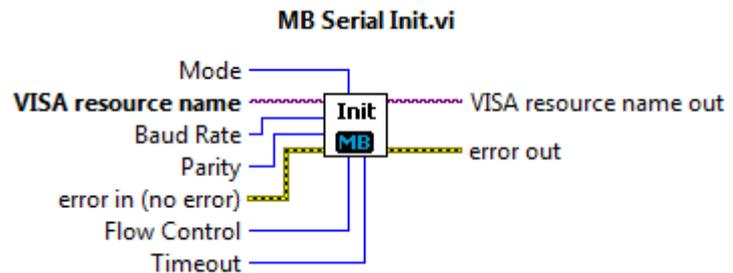


Figura 34 - Instrumento virtual MB Serial Init
Fonte: Autoria própria via LabVIEW.

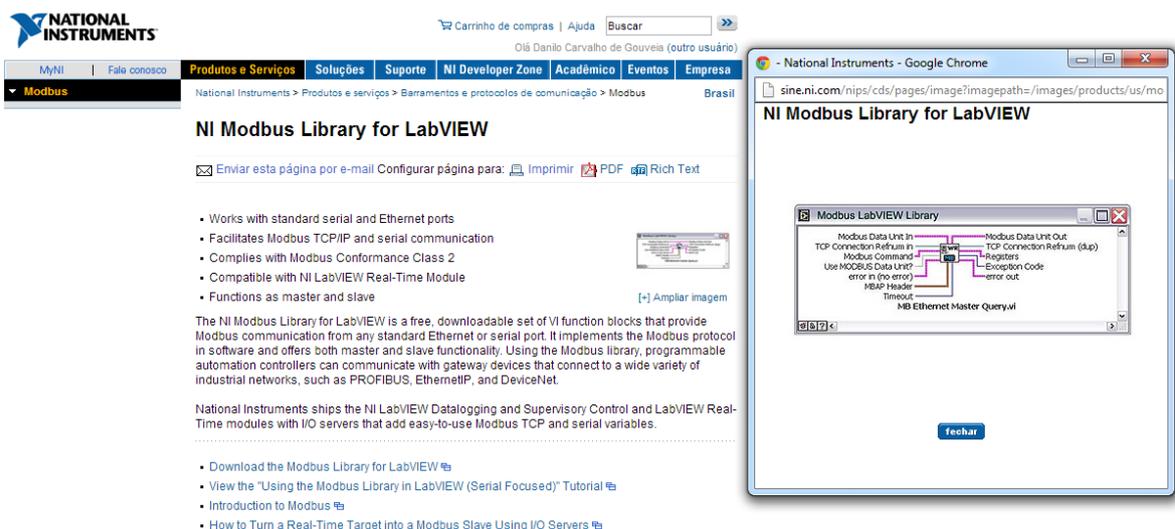
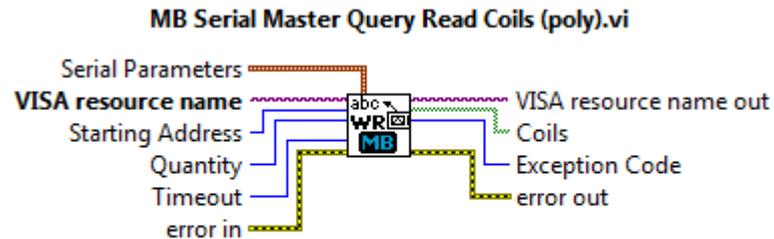


Figura 35 - Site Nacional Instruments para download NI Modbus library for LabVIEW
Fonte: Autoria própria via LabVIEW

Desta biblioteca, as principais VIs utilizadas foram, primeiramente, a VI *MB Serial Init* para programar a etapa de configuração das portas de comunicação e a VI *MB Serial Master Query Read Coils (poly)* para a etapa de escrita e leitura.



The master uses this VI to read the slaves' coils. This corresponds to a public function code of 1 in the MODBUS protocol.

Figura 36 - Instrumento virtual MB Serial Master Query Read Coil (poly)
Fonte: Aatoria própria via LabVIEW.

3.3. SERVOCONVERSOR

O servoconversor SCA-06 da empresa WEG foi escolhido para realizar o controle do servomotor SWA do mesmo fabricante. Tal escolha foi estratégica para se trabalhar com uma única classe de equipamentos, com o objetivo de evitar incompatibilidades de sistemas e possíveis erros de comunicação. Este equipamento permite tanto o controle de velocidade e posição, como o controle de torque de servomotores trifásicos de corrente alternada (WEG, 2012).

Tais drives necessitam de uma interface para comunicação com o computador. Esta interface física ou via rádio frequência é chamada de meio de transmissão (SAKURAY, 2005) e podem ser RS-232, RS-485, CANopen, Ethernet 10/100, DeviceNet e EtherCAT, além de outras interfaces proprietárias, como o *Sercos I, II e III* da Bosh Rexroth (LIMA e OLIVEIRA, 2011). De maneira errônea, o conceito destas interfaces são entendidas como protocolos contrariando a definição dos conceitos dos padrões ANSI/ISA-95 e EIA (RS) (CUNHA, 2000).

Nesta seção serão apresentadas três redes de comunicação utilizadas: USB, RS-232 e RS-485.

- **Porta USB**

O servoconversor possui uma porta USB que permite ao usuário a leitura/escrita de parâmetros, *download/upload* e monitoração das informações. Devido ao fato de que o USB é assíncrono, sendo que neste estudo baseou-se na análise de dados síncronos, a porta deve ser utilizada apenas para realizar

configurações iniciais. Este meio de comunicação foi utilizado para transferir o programa *Ladder* para a unidade de servoacionamento e tal operação foi realizada pelo software “*WEG Ladder Programmer - WLP*”. A Figura 37 representa como é feita a ligação.

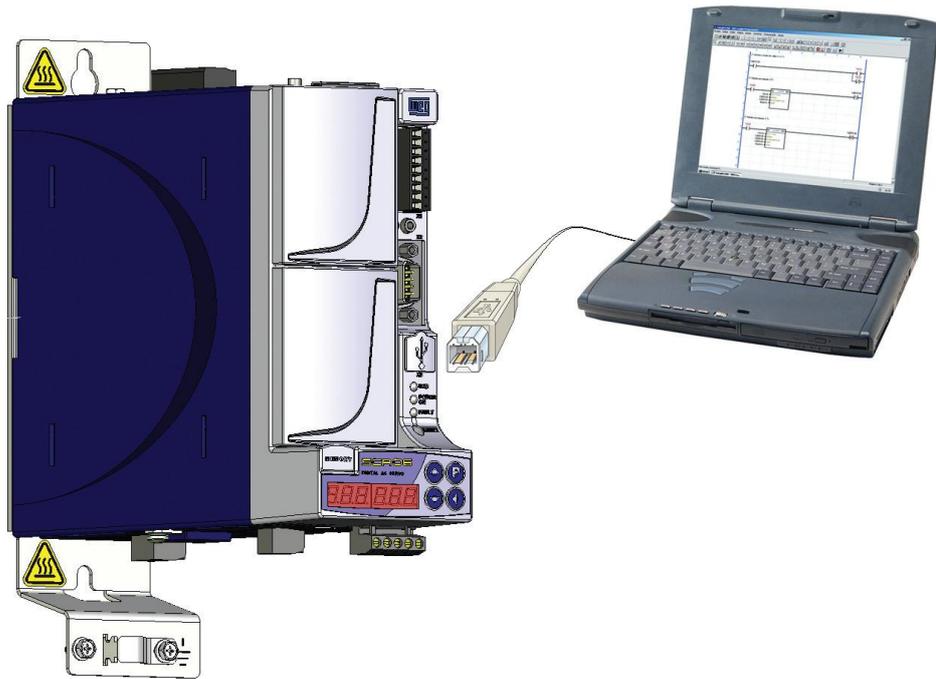


Figura 37 - Comunicação do servoconversor com o computador pela USB.
Fonte: (WEG, 2012).

- **Bloco de comunicação RS232 e RS485**

Para que fosse possível a troca de informação em tempo real durante os ensaios entre o computador e o servoconversor, foi necessário utilizar um bloco adicional com as interfaces RS-232 e RS-485, visto que o SCA-06 dispõe de três entradas disponíveis para blocos extras, conforme apresentado na Figura 38:

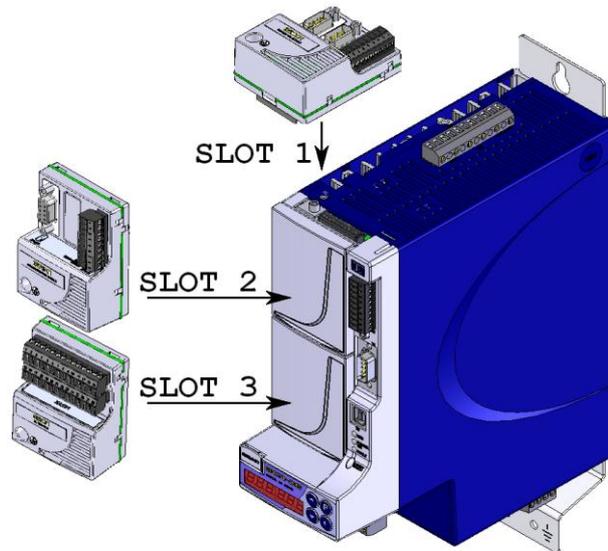


Figura 38 - Expansão das conexões.
 Fonte: (WEG, 2012).

O bloco que contém as entradas e saídas RS232 e RS485 é conhecido como “Opcional ECO-1” e sua estrutura é apresentada na Figura 39.

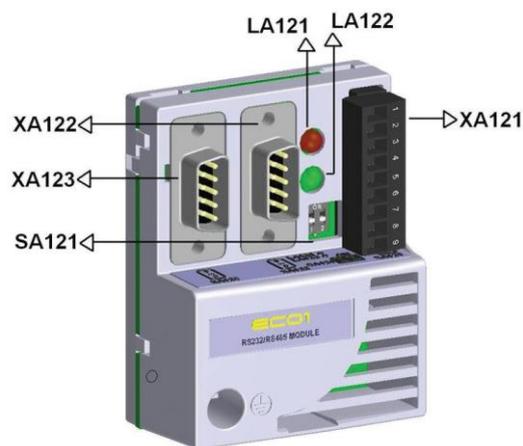


Figura 39 - Bloco de expansão Eco 1.
 Fonte: (WEG, 2012).

Sendo que:

XA121 - Interface RS232 e RS485.

XA122 - Interface RS232.

XA123 - Interface RS485.

LA121 - Acende quando a transmissão é feita por RS232.

LA122 - Acende quando a transmissão é feita por RS485.

SA121 - Chave de seleção de modo.

O padrão serial RS foi desenvolvido pela *Electronics Industry Association* (EIA) e apresenta duas formas de transmissão: SDT e DDT (SMITH, 2010).

SDT (*Single-Ended Transmission*) é a arquitetura, presente no RS232 e RS423, que consiste em transmitir o sinal por um condutor e utilizando outro condutor de aterramento como referência.

DDT (*Differential Data Transmission*) é a arquitetura, presente no RS422 e RS485, que transmite o sinal por um condutor, tendo outro condutor com o sinal invertido para se obter uma diferença de sinal praticamente imune às interferências.

- **RS232:**

O padrão RS232 possui canais independentes para transmissão, com uma linha para transmitir e outra para receber os dados. A transmissão/aquisição dos dados é feita pela variação do nível de tensão, com arquitetura SDT, de modo que a taxa de transmissão é reduzida a ordem de até 20Kbps para uma distância de 15 metros (ARC ELETRÔNICOS, 2000). No servoconversor essa interface pode ser utilizada respeitando a ordem dos pinos, presentes no conector, de acordo com o Quadro 3.

Quadro 3 - Especificação da conexão XA122 para RS232

Conector XA122	
Pino	Função
1	NC
2	RX_232
3	TX_232
4	Reservado *
5	GND
6	NC
7	232 RTS
8	NC
9	NC
Carcaça	Terra

* Não conectar os pinos reservados.

Fonte: (WEG, 2012).

- **RS485:**

A RS485 utiliza um ou dois pares de fios para transmissão de dados. Tem isolamento óptico, e trabalha a taxas de transmissão de 10 Mbps e seu alcance pode atingir, sem amplificação, aproximadamente 1200 metros de distância. A transmissão de dados ocorre na forma *DDT* (ARC ELETRÔNICOS, 2000). O Quadro 4 apresenta a configuração dos pinos para conexão.

Quadro 4 - Especificação da conexão XA123 para RS485

Conector XA123	
Pino	Função
1	NC
2	NC
3	NC
4	NC
5	GND
6	Reservado *
7	Nc
8	A (Data -)
9	B (Data +)
Carcaça	Terra

* Não conectar os pinos reservados.

Fonte: (WEG, 2012).

A entrada XA121 pode utilizar RS232 ou RS485 desde que sejam respeitadas as especificações do Quadro 5

Quadro 5 - Especificação da conexão XA121 para RS232 e RS485

Conector XA121	
Pino	Função
1	Terra
2	RX_232
3	TX_232
4	Reservado *
5	GND
6	Reservado *
7	232 RTS
8	A
9	B

* Não conectar os pinos reservados.

Fonte: (WEG, 2012).

3.3.1. Plataforma WLP

O controle do servomotor utilizado foi feito pelo *software WLP* e este utiliza lógica *Ladder* para a programação. O *software* foi escolhido por ser desenvolvido pela WEG, mesma fabricante do servomotor, por possuir uma ampla documentação de suas funcionalidades e pela boa confiabilidade que apresenta, visto que é disponibilizado pelo mesmo fabricante do sistema (WEG, 2012). A linguagem *Ladder* adotada no *software* também se destaca como um diferencial para tal escolha, pois durante a programação é possível assimilar perfeitamente funções simples com funções avançadas, como no caso o controle PID do servomotor. A Figura 40 contempla o ambiente para edição no *software WLP*.

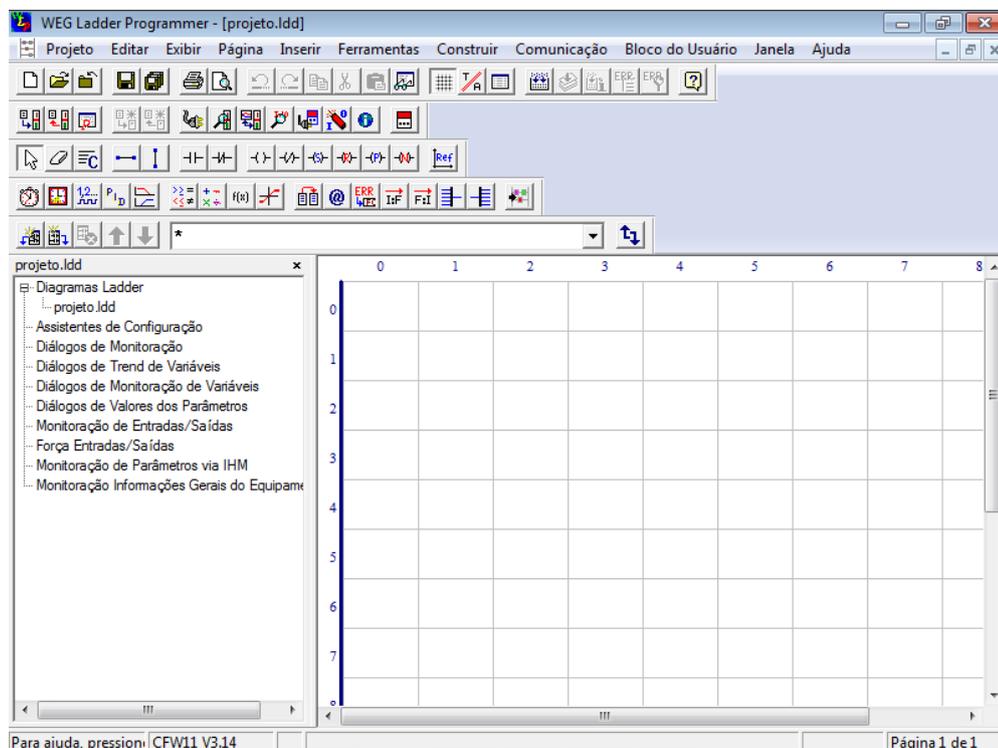


Figura 40 - Ambiente de trabalho do WLP
Fonte: Autoria própria via WLP.

Após a programação, os dados são inseridos no servoconversor por meio da interface adotada. O trabalho nesse programa será de maneira *offline*, pois uma vez que os dados sejam enviados para o servoconversor, este passa a seguir a lógica em conjunto com comandos externos no modo *online*, ou seja, em tempo real, por intermédio da instrumentação virtual, neste caso o *LabVIEW*.

4. SIMULAÇÕES, EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Para construir um modelo concreto, é preciso seguir um procedimento de identificação normalmente distribuído em 3 partes (LJUNG, 1987):

- Escolha do modelo aproximado: escolher modelo matemático referente à aplicação desejada. O modelo escolhido para a questão já é conhecido no meio acadêmico.
- Obtenção dos dados: obter um ensaio para recolher dados referentes ao sinal aplicado e o sinal de leitura.
- Regra para validação: analisar as respostas da planta e do modelo verificando a confirmação do modelo definido (IKONEN e NAJIM, 2002) (SUN, LI e XU, 2003).

O presente trabalho procurou então identificar os parâmetros reais do servomotor utilizado em projeto, bem como sua modelagem teórica, conforme literatura de referência e, finalmente, desenvolver a simulação no ambiente computacional, procurando comparar o desempenho simulado, com a resposta esperada na prática. Apresentou-se também o controle de torque do servomotor por dois modos distintos: controle de corrente e controle de torque instantâneo.

4.1. ESCOLHA DO MODELO

A escolha do modelo em questão foi feita através do levantamento bibliográfico existente e desta forma foi implementado em *LabVIEW*.

4.1.1. Elaboração da Máquina MSIP em *LabVIEW*.

Para realizar a criação de simulações utilizando a máquina PMSM é preciso inicialmente conhecer o modelo matemático, Quadro 6, dela e por intermédio dele desenvolver o modelamento em *LabVIEW*.

Quadro 6 - Resumo da modelagem do MSIP.

$di_d/dt = -R/L_d i_d + N L_q/L_d \omega_r i_q + 1/L_d v_d$
$di_q/dt = -R/L_q i_q - N L_d/L_q \omega_r i_d - \lambda_0 N/L_q \omega_r + 1/L_q v_q$
$J d\omega_r/dt = 3/2 N[\lambda_0 i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] - \tau_l - B\omega_r$
$d\theta_e/dt = N\omega_r$
$\tau_e = 3/2 N[\lambda_0 i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]$

Desta forma, com base nas equações obtidas através da modelagem da máquina MSIP é possível realizar a implementação em *LabVIEW* desta máquina para realização de ensaios preliminares aos ensaios práticos, fazendo com que o tempo de desenvolvimento de projetos seja diminuído.

Para a realização da modelagem, Figura 41, que equaciona o movimento do rotor do servomotor, utiliza-se a equação do movimento é possível elaborar a seguinte VI em *LabVIEW* em conjunto com os pacotes de programação adicionais do *control design simulation*.

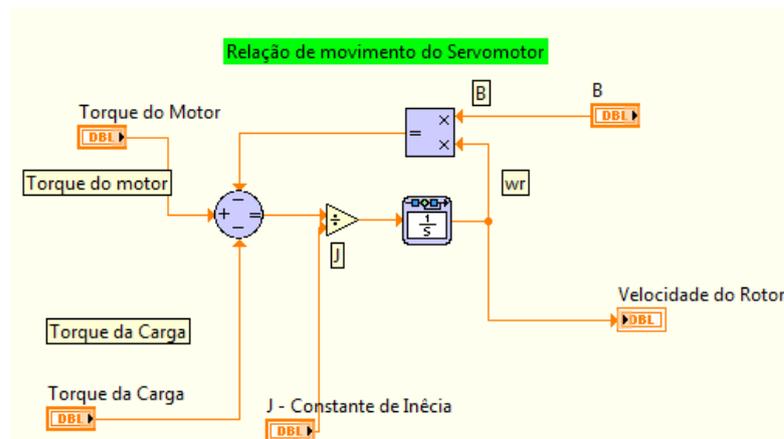


Figura 41 - Modelagem do Movimento
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

A realização da modelagem que encontra o torque elétrico é descrito na Figura 42:

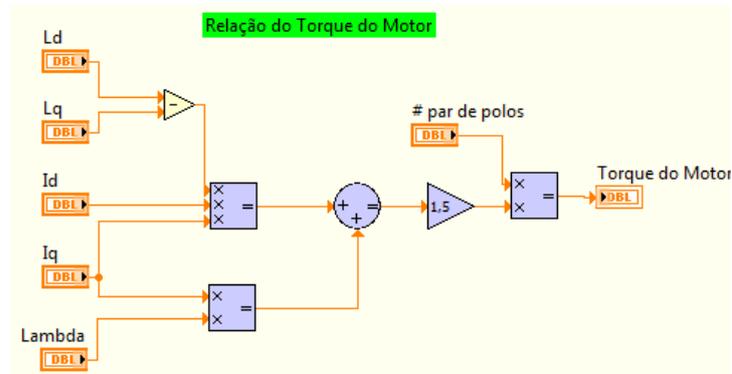


Figura 42 - Modelagem do torque fornecido pelo servomotor
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

A implementação da equação das correntes I_d e I_q são mostrados na Figura 43 e Figura 44, respectivamente:

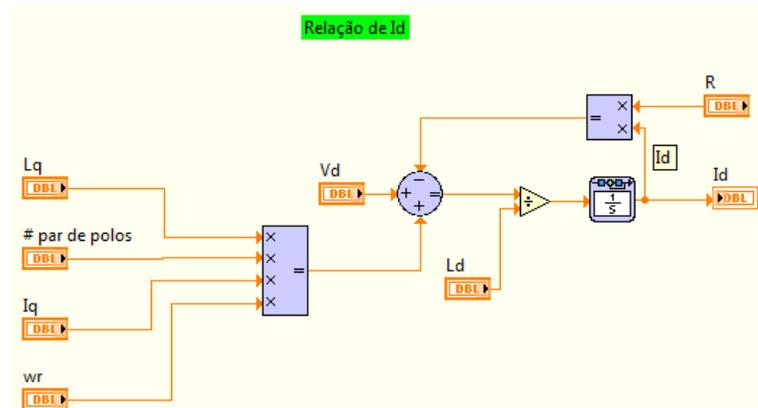


Figura 43 - Modelagem de I_d
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

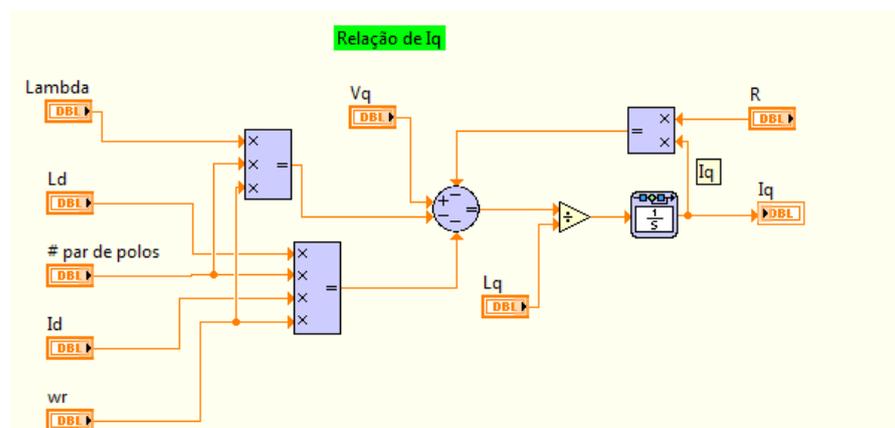


Figura 44 - Modelagem de I_q
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

A modelagem para obter a posição angular é mostrada na Figura 45:

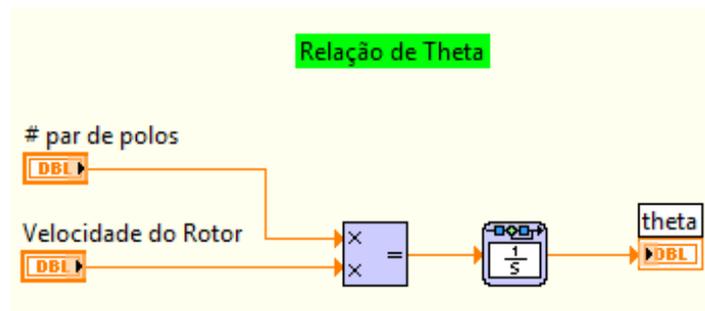


Figura 45 - Modelagem do posicionamento angular.
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

Finalmente, para alimentar o servomotor é preciso que chegue a seus enrolamentos uma tensão, porém para que seja processado e analisado o comportamento transitório desta máquina é utilizado o modelo d-q, como mostrado na Figura 46, através das transformadas de Clarke e Park (PILLAY e KRISHNA, 1988).

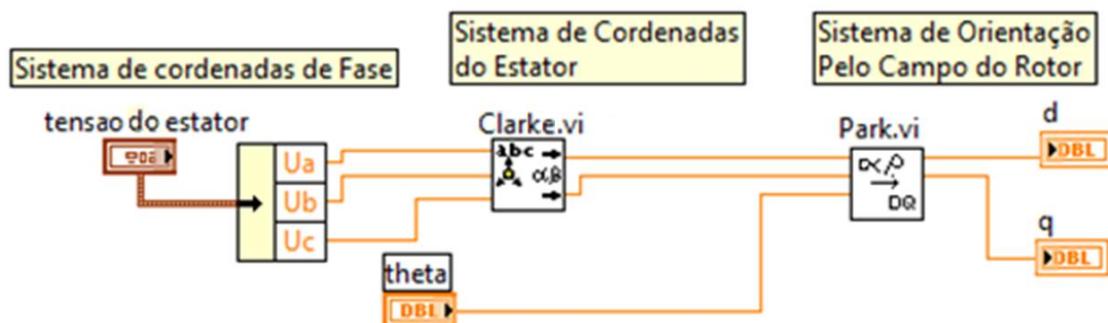


Figura 46 - Modelagem da alimentação do servomotor
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

4.2. OBTENÇÃO DOS DADOS E VALIDAÇÃO DO MODELO

4.2.1. Obtenção dos Parâmetros do servomotor MSIP

Foram levantados os parâmetros do servomotor utilizado com o objetivo de desenvolver simulações no ambiente computacional *LabVIEW*, o mais próximo da realidade. Esses parâmetros foram acessados através do servoconversor, conectado ao servomotor, ambos devidamente alimentados pela rede elétrica e aterrados.

Primeiramente, foram levantados os valores relativos às características físicas do servomotor e que não variam conforme sua aplicação e apresentado no Quadro 7:

Quadro 7 - Características físicas do servomotor.

Característica	Parâmetro	Valor
Modelo do servomotor	P0385	19 (SWA 40-0.8-3000rpm)
Resistência	P0409	32,7 Ohms
Numero de pares de pólos	P0407	4
Indutância de quadratura (Iq)	P0414	42,60 mH
Indutância do eixo direto (Id)	P0415	40,00 mH
Constante de torque	P0417	0,800 N.m/A
Inércia do motor (Jm)	P0418	0,0497g.m ²

Os parâmetros de corrente e velocidade, referido como P0119 e P0121 respectivamente, podem sofrer diversas alterações durante o uso e o controle utilizado. Os demais parâmetros de ganhos utilizados nos controles estão listados no Quadro 8:

Quadro 8 - Parâmetros dos ganhos do PID.

Característica	Parâmetro	Valor
Ganho Proporcional do PID de Corrente Iq (Kp)	P0392	9019
Ganho Integral do PID de Corrente Iq (Ki)	P0393	250
Ganho Proporcional do PID de Corrente Id (Kp)	P0395	11514
Ganho Integral do PID de Corrente Id (Ki)	P0396	500
Ganho Proporcional do Regulador de Posição (Kp)	P0159	50
Ganho Proporcional do Regulador de Velocidade (Kp)	P0161	1500
Ganho Integral do Regulador de Velocidade (Ki)	P0162	30
Ganho Derivativo do Regulador de Velocidade (Kd)	P0163	0

4.2.2. Levantamento da curva P0067¹³ X Torque

Este ensaio simulado foi realizado para verificar o comportamento do parâmetro P0067 do servoconversor com a variação da entrada de torque.

O parâmetro P0067 é usado para armazenar a informação de torque. Este parâmetro tem a capacidade de realizar a leitura de valores de -10 a 10 volts e representar tais valores em números inteiros de -8192 a 8192. A descrição do Parâmetro P0067 e sua programação são mostradas no Apêndice D.

- Modelamento em *LabVIEW*

A modelagem foi realizada levando em consideração os parâmetros dos controladores adquiridos no ensaio.

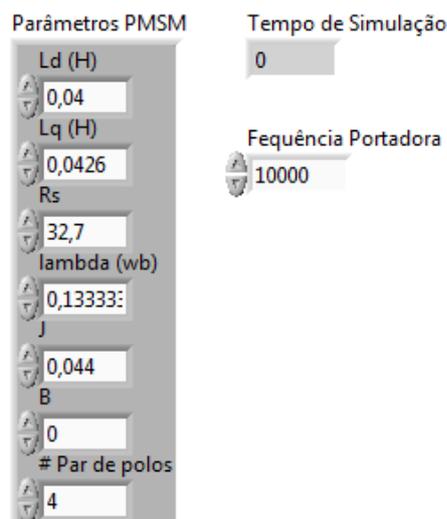


Figura 47 - Parâmetros do servomotor MSIP - Painel Frontal
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

¹³ O parâmetro P0067 está detalhado no Apêndice D.

Foi elaborado a VI conforme a Figura 48.

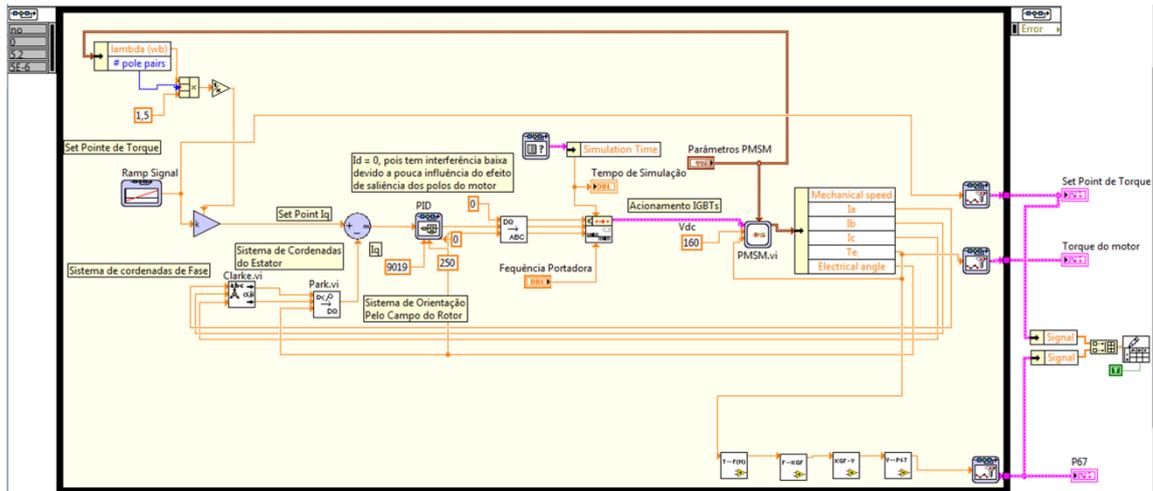


Figura 48 - VI para levantamento da curva P0067 x Torque - Diagrama de Blocos
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

Esta VI possui uma hierarquia de sub-VIs que são mostradas na Figura 49. É possível observar que a VI de controle “1” possui diversas Sub-VIs: 2 - VI de armazenamento, 3 - VI de conversão, 4 - Modelagem do servomotor MSIP, 5 - VI de PID, 6 - Modelagem de uma ponte de IGBTs, 7 - Transformada de Park, 8 - Transformada inversa de Park, 9 - Transformada de Clark, 10 - Sistema de modelagem do *Control Design e Simulation* e 11 - VI de criação de SPWM.

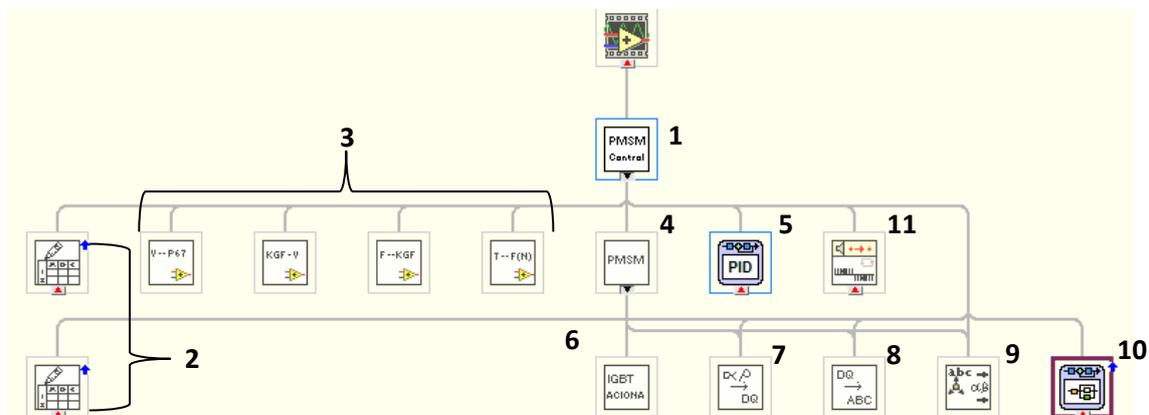


Figura 49 - Hierarquia de Sub-VIs do controle de torque
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

O modelo de ensaio escolhido foi o modelo de controle de torque por corrente. O ensaio foi realizado com a alimentação de torque de -2,4 N.m até 2,4 N.m, pois a corrente máxima suportada pelo servomotor é de 3A e com a constante de torque igual 0,8 N.m/A.

Para realizar a interpretação do dado lido pelo parâmetro P0067 foi preciso elaborar VIs de ganhos referente a cada transformação do sinal de torque gerado pelo servomotor.

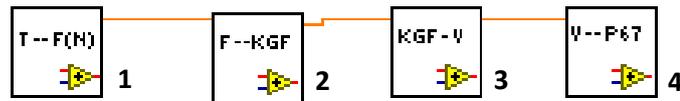


Figura 50 - Transformações em VIs
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

O servomotor exerce um torque em seu eixo que é transmitido como força na célula de carga (Figura 50– 1), em seguida a célula de carga recebe a força e transforma em tensão (Figura 50 - 2, 3); por fim o servoconversor lê esta tensão e disponibiliza em seu parâmetro P0067. O descritivo das VIs da Figura 51 se encontra no Apêndice D.

Para realizar a leitura do torque, as VIs de transformação receberam o torque fornecido pelo servomotor simulado conforme Figura 51.

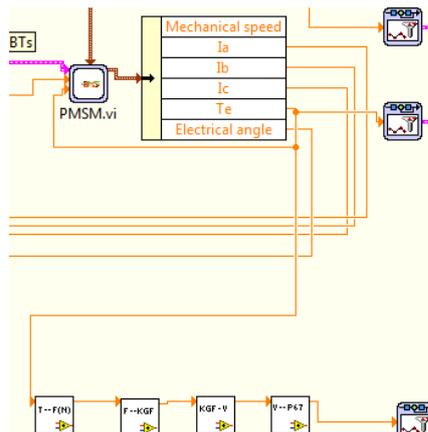


Figura 51 - Simulação para gerar o P0067
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

O arquivamento do sinal, não é um item trivial, pois em *LabVIEW* não se pode (VI existentes) arquivar dados não numéricos. Desta forma, é preciso realizar a conversão do valor acumulado na simulação (*Unbundle By Name* - retira do sinal apenas a tabela de dados referente ao sinal) e enviar para a VI de salvamento chamada *Write To Spreadsheet File*. Assim os dados são adquiridos e poderão ser processados posteriormente.



Figura 52 - Arquivamento do sinal
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

Realizando a simulação têm-se os seguintes resultados, vistos na Figura 53 e Figura 54:

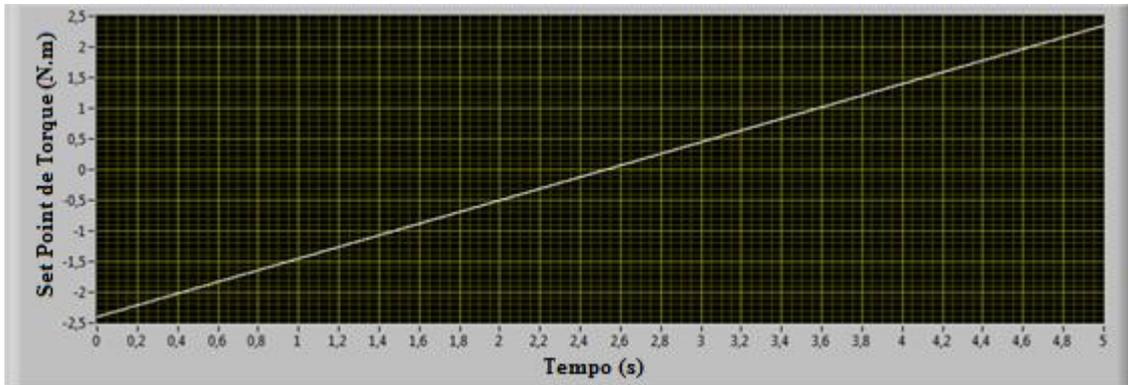


Figura 53 - Set Point de torque
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

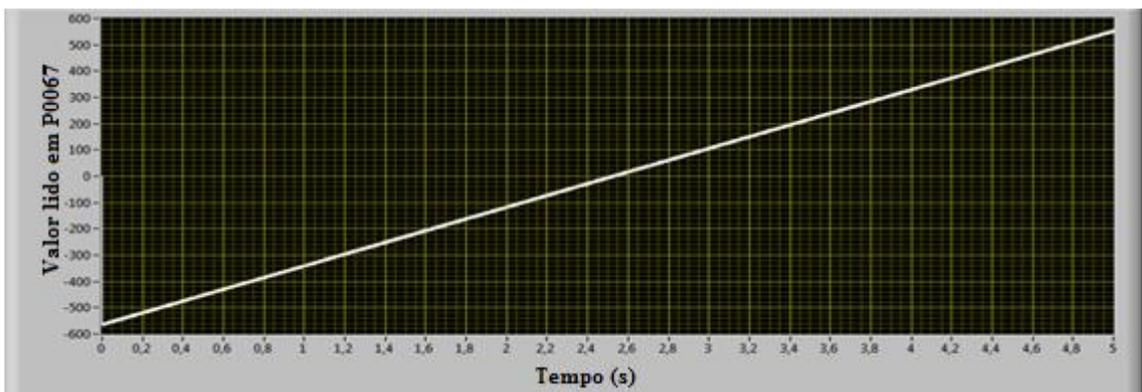


Figura 54 - Leitura do parâmetro simulado P0067
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

- **Teste prático**

Este ensaio prático foi realizado para verificar o comportamento do parâmetro P0067 do servoconversor com a variação da entrada de torque.

O ensaio prático foi realizado aplicando-se um referencial de torque variável, partido de -2,4 N.m até 2,4 N.m que é o limite aplicável no servomotor escolhido.

Este ensaio foi realizado com a utilização dos seguintes equipamentos: servoconversor, servomotor, célula de carga, amplificador, computador e *software* de instrumentação virtual conforme Figura 55:

A célula de carga é instalada em uma estrutura metálica que impede a livre movimentação do eixo do motor. Para supervisionar e aplicar os *setpoints* foi desenvolvido um programa no *LabVIEW*. Foi utilizado na comunicação serial RS485 o protocolo Modbus.

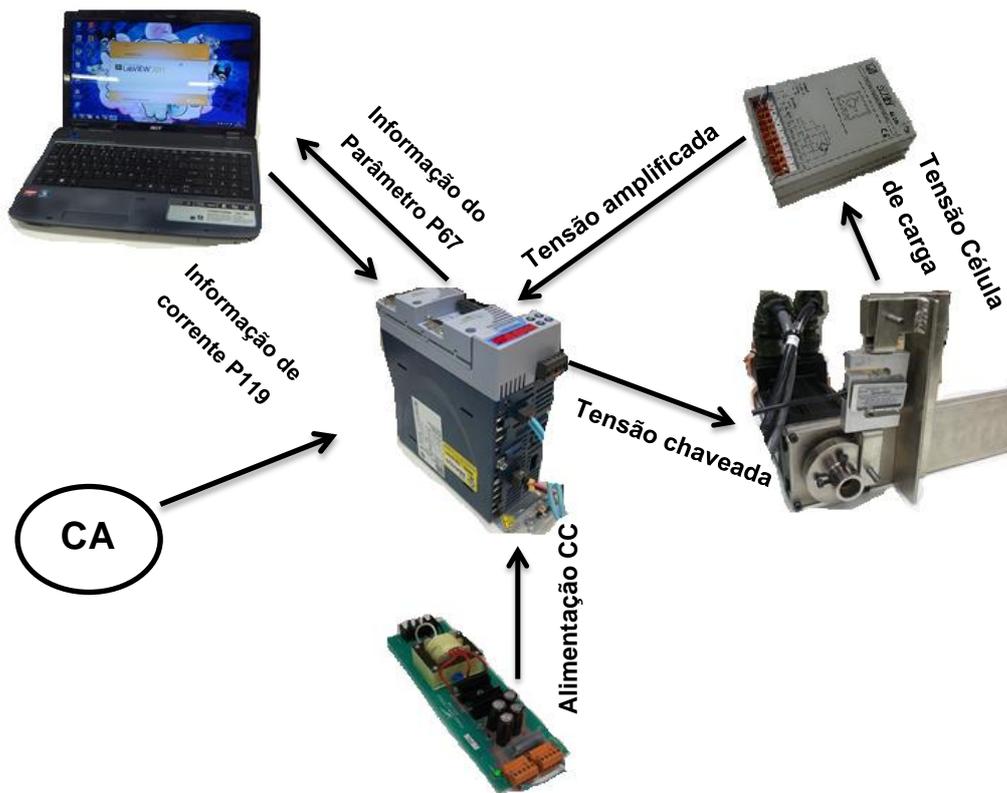


Figura 55 - Esquemático global do ensaio
 Fonte: Autoria própria.

Para a realização deste ensaio foi preciso elaborar uma VI que aplicasse uma rampa de torque na entrada do parâmetro P0119 (referência de corrente) no servoconversor e o recebimento do valor contido no parâmetro P0067, bem como no arquivamento dos dados obtidos.

Foi elaborado a VI conforme a Figura 56:

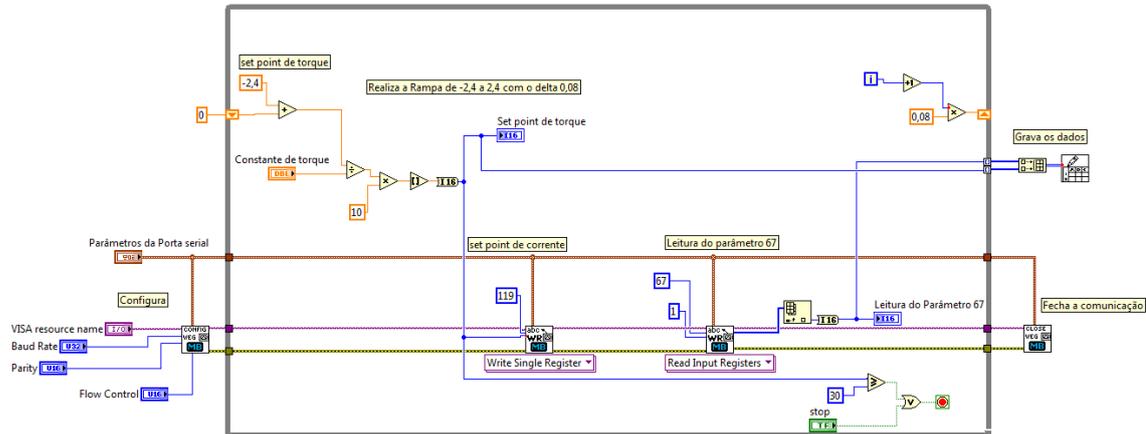


Figura 56 - VI ModBUS para levantamento da curva P0067 x Torque - Diagrama de Blocos
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

Para realizar a comunicação foram seguidos os seguintes passos: configuração, escrita, leitura, processamento, fechamento da comunicação. A vista global das hierarquias da VI criada para o acionamento do servomotor da WEG, Figura 57, mostram as etapas em questão.

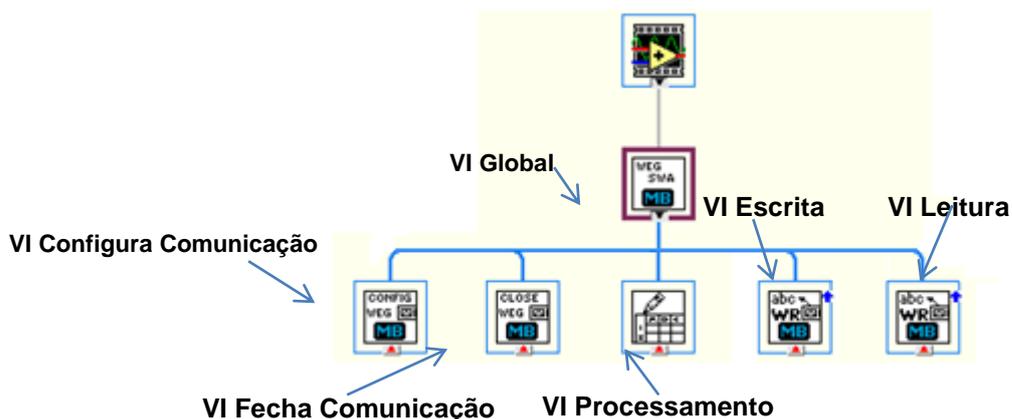


Figura 57 - VI ModBUS para levantamento da curva P0067 x Torque - Estrutura hierárquica das VIs
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

A etapa de configuração foi de complexa elaboração, pois quando se iniciou o projeto, o programa de instrumentação em *LabVIEW* apresentava problema de comunicação entre a serial RS485 e os pacotes de dados enviados com os recebidos. Para corrigir esse problema foi utilizada uma ferramenta chamada *Wire*

Mode, visto na Figura 58, devidamente configurado para a utilização do RS485 com 2 fios.

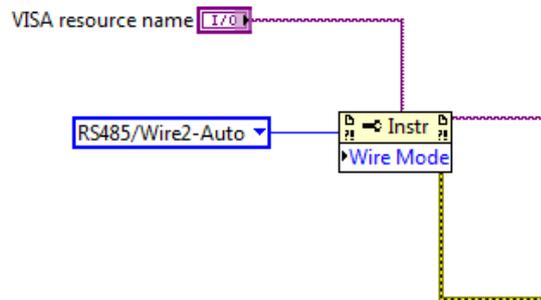


Figura 58 - Utilização do Wire mode
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

Com este ajuste houve a estabilização nos dados recebidos, portanto não houve a oscilação que ocorria e a aparente perda de sintonia.

Em uma vista global, foi criada uma sub-VI chamada de *Config WEG*, Figura 59, que foi desenvolvida para facilitar o processo de configuração da porta serial.

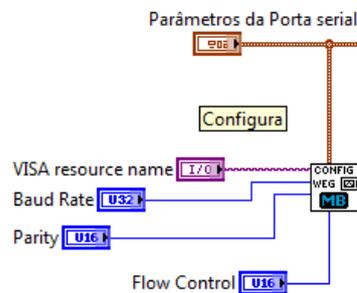


Figura 59 - VI Config WEG
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

Esta VI é composta por etapas, vistas na Figura 60, pré-estabelecidas como: Configuração do modo de operação e habilita motor:

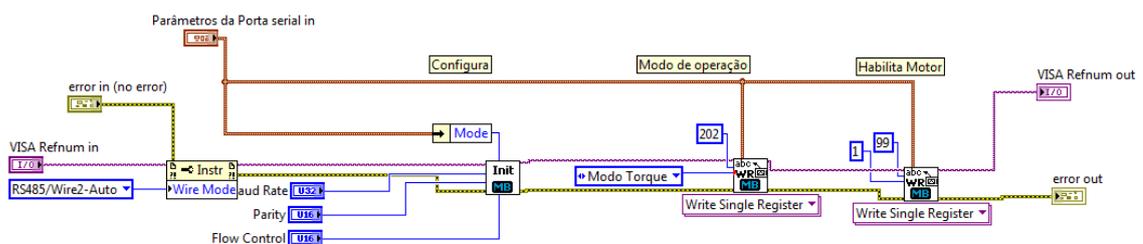


Figura 60 - Composição da VI Config WEG
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

Foi imposto no parâmetro P0119 o valor executado pela rampa criada através de uma lógica para incremento de 0,08 em cada iteração, conforme Figura 61:

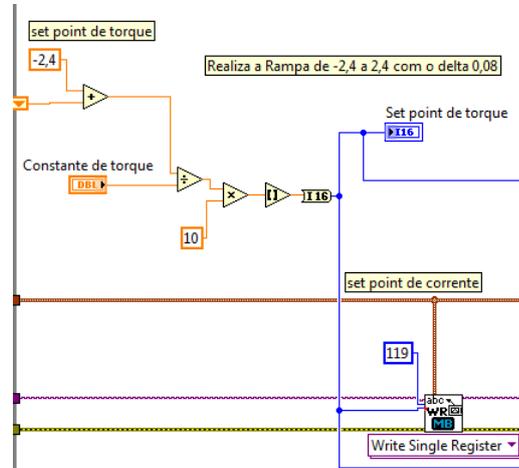


Figura 61 - Lógica de Escrita
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

Para ler o valor do parâmetro P0067 foi utilizado a VI da Figura 62:

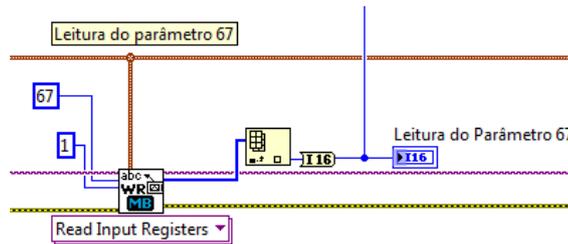


Figura 62 - Leitura dos valores
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

A fim de processar os dados colhidos pelo ensaio, foi realizado um estrutura para realizar o arquivamento dos dados conforme Figura 63.

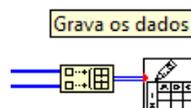


Figura 63 - Processamento dos dados obtidos
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

Ao final do processo é preciso executar uma função para desabilitar o servoconversor e finalizar a comunicação via RS485, desta forma foi criada uma VI chamada de Close WEG, mostrada na Figura 64 (Sub-VI) e Figura 65 (Completa):

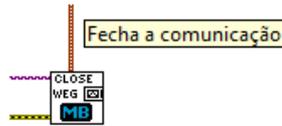


Figura 64 - Close VI
 Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

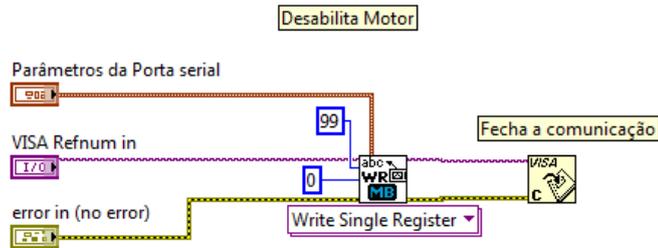


Figura 65 - Esquemático da Close VI
 Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

Realizando o ensaio prático têm-se os seguintes resultados na **Figura 66:**

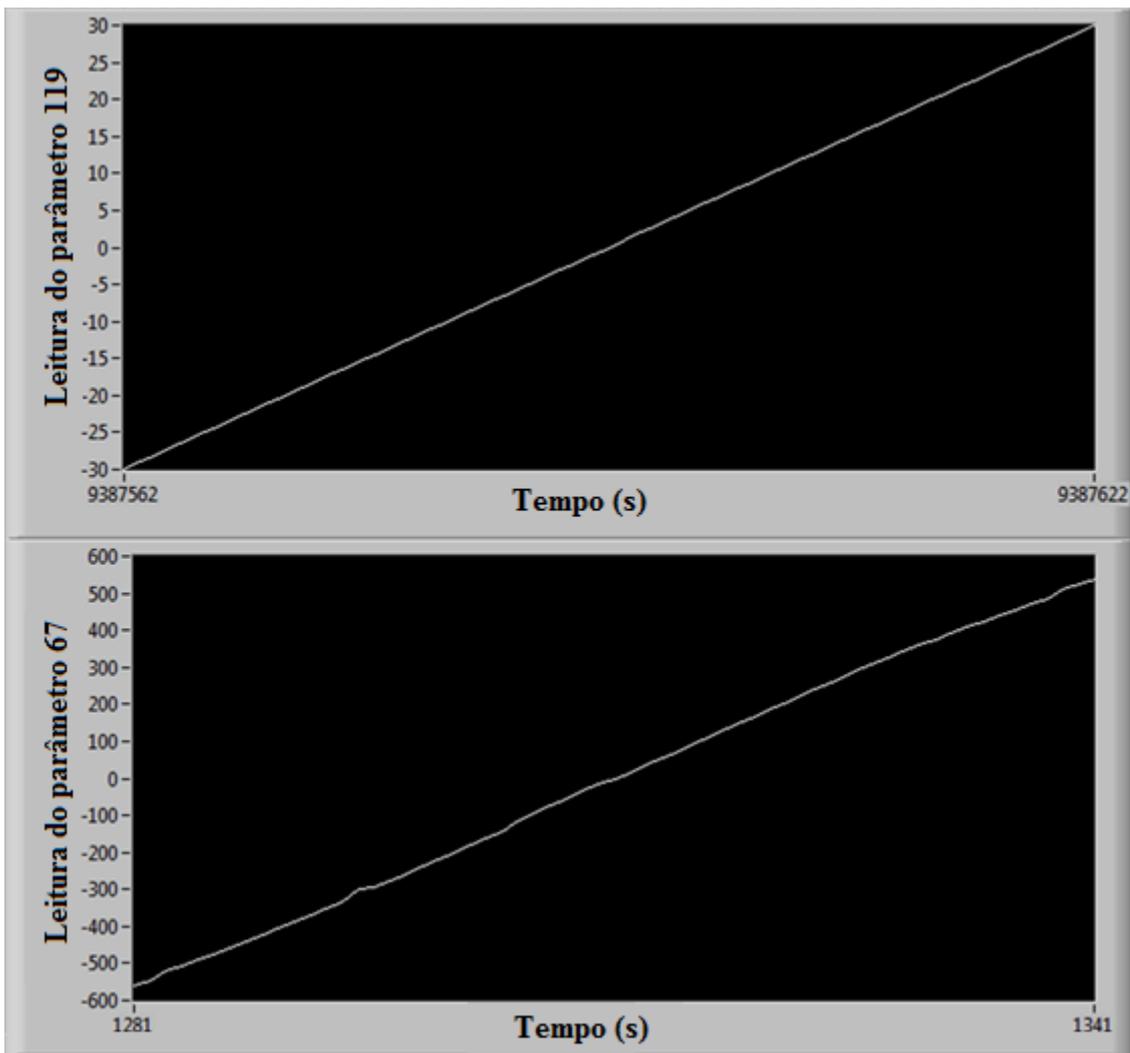


Figura 66 - Leitura do parâmetro P0067
 Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

- **Comparação entre os resultados obtidos**

Realizando a comparação com os dados obtidos nos ensaios prático e simulado, que se encontram no Apêndice C, pode-se observar que o teste simulado contém erros em comparação com o teste prático. O erro máximo é de 24 unidades do parâmetro P0067, representando um erro em torque de 0,102 N.m visto na Figura 67.

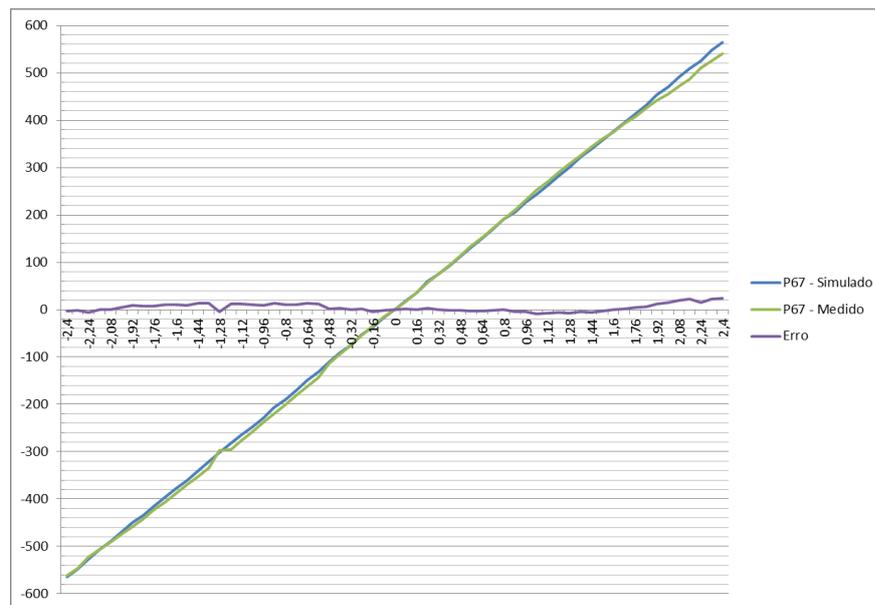


Figura 67 - Leitura do parâmetro simulado P0067 comparado
Fonte: Autoria própria.

O erro encontrado pode ser devido ao fato da não realização da modelagem do equipamento mecânico, pois a conversão utilizada na simulação para torque apenas leva em consideração o diâmetro do eixo do servomotor.

Outro aspecto extremamente importante a ser notado é que o motor, com o rotor travado, recebeu o comando de corrente variando até 3A, a qual é 3 vezes superior à nominal. Tal corrente ocasionou excesso de temperatura e, em outro momento, levou o servoconversor apresentar permanentemente a falha 70, correspondente a sobreaquecimento do sistema. Tal falha foi constatada pela empresa EngeMOVI, a qual encaminhou o servoconversor para assistência. Assim, os ensaios futuros deverão ser feitos respeitando a corrente nominal e não a corrente máxima.

4.2.3. Resposta ao degrau

Este ensaio simulado foi realizado para verificar o comportamento da resposta ao degrau de 0,48 N.m.

- **Modelamento em *LabVIEW***

A modelagem em *LabVIEW* é similar à utilizada no ensaio prático 2, a modelagem do ensaio prático 3 é mostrada na Figura 68.

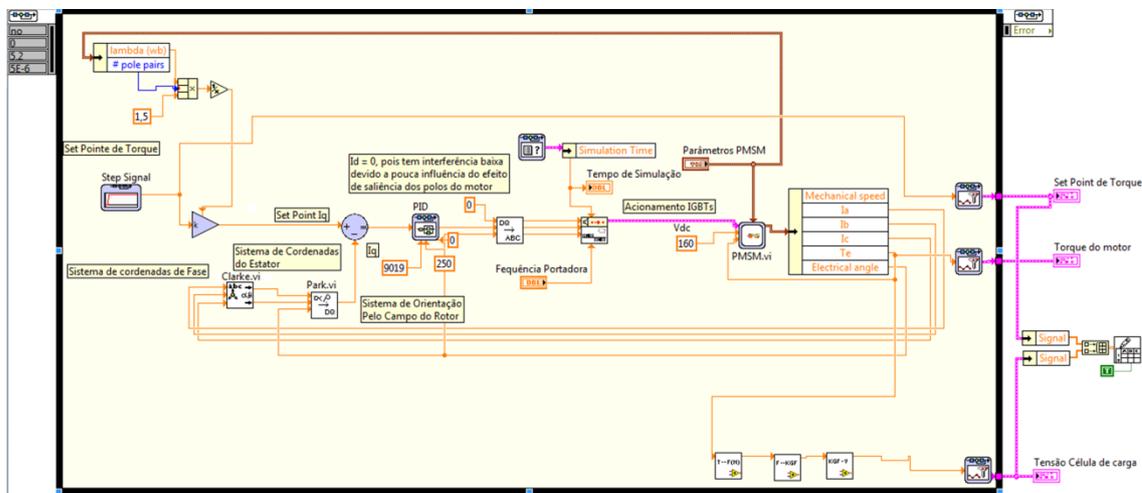


Figura 68 - VI para levantamento da resposta ao degrau de 0,49 N.m
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW*.

Iniciando a simulação os resultados obtidos por ela são mostrados nas Figura 69 a Figura 71.

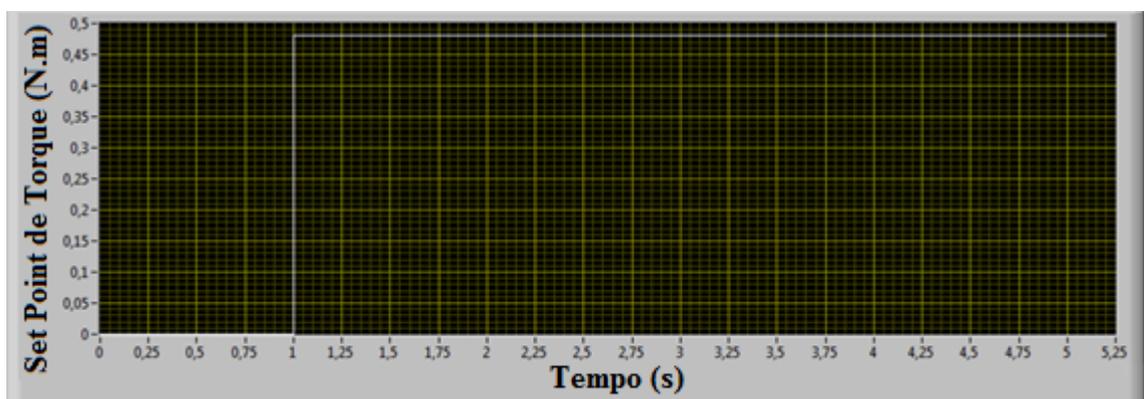


Figura 69 - Set Point de torque
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

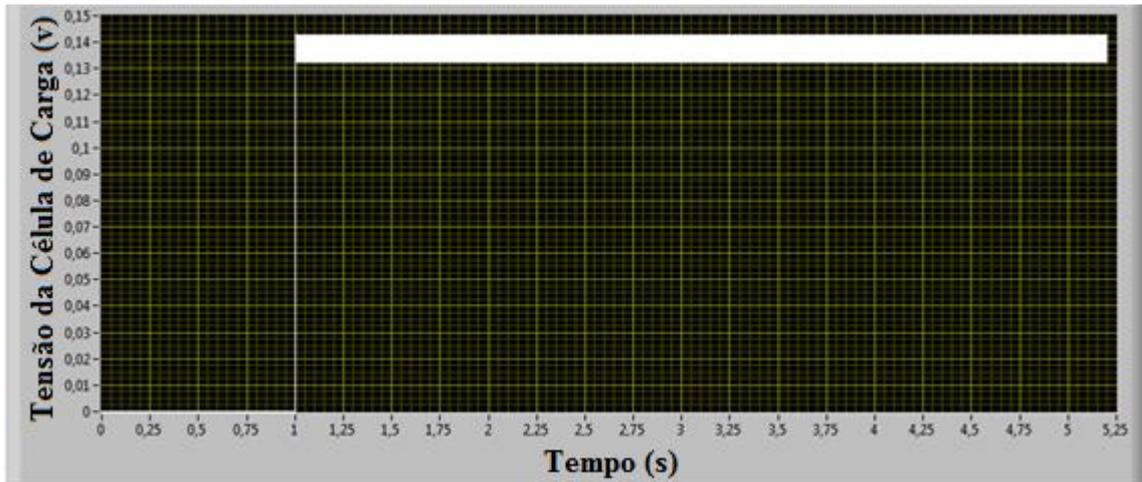


Figura 70 - Leitura da tensão amplificada
 Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

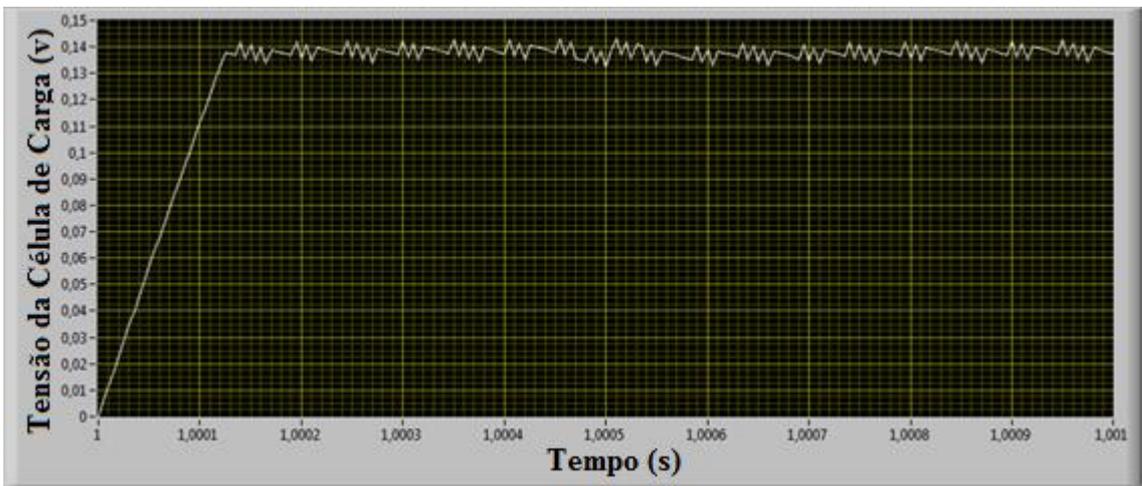


Figura 71 - Detalhe da leitura da tensão amplificada
 Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

O tempo de estabelecimento pelo gráfico simulado é em torno de 0,12 ms e o valor da amplitude varia de 132 mV e 142 mV tendo seu valor médio de 137 mV.

- **Teste prático**

O servomotor, ao ser acionado, possui um tempo para o estabelecimento do torque controlado aplicado. Esse tempo, composto pela identificação do acionamento mais o estabelecimento do comando, é importante para o conhecimento e desenvolvimento dos controladores, bem como da lógica implementada e utilização de amplificadores adequados. Por se tratar de uma execução rápida, da ordem de algumas dezenas de μ s, esta diferença de tempo de acionamento pode influenciar no resultado do controle.

O teste foi realizado no servomotor WEG SWA em conjunto com uma célula de carga Alfa SV50, um amplificador Clip AE501 para leitura da célula e um osciloscópio Agilent U1604A para aquisição gráfica dos sinais. Foi elaborado um programa *Ladder*, que libera um sinal na saída digital X1 do servoconversor, quando o motor é acionado via acionamento externo por chave, Figura 72. Este sinal da saída digital tem como o objetivo comparar os tempos com o sinal enviado ao servomotor.

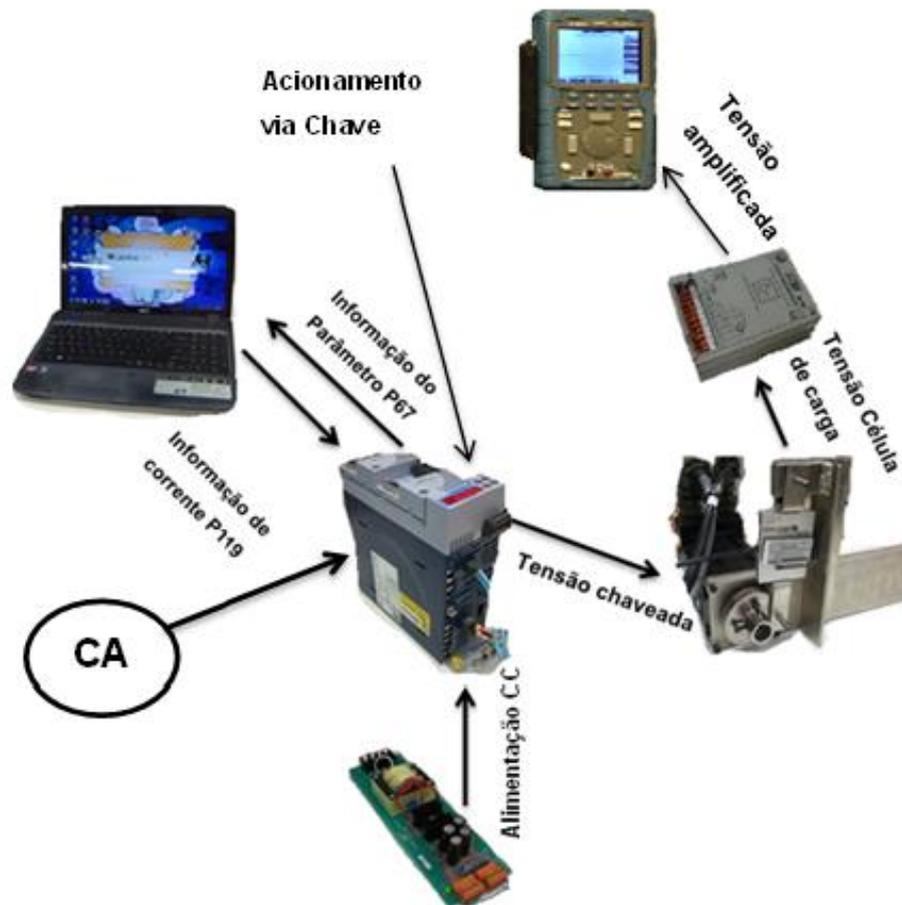


Figura 72 - Esquemático global do ensaio prático utilizando osciloscópio digital
 Fonte: Autoria própria.

O osciloscópio recebeu dois sinais, em tempo real, sendo no canal 1 a chave externa e no canal 2 a saída digital X1. Os dois sinais são de 24 V.

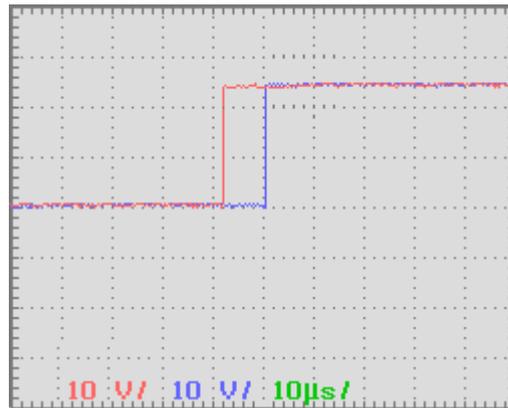


Figura 73 - Tempo de acionamento: chave de entrada (vermelho) e saída X1 (azul)

Fonte: Autoria própria via aquisição de imagem do osciloscópio digital.

Na Figura 73 adquirida pelo osciloscópio digital, o gráfico em vermelho representa a chave de entrada e o gráfico em azul é a saída X1. O resultado obtido foi um leve atraso na aplicação do comando externo para o acionamento do motor de aproximadamente $8\mu\text{s}$. Este tempo consiste no intervalo do servoconversor interpretar o sinal de entrada e transformar em um comportamento previamente programado.

Além deste tempo, existe também o de estabelecimento mecânico com a carga, chamado de tempo morto. O osciloscópio recebendo o sinal de saída da célula de carga, equipada com amplificador, exibiu em tempo real junto com o sinal da saída X1 para comparação, como pode ser visto na Figura 74.

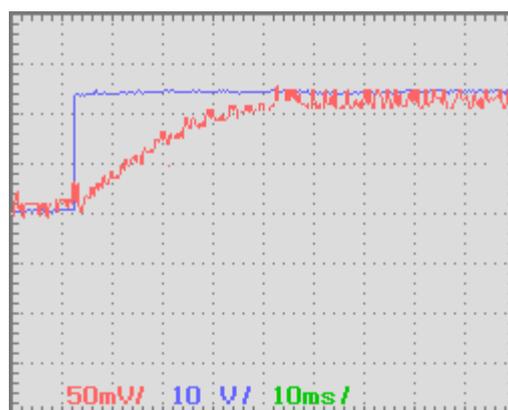


Figura 74 - Sinais de saída: sinal enviado (vermelho) e sinal X1 (azul)

Fonte: Autoria própria via aquisição de imagem do osciloscópio digital

Na Figura 74 está em vermelho o sinal enviado pela célula de carga e em azul o sinal X1 do servoconversor. Esta saída X1 do servoconversor estava

configurada para liberar 24 V no acionamento enquanto que a célula de carga ficou entre 105 mV e 125 mV quando estabilizado. O torque na célula de carga levou aproximados 48ms para se estabelecer. Como o tempo de 8 μ s foi bem baixo, comparado com o teste anterior, foram obtidos aproximadamente 48ms para haver o estabelecimento do comando. Logo foi comprovado que o comando não é instantâneo e existe o atraso, invariável conforme a corrente programada, característica essa que deve ser levada em conta na programação.

- **Comparação entre os resultados obtidos**

Realizando a comparação com os dados obtidos nos ensaios prático e simulado, pode-se verificar que o tempo de estabelecimento no teste simulado (0,12 ms) é muito menor em comparação com o ensaio prático (48ms). Com relação à amplitude obtida, o ensaio simulado tem o resultado entre 132 mV e 142 mV e o prático 105 mV e 125 mV levando a um erro máximo de 37mV o que representa 0,1285 N próximo ao erro do ensaio prático 2 que foi de 0,102N.

4.2.4. *Swept Sine*

O teste consiste em variar a frequência de um sinal em uma faixa de frequência definida, sendo geralmente iniciado do zero até um valor escolhido. Os motores possuem um limite de resposta ao sinal aplicado, geralmente variando a corrente ou tensão, demonstrando assim o limite de frequência do sinal que pode ser trabalhado.

O *Swept Sine* foi utilizado em uma simulação para variar a corrente na malha de corrente do servomotor modelado, tendo como realimentação do sistema a corrente. A construção do programa em *LabVIEW* pode ser observada na Figura 75. O resultado do teste realizado pode ser conferido na Figura 76. Outro teste de *Swept Sine* também foi realizado variando o torque do servomotor pelo controle de torque direto. A realimentação da malha de controle foi feita usando o torque gerado pelo motor. A construção do programa pode ser vista na Figura 77. Os resultados obtidos pelo teste estão na Figura 78.

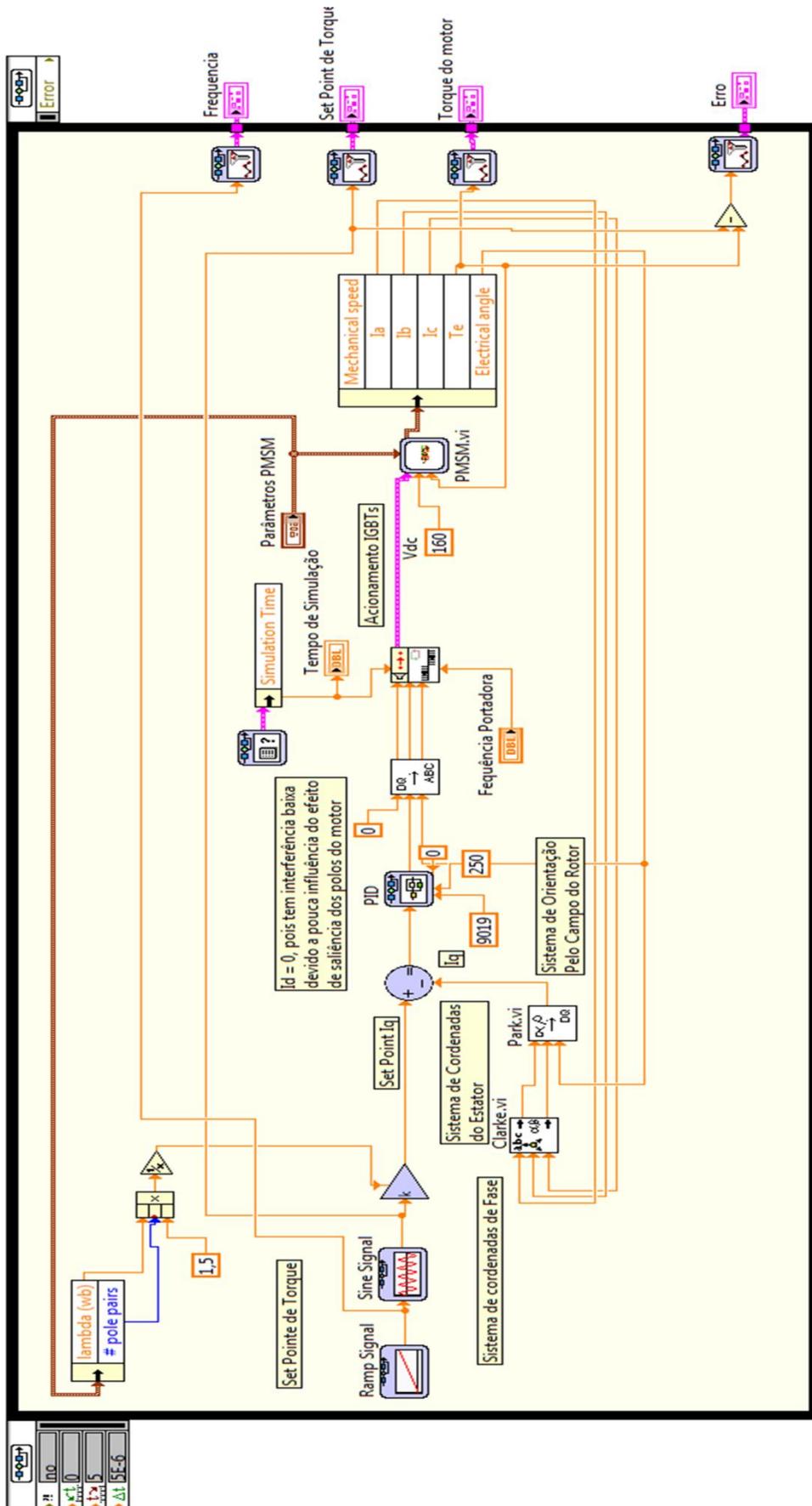


Figura 75 - Controle de torque através da Corrente.
 Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

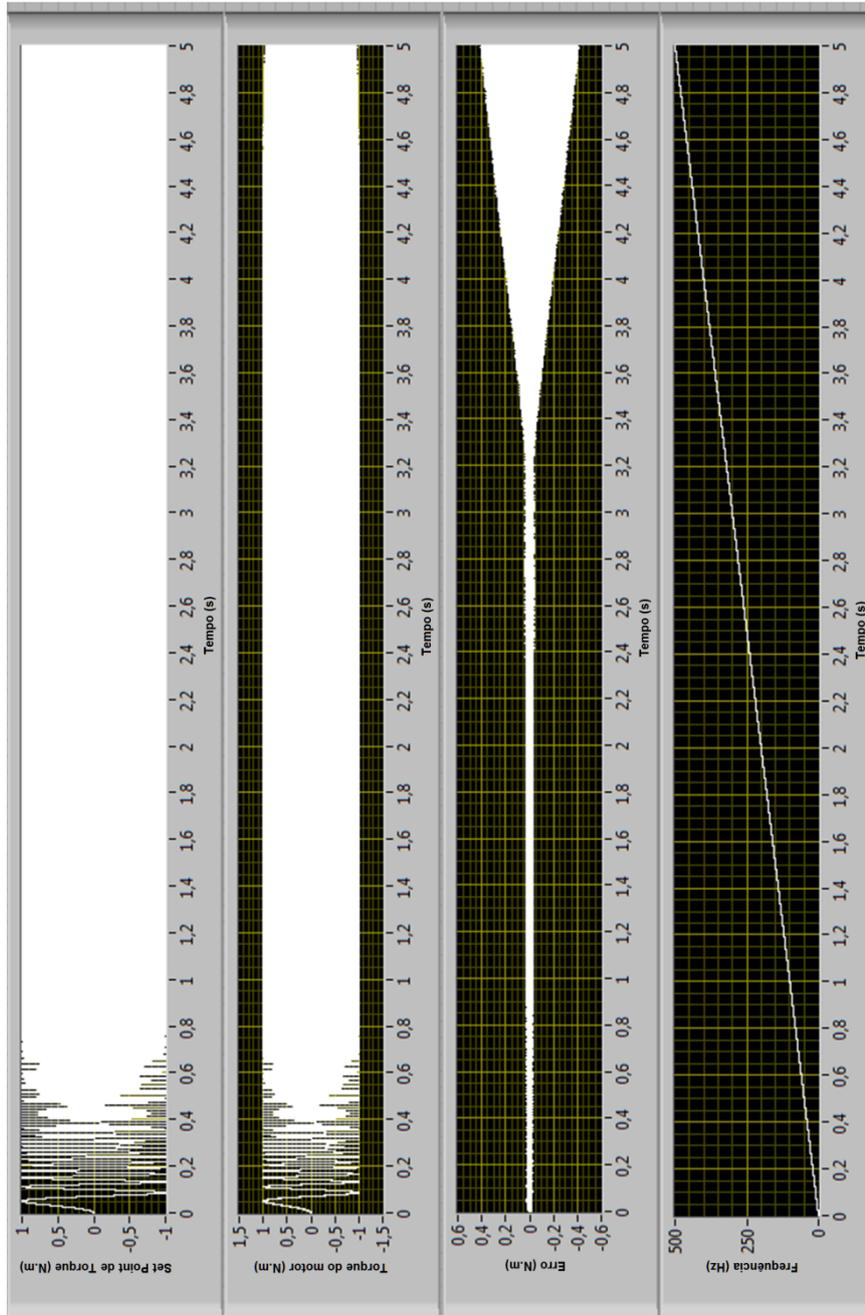


Figura 76 - Resultados para o Swept Sine
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

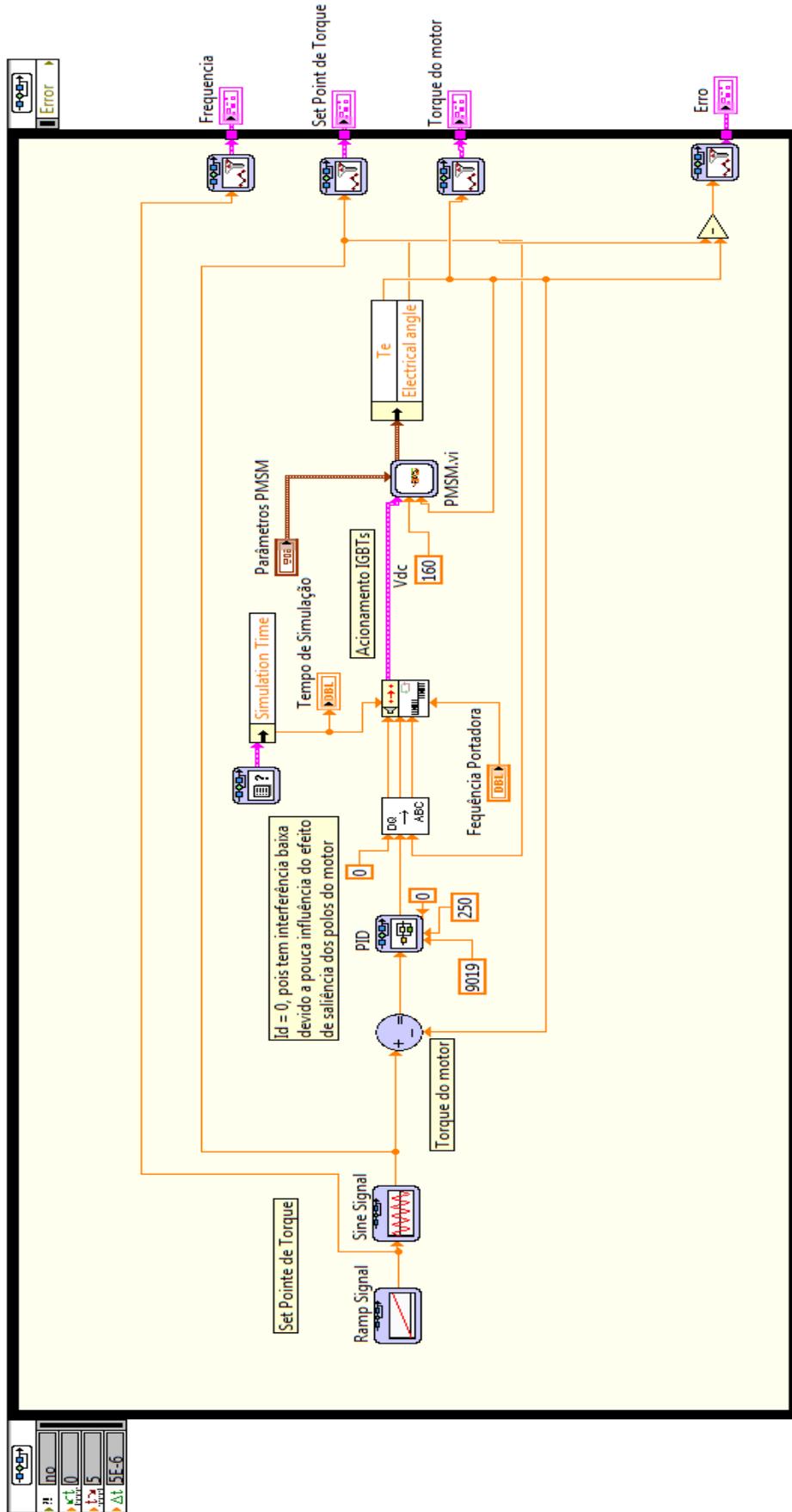


Figura 77 - Controle de torque por controle direto
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

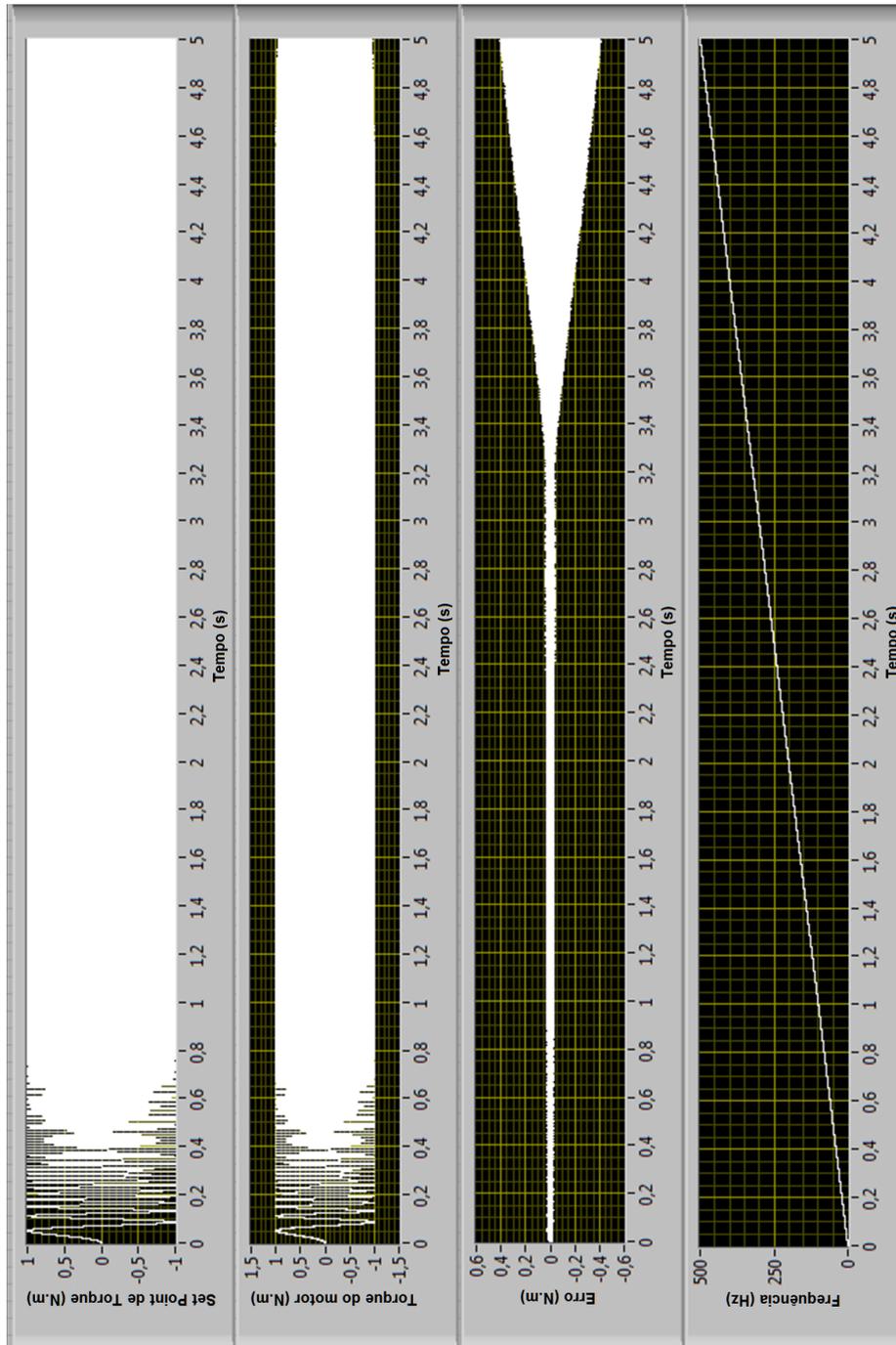


Figura 78 - Resultado para o Swept Sine com torque direto
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

Em Ambos os Resultados, se pode observar que a partir da frequência 330 Hz o erro começa a aumentar consideravelmente.

Em uma simulação com uma variação de frequência ainda maior é possível ver a perda de resposta, como visto na Figura 79:

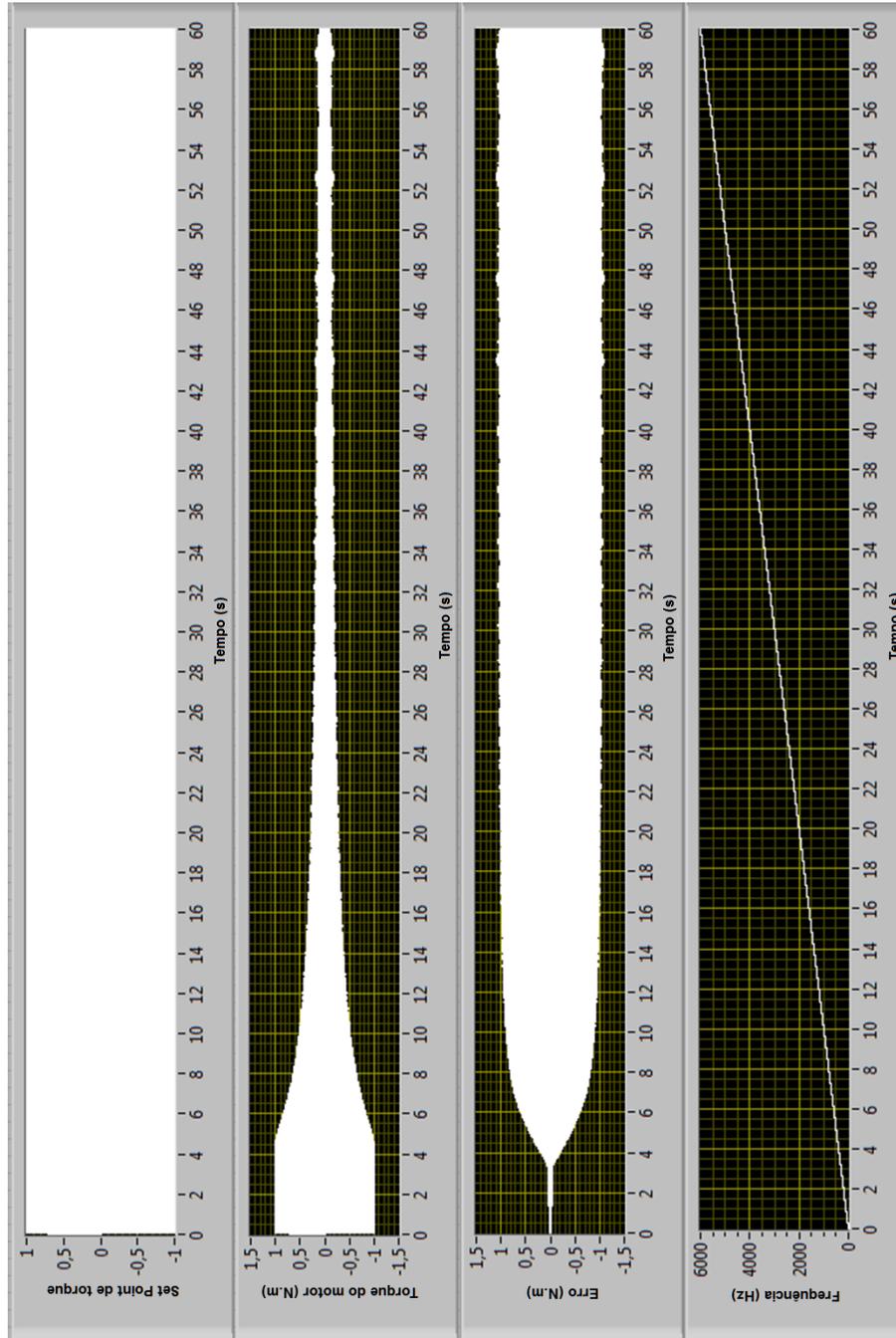


Figura 79 - Swept sine de 1 minuto
Fonte: Autoria própria via LabVIEW(2012).

Ou seja, pode-se observar que a partir de 500 Hz o servomotor começa a não conseguir responder conforme o esperado, levando o torque a uma queda contínua conforme a frequência aumenta.

Na Figura 80 pode ser notado melhor o comportamento do servomotor com a aplicação do *Swept sine* relacionando o decorrer do tempo, variando 60 Hz durante 0,6 segundos, com o erro obtido.

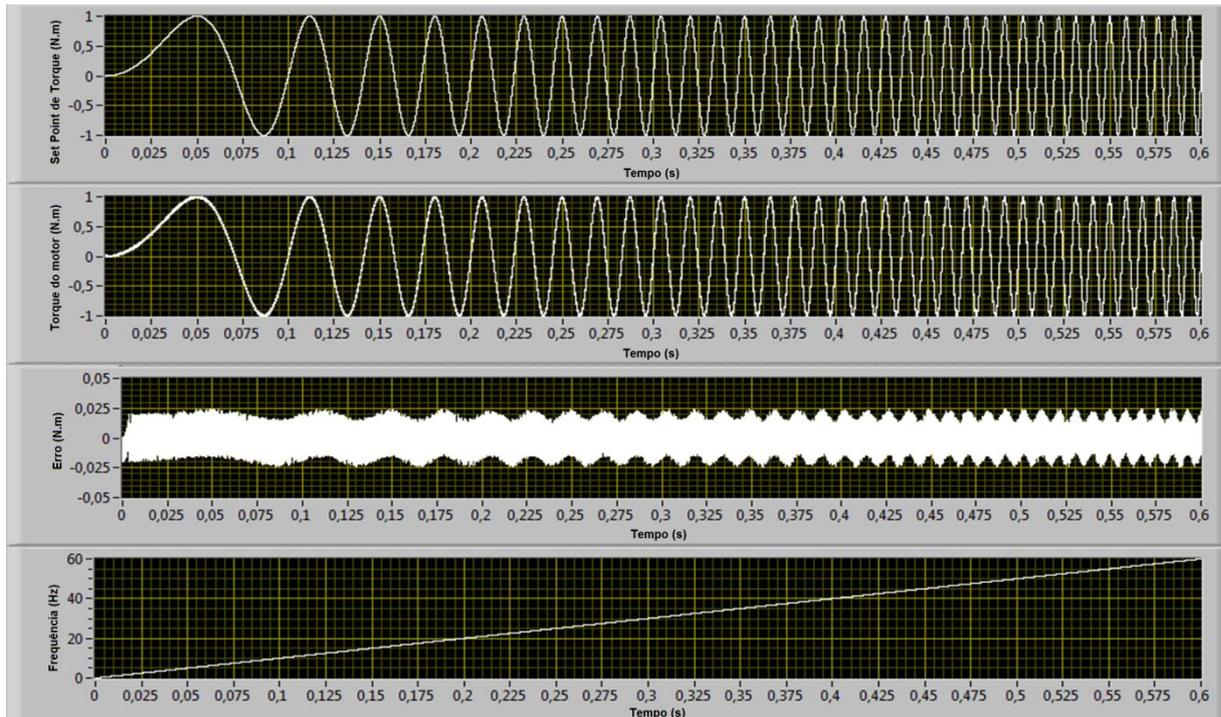


Figura 80 - Swept sine com variação de 0,6 segundos e 60 Hz
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

4.3. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE DE TORQUE

Para conhecer o comportamento do motor com o controle de corrente foram realizados dois programas com formas diferentes: Controle por corrente e controle por torque instantâneo. O primeiro foi feito para ser utilizado pelo sensor de corrente interno do servoconversor SCA06 e no segundo a realimentação foi feita para ser utilizado com uma célula de carga acoplada ao eixo do servomotor e ligada eletricamente em uma entrada analógica do servoconversor. O sistema montado pode ser visto na Figura 81.

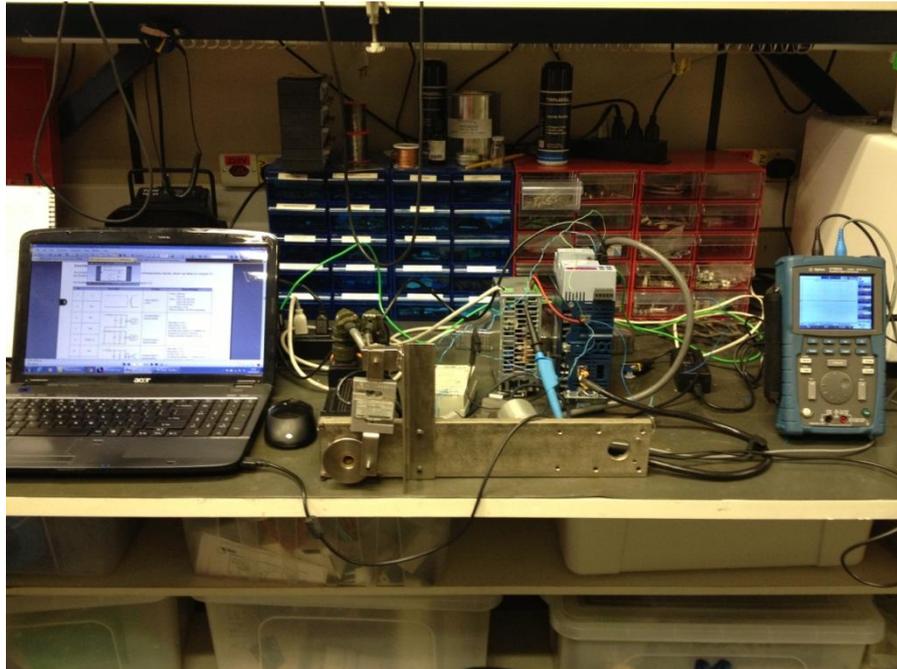


Figura 81 - Montagem do sistema
Fonte: Autoria própria.

4.3.1. Controle de torque por realimentação de corrente

Com a utilização do LabVIEW, foi elaborado um programa para realizar a supervisão do servomotor e para aplicar o conjunto de *setpoints* necessários como demonstrado na Figura 82.

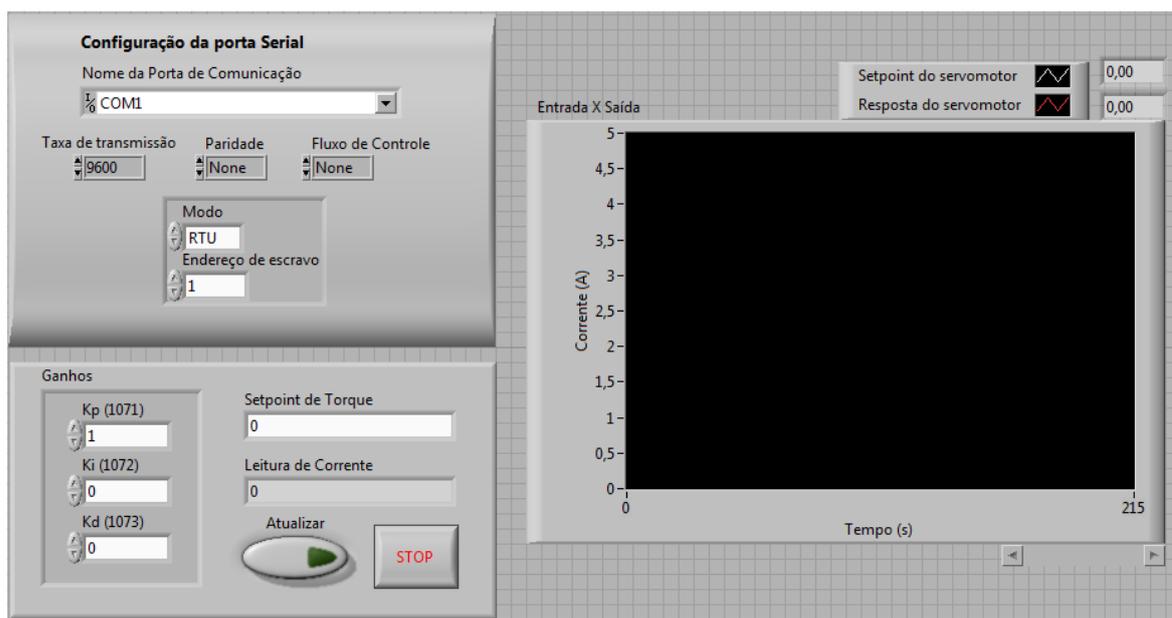


Figura 82 - Programa de supervisão
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

Em estado operacional habilita-se o servoconversor através do parâmetro P0099 e coloca-se o sistema em modo *Ladder* pelo parâmetro P0202. A programação dessa etapa pode ser vista na Figura 83. O protocolo de comunicação utilizado, pela serial RS485, foi o Modbus.

Quando o servoconversor está em modo *Ladder*, as funções de PID pré-definidas no servoconversor deixam de ser válidas e o PID que será considerado será o que foi desenvolvido na plataforma *WLP*.

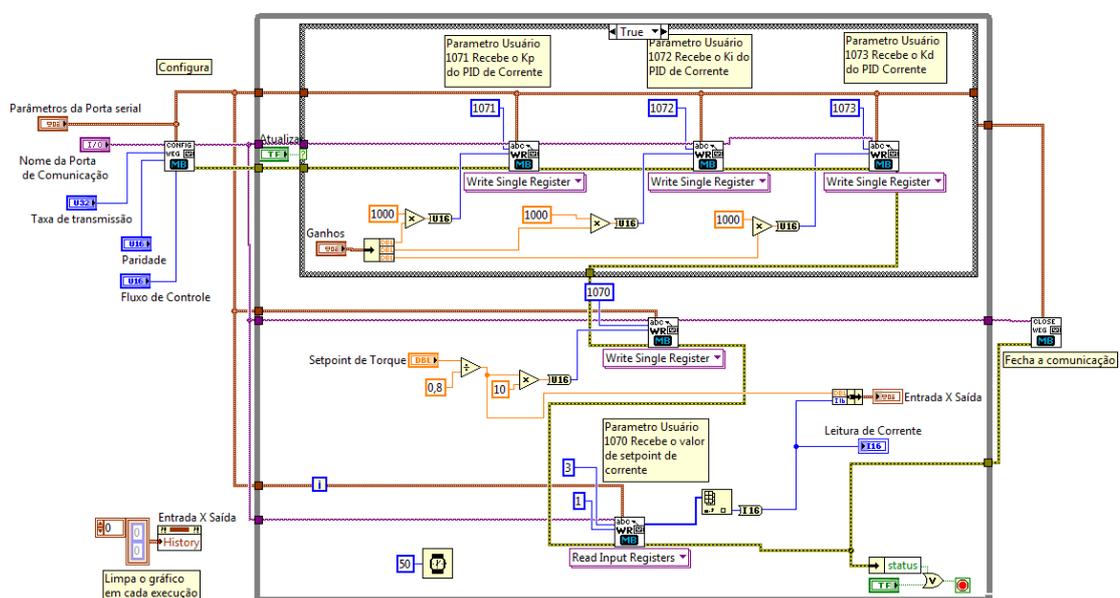


Figura 83 - Programação do modo de execução
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

Feito isso, a execução do programa entra em um loop *while* dentro do qual os ganhos (Kp, Ki e Kd) do bloco de PID do *Ladder* são atribuídos por meio de parâmetros do usuário que são variáveis utilizadas e atribuídas no programa *Ladder*. O *setpoint* de corrente é escrito no parâmetro do usuário e a corrente do motor é lida no parâmetro P0003. Uma vez que o usuário aperte o botão stop, o drive é desabilitado e os objetos de comunicação/interface são encerrados. Quando é feita a finalização incorreta, podem ocorrer inconveniências como o servomotor continuar habilitado sendo necessário desabilitar no próprio servoconversor.

Quanto ao código *Ladder*, apresentado na Figura 84 e Figura 85, desenvolvido para atribuir os valores do PID na malha de corrente do sistema, observa-se que esse adquire os ganhos (Kp, Ki e Kd) dos parâmetros de usuário,

atribuídos no programa elaborado no LabVIEW, e os divide por 1000. Isso não gera distorções, pois no código *Ladder* tais ganhos foram multiplicados por 1000 e esse procedimento traz a vantagem de viabilizar a transmissão de números decimais nos parâmetros, os quais só podem receber números inteiros. Uma vez que os ganhos, e também o *setpoint* foram adquiridos, esses dados são inseridos na entrada do bloco de controle PID e a saída desse é inserida na referência de corrente do SCA06 através do parâmetro P0119.

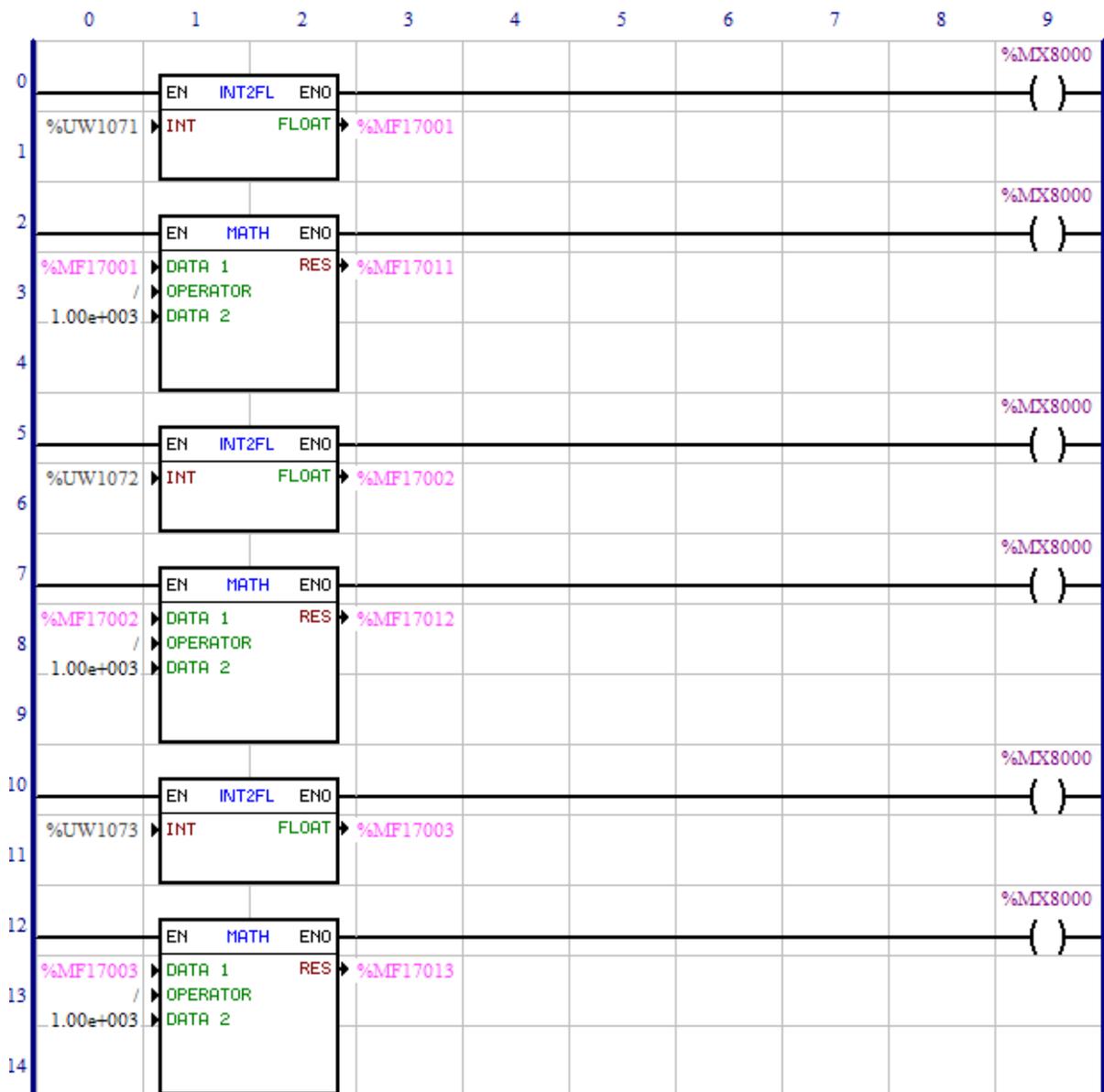


Figura 84 - Parâmetros do usuário no programa *Ladder*
 Fonte: Autoria própria via WLP (9.11).

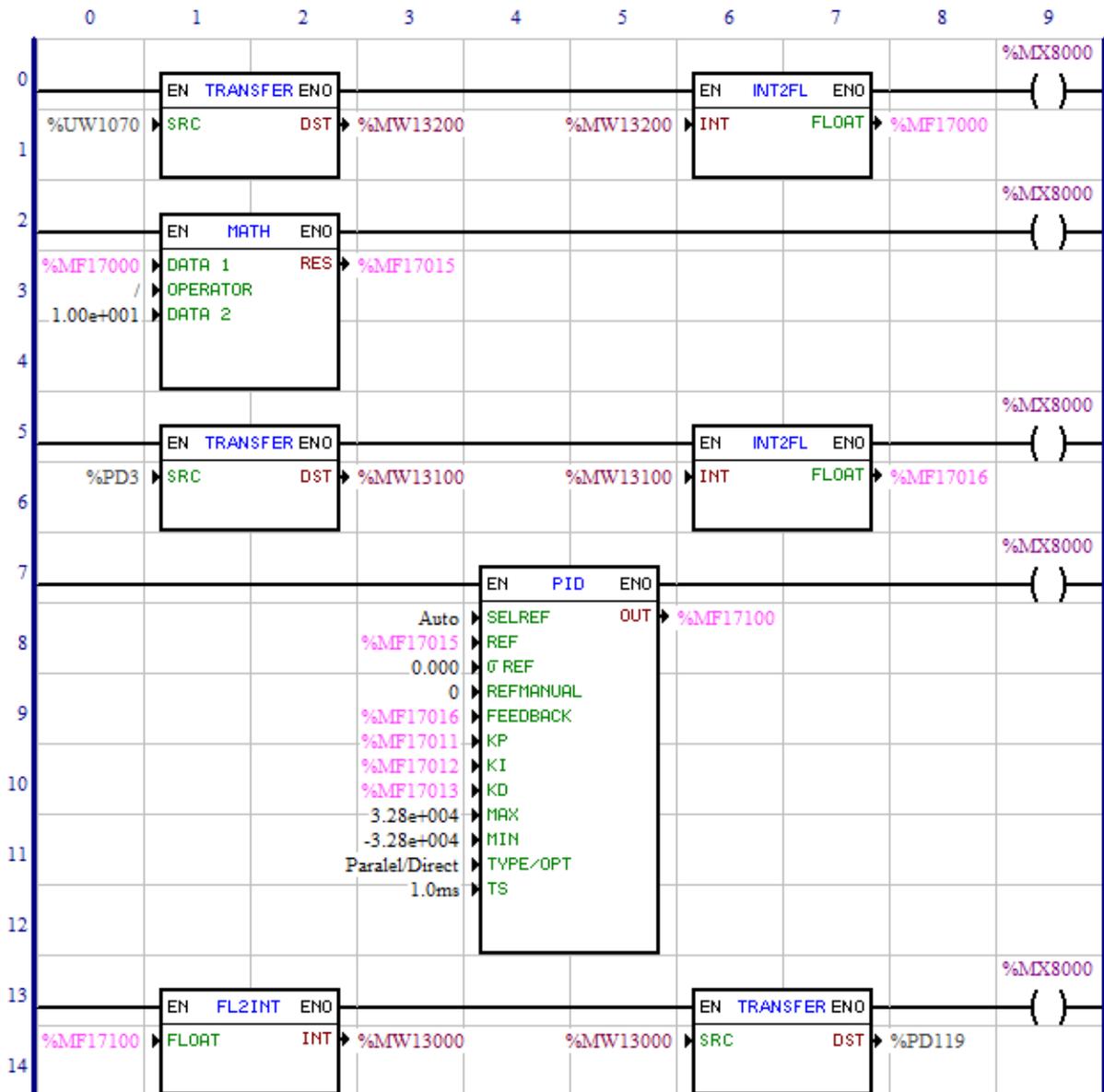


Figura 85 - PID do programa *Ladder*
 Fonte: Autoria própria via WLP (9.11).

Estes programas poderão ser utilizados para a definição dos PID que definirão o controle de torque por realimentação em corrente e para a verificação do erro medido de forma gráfica através da comparação entre a onda da referência de corrente e o valor medido.

4.3.2. Malha de corrente realimentada pela célula de carga

A célula de carga é instalada em uma estrutura metálica que impede a livre movimentação do eixo do motor. Para supervisionar e aplicar os setpoints foi desenvolvido um programa no LabVIEW, visto na Figura 86. Foi utilizado na comunicação serial RS485 o protocolo Modbus.

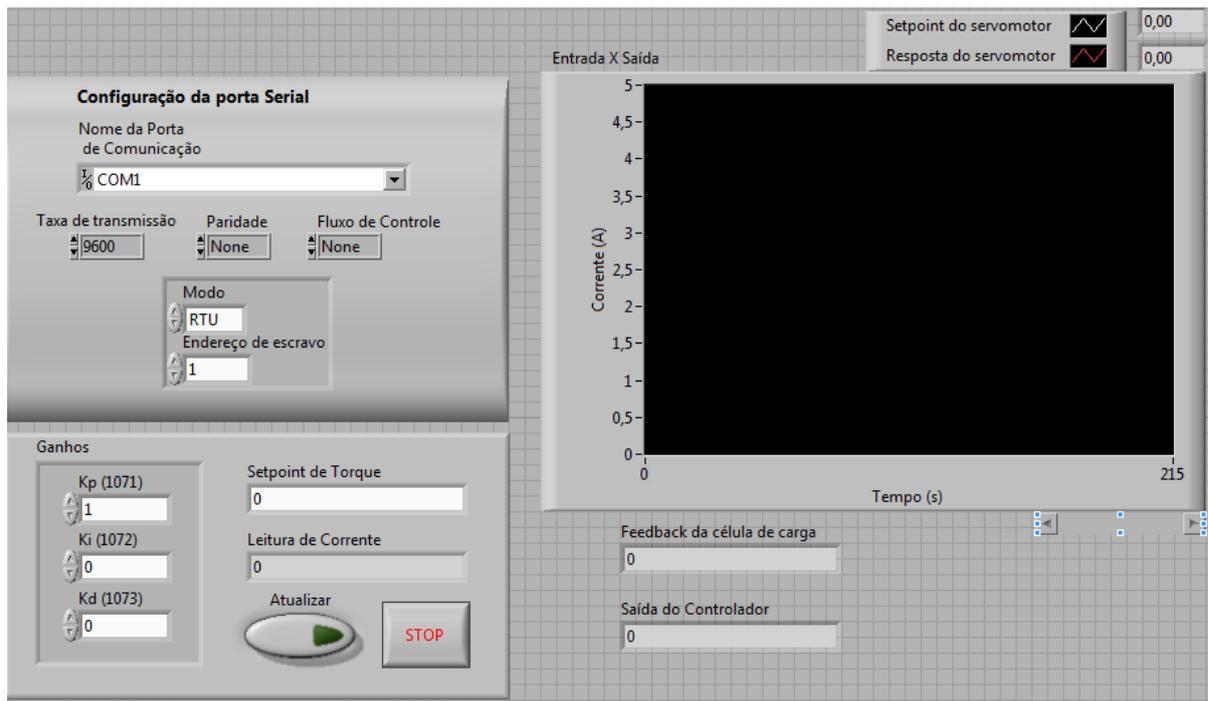


Figura 86 - Painel frontal do programa para aplicar os *setpoint*
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

O torque que o motor exerce nesse sistema gera uma tração na célula de carga, a qual produz uma pequena deformação nos *strain gages* unidos à estrutura, resultando em um sinal elétrico fornecido pelo amplificador, modelo Clip AE501 da HBM. Este sinal é conectado em uma entrada analógica do servoconversor para realizar sua aquisição e leitura.

A programação dessa etapa pode ser vista na Figura 87. O protocolo de comunicação utilizado, pela serial RS485, foi o Modbus. Foram introduzidos dois indicadores: um para monitorar a saída da célula de carga e outro para verificar a saída do controlador.

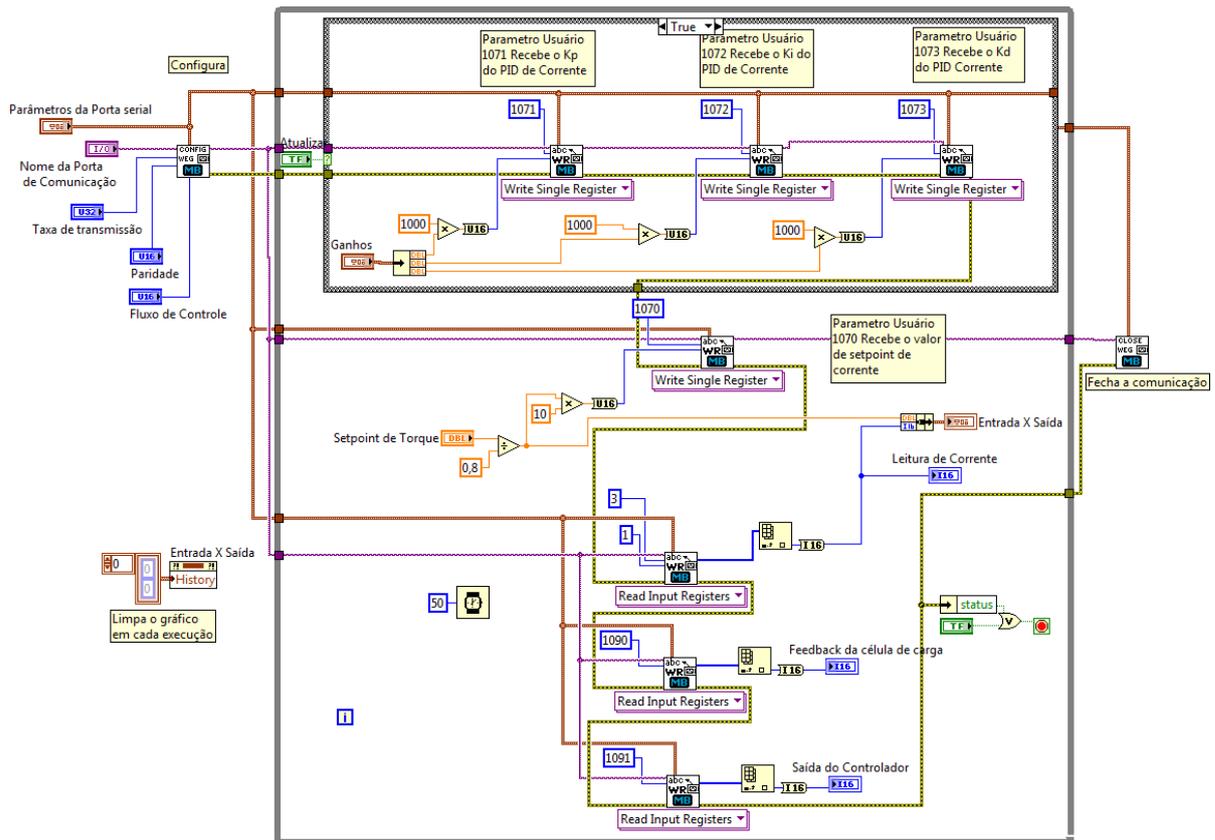


Figura 87 - Diagrama de blocos do programa para aplicar os *setpoints*
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

O programa Ladder para essa aplicação está ilustrado na Figura 88, Figura 89 e Figura 84. Este programa recebe a informação da referência do torque que é comparada pelo sinal gerado pela célula de carga, passando por um PID e logo após realizando a atualização do valor do parâmetro P0119.

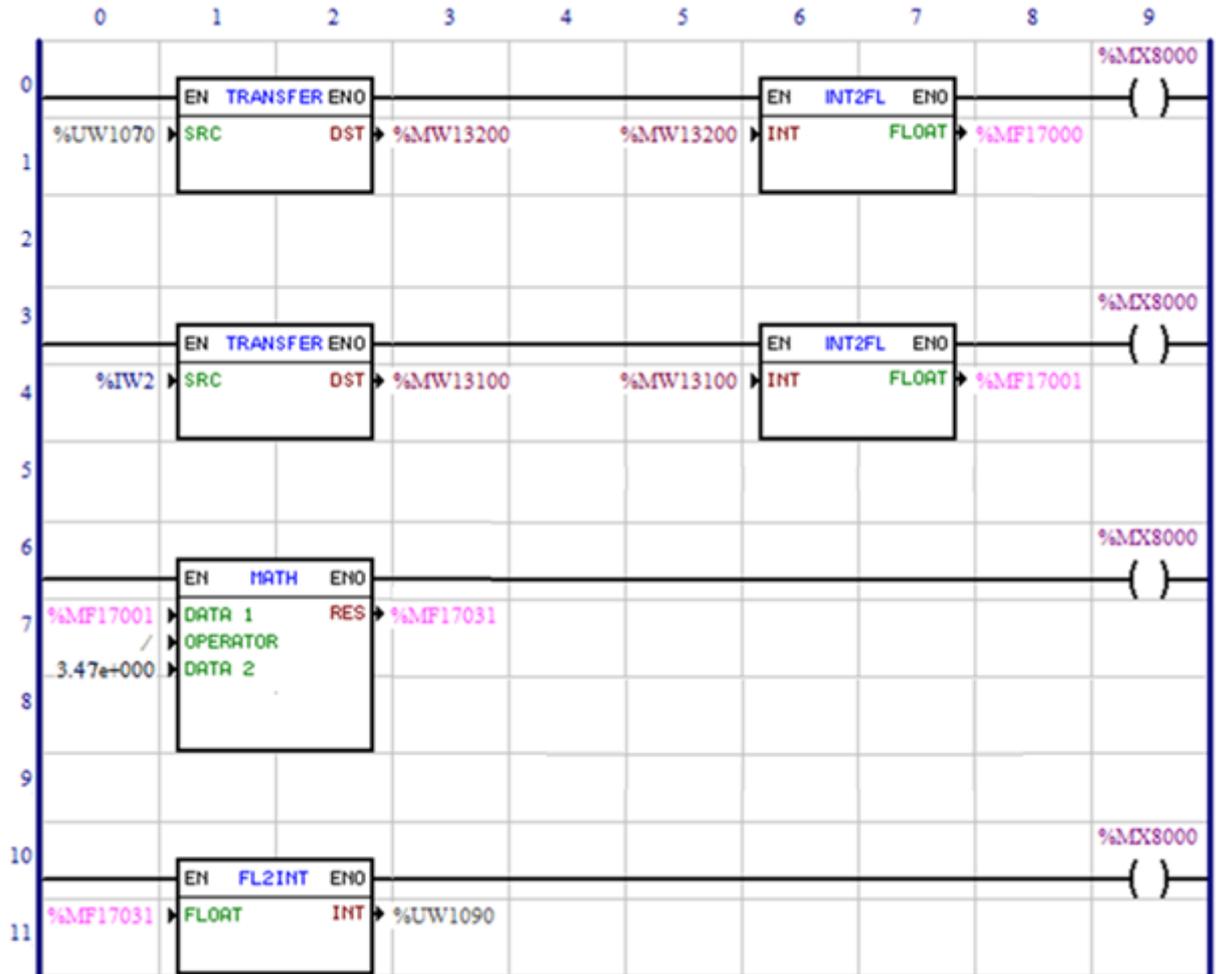


Figura 88 - Parâmetros de usuário do programa *Ladder* para controle de corrente via célula de carga

Fonte: Autoria própria via *WLP* (9.11).

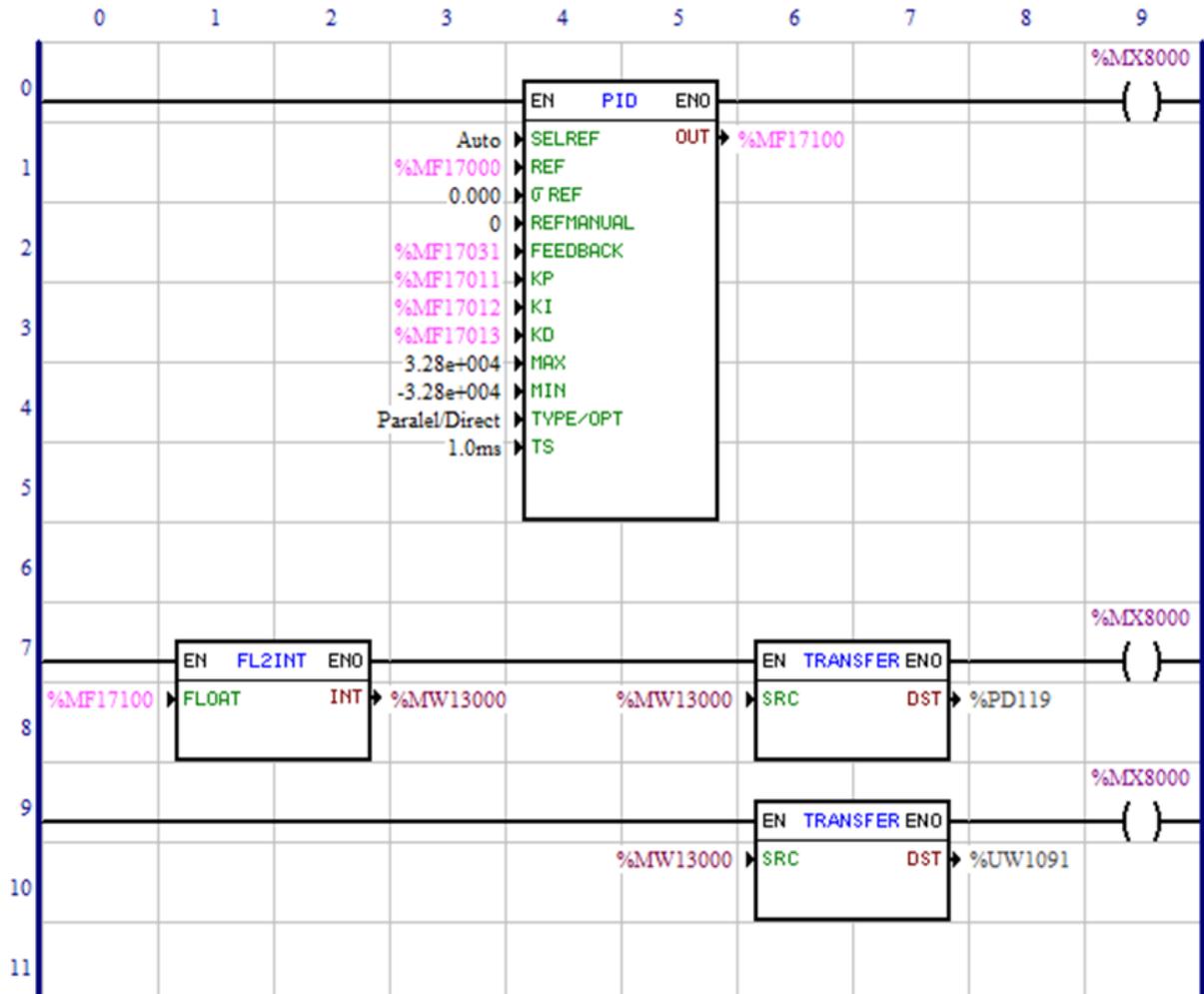


Figura 89 - PID do programa *Ladder* para controle de corrente via célula de carga
 Fonte: Autoria própria via WLP (9.11).

4.3.3. Comentários

O ensaio prático deste item não foi realizado devido a empecilhos causados, inicialmente, pela queima do servoconversor, o que impossibilitou os testes em um período de aproximadamente quatro meses (de novembro de 2012 a meados de fevereiro de 2013). Após o retorno foi possível realizar alguns ensaios, contudo, o curto período restante e questões de infraestrutura da própria empresa impossibilitaram o desfecho da aplicação prática. Desta forma os testes experimentais referentes ao controle de torque não puderam ser executados, porém a realização dos teste em ambiente virtual estão bem definidos e possibilitam uma boa visualização do método de controle de torque.

5. CONCLUSÃO

Ao desenvolver a modelagem do servomotor foi necessário pesquisar estudos relacionados com modelagem de MSIP em questão. Embora não sendo fáceis e triviais de se encontrar, o desenvolvimento foi essencial para a construção do ambiente de simulação do servomotor.

O aprendizado com o *software LabVIEW* teve que ser reforçado para conseguir desenvolver os programas necessários para os testes. Ao trabalhar com as extensões adequadas, que podem ser aplicadas no *software*, foi possível estabelecer a comunicação do computador ao servoconversor e, com essa contribuição, percebeu-se o quão versátil e poderoso pode se tornar um ambiente de instrumentação. O trabalho com a programação *Ladder* do servoconversor proporcionou a experiência em lidar com ferramentas diferenciadas e trouxe um incremento no aprendizado.

Com os testes práticos feitos no servomotor, que puderam ser realizados nos laboratórios da UTFPR e da EngeMOVI, foi possível observar e conhecer o comportamento do sistema. Devido às limitações de uso do motor, como o perigo em que pode haver superaquecimento em determinadas aplicações, não foi possível comprovar na prática a resposta em frequência de corrente aplicada no servomotor, tendo como referência final a obtida em simulação realizada em *LabVIEW*. Esta frequência encontrada é importante, pois em determinado valor o motor passa a ter uma resposta incoerente com o esperado, resultando num comportamento impróprio.

A utilização de estrutura, como a célula de carga em conjunto com o amplificador, foi essencial para os testes referentes à realimentação na malha de corrente do motor. Pode-se realizar a realimentação, na malha de controle no sistema do servomotor, por meio do sensor interno. Através de teste, foi possível conhecer a própria limitação do servomotor em que não é adequado aplicar correntes superiores a 3 A devido ao superaquecimento. Fato importante, pois em diversos sistemas servoacionados, pode ser necessária a aplicação de grandes forças para iniciar ou manter determinados tipos de movimentos. Assim, estes deverão ser limitados para evitar danos ao servoconversor.

Foi necessário superar diversos desafios que ocorreram ao longo do estudo, dos quais, o mais preocupante foi a queima do servoconversor. Durante este tempo de espera de um novo equipamento, que perdurou de novembro de 2012 a meados de fevereiro de 2013, a pesquisa e desenvolvimento das simulações foram intensificados.

Por fim, é possível afirmar que, de acordo com os referenciais bibliográficos e as simulações e testes realizados, o servomotor estudado poderá desempenhar admiráveis trabalhos em projetos de servoacionamentos. Se for substituído por um modelo de servomotor diferente, capaz de desenvolver um torque superior, novos testes deverão ser feitos para conhecer as novas limitações existentes para o uso.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diversos conceitos apresentados neste estudo poderão embasar o desenvolvimento de futuros trabalhos relacionados aos sistemas robóticos. Estes podem estar relacionados com:

- Implementação da malha de controle de velocidade e de posicionamento à malha de corrente existente.
- Estudo do controle de torque por estimadores, como por exemplo, o filtro de Kalman estendido, observadores lineares, inteligência artificial, sistemas adaptativos, potência instantânea, entre outros.

REFERÊNCIAS

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. D. **Extensometria Básica**. UNESP. Ilha Solteira, p. 45. 2004.

ANDOLFATO, S. H. D. **Sistema de Automação de Níveis Digitais**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 108. 2010.

ANDREA, C. Q. Aulas de Sistemas de Controle 1. **Página Pessoal UTFPR**, 2012. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/quevedo>>. Acesso em: 06 Setembro 2012.

ARC ELETRÔNICOS. RS-422 balanced differential drivers. **Arc Eletrônicos**, 2000. Disponível em: <<http://www.arcelect.com/rs422.htm>>. Acesso em: 21 nov. 2012.

BOILEAU, T. et al. Online Identification of PMSM Parameters: Parameter Identifiability and Estimator Comparative Study. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 47, n. 4, p. 1944-1957, jul. 2011. ISSN 10.1109/TIA.2011.2155010.

BOTTENTUIT JR., J. B. Teses de Mestrado. **Nautilus**, Maio 2007. ISSN 214. Disponível em: <<http://nautilus.fis.uc.pt/cec/teses/joaojunior/index.html>>. Acesso em: 21 Outubro 2012.

CARRARO, A. **Motores Elétricos**. Universidade de Caxias do Sul. Bento Gonçalves, p. 45. 2010.

CHUNG, S.-K. et al. A New Instantaneous Torque Control of PM Synchronous Motor for High Performance Direct Drive Applications. **IEEE Transactions on Power Electronics**, XIII, n. 3, maio 1998. 388-400.

CORRÊA, M. A. Servo-acionamentos e Servomotores. **Mecatrônica Atual**, São Paulo, v. 22, jun. 2005.

CUNHA, J. M. **Protótipo de Rede Industrial utilizando o Padrão Serial RS-485 e Protocolo Modbus**. Universidade Regional de Blumenau. Blumenau, p. 104. 2000.

DORAN, D.; GOKHALE, S. Web Robot Detection Techniques: Overview and Limitations. **Journal Data Mining and Knowledge Discovery**, Hingham, 1 jan. 2011. 183-210.

NOTE, Y. **Servo Motor and Motion Control Using Digital Signal Processors**. 1ª. ed. New Jersey: Prentice Hall, v. Único, 1990.

ENGEMOVI. Desenvolvimento do Robô Hexaflex. **Engemovi Engenharia de Automação e Projetos Mecânicos**, 9 Fevereiro 2011. Disponível em: <<http://www.engemovi.com.br/noticias/desenvolvimento-do-rob-hexaflex/>>. Acesso em: 03 Janeiro 2013.

FERREIRA, P. A. V. **Princípios de Controle e Servomecanismos**. UNICAMP. Campinas, p. 262. 2006.

FIGUEIREDO, D.; BIM, E. Controle Linear de Máximo Torque de um Motor Síncrono de Ímãs Permanentes Interiores. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 21, n. 3, p. 260-271, maio 2010. ISSN ISSN 0103-1759.

FRÄGER, C. Servo Motors: The Muscle for Automation Task. **Control Engineering Europe**, 15 Abril 2009. Disponível em: <<http://www.controlengurope.com/article/24050/Servo-Motors--The-Muscle-for-Automation-Tasks.aspx>>. Acesso em: 06 maio 2012.

GIERAS, J. F. **Permanent Magnet Motor Technology: Design and applications**. 3ª. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, v. Único, 2010. ISBN ISBN 978-1-4200-6440-7.

HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH. Operating Manual. **HBM**, 2011. Disponível em: <<http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b0615.pdf>>. Acesso em: 1 Março 2013.

IKONEN, E.; NAJIM, K. **Advanced Process Identification and Control**. 1ª. ed. New York: Marcel Dekker, v. Único, 2002.

KORDIK, J. Comparação de sistemas com motores de passo e servomotores. **Mecatrônica Atual**, São Paulo, v. 10, junho 2003.

LIMA, C.; OLIVEIRA, A. Proposta de Laboratório Multidisciplinar de Servomotores. **XXX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, Blumenau, 03 a 06 out. 2011. 10p.

LJUNG, L. **System Identification: Theory for the User**. 2ª. ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, v. Único, 1987.

MAO, X.; LI, X. The inverse decoupling control of permanent magnet synchronous motor. **2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE)**, IV, 24-26 Agosto 2010. 544-547.

MILLER, T. J. E. **Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives**. 1ª. ed. Oxford: Oxford University Press, v. Único, 1989. ISBN 0-19-859369-4.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, v. Único, 2002. 696 p.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, v. Único, 2003.

OLIVEIRA JUNIOR, J. B. D. D. **Avaliação Comparativa de Observadores em Modo Deslizante**. UFRJ. Rio de Janeiro, p. 95. 2007.

OTTOBONI, A. Servo-acionamentos. **Mecatrônica Atual**, São Paulo, n. 6, p. 7-14, Outubro 2002.

PILLAY, P.; KRISHNA, R. Modeling of Permanent Magnet Motor Drives. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Novembro 1988. 537-541.

PURANEN, J. **Induction Motor Versus Permanent Magnet Synchronous Motor in Motion Control Applications: a Comparative Study**. 1ª. ed. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, v. Único, 2006. 147 p. ISBN 952-214-297-2.

QIU, A.; WU, B.; KOJORI, H. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor using extended Kalman filter. **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**, Toronto, Canadá, III, 2-5 maio 2004. 1557-1562.

SAKURAY, F. Sistema de Comunicação de dados. **Departamento de Computação - UEL**, 2005. Disponível em: <<http://www2.dc.uel.br/~sakuray/Espec-Comunicacao%20de%20dados/R%A3bia%20-%20Danilo/Meios%20de%20transmiss%92o%20de%20dados%20nas%20redes.htm>>. Acesso em: 07 out. 12.

SCLATER, N.; CHIRONIS, N. P. **Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook**. 3ª. ed. New York: McGraw-Hill, v. Único, 2001. ISBN ISBN 0-07-136169-3.

SILVA, J. M. G. D. Grupo de Controle Automação e Robótica. **Departamento de Engenharia Elétrica da UFRGS**, 3 abr. 2000. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node6.html>>. Acesso em: 08 set. 2012.

SMITH, R. Quick Reference for RS485, RS422, RS232 and RS423. **RS-485**, 2010. Disponível em: <<http://www.rs485.com/rs485spec.html>>. Acesso em: 14 jan. 2013.

SUMATHI, S.; SUREKHA, P. **LabVIEW based Advanced Instrumentation Systems**. 1ª. ed. Berlin: Springer, v. Único, 2007. ISBN 10 3-540-48500-7.

SUN, L.; LI, H.; XU, B. **Precise determination of permanent magnet synchronous motor parameters based on parameter identification technique**. International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing: IEEE. 2003. p. pp 34-36.

WEG. **Guia de aplicação de servoacionamentos**. Catálogos WEG. Jaraguá do Sul, p. 194. 2011.

WEG. Automação: Servoconversor SCA06 - Servomotor SWA. **Catálogos WEG**, 2012. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-servoconversor-sca06-50022905-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 29 Maio 2012.

APÊNDICE A - Transformada de Clarke

Motores trifásicos podem ser representados matematicamente em diferentes sistemas de coordenadas. Através de manipulações e transformações, pode-se realizar a mudança de um sistema a outro.

O conjunto de transformações necessárias para se realizar a mudança do sistema de coordenadas de fase (a, b, c) para o sistema de coordenadas do estator (α, β) e vice-versa é conhecido como transformada de Clarke.

A tensão e corrente do estator são representadas por:

$$[i_\alpha \quad i_\beta]^T = A_{\alpha,\beta}^{a,b,c} [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \quad (30)$$

$$[u_\alpha \quad u_\beta]^T = A_{\alpha,\beta}^{a,b,c} [u_a \quad u_b \quad u_c]^T \quad (31)$$

Desta forma, a matriz de transformação é definida por:

$$A_{\alpha,\beta}^{a,b,c} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (32)$$

A transformação inversa é dada por:

$$(A_{\alpha,\beta}^{a,b,c})^+ = (A_{\alpha,\beta}^{a,b,c})^T (A_{\alpha,\beta}^{a,b,c} (A_{\alpha,\beta}^{a,b,c})^T)^{-1} A_{\alpha,\beta}^{a,b,c} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}^T \quad (33)$$

Como resultado, obtém-se:

$$[i_a \quad i_b \quad i_c]^T = (A_{\alpha,\beta}^{a,b,c})^+ [i_\alpha \quad i_\beta]^T \quad (34)$$

$$[u_a \quad u_b \quad u_c]^T = (A_{\alpha,\beta}^{a,b,c})^+ [u_\alpha \quad u_\beta]^T \quad (35)$$

APÊNDICE B - Transformada de Park

O conjunto de transformações necessárias para se realizar a mudança do sistema de coordenadas do estator (α, β) para o sistema de orientação pelo campo do rotor (d, q) e vice-versa é conhecido como transformada de Park. $[i_d \ i_q]^T$ é o vetor de corrente e $[u_d \ u_q]^T$ é vetor de tensão.

$$[i_d \ i_q]^T = A_{d,q}^{\alpha,\beta} [i_\alpha \ i_\beta]^T \quad (36)$$

$$[u_d \ u_q]^T = A_{d,q}^{\alpha,\beta} [u_\alpha \ u_\beta]^T \quad (37)$$

A matriz de transformação é definida por:

$$A_{d,q}^{\alpha,\beta} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \text{sen } \theta_e \\ -\text{sen } \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (38)$$

A transformação inversa é dada por:

$$[i_\alpha \ i_\beta]^T = (A_{d,q}^{\alpha,\beta})^T [i_d \ i_q]^T \quad (39)$$

$$[u_\alpha \ u_\beta]^T = (A_{d,q}^{\alpha,\beta})^T [u_d \ u_q]^T \quad (40)$$

APÊNDICE C - Levantamento da curva P0067 X Torque

O resultado do levantamento da curva corrente x torque, mostrado no Quadro 9, foi obtido a partir de relatório gerado pelo *software LabVIEW* durante a execução do ensaio. O parâmetro P0067, referente à entrada analógica, transforma os valores de entrada em variáveis de -8192 a 8191.

Quadro 9 - Parâmetros dos ganhos.

Simulado		Prático		Erros	
Torque (N.m)	P0067 - Simulado	Torque (N.m)	P0067 - Medido	Erro (N.m)	Erro %
-2,4	-565,028	-2,4	-562	-3,028	0,539%
-2,32	-548,447	-2,32	-547	-1,447	0,265%
-2,24	-527,541	-2,24	-522	-5,541	1,061%
-2,16	-506,138	-2,16	-506	-0,138	0,027%
-2,08	-490,436	-2,08	-491	0,564	0,115%
-2	-470,907	-2	-475	4,093	0,862%
-1,92	-449,812	-1,92	-459	9,188	2,002%
-1,84	-434,791	-1,84	-442	7,209	1,631%
-1,76	-414,816	-1,76	-422	7,184	1,702%
-1,68	-395,283	-1,68	-406	10,717	2,640%
-1,6	-378,25	-1,6	-388	9,75	2,513%
-1,52	-360,881	-1,52	-370	9,119	2,465%
-1,44	-340,056	-1,44	-353	12,944	3,667%
-1,36	-321,036	-1,36	-334	12,964	3,881%
-1,28	-301,115	-1,28	-297	-4,115	1,386%
-1,2	-282,878	-1,2	-295	12,122	4,109%
-1,12	-263,633	-1,12	-276	12,367	4,481%
-1,04	-247,872	-1,04	-258	10,128	3,926%
-0,96	-229	-0,96	-238	9	3,782%
-0,88	-205,453	-0,88	-219	13,547	6,186%
-0,8	-189,097	-0,8	-200	10,903	5,452%
-0,72	-169,989	-0,72	-181	11,011	6,083%
-0,64	-149,122	-0,64	-162	12,878	7,949%
-0,56	-131,683	-0,56	-143	11,317	7,914%
-0,48	-111,167	-0,48	-113	1,833	1,622%
-0,4	-90,68	-0,4	-94	3,32	3,532%
-0,32	-75,052	-0,32	-75	-0,052	0,069%
-0,24	-53,002	-0,24	-54	0,998	1,848%
-0,16	-37,733	-0,16	-34	-3,733	10,979%
-0,08	-16,638	-0,08	-15	-1,638	10,920%
0	0	0	0	0	0,000%
0,08	18,167	0,08	16	2,167	13,544%
0,16	35,819	0,16	36	-0,181	0,503%

Simulado		Prático		Erros	
Torque (N.m)	P0067 - Simulado	Torque (N.m)	P0067 - Medido	Erro (N.m)	Erro %
0,24	59,654	0,24	56	3,654	6,525%
0,32	75,114	0,32	75	0,114	0,152%
0,4	92,247	0,4	94	-1,753	1,865%
0,56	131,105	0,56	134	-2,895	2,160%
0,64	150,351	0,64	153	-2,649	1,731%
0,72	170,126	0,72	172	-1,874	1,090%
0,8	191,281	0,8	191	0,281	0,147%
0,88	206,246	0,88	210	-3,754	1,788%
0,96	226,34	0,96	231	-4,66	2,017%
1,04	242,997	1,04	252	-9,003	3,573%
1,12	263,123	1,12	270	-6,877	2,547%
1,2	282,287	1,2	289	-6,713	2,323%
1,28	300,514	1,28	308	-7,486	2,431%
1,36	321,909	1,36	326	-4,091	1,255%
1,44	338,609	1,44	344	-5,391	1,567%
1,52	358,858	1,52	362	-3,142	0,868%
1,6	375,511	1,6	375	0,511	0,136%
1,68	393,805	1,68	392	1,805	0,460%
1,76	412,828	1,76	408	4,828	1,183%
1,84	431,648	1,84	425	6,648	1,564%
1,92	453,333	1,92	442	11,333	2,564%
2	470,445	2	456	14,445	3,168%
2,08	490,778	2,08	472	18,778	3,978%
2,16	509,129	2,16	487	22,129	4,544%
2,24	525,434	2,24	510	15,434	3,026%
2,32	548,042	2,32	526	22,042	4,190%
2,4	563,75	2,4	540	23,75	4,398%

APÊNDICE D - Conversão de torque até o parâmetro P0067

Este apêndice é para demonstrar as transformações utilizadas para simular o valor obtido pela célula de carga, através da leitura da força aplicada pelo torque do motor e a gravação deste dado no parâmetro P0067 do servoconversor.

Primeiramente é preciso converter o torque aplicado no eixo do servomotor em força aplicada na célula de carga, Figura 50. Para isso considera-se apenas a aplicação do torque no diâmetro do eixo do servomotor, cuja medida corresponde a 5 cm. Sendo assim, seguindo as equações da física, a seguinte VI é elaborada conforme a Figura 90 e Figura 91:



Figura 90 - Transformação torque em força
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

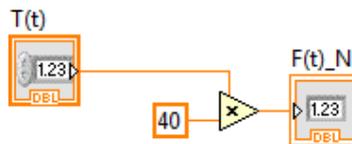


Figura 91 - Vista geral da VI da transformação torque em força
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

A força imposta pelo servomotor é refletida na célula de carga, a qual tem suas equações dadas em kgf. Porém, a força aplicada na célula de carga até o presente momento encontra-se em Newton. Desta forma, esta força deve ser convertida para kgf, Figura 92, para isso utiliza-se a relação básica de transformação conforme Figura 92 e Figura 93.



Figura 92 - Transformação força (Newton) em força (kgf)
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).



Figura 93 - Vista geral da VI da transformação de força (Newton) em força (kgf)
Fonte: Autoria própria via *LabVIEW* (2012).

A célula de carga realiza a conversão da força imposta, compressão ou tração, e cria uma tensão em sua saída na ordem de mV, Figura 94. Esta relação de

força imposta por tensão gerada foi retirada do catálogo do fabricante da célula Alfa Instrumentos e é representada pela Figura 95.



Figura 94 - Transformação força (kgf) em tensão amplificada
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

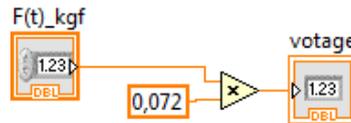


Figura 95 - Vista geral da VI da transformação de força (kgf) em tensão amplificada
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

Por fim, este valor amplificado é colocado na entrada analógica do servoconversor e lido através do parâmetro P0067. Este parâmetro realiza a leitura de valores de -10 a 10 volts e representa tais valores em -8192 a 8192. Sendo assim a seguinte conversão é apresentada na Figura 96 e Figura 97.

A variação de valores apresentada no parâmetro P0067, de -600 a aproximadamente 600, se dá pela resolução da entrada analógica de tensão que tem uma resolução de 8192 divisões. A relação da força aplicada e a tensão obtida na saída do amplificador da célula de carga é dada por:

$$Tensão\ de\ saída(V) = Carga(em\ Kgf)/50(Kg) * 3.6(V) \quad (41)$$



Figura 96 - Transformação tensão amplificada em valor do parâmetro P0067
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

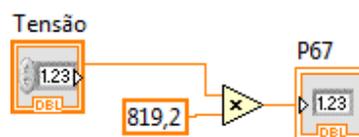


Figura 97 - Vista geral da VI da transformação de tensão amplificada em valor do parâmetro P0067
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

APÊNDICE E - Detalhamento das VIs utilizadas

Quando ativado, o servomotor é controlado pelo chaveamento dos IGBTs. Para que isso seja simulado foi desenvolvida em uma VI uma ponte de IGBTs que é comutada por um sinal de acionamento, podendo ser vista na Figura 98 e com mais detalhes na Figura 99.



Figura 98 - VI da ponte de IGBT
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

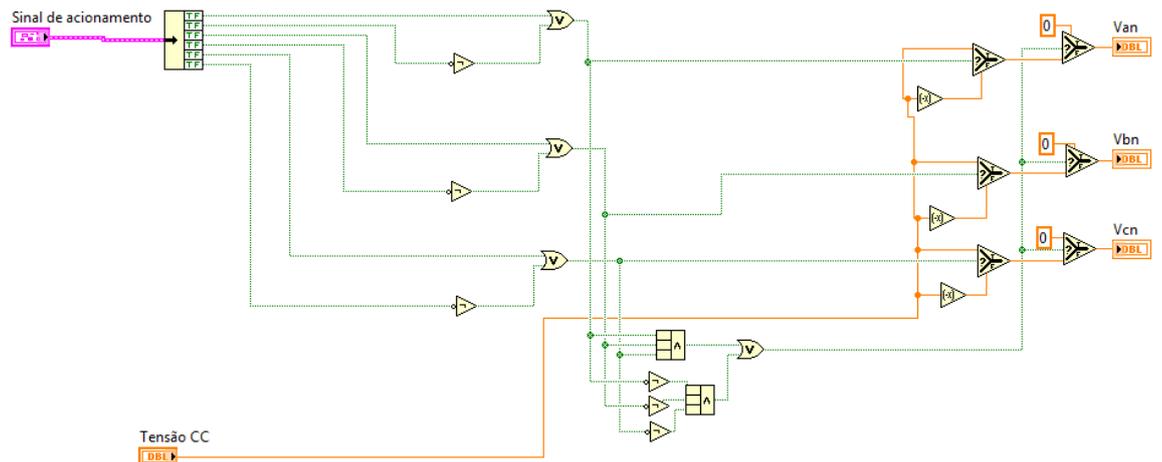


Figura 99 - Detalhamento da VI da ponte de IGBT
Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

O sinal de acionamento que realiza a comutação, pelo sinal de entrada na VI da ponte de IGBT, é modulado em PWM. Este sinal é feito na VI de geração do PWM, conforme pode ser vista na Figura 100 e com mais detalhes na Figura 101.

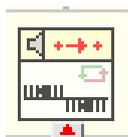


Figura 100 - VI de geração do PWM
 Fonte: Autoria própria via LabVIEW(2012).

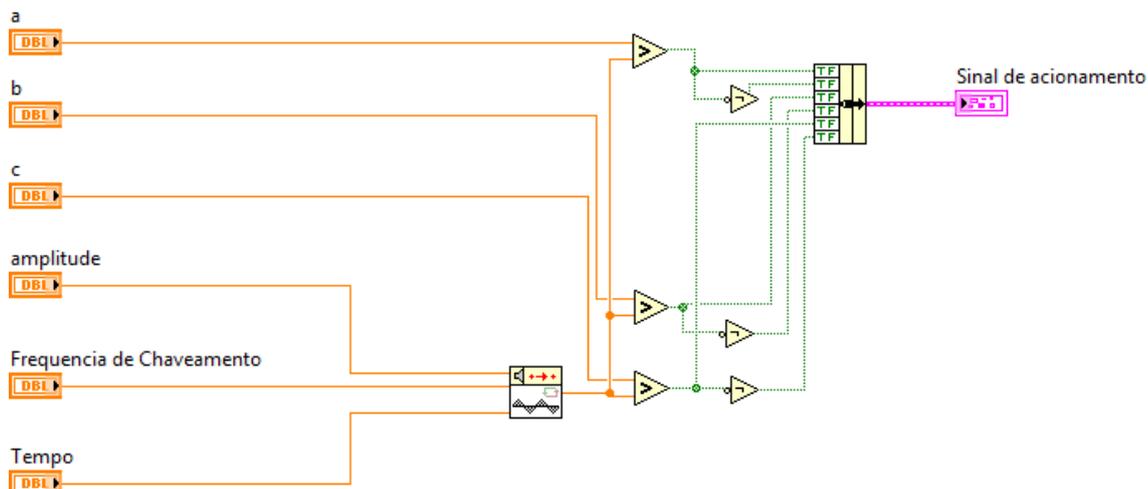


Figura 101 - Detalhamento da VI da geração do PWM
 Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

De acordo com o apêndice A e B, o sistema da transformada de Park é dado pela VI da transformada de Park de acordo com a Figura 102 e detalhada na Figura 103.



Figura 102 - VI da transformada de Park
 Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

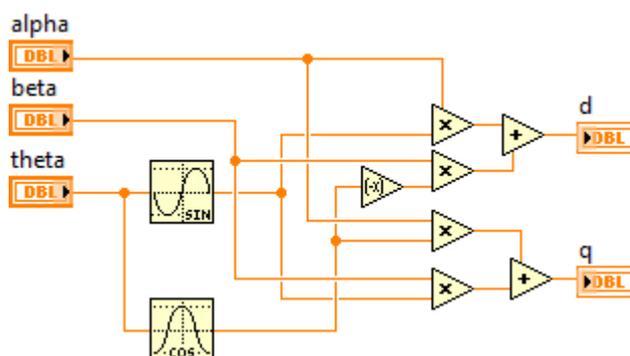


Figura 103 - Detalhamento da VI da transformada de Park
 Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

A VI da inversa de Park é mostrada na Figura 104 e na Figura 105 pode ser vista com mais detalhes.

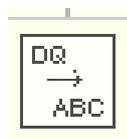


Figura 104 - VI da inversa de Park
 Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

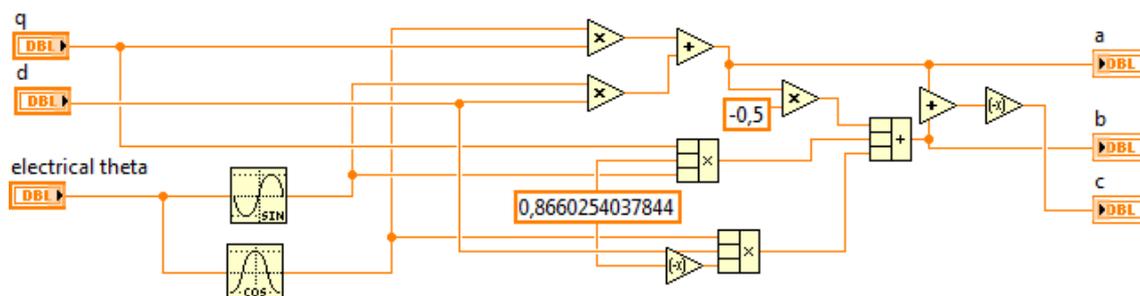


Figura 105 - Detalhes da VI da transformada inversa de Park
 Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

De acordo com o apêndice A e B o sistema da transformada de Clarke é dado na VI da transformada de Clarke, visto na Figura 106 e com detalhamento na Figura 107.

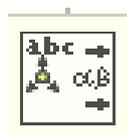


Figura 106 - VI da transformada de Clarke
 Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).

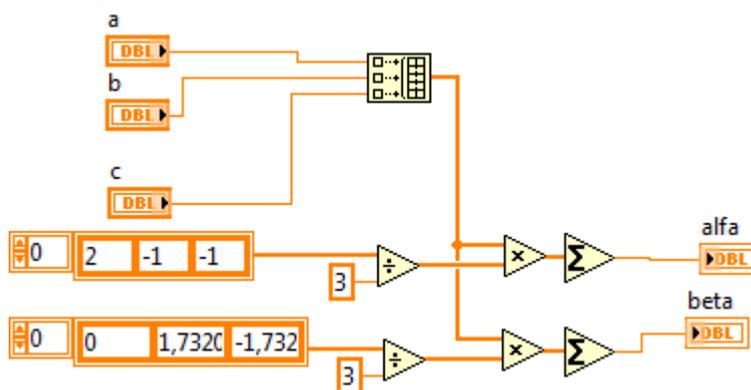


Figura 107 - Detalhe da VI da transformada de Clarke
 Fonte: Autoria própria via LabVIEW (2012).