



**FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI-CIMATEC
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA
INDUSTRIAL**

VITOR MAIA ANDRADE

**INFRAESTRUTURA E MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO
DAS CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DE MOTORES
DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS UTILIZANDO
INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL:**

**Ênfase nos ensaios de resistência de enrolamento, a vazio e com o
rotor bloqueado**

**SALVADOR
2011**

Vitor Maia Andrade

**INFRAESTRUTURA E MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO
DAS CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DE MOTORES
DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS UTILIZANDO
INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL:**

**Ênfase nos ensaios de resistência de enrolamento, a vazio e com o
rotor bloqueado**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Faculdade de Tecnologia
SENAI CIMATEC como requisito final para
obtenção do título de Tecnólogo em
Mecatrônica Industrial.

Orientador: Prof. M.Sc. Milton Bastos.

Salvador
2011

Dedico esse trabalho a toda minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais por terem me dado essa oportunidade e que juntos com meu irmão sempre estiveram me apoiando.

Aos amigos antigos e os que fiz durante a faculdade pela companhia e ajuda durante todos esses anos.

E por fim ao professor Milton Bastos por ter colaborado muito para a conclusão desse trabalho, além de estar sempre orientando sobre outras questões.

“Um passo à frente e você já não está mais no mesmo lugar”
Chico Science

RESUMO

Este trabalho apresenta a infra-estrutura necessária para a implantação de uma bancada para ensaios em Motores de Indução trifásicos utilizando instrumentação virtual. Aqui serão descritos os métodos e instrumentos necessários para realização dos ensaios de resistência do enrolamento, ensaio a vazio e com o rotor bloqueado, uma breve introdução do ambiente de desenvolvimento LabVIEW e sistema de aquisição de dados CompactDAQ ambos da National Instruments.

Palavras Chaves: motor de indução trifásico, instrumentação virtual, LabVIEW, Ensaios.

ABSTRACT

This paper presents the basic infrastructure for the deployment of a workbench for testing three phase induction motors using virtual instrumentation. Here is describes the methods and tools necessary for testing of insulation resistance, winding resistance, no-load test and locked rotor test, a brief introduction to the software LabVIEW and data acquisition system CompactDAQ both produced by National Instruments.

Key-words: three phase induction motor, virtual Instrumentation, LabVIEW, tests.

LISTA DE ACRÔNIMOS

- CC – Corrente Contínua;
- CA – Corrente Alternada;
- CIMATEC - Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia, unidade do SENAI/BA;
- DAQ - *Data acquisition* (Aquisição de dados);
- fem - Força eletromotriz;
- GPIO - *General Purpose Interface Bus*, interface de comunicação;
- G - Linguagem de programação *Graphic*;
- LabVIEW - *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*;
- MAX - *Measurement & Automation Explorer*;
- MIT - Motor de Indução Trifásico;
- MG – *Motors and Generators*;
- NBR - Norma Brasileira;
- NEMA - National Electrical Manufacturers Association;
- PC - *Personal Computer* (Computador Pessoal);
- RMS – Valor Eficaz;
- SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial;
- USB - *Universal Serial Bus*;
- VI - *Virtual Instruments* (instrumentos virtuais).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Elementos do MIT. Fonte: Siemens Industry, Inc.	19
Figura 2: Vista frontal do núcleo do estator. Fonte: Siemens Industry, Inc.	19
Figura 3: Enrolamento montado no estator. Fonte: Siemens Industry, Inc.(1)	20
Figura 4: Enrolamento montado no estator. Fonte: Siemens Industry, Inc.(2)	20
Figura 5: Vista Frontal do Núcleo do rotor. Fonte: Siemens Industry, Inc.	20
Figura 6: Barras condutoras e anéis de curto-circuito. Fonte: Siemens Industry, Inc.	21
Figura 7: Rotor tipo gaiola de esquilo. Fonte: Siemens Industry, Inc.	21
Figura 8: Perfil de um MIT. Fonte: Siemens Industry, Inc.	21
Figura 9: Campo magnético girante. Fonte: Siemens Industry, Inc.	22
Figura 10: Placa de identificação WEG. Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S/A.	24
Figura 11: Baixa resistência de enrolamento. Fonte: ABNT-NBR 5383-1.	26
Figura 12: Alto valor de resistência de enrolamento. Fonte: ABNT-NBR 5383-1.	26
Figura 13: Ponte de Kelvin. Fonte: ABNT-NBR 5383-1.	27
Figura 14: Ponte de Wheatstone. Fonte: ABNT-NBR 5383-1.	28
Figura 15: Circuito Equivalente do estator do MIT. Fonte: Fitzgerald, Máquinas Elétricas.	31
Figura 16: Circuito Equivalente do rotor do MIT. Fonte: Fitzgerald, Máquinas Elétricas.	31
Figura 17: Circuito Equivalente completo do MIT. Fonte: Fitzgerald, Máquinas Elétricas.	31
Figura 18: Circuito Equivalente do MIT a Vazio. Fonte: Fitzgerald, Máquinas Elétricas.	32
Figura 19: Circuito Equivalente do MIT com Rotor Bloqueado. Fonte: Fitzgerald, Máquinas Elétricas.	34
Figura 20: Painel Frontal de um VI.	36
Figura 21: Diagrama de blocos de um VI.	37
Figura 22: Dispositivos DAQ. Fonte: NI, Manual de treinamento do LabVIEW.	38
Figura 23: Janela principal do <i>Measurement & Automation Explorer</i>	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 24: CompactDAQ. Fonte: <i>National Instruments site</i> .	40
Figura 25: Rack do CompactDAQ vazio. Fonte: <i>National Instruments site</i> .	40
Figura 26: Módulos de entrada e saída. Fonte: <i>National Instruments site</i> .	40
Figura 27: Vista Frontal NI 9205. Fonte: NI – Módulo NI 9205.	41
Figura 28: Circuito de Entrada NI 9205. Fonte: NI – Módulo NI 9205.	42
Figura 29: Configuração "Tensão Diferencial". Fonte: NI – Módulo NI 9205.	42
Figura 30: Configuração "Terra Comum". Fonte: NI – Módulo NI 9205.	42
Figura 31: Fluxograma de Navegacao	43
Figura 32: Tela de Entrada	44
Figura 33: Tela de Identificação	45
Figura 34: Tela Menu de Navegação	45
Figura 35: Painel Frontal Teoria do Ensaio a Vazio	46
Figura 36: Painel Frontal testes Ensaio a Vazio	46
Figura 37: Painel Frontal de Parâmetros Ensaio a Vazio	47
Figura 38: Diagrama de blocos "Aquisicao de Dados" Medição CC	47
Figura 39: Diagrama de blocos "Aquisicao de Dados" Medição CA	48
Figura 40: Circuito de Medição para ensaio a vazio	49
Figura 41: Circuito de Medição para ensaio com rotor bloqueado	50
Figura 42: Conexões da bancada	50
Figura 43: Medição de 2 Volts MAX	53
Figura 44: Medição de 2 V Osciloscopio	54
Figura 45: Forma de onda 3Vrms medida pelo Osciloscópio	56
Figura 46: Forma de onda 3Vrms medida pelo LabVIEW	56
Figura 47: Forma de Onda 3Vrms <i>Measurement & Automation Explorer</i>	57
Figura 48: Painel Frontal do VI de teste de enrolamento	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros de simulação do motor	52
Tabela 2: Medição de tensão CC	53
Tabela 3: Medição de Tensão AC - Entrada do Transformador	54
Tabela 4: Medição de Tensão AC - Saída RMS do Transformador	55
Tabela 5: Medição de Tensão AC - Saída Transformador Tensão Mínima	55
Tabela 6: Medição de Tensão AC - Saída Transformador Tensão Máxima	55
Tabela 7: Cálculo do fator de correção de tensão	57
Tabela 8: Ensaio de Resistência de Enrolamento	58

LISTA DE SÍMBOLOS

C_1 - Fator de redução para perdas considerar perdas não fundamentais do motor;

E_2 - A tensão de fase do rotor referenciada ao estator, em V;

f - É a frequência da rede trifásica;

k - Constante para conversão de temperatura da resistência do enrolamento, valor depende do material;

I_1 - A corrente no estator, em A;

I_2 - A corrente no rotor referenciada ao estator, em A;

I_m - A corrente de magnetização, em A;

I_c - A corrente de perda no núcleo, em A;

I^2R - Perda no estator, em watts;

I_{lvz} - Corrente de linha a vazio, em A;

I_{LL} - Corrente de linha com rotor bloqueado, em Amperes (A);

m - Número de fases do motor;

n_s - Velocidade real do rotor, dada em rotações por minuto (RPM);

P_{cu} - Perda I^2R no estator em watts (W);

P_c - Perda no núcleo em watts (W);

P_{si} - Potência de entrada no estator em watts (W);

P_{vz} - Potência ativa de entrada a vazio, em watts;

P_{atv} - Perdas por atrito e ventilação, em watts;

P_L - Potência ativa trifásica com rotor bloqueado, em VAR

Q_{vz} - Potência reativa a vazio, em VAR;

Q_L - Potência reativa com rotor bloqueado, em VAR

R_s - Resistência do enrolamento corrigida para temperatura especificada em ohms (Ω);

R_x - Resistência ôhmica do enrolamento, em ohms (Ω);

R_v - Resistência interna do voltímetro, em ohms (Ω);

R_a - Resistência interna do amperímetro, em ohms (Ω);

R_A - Resistência de um resistor auxiliar "a", em ohms (Ω);

R_B - Resistência de um resistor auxiliar "b", em ohms (Ω);

R_s - Resistência do resistor padrão, em Ohms (Ω);

R_t - Resistência do enrolamento na temperatura de ensaio, em ohms (Ω);

LISTA DE SÍMBOLOS

- R_1 - A resistência do estator, em ohms;
- R_2 - A resistência do rotor referenciada ao estator, em ohms;
- R_c - A resistência de perda no núcleo, em ohms;
- s - Escorregamento por unidade;
- S_{vz} - Potência aparente a vazio, em VA;
- S_L - Potência aparente com rotor bloqueado, em VA;
- t_s - Temperatura especificada para conversão, dada em graus Celsius;
- t_t - Temperatura de ensaio, dada em graus Celsius;
- T - Conjugado com o rotor bloqueado, dado em Newton – metros (N.m);
- V - Tensão aplicada ao enrolamento, em volts (V);
- V_1 - A tensão de fase, em V;
- V_{lvz} – Tensão de linha a vazio, em V;
- V_{ll} - Tensão de linha com rotor bloqueado, em V;
- X_1 - A reatância do estator, em ohms;
- X_2 - A reatância do rotor, em ohms;
- X_m - A reatância de magnetização, em ohms.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	18
2.1.1 Construção	18
2.1.2 Princípio Funcionamento	22
2.1.3 Placa de identificação	23
2.2 ENSAIOS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	25
2.2.1 Condições gerais de ensaio	25
2.2.2 Ensaio da resistência do Enrolamento.....	25
2.2.2.1 Método da Queda de Tensão.....	26
2.2.2.2 Método da Ponte.....	27
2.2.3 Ensaio a Vazio	28
2.2.4 Ensaio com o Rotor Bloqueado	29
2.2.4.1 Corrente com o Rotor Bloqueado.....	29
2.2.4.2 Conjugado com o Rotor Bloqueado	30
2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	30
2.3.1 Circuito Equivalente a vazio	32
2.3.2 Circuito Equivalente com rotor bloqueado	33
2.4 INTRODUÇÃO AO LABVIEW	36
2.4.1 Aquisição de dados com LabVIEW.....	37
2.4.1.1 CompactDAQ	39
2.4.1.2 Modulo NI 9205	41
3 BANCADA PARA ENSAIOS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	43
3.1 APLICAÇÃO LABVIEW.....	43
3.2 CIRCUITOS CONDICIONADORES DE SINAL	48
3.3 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA BANCADA DE TESTES.....	49
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	51
4.1 VALIDAÇÃO DA APLICAÇÃO.....	51
4.2 VALIDAÇÃO DA AQUISIÇÃO DE DADOS.....	52
4.2.1 Teste de tensão contínua	52
4.2.2 Teste de tensão alternada	54
4.2.2.1 Correção da tensão CA medida	57
4.2.3 Simulação do ensaio de resistência de enrolamento do rotor.....	58
4.3 DISCURSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	59
4.4 DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	60

5 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
APÊNDICE A – DIAGRAMA DE BLOCOS: PAGINA INICIAL.VI	63
APÊNDICE B – DIAGRAMA DE BLOCOS: MENU DE ENSAIOS.VI	64
APÊNDICE B (CONTINUAÇÃO) – DIAGRAMA DE BLOCOS: MENU DE ENSAIOS.VI	65
APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS: DADOS DO FABRICANTE.VI	66
APÊNDICE D – DIAGRAMA DE BLOCOS: RESISTÊNCIA DE ENROLAMENTO.VI	67
APÊNDICE E – DIAGRAMA DE BLOCOS: ENSAIO AVAZIO.VI.....	68
APÊNDICE F – DIAGRAMA DE BLOCOS: ENSAIO COM ROTOR BLOQ.VI.....	69
ANEXO A – FOLHA DE DADOS DO MULTÍMETRO TENMA	70
ANEXO B – FOLHA DE DADOS DO OSCILOSCÓPIO TEKTRONIXS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A realização de ensaios para a determinação das características de desempenho de motores elétricos é fundamental para se obter uma melhor eficiência na utilização desses equipamentos. O acompanhamento dessas características de funcionamento permite também realizar intervenções de manutenção de forma mais sistematizada e embasada.

Nos ensaios em motores de indução trifásicos descritos pelas normas NBR 17094-1 e NBR 5383-1 são necessários fazer a medição, conversão e análise matemática de uma grande quantidade de variáveis como: temperatura de diversos pontos do motor e do ambiente, tensão e corrente nos enrolamentos, torque, etc. Assim, os procedimentos se tornam muito complicados e demorados de serem feitos de forma convencional. Uma maneira de tornar a realização desses ensaios mais dinâmico e confiável é a utilização da instrumentação virtual.

A instrumentação virtual consiste na integração da precisão do equipamento de medição com a praticidade do computador. Essa técnica apresenta um instrumento de medição enviando dados para um computador que tem a função de tratar esses dados, com auxílio desta ferramenta pode-se modelar o equipamento, mostrar em tempo real os valores medidos, certificar e armazenar históricos para acompanhamento.

Para mostrar como essa tecnologia pode ser utilizada na determinação das características de desempenho de motores de indução trifásico será descrito como esses ensaios são divididos, os métodos a serem seguidos de acordo com as normas, as ferramentas disponíveis no ambiente de desenvolvimento *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench* (LabVIEW) e o sistema de aquisição de dados que será utilizado para fazer a integração instrumento físico e computador.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estruturar e implementar uma bancada para realização de ensaios de resistência dos enrolamentos, ensaio a vazio e ensaio com o rotor bloqueado em

motores de indução trifásicos utilizando instrumentação virtual.

1.1.2 Objetivos específicos

Para a realização desse trabalho serão executados os seguintes passos:

- ◆ Estudar as normas que definem os métodos de ensaios em motores de indução trifásicos;
- ◆ Estudar o ambiente de desenvolvimento LabVIEW;
- ◆ Pesquisar instrumentos de medição necessários para realização dos ensaios escolhidos;
- ◆ Estudar o sistema de aquisição CompactDAQ;
- ◆ Desenvolver programas para tratamento e amostragem de dados, utilizando LabVIEW;
- ◆ Montar, testar e validar uma bancada para realização de ensaios de resistência do enrolamento, ensaio a vazio e com o rotor bloqueado em motores de indução trifásicos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A realização de ensaios em máquinas elétricas exige a utilização de uma grande quantidade de instrumentos e o cálculo de muitos parâmetros para poder fazer a caracterização do motor.

Com o LabVIEW é possível, através de suas ferramentas matemáticas e comunicação com outros softwares como o EXCEL, fazer a análise das informações obtidas e gerar documentos técnicos automaticamente.

Assim com instrumentação virtual implementada pelo LabVIEW pretende-se reduzir o número de instrumentos utilizados e também tornar mais fácil o trabalho do operador que irá conduzir o ensaio.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão mostradas as bases teóricas necessárias para a realização do projeto. A começar com uma introdução a motores de indução trifásicos falando de seus componentes e funcionamento, depois será mostrado os ensaios existentes, como eles são classificados e os métodos para a realização de ensaios de resistência do enrolamento, ensaio a vazio e com o rotor bloqueado e por ultimo, uma apresentação do ambiente de desenvolvimento LabVIEW e como realizar aquisição de dados com essa ferramenta.

2.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O motor de indução ou assíncrono é um motor elétrico em que a fonte de energia é conectada apenas no enrolamento do estator e no rotor uma tensão alternada de frequência e potência variáveis é induzida, por isso é considerada uma máquina de excitação única (Del Toro, 1994).

O Motor de Indução Trifásico (MIT), é a máquina elétrica girante que possui uma estrutura construtiva simples, requer pouca manutenção e é o mais indicado para operar em locais remotos e/ou lugares que possui situações severas de trabalho sendo assim o preferido nas indústrias (Kosow, 2000).

2.1.1 Construção

O motor de indução é uma máquina de construção simples, sendo composto fundamentalmente por duas partes: estator e rotor. A Figura 1 mostra alguns elementos do motor entre eles o estator e o rotor.

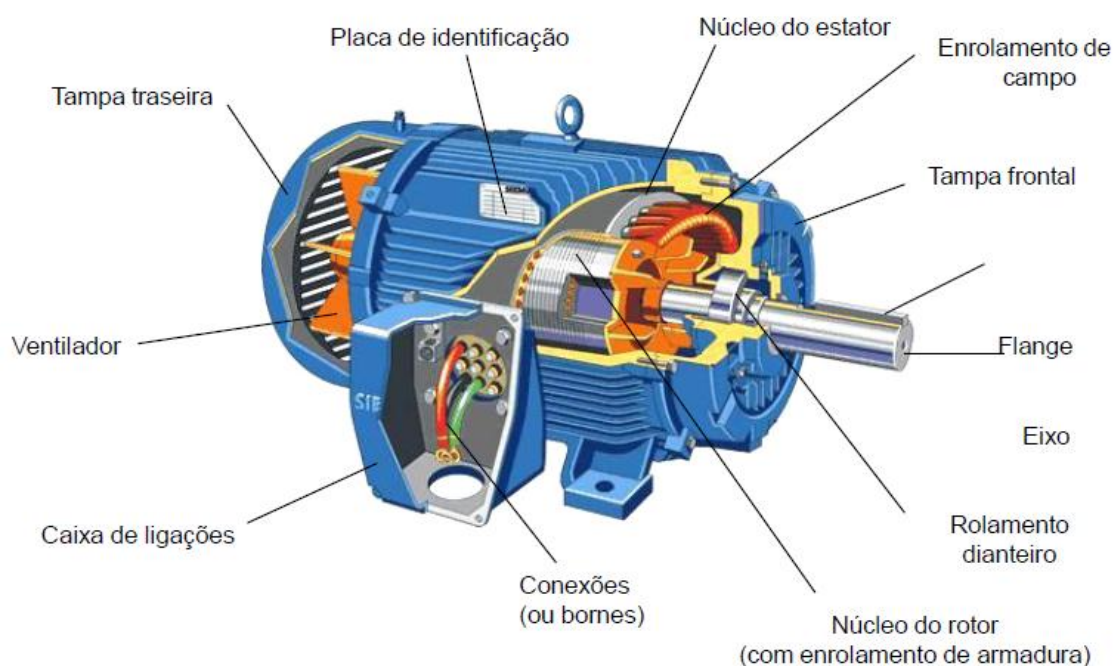


Figura 1: Elementos do MIT. Fonte: Siemens Industry, Inc.

O estator faz parte da carcaça do motor e é formado por um núcleo feito de chapas de aço magnético laminado, que possui ranhuras como mostrado na Figura 2. Nessas ranhuras são colocados os três enrolamentos do estator (uma para cada fase) que são compostos por fios isolados, como mostrados na Figura 3 e na Figura 4.

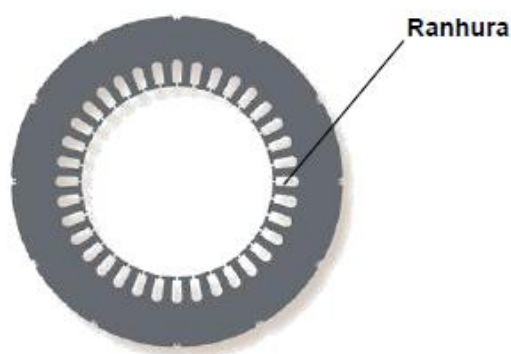


Figura 2: Vista frontal do núcleo do estator. Fonte: Siemens Industry, Inc.

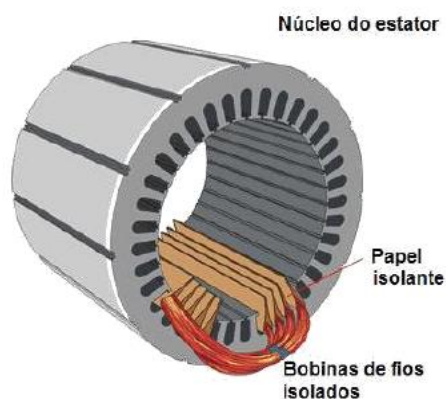


Figura 3: Enrolamento montado no estator. Fonte: Siemens Industry, Inc.(1)

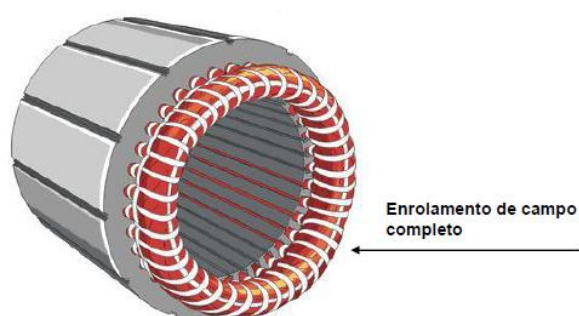


Figura 4: Enrolamento montado no estator. Fonte: Siemens Industry, Inc.(2)

O rotor, no caso de motores do tipo gaiola de esquilo, é formado por um eixo, um núcleo de chapas com o mesmo material do estator, como indicado na Figura 5, e por barras condutoras de alumínio não isoladas, conectadas por anéis de curto-circuito, como mostrados na Figura 6. Essas barras são postas paralelas (ou aproximadamente paralelas) ao eixo nas ranhuras do núcleo do rotor. A Figura 7 mostra o rotor completo.

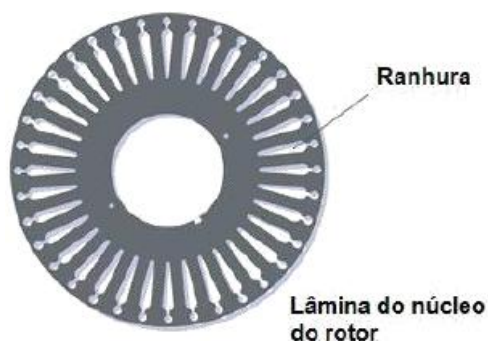


Figura 5: Vista Frontal do Núcleo do rotor. Fonte: Siemens Industry, Inc.

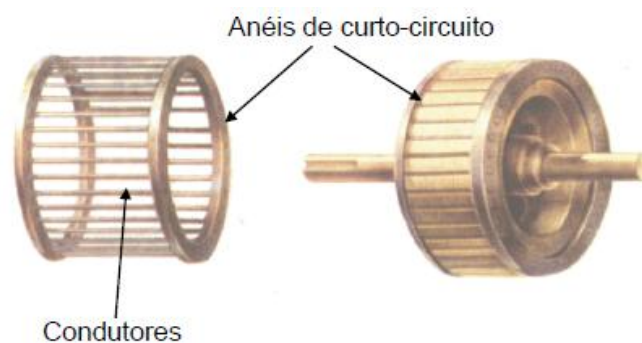


Figura 6: Barras condutoras e anéis de curto-circuito. Fonte: Siemens Industry, Inc.

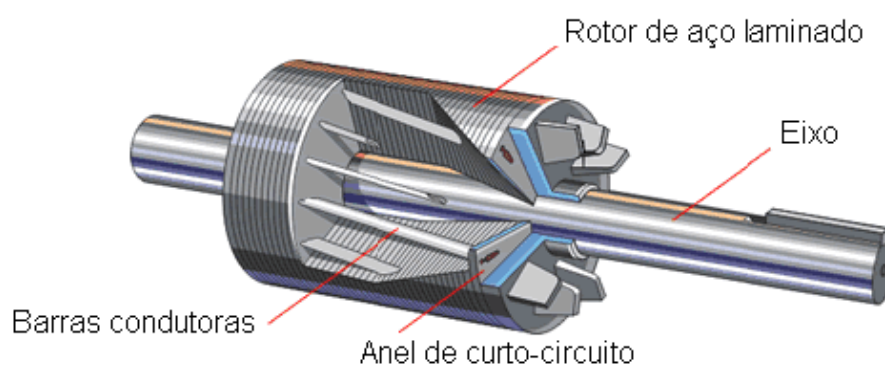


Figura 7: Rotor tipo gaiola de esquilo. Fonte: Siemens Industry, Inc.

O estator e o rotor são montados solidários e concêntricos, com um eixo comum aos anéis, o espaço que existe entre o estator e o rotor é chamado de entreferro (SIEMENS, 2011). A Figura 8 mostra um perfil da montagem.

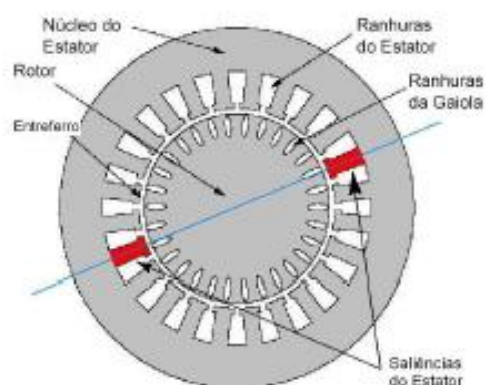


Figura 8: Perfil de um MIT. Fonte: Siemens Industry, Inc.

2.1.2 Princípio Funcionamento

Ao conectar os enrolamentos do estator em uma rede de alimentação trifásica simétrica, é gerado um campo magnético no entreferro, que gira a velocidade síncrona determinada pela Equação 1:

$$n_s = \frac{2f}{p} [\text{rotações/segundo}] \quad (1)$$

Onde:

- ♦ n_s - É a velocidade síncrona;
- ♦ f - É a frequência de alimentação;
- ♦ p - É o número de pólos.

A Figura 9 mostra como o campo magnético resultante se comporta de acordo com a alimentação trifásica (Del Toro, 1994).

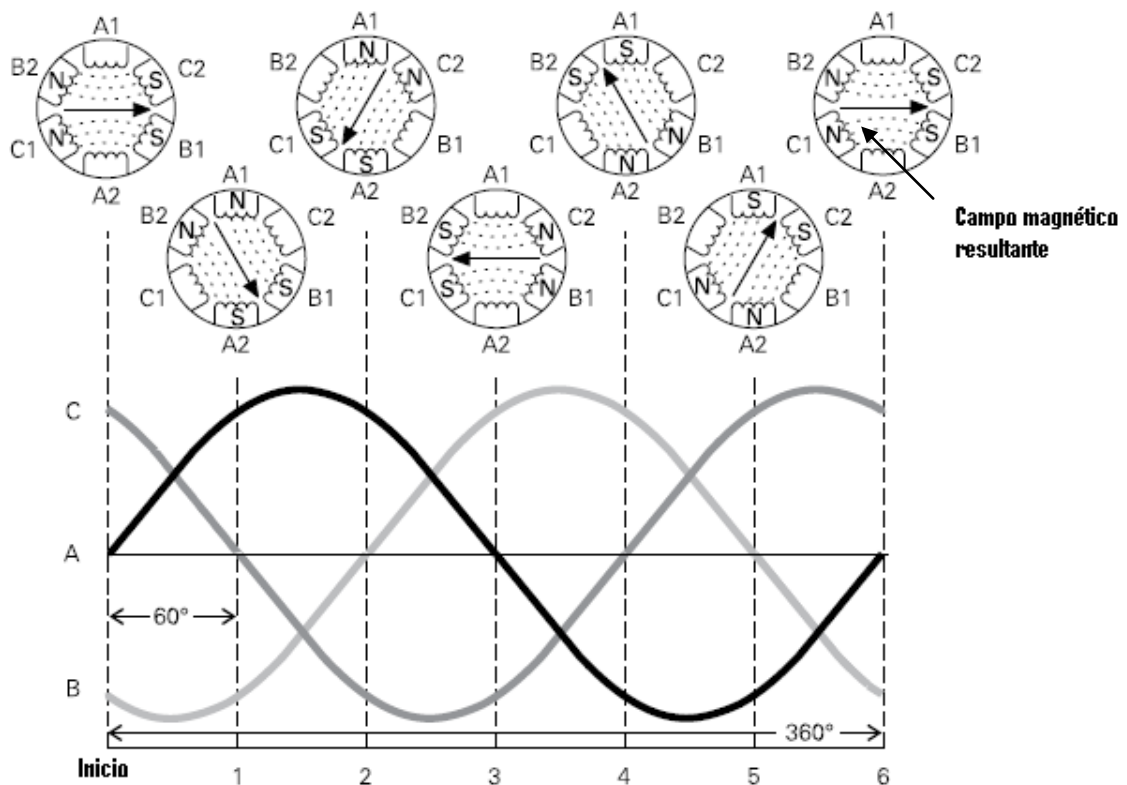


Figura 9: Campo magnético girante. Fonte: Siemens Industry, Inc.

O campo magnético girante gerado pelo enrolamento do estator corta também as barras condutoras do rotor e como consequência uma força eletromotriz (fem) é

induzida no condutor. Como os condutores estão curto-circuitados pelos anéis uma corrente irá circular através das barras e também vai gerar um campo magnético, e por isso o motor de indução trifásico pode ser comparado com o transformador, sendo o enrolamento do estator considerado o primário e o do rotor o secundário do transformador.

Esse campo magnético gerado no rotor tentará acompanhar o campo magnético gerado no estator produzindo assim torque, porém nunca poderão ter a mesma velocidade.

A diferença da velocidade do rotor e a velocidade síncrona é denominada de escorregamento. O escorregamento é definido pela Equação 2 e seu valor é influenciado pela carga acoplada no motor e pelas perdas por atrito (Del Toro, 1994).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Onde:

- ◆ s – É o escorregamento por unidade;
- ◆ n_s – É a velocidade síncrona;
- ◆ n – É a velocidade real do rotor.

2.1.3 Placa de identificação

Todo motor deve ter preso em sua carcaça uma placa de identificação, ela deve ser fixada de modo que seja facilmente encontrada e fique visível na posição de utilização determinada pela sua forma construtiva e disposição de montagem (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 17094-1, 2008).

A Figura 10 mostra um exemplo de placa de um motor fabricado pela WEG.

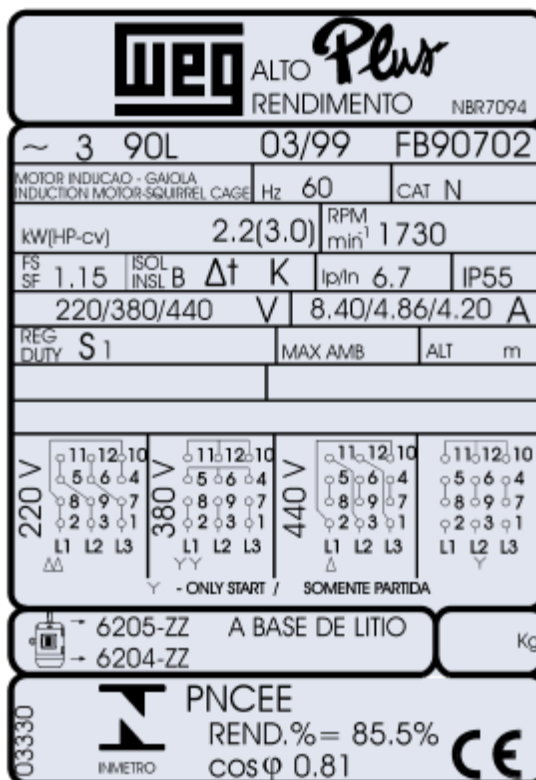


Figura 10: Placa de identificação WEG. Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S/A.

No exemplo da Figura 10 é possível encontrar muitas informações sobre o motor, como:

- ◆ Número de fases: ~ 3;
- ◆ Modelo da carcaça: 90L;
- ◆ Mês e ano de fabricação: 03/99;
- ◆ Número de série: FB90702;
- ◆ Tipo do motor: motor de indução gaiola;
- ◆ Frequência nominal (HZ): 60Hz;
- ◆ Categoria: N;
- ◆ Potência nominal (HP-cv): 2.2(3.0).

Outros dados que estão contidos nessa placa, são descritos na norma NBR 17094-1:2008 (WEG, 2009).

2.2 ENSAIOS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Os ensaios em motores de indução trifásicos são classificados pela norma NBR 17094-1:2008 como ensaios de rotina, tipo e especiais. Os ensaios de rotina compreendem: medição da resistência de isolamento, medição da resistência de enrolamento a frio, ensaio a vazio e medição da rigidez dielétrica. Os ensaios de tipo são os ensaios de rotina mais: ensaio com rotor bloqueado, elevação de temperatura, determinação de perdas, rendimento, fator de potência e ensaio de conjugado máximo. Os ensaios especiais são: ensaio de sobrevelocidade, nível de ruído, tensão no eixo e medição da resistência de isolamento do mancal, vibração e medição da tangente do ângulo de perda (ABNT. NBR 17094-1, 2008).

2.2.1 Condições gerais de ensaio

Para a realização dos ensaios descritos a seguir é necessário garantir que os motores estejam em bom estado de conservação e que estejam com todas as tampas montadas por requisito da norma NBR 5383-1:2002 (ABNT-NBR 5383-1, 2002).

2.2.2 Ensaio da resistência do Enrolamento

Este ensaio consiste na medição da resistência ôhmica do enrolamento quando este é submetido a uma tensão contínua a uma determinada temperatura. É muito útil para verificar se há alguma espira em curto-circuito e conexões e contatos em más condições.

Os métodos mais comuns para se medir as resistências dos enrolamentos são o método a queda de tensão e o da ponte.

É importante que toda medida de resistência de enrolamento seja corrigida para a temperatura de 25 °C pela Equação 3, para fins de comparação (ABNT-NBR 5383-1, 2002).

$$R_s = R_t \frac{(t_s+k)}{(t_t+k)} \quad (3)$$

Onde:

- ◆ R_s a resistência do enrolamento corrigida para temperatura t_s , em ohms;
- ◆ t_s é a temperatura padrão, em graus Celsius;
- ◆ R_t a resistência na temperatura de ensaio, em ohms;
- ◆ t_t a temperatura de ensaio, em graus Celsius;
- ◆ k igual a 234,5 para enrolamentos feito de cobre eletrolítico com 100% de condutividade ou 225 para alumínio com condutividade em volume de 62%.

2.2.2.1 Método da Queda de Tensão

Para esse método existem dois esquemas que podem ser montados de acordo com o valor da resistência a ser medido. O primeiro esquema mostrado na Figura 11 é utilizado quando o valor da resistência é baixo, já o segundo esquema mostrado na Figura 12 é utilizado para valores altos de resistência.

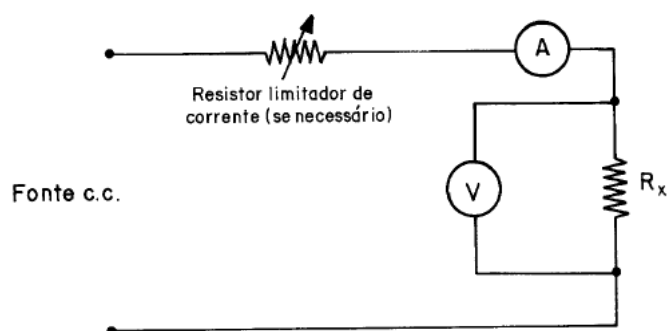


Figura 11: Baixa resistência de enrolamento. Fonte: ABNT-NBR 5383-1.

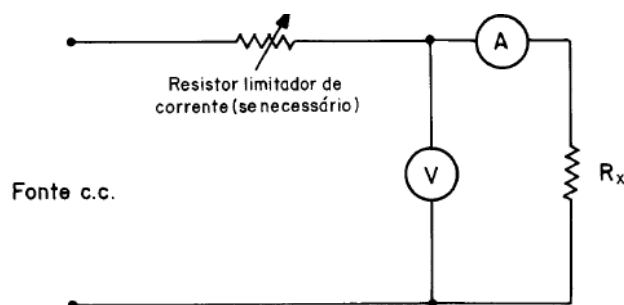


Figura 12: Alto valor de resistência de enrolamento. Fonte: ABNT-NBR 5383-1.

Para cada circuito mostrado acima um cálculo deve ser realizado. A Equação 4 corresponde a o circuito da Figura 11 e a Equação 5 corresponde à Figura 12 (ABNT-NBR 5383-1, 2002).

$$R_x = \frac{V}{I - V/R_v} \quad (4)$$

$$R_x = \frac{V - IR_a}{I} \quad (5)$$

Onde:

- ◆ R_x - Resistência ôhmica do enrolamento, em ohms;
- ◆ V - Tensão aplicada ao enrolamento, em Volts;
- ◆ I - Corrente do enrolamento, em ampères;
- ◆ R_v - Resistência interna do voltímetro, em ohms;
- ◆ R_a - Resistência interna do amperímetro, em ohms.

2.2.2.2 Método da Ponte

Assim como o método da Queda de Tensão, o método da Ponte possui dois circuitos, um para resistências de baixo valor e com quatro terminais e outro para altos valores de resistência.

O circuito utilizado para resistência que possuem quatro terminais e valores baixos é a Ponte de Kelvin que está sendo mostrado na Figura 13, sendo o cálculo da resistência feito pela Equação 6.

O esquema utilizado para resistência de valores altos é a Ponte de Wheatstone, mostrada na Figura 14 e calculado pela Equação 7.

Nos dois circuitos, resistores auxiliares são ajustados para que o detector de corrente D indique corrente zero (ABNT-NBR 5383-1, 2002).

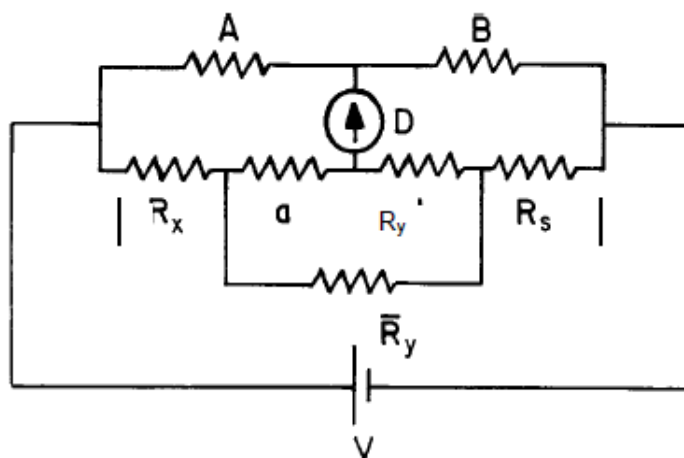


Figura 13: Ponte de Kelvin. Fonte: ABNT-NBR 5383-1.

$$R_x = R_s \frac{R_A}{R_B} + \left[\frac{R_b R_y}{R_a + R_b + R_y} \right] \times \left[\frac{R_A}{R_B} - \frac{R_a}{R_b} \right] \quad (6)$$

Onde:

- ◆ R_x – É a resistência a ser calculada, em Ohms;
- ◆ R_a – É a resistência do ramo “a”, em Ohms;
- ◆ R_b – É a resistência do ramo “b”, em Ohms;
- ◆ R_y – É a resistência de ligação y, em Ohms;
- ◆ R_A e R_B – São as resistências auxiliares, em Ohms;
- ◆ R_s – É um resistor padrão, em Ohms.

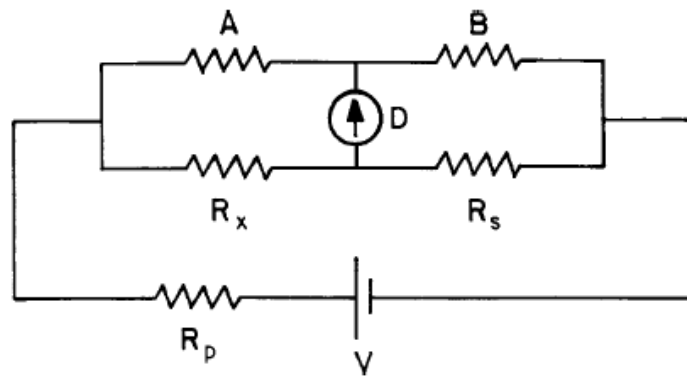


Figura 14: Ponte de Wheatstone. Fonte: ABNT-NBR 5383-1.

$$R_x = \frac{R_A}{R_B} \times R_s \quad (7)$$

Onde:

- ◆ R_x – É a resistência a ser calculada, em Ohms;
- ◆ R_A e R_B – São resistores auxiliares, em Ohms;
- ◆ R_s – É um resistor padrão, em Ohms.

2.2.3 Ensaio a Vazio

O ensaio a vazio é quando o motor de indução funciona sem que ele forneça potência mecânica útil na ponta do seu eixo e com tensão nominal. É feito para a determinação das perdas no núcleo e por atrito e ventilação.

Para encontrar o valor das perdas em vazio deve-se calcular perda I^2R no estator do motor antes. A perda I^2R no estator é igual a $1,5 I^2R$, sendo I a corrente eficaz medida de cada terminal de linha e R é a resistência em curto-circuito entre dois terminais de linha, obtida pelo ensaio de resistência de enrolamento na seção anterior.

As perdas no núcleo, por atrito e ventilação serão iguais a leitura da potência de entrada subtraída pela perda I^2R no estator.

O ensaio a vazio é feito ligando a máquina com tensão e frequência de alimentação com valores nominais sem que nenhuma carga seja acoplada no rotor. Nessas condições efetuar leituras de tensão, corrente e potência de entrada.

Recomenda-se esperar um tempo até que as medidas sejam estabilizadas (ABNT-NBR 5383-1, 2002).

2.2.4 Ensaio com o Rotor Bloqueado

O ensaio de rotor bloqueado em um motor de indução trifásico é feito ligando a máquina, que deve ter o rotor travado mecanicamente, a uma fonte de tensão trifásica variável (utilizar um variac na saída da alimentação trifásica convencional).

Nessas condições ir aumentando a amplitude da tensão aos poucos até que a corrente medida seja igual à corrente nominal. Quando isso acontecer deve-se anotar os valores de tensão, corrente e potência ativa de entrada e desligar imediatamente o motor.

O fabricante informa qual é o tempo máximo que o motor pode ficar ligado com o rotor bloqueado e corrente nominal, esse tempo deve ser respeitado e se possível desligar antes de atingi-lo.

Os valores de tensão, corrente e potência ativa de entrada devem ser medidos durante todo o ensaio (ABNT-NBR 5383-1, 2002).

2.2.4.1 Corrente com o Rotor Bloqueado

A verificação da corrente com o rotor bloqueado serve para averiguar a qualidade da fabricação e o desempenho do motor e consiste em fazer leitura da corrente em cada linha com tensão e frequência nominais (ABNT-NBR 5383-1, 2002).

2.2.4.2 Conjugado com o Rotor Bloqueado

O conjugado (também chamado de torque, momento ou binário) é a grandeza que mede o esforço necessário para girar um eixo.

O conjugado com o rotor bloqueado é o conjugado mínimo desenvolvido. Pode ser medido diretamente com um dinamômetro ou indiretamente pela Equação 8 (ABNT-NBR 5383-1, 2002).

$$T = \frac{k(P_{si} - P_{cu} - P_c)C_1}{n_s} \quad (8)$$

Onde:

- ◆ T - É o conjugado com o rotor bloqueado;
- ◆ P_{si} - É a potência de entrada no estator em watts;
- ◆ P_{cu} - É a perda I²R no estator em watts;
- ◆ P_c - É a perda no núcleo em watts;
- ◆ n_s - É a velocidade síncrona em rotações por minutos;
- ◆ C_1 - É fator de redução que varia de 0,9 à 1 para levar em conta outras perdas;
- ◆ k - É igual 9,549 para T , em newtons-metros.

2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O motor de indução trifásico pode ser modelado como sendo um circuito elétrico composto por dois ramos. O primeiro ramo, mostrado na Figura 15, se refere ao circuito do estator e o segundo, mostrado na Figura 16, ao rotor. A Figura 17 mostra o circuito completo do MIT.

A representação do motor como um circuito é útil para determinar as perdas e características de desempenho do motor (IEEE Std 112, 2004).

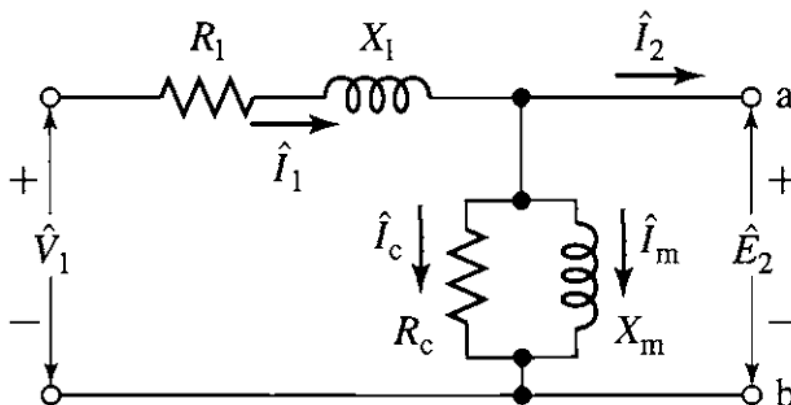


Figura 15: Circuito Equivalente do estator do MIT. Fonte: Fitzgerald, Máquinas Elétricas.

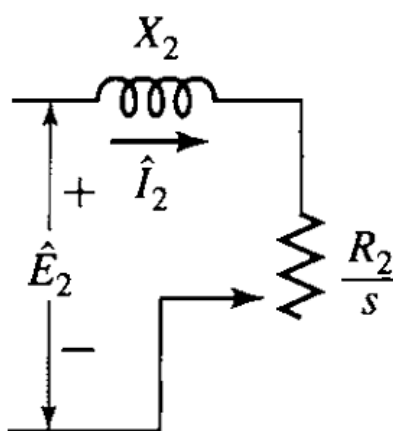


Figura 16: Circuito Equivalente do rotor do MIT. Fonte: Fitzgerald, Máquinas Elétricas.

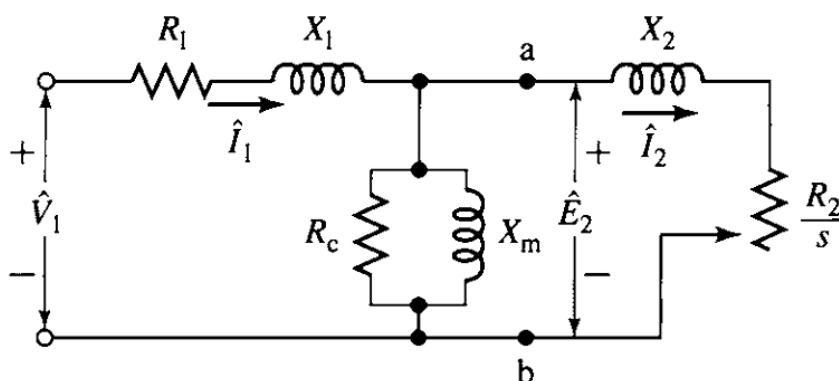


Figura 17: Circuito Equivalente completo do MIT. Fonte: Fitzgerald, Máquinas Elétricas.

Para as Figuras 15, 16 e 17 considerar:

- ◆ V_1 - A tensão de fase, em V
- ◆ E_2 - A tensão de fase do rotor referenciada ao estator, em V
- ◆ I_1 - A corrente no estator, em A
- ◆ I_2 - A corrente no rotor referenciada ao estator, em A
- ◆ I_m - A corrente de magnetização, em A
- ◆ I_c - A corrente de perda no núcleo, em A
- ◆ R_1 - A resistência do estator, em ohms

- ◆ R_2 - A resistência do rotor referenciada ao estator, em ohms
- ◆ R_c - A resistência de perda no núcleo, em ohms
- ◆ X_1 - A reatância do estator, em ohms
- ◆ X_2 - A reatância do rotor, em ohms
- ◆ X_m - A reatância de magnetização, em ohms

2.3.1 Circuito Equivalente a vazio

Com o motor ligado a vazio, como na condição descrita no tópico 2.2.3 Ensaio a Vazio, a potência entregue ao rotor é a mínima necessária para fazer o rotor girar.

Conseqüentemente o circuito equivalente do motor de indução trifásico pode ser aproximado desprezando o ramo do rotor, como visto na Figura 18 (IEEE Std 112, 2004).

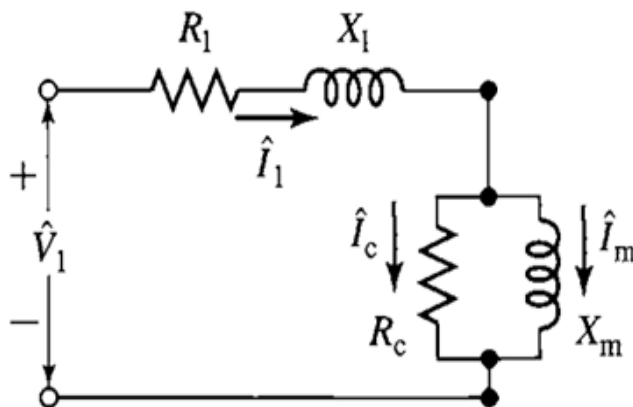


Figura 18: Circuito Equivalente do MIT a Vazio. Fonte: Fitzgerald, Máquinas Elétricas.

Assim pode-se considerar que a potência medida a vazio é igual ao total de perdas a vazio. Essas perdas são: perda I^2R no estator, perdas mecânicas (perdas por atrito e ventilação) e perdas no núcleo (Ver tópico 2.2.3 Ensaio a Vazio). Chegando a Equação 9 (Fitzgerald, 2006).

$$P_{vz} = P_c + P_{atv} + I^2R \quad (9)$$

Considerar na Equação 9.

- ◆ P_{vz} - Potência ativa de entrada a vazio, em watts;
- ◆ P_c - Perda no núcleo do motor, em watts;
- ◆ P_{atv} - Perdas por atrito e ventilação, em watts;
- ◆ I^2R - Perda no estator, em watts.

As perdas mecânicas são estimadas através de um gráfico Potência de entrada VS Tensão. Com esse gráfico considerar as perdas mecânicas iguais a potência de entrada quando o valor de tensão for zero.

A perda I^2R no estator do motor de indução trifásico é calculada através da Equação 10. (Fitzgerald, 2006)

$$I^2R = 3I^2R_1 \quad (10)$$

Onde:

- ◆ I – É a corrente de linha medida por terminal, em Amperes (A);
- ◆ R_1 – É resistência do estator obtida do ensaio de resistência, em Ohms.

A potência aparente e potência reativa são obtidas a partir das Equações 11 e 12.

$$S_{vz} = mV_{lvz}I_{lvz} \quad (11)$$

$$Q_{vz} = \sqrt{S_{vz}^2 - P_{vz}^2} \quad (12)$$

Considerar na Equação 11 e na Equação 12:

- ◆ P_{vz} - Potência ativa trifásica a vazio, em VA;
- ◆ S_{vz} - Potência aparente a vazio, em VA;
- ◆ Q_{vz} - Potência reativa a vazio, em VAR;
- ◆ V_{lvz} – Tensão de linha a vazio, em V;
- ◆ I_{lvz} – Corrente de linha a vazio, em A;
- ◆ m – Número de fases do motor.

Por fim pode-se calcular a Resistência de perda no núcleo R_{fe} pela Equação 13 (Fitzgerald, 2006).

$$R_{fe} = \frac{mV_{lvz}^2}{P_h} \quad (13)$$

2.3.2 Circuito Equivalente com rotor bloqueado

No ensaio com o rotor bloqueado (descrito no tópico 2.2.4) a corrente que circula nos enrolamentos do rotor é muito elevada comparada com a do circuito de magnetização e o escorregamento é igual a 1(um).

Assim o circuito equivalente do motor de indução trifásico pode ser aproximado para o circuito da Figura 19 (Fitzgerald, 2006),

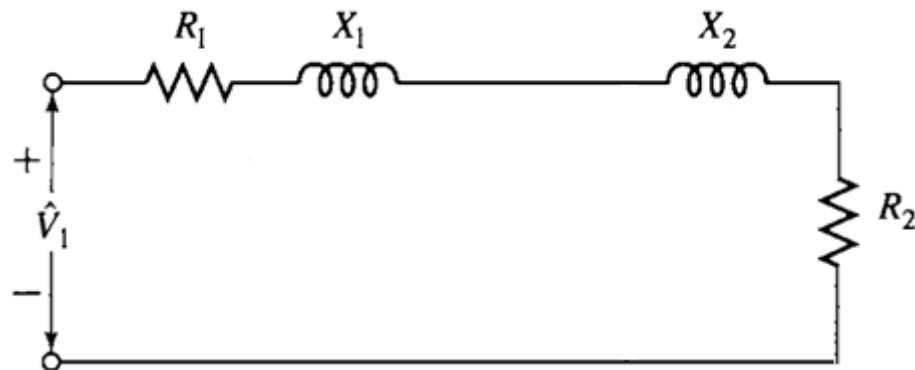


Figura 19: Circuito Equivalente do MIT com Rotor Bloqueado. Fonte: Fitzgerald, Máquinas Elétricas.

Assim, com essas considerações, os valores medidos, mais os parâmetros encontrados nos ensaios a vazio e de resistência de enrolamento do estator, faz-se os seguintes cálculos.

Primeiro, pode-se encontrar os valores de potência aparente e reativa com rotor bloqueado na Equação 14 e na Equação 15 (Fitzgerald, 2006).

$$S_L = mV_{LL}I_{LL} \quad (14)$$

$$Q_L = \sqrt{S_L^2 - P_L^2} \quad (15)$$

Considerar na Equação 14 e na Equação 15:

- ◆ P_L - Potência ativa trifásica com rotor bloqueado, em VAR;
- ◆ S_L - Potência aparente com rotor bloqueado, em VA;
- ◆ Q_L - Potência reativa com rotor bloqueado, em VAR;
- ◆ V_{LL} - Tensão de linha com rotor bloqueado, em V;
- ◆ I_{LL} - Corrente de linha com rotor bloqueado, em Amperes (A);
- ◆ m - Número de fases do motor.

Segundo, calcular os valores de Resistência, Impedância e Reatância equivalente. Equação 16, Equação 17 e Equação 18. (Fitzgerald, 2006)

$$R_{eq} = \frac{P_L}{3I_{LL}^2} \quad (16)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_L}{I_{LL}} \quad (17)$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (18)$$

Terceiro, de acordo com a classe do motor definida pela NEMA MG-1-2003 e fornecida pelo fabricante pode-se encontrar uma relação entre a reatância do estator com a reatância do rotor, como mostra a Equação 19. (Fitzgerald, 2006)

$$k = \frac{X_1}{X_2} \quad (19)$$

Sendo:

- ◆ $k = 1$ para motores de classe A e D;
- ◆ $k = 0.67$ para motores de classe B;
- ◆ $k = 0.43$ para motores de classe C.

Com a Equação 19 mais a Equação 20, Equação 21 e Equação 22 podemos calcular os valores das reatâncias X_1 e X_2 . (Fitzgerald, 2006)

$$X_{eq} = X_1 + X_2 \quad (20)$$

$$X_2 = \frac{X_{eq}}{k+1} \quad (21)$$

$$X_1 = X_{eq} - X_2 \quad (22)$$

Quarto, a resistência do rotor é calculada com a Equação 23:

$$R_2 = R_{eq} - R_1 \quad (23)$$

Quinto, Com o valor da reatância do estator e com os valores de tensão, corrente e potência reativa medidos no teste a vazio podemos calcular o valor da reatância de magnetização com a Equação 24 (Fitzgerald, 2006):

$$X_m = \frac{mV_0^2}{Q_0 - (mI_{i0}^2 X_1)} \quad (24)$$

2.4 INTRODUÇÃO AO LABVIEW

LabVIEW se trata de um ambiente de programação para a linguagem G (*Graphic*). A linguagem G é uma linguagem gráfica dotada de blocos para controle de fluxo, laços iterativos, operações matemáticas, etc.

No LabVIEW é possível implementar de maneira simples sistemas complexos de aquisição e manipulação de dados, fazer análises estatísticas, amostragem em gráficos e displays e gravar informações em outros formatos como uma planilha do Excel.

Os programas gerados no LabVIEW são chamados de VIs (Virtual Instruments) ou instrumentos virtuais pois sua aparência e operação são parecidos com a de um instrumento real e são compostos basicamente pelas seguintes partes:

- ◆ Painel Frontal que é a parte que interage com o usuário, produzindo entrada e saída de informação. Geralmente contem no painel frontal gráficos, displays, botões de controle, dispositivos de entrada numérica, etc. A Figura 20 mostra um exemplo de Painel Frontal;

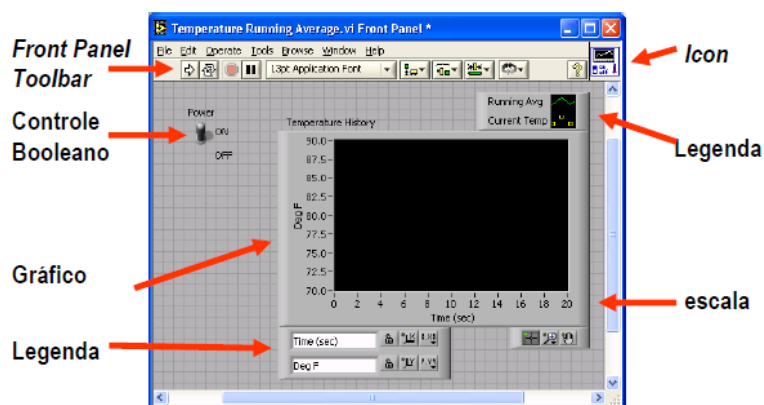


Figura 20: Painel Frontal de um VI.

- ◆ Diagrama de Blocos é a parte onde os dados provenientes do Painel Frontal ou de um *hardware* específico são tratados, o Diagrama de Blocos é formado por blocos que realizam diversas funções de tratamento de dados. A Figura 21 mostra a aparência de um diagrama de blocos;

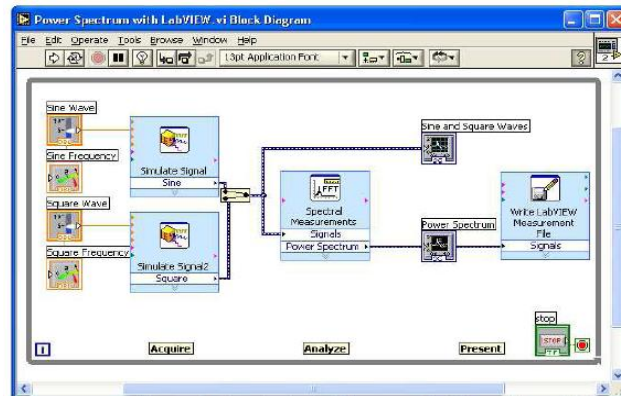


Figura 21: Diagrama de blocos de um VI.

- ◆ *Icon e Connector Pane*, no LabVIEW para que uma aplicação possa rodar dentro de outra como um SubVI, é necessário criar um ícone para esse SubVI com terminais de entrada e saída (*National Instruments - NI, 2001*).

2.4.1 Aquisição de dados com LabVIEW

Para que os dados dos instrumentos de medição sejam enviados para o PC e assim fazer o tratamento com o LabVIEW é necessário utilizar um sistema de aquisição de dados, ou DAQ (*Data Acquisition*).

Os sistemas DAQ têm a função de receber um sinal elétrico contínuo enviado por um sensor ou transdutor e converte-los em sinais digitais. Muitas vezes esses sinais contínuos devem ser condicionados antes que sejam enviados para o DAQ, pois podem danificar o equipamento. A Figura 22 mostra dois tipos de DAQ, o tipo “A” o dispositivo DAQ Plug – in está instalado no computador e o tipo “B” o dispositivo DAQ é externo.

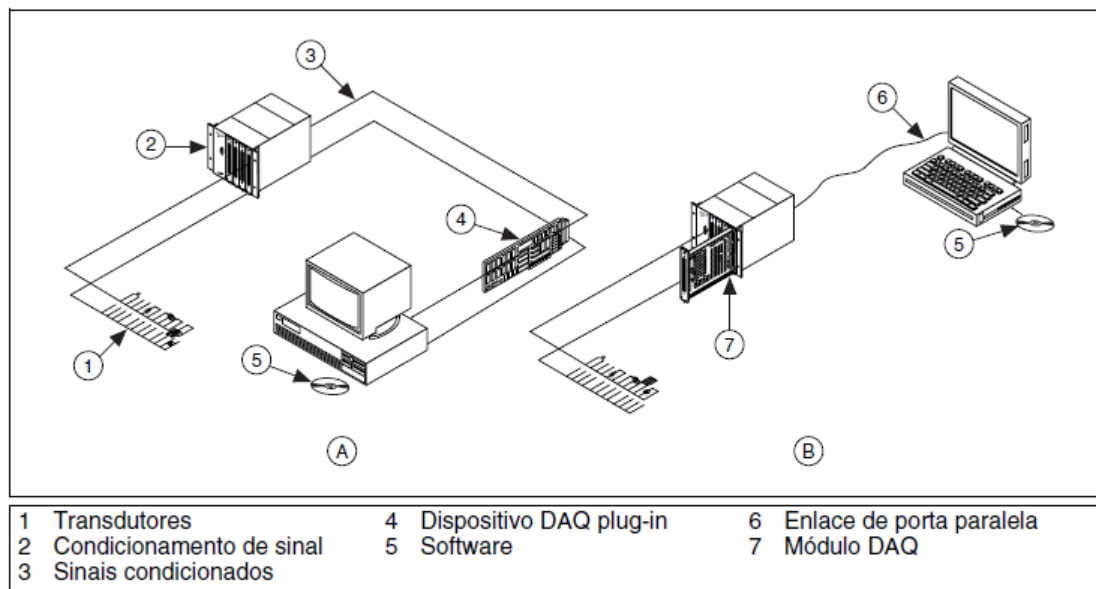


Figura 22: Dispositivos DAQ. Fonte: NI, Manual de treinamento do LabVIEW.

O computador e o dispositivo DAQ podem se comunicar através da porta paralela, porta serial, rede Ethernet e USB.

Para utilizar os dispositivos conectados ao computador no LabVIEW deve-se configurar e estabelecer os parâmetros de dispositivos. Esses parâmetros dependem do DAQ que está sendo utilizado e da grandeza que será medida.

Então acompanha o LabVIEW um utilitário de configuração, o *Measurement & Automation Explorer (MAX)* que é mostrado na Figura 23.

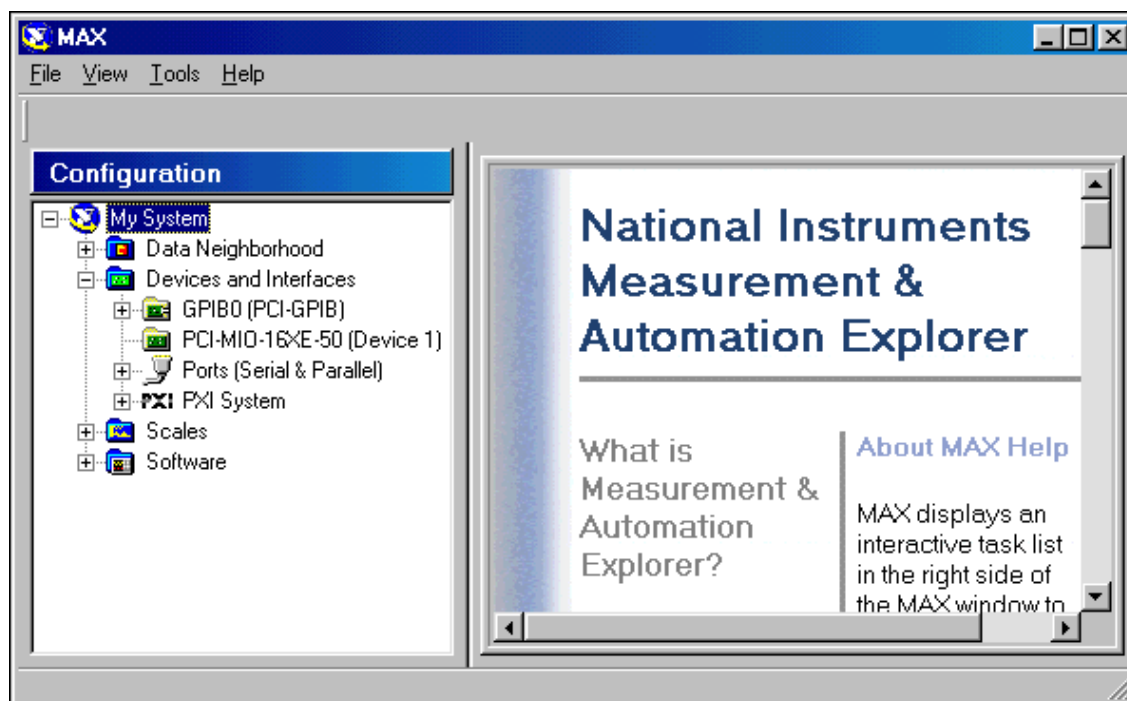


Figura 23: Janela principal do *Measurement & Automation Explorer*

O *Measurement & Automation Explorer* detecta também instrumentos que possuem interface GPIB (*General Purpose Interface Bus*).

GPIB é uma interface paralela de 8 bits muito utilizado em instrumentos de bancada, em que as medições são feitas manualmente. (*National Instruments - NI, 2001*)

2.4.1.1 CompactDAQ

Existem diversos dispositivos DAQ oferecidos pela *National Instruments* que podem ser utilizado com o LabVIEW, um deles é o CompactDAQ.

O CompactDAQ mostrado na Figura 24 é um sistema de aquisição de dados modular que pode ser utilizado tanto no campo como em bancadas de testes. O CompactDAQ é ligado ao computador por USB ou Ethernet dependendo do modelo de seu *rack* e pode suportar até oito módulos de entrada e saída.

Esse sistema foi escolhido para o projeto por causa da fácil integração com o LabVIEW sendo reconhecido assim que conectado no PC e por estar disponível na faculdade SENAI CIMATEC. A Figura 25 e a Figura 26 mostram, respectivamente, um rack que utiliza conexão USB vazio do CompactDAQ e seus módulos de entrada e saída (NI - CompactDAQ, 2010).



Figura 24: CompactDAQ. Fonte: *National Instruments site.*



Figura 25: Rack do CompactDAQ vazio. Fonte: *National Instruments site.*



Figura 26: Módulos de entrada e saída. Fonte: *National Instruments site.*

2.4.1.2 Modulo NI 9205

O módulo NI 9205 é um cartão de entrada analógica que pode ser usado com o CompactDAQ. Esse cartão possui as seguintes características:

- ◆ 32 (trinta e duas) entradas na configuração “terra comum” e 16 (dezesesseis) entradas na configuração “tensão diferencial”;
- ◆ Resolução de 16-bits;
- ◆ Taxa de amostragem de até 150KS/s (cento e cinqüenta mil amostras por segundo);
- ◆ Ranges de entrada programável de: +-200 mV, +-1 V, +-5 V, +-10 V;
- ◆ Proteção de até 30 V de sobretensão por canal;
- ◆ Conexão de entrada com borneira ou conector DB-37;
- ◆ Impedância de entrada (Canal – Terra) de 10GΩ.

A Figura 27 mostra a vista frontal do módulo com cada tipo de conector, a Figura 28 mostra o circuito de entrada do NI 9205, a Figura 29 mostra as conexões para a configuração “tensão diferencial” e a Figura 30 mostra as conexões para a configuração “terra comum” (NI – Módulo NI 9205, 2010).

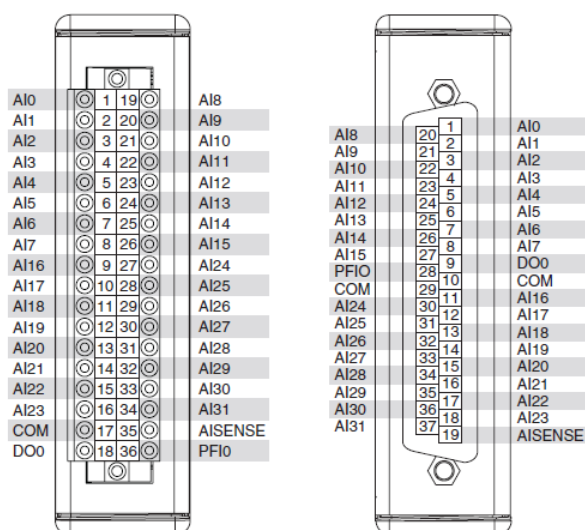


Figura 27: Vista Frontal NI 9205. Fonte: NI – Módulo NI 9205.

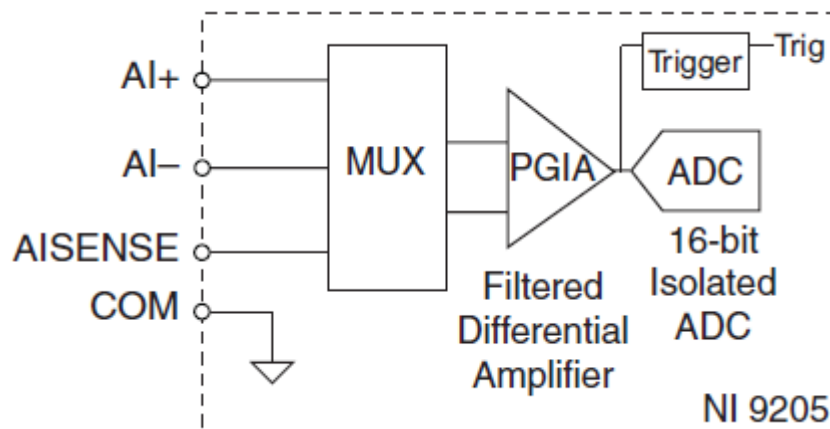


Figura 28: Circuito de Entrada NI 9205. Fonte: NI – Módulo NI 9205.

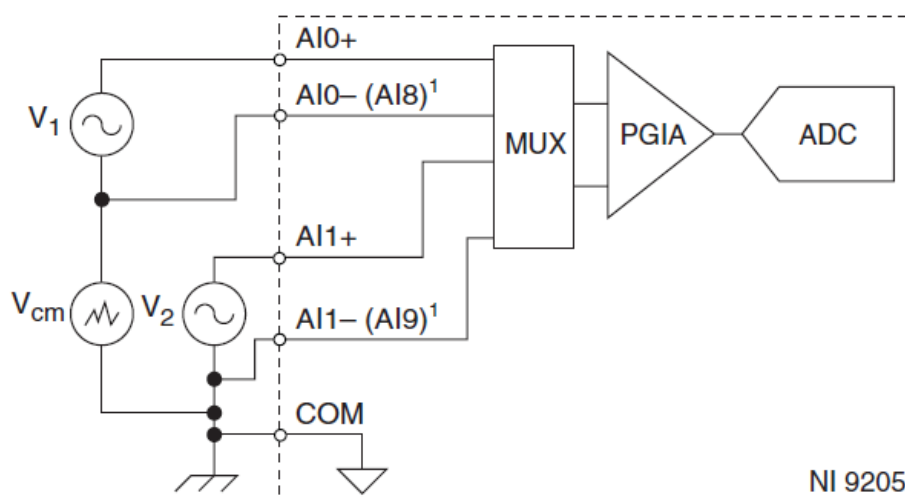


Figura 29: Configuração "Tensão Diferencial". Fonte: NI – Módulo NI 9205.

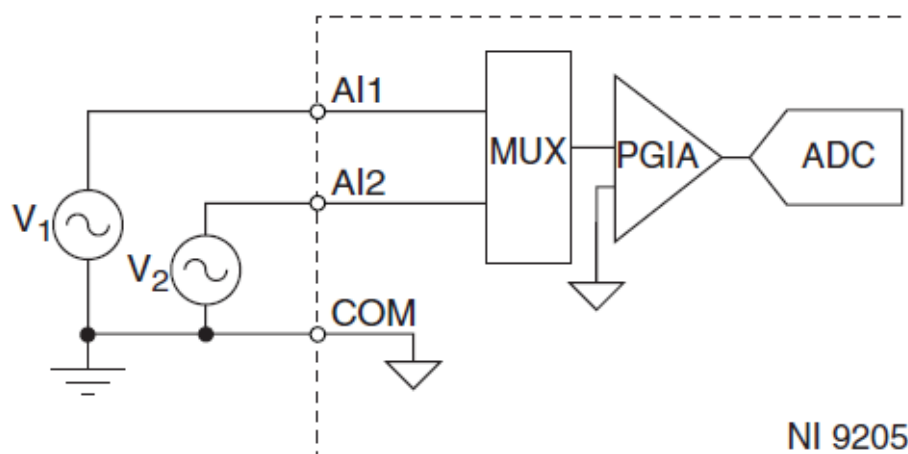


Figura 30: Configuração "Terra Comum". Fonte: NI – Módulo NI 9205.

3 BANCADA PARA ENSAIOS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Para a realização dos ensaios de resistência de enrolamento, a vazio e com rotor bloqueado foi idealizada uma bancada de testes composta por:

- ◆ Um computador com o software LabVIEW versão 2009 ou mais atual;
- ◆ CompactDAQ com saída USB;
- ◆ Cartão de entrada analógica NI 9205;
- ◆ Circuitos condicionadores de sinal.

3.1 APLICAÇÃO LABVIEW

A aplicação desenvolvida no LabVIEW é capaz de calcular os parâmetros do circuito equivalente de um motor de indução trifásico a partir dos ensaios de resistência do enrolamento, a vazio e com rotor bloqueado.

O programa segue um fluxo de navegação mostrado na Figura 31.

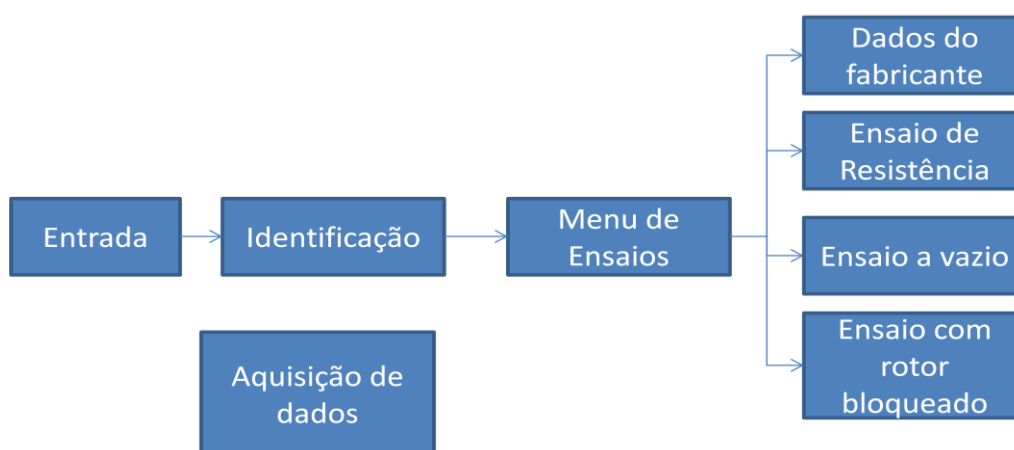


Figura 31: Fluxograma de Navegação

Cada bloco mostrado na Figura 31 é um VI criado em LabVIEW e tem uma função específica na aplicação.

O bloco “Aquisição de dados” que fica a parte da navegação é executado quando são feitas as medições de tensão e corrente referente a cada ensaio, nesse bloco também são calculadas as potências de entrada e o fator de potência.

Os blocos “Ensaio de Resistência”, “Ensaio a vazio” e “Ensaio com rotor bloqueado” mostram a teoria que envolve cada ensaio, chamam o bloco “Aquisição de dados” e realizam cálculos com os valores medidos, mostrando os parâmetros e as perdas que são encontradas em cada ensaio.

No bloco “Dados do fabricante” o usuário informa dados que são fornecidos pelo fabricante na placa do motor ou na folha de dados do motor.

O bloco “Menu de ensaios” permite a escolha de qual bloco de ensaios vai ser executado.

Os blocos “Entrada” e “Identificação” estão apenas para compor a navegação sendo que no segundo o usuário informa seu nome, que ira aparecer em todos os blocos.

A Figura 32 mostra o painel frontal do VI referente ao bloco “Entrada”, a Figura 33 mostra o painel frontal bloco “Identificação”, a Figura 34 mostra o painel frontal VI do bloco “Menu de Ensaios”, a Figura 35, Figura 36 e Figura 37 mostram o painel frontal do bloco “Ensaio a Vazio”. A Figura 38 e Figura 39 mostram o diagrama de blocos do “Aquisição de Dados”. Os diagramas de blocos dos outros VIs são mostrados no apêndices desse trabalho.



Figura 32: Tela de Entrada



Figura 33: Tela de Identificação

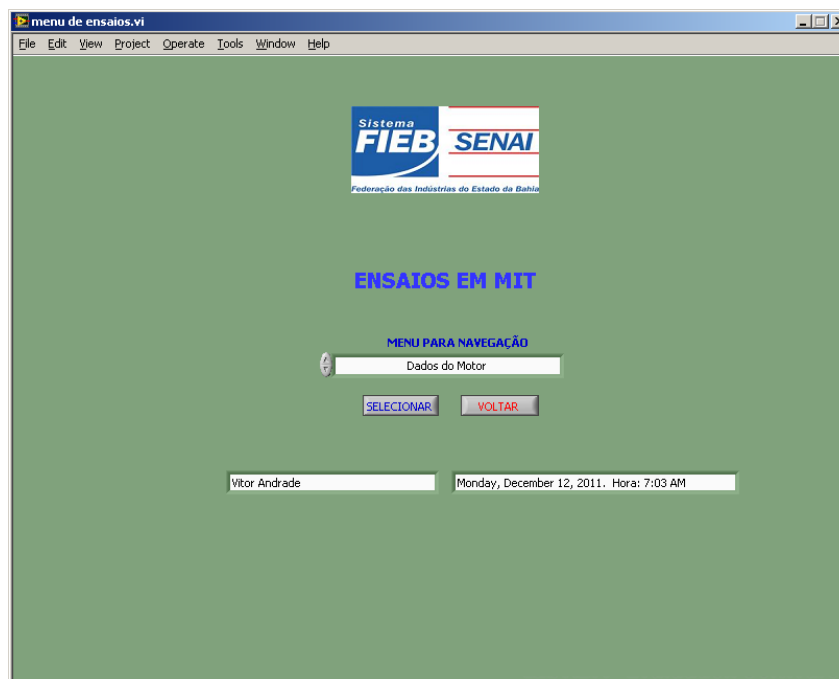


Figura 34: Tela Menu de Navegação

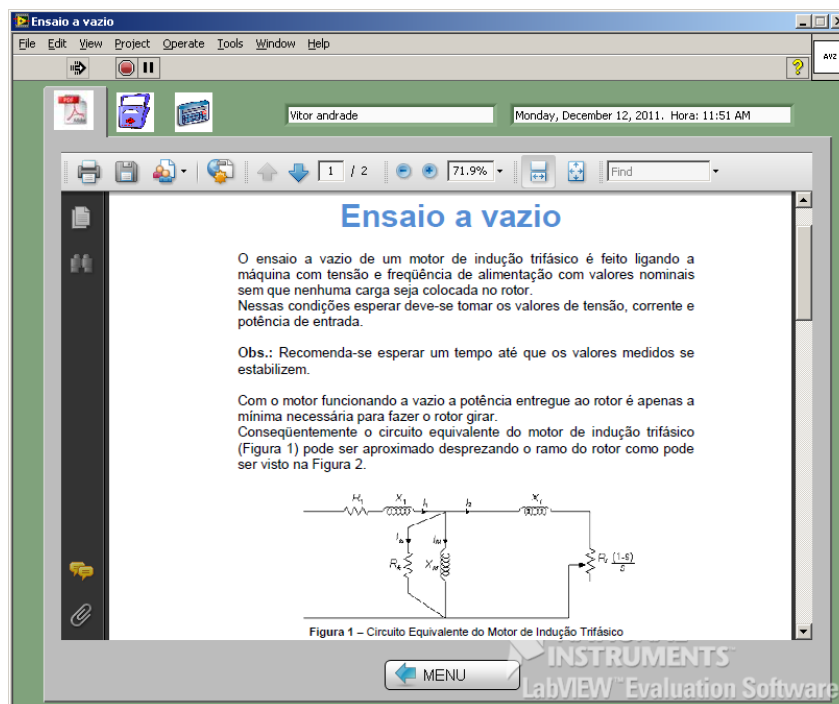


Figura 35: Painel Frontal Teoria do Ensaio a Vazio

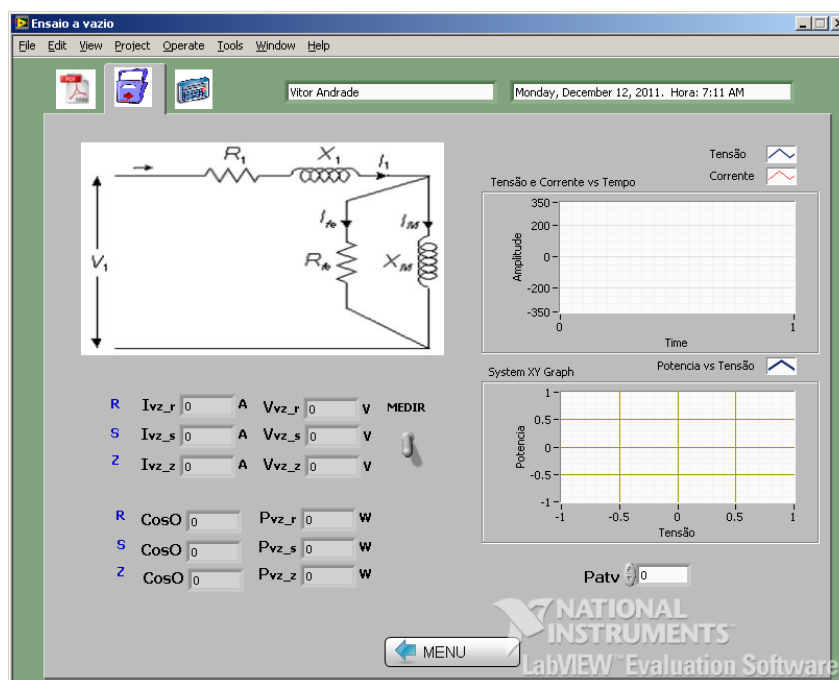


Figura 36: Painel Frontal Testes Ensaio a Vazio

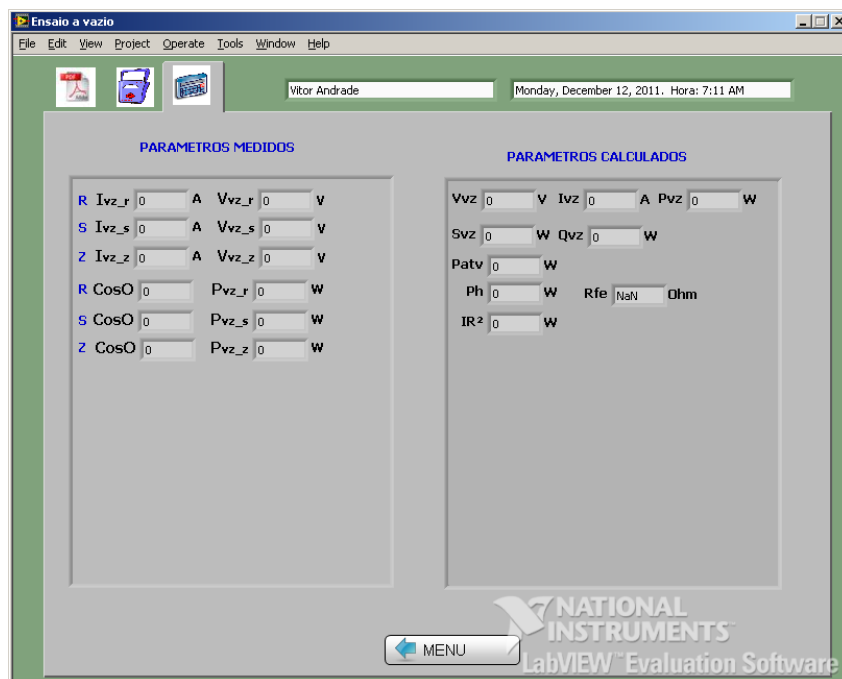


Figura 37: Painel Frontal de Parâmetros Ensaio a Vazio

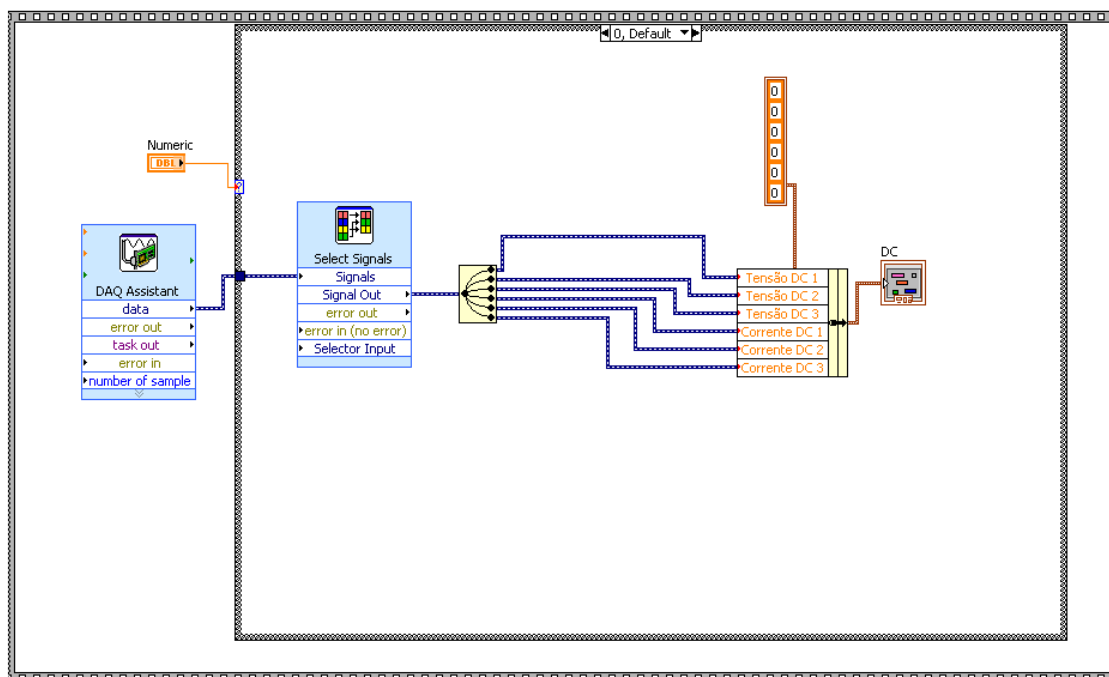


Figura 38: Diagrama de blocos "Aquisição de Dados" Medição CC

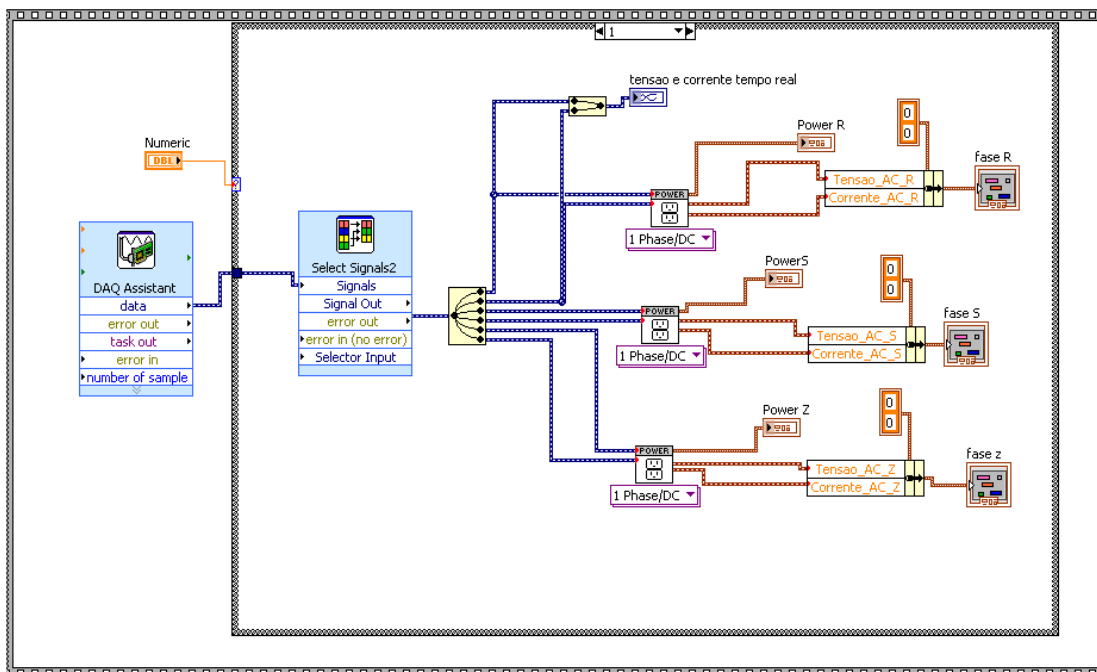


Figura 39: Diagrama de blocos "Aquisição de Dados" Medição CA

3.2 CIRCUITOS CONDICIONADORES DE SINAL

O circuito condicionador de sinal se faz necessário pois o cartão de entrada analógica NI 9205 só aceita entrada em tensão com range de no máximo -10V a +10V, sendo que para a realização dos ensaios deverão ser medidos valores altos de tensão e corrente.

Para a medição de correntes alternadas (ensaio a vazio e com rotor bloqueado) e contínuas (ensaio de resistência de enrolamento) será usado um sensor de efeito hall com as seguintes especificações.

- ◆ Entrada de corrente de 50A;
- ◆ Saída de tensão de 0V a 5V;
- ◆ Tensão de alimentação de 12V;
- ◆ Linearidade de até 2% do fundo de escala;
- ◆ Tensão de isolamento de 600V ou mais.

A saída do sensor hall em tensão ira acompanhar a variação da entrada em corrente reproduzindo assim sua forma de onda. Se a entrada for corrente CC a saída será um valor de tensão proporcional contínuo.

O sensor hall CYHCS-WLY da ChenYang Technologies atende aos requisitos.

Para a medição de tensão alternada (ensaios a vazio e com rotor bloqueado) será usado um transformador abaixador com entrada de no máximo 220 Vrms e saída de no máximo 6 Vrms limitando assim a bancada para motores de tensão nominal de até 220 Vrms.

3.3 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA BANCADA DE TESTES

Para a realização das medições de tensão e corrente nos ensaios a vazio e com rotor bloqueado devem-se fazer as ligações de acordo com a Figura 40 para ensaio a vazio e Figura 41 para rotor bloqueado. Essas figuras mostram um motor ligado em estrela e as conexões entre os circuitos condicionadores e a fonte do motor. No ensaio com rotor bloqueado deve-se utilizar um regulador de tensão para que possa variar de forma crescente a tensão de alimentação até a corrente medida chegar ao valor nominal.

Como os circuitos estão medindo a tensão de fase, quando houver a necessidade de usar a tensão de linha para efetuar cálculos deve-se fazer a transformação através da multiplicação do valor medido por raiz de três.

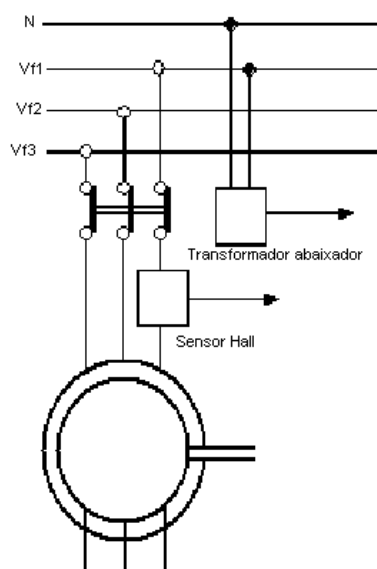


Figura 40: Circuito de Medição para ensaio a vazio

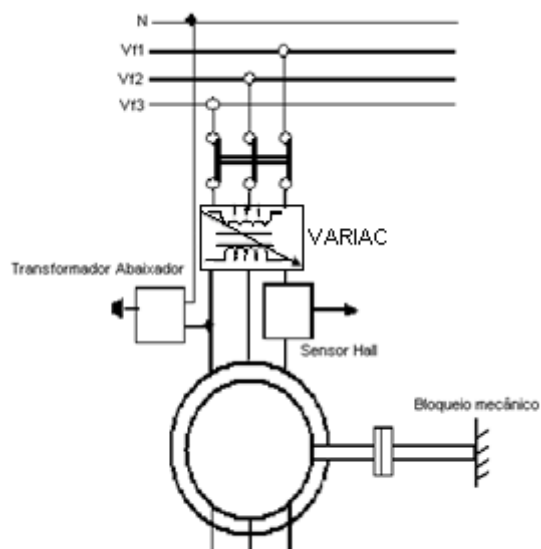


Figura 41: Circuito de Medição para ensaio com rotor bloqueado

As saídas dos circuitos condicionadores são ligadas no módulo NI 9205 que está em um CompactDAQ ligado ao computador pela porta USB, como mostra a Figura 42.

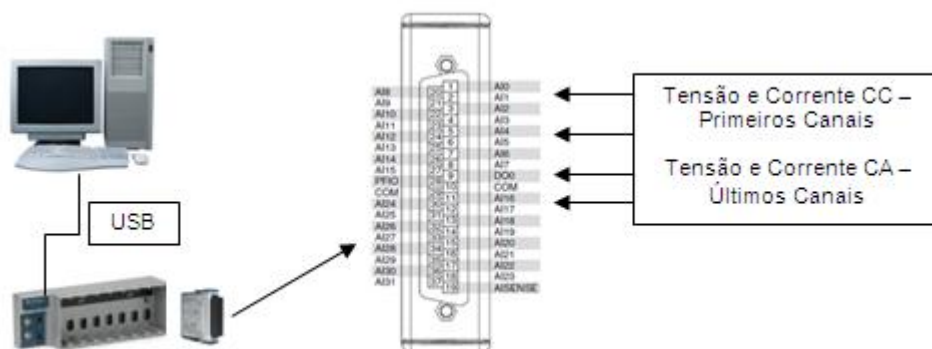


Figura 42: Conexões da bancada

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A validação da bancada de testes foi obtida de através de duas etapas, a primeira foi a validação do algoritmo executado pela aplicação através de valores de simulação e a segunda foi a validação da aquisição de dados.

Um teste completo e integrado que seria a realização de todos os ensaios como descrito não pode ser executado pois houve dificuldade de ter em um só local todos os equipamentos que envolve a bancada.

Porém foi feita uma simulação do teste de Resistência de Enrolamento usando valores de tensão de uma fonte CC.

4.1 VALIDAÇÃO DA APLICAÇÃO

A validação da aplicação desenvolvida em Labview foi feita através de funções de simulação que o software oferece.

Os valores de tensão e corrente CC foram fixados em 8V e 20A respectivamente.

O valor de tensão CA para o ensaio a vazio foi fixado em 220Vrms, 60Hz e ângulo de fase igual a 0° . E o valor de corrente CA a vazio foi 2Arms, 60Hz e ângulo de -5° .

O valor de tensão CA para o ensaio com rotor bloqueado foi fixado em 100Vrms, 60Hz e ângulo de fase igual a 0° . E o valor de corrente CA a vazio foi 5Arms, 60Hz e ângulo de -5° .

O valor da perda mecânica do motor não pode ser obtido nessas condições visto que seria necessária a aquisição de diversos valores de tensão em função da potência quando o motor estiver funcionando a vazio. Então ele foi fixado em 5 Watts.

Foi definido também que a classe de fabricação definida pela NEMA MG-1-2003 seria classe A.

Com esses valores acima a aplicação calculou os parâmetros do circuito encontrando os valores mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de simulação do motor

Parâmetros do motor – Simulação	
Potência ativa de Entrada a vazio	1314.98 Watts
Potência com rotor bloqueado	1494.29 Watts
Perdas no núcleo	1305.18 Watts
Perdas no estator	4.8 Watts
X_1	0.87155 Ohm
X_2	0.87155 Ohm
R_1	0.4 Ohms
R_2	19.5239 Ohm
R_c	111.249 Ohm
X_m	1388.32 Ohm

Os valores usados nesse teste não seguem um padrão. Esse teste foi realizado para validar os cálculos. A Tabela 1 mostra que o programa é capaz de calcular os valores dos parâmetros.

4.2 VALIDAÇÃO DA AQUISIÇÃO DE DADOS

Nessa etapa foi testado o cartão de entrada analógica NI 9205 através da aquisição de valores de tensão CC e CA utilizando o *Measurement & Automation Explorer* e o LabVIEW.

Os valores medidos foram comparados com um multímetro TENMA 72-7745 e um osciloscópio TEKTRONIX TDS 1001B, a especificação técnica de cada um se encontra no ANEXO A – Folha de dados do Multímetro TENMA e ANEXO B – Folha de dados do osciloscópio TEKATRONIX TDS 1001B.

4.2.1 Teste de tensão contínua

Esse teste foi realizado fazendo a medição de valores de tensão na faixa de 0V (zero volts) até 10V (dez volts) variando de um em um volts. Para cada valor medido no *Measurement & Automation Explorer* foi feito a medição no multímetro e no osciloscópio chegando aos valores mostrados na Tabela 2:

Tabela 2: Medição de tensão CC

Medição de Tensão CC				
Osciloscópio	Multímetro	Measurement & Automation Explorer	Erro osciloscópio	Erro multímetro
1 V	0.99 V	0.99 V	-0.01 V	0 V
2 V	1.96 V	1.97 V	-0.03 V	+0.01 V
3 V	2.96 V	2.97 V	-0.03 V	+0.01 V
4 V	4.02 V	4.02 V	+0.02 V	0 V
5 V	5.02 V	5.01 V	+0.01 V	-0.01 V
6 V	6.02 V	6.01 V	+0.01 V	-0.01 V
7 V	6.96 V	6.96 V	-0.04 V	0 V
8 V	7.94 V	7.93 V	-0.07 V	-0.01 V
9 V	8.96 V	8.96 V	-0.04 V	0 V
10 V	10.04 V	10 V	0 V	-0.04 V

A Figura 43 e a Figura 44 mostram exemplos de valores medidos no *Measurement & Automation Explorer* e no osciloscópio.

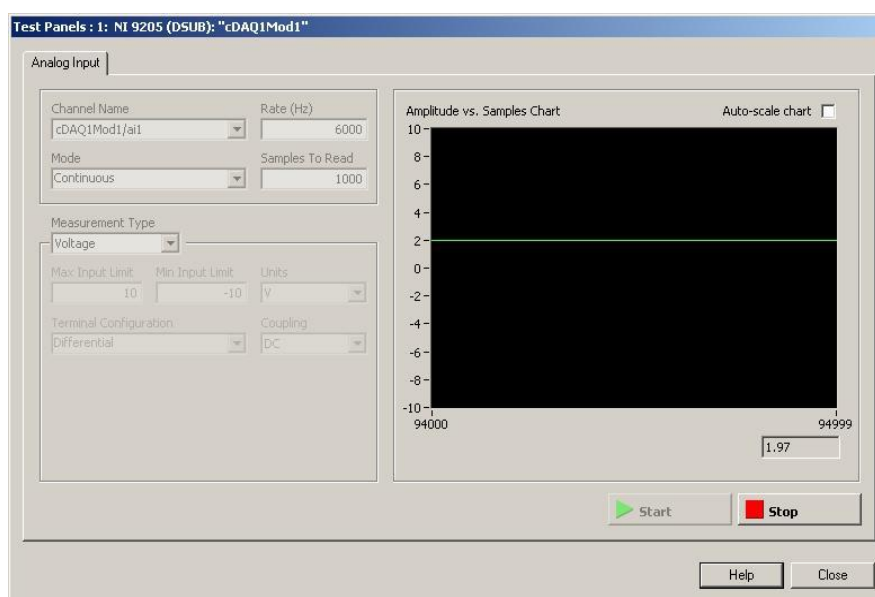


Figura 43: Medição de 2 Volts MAX

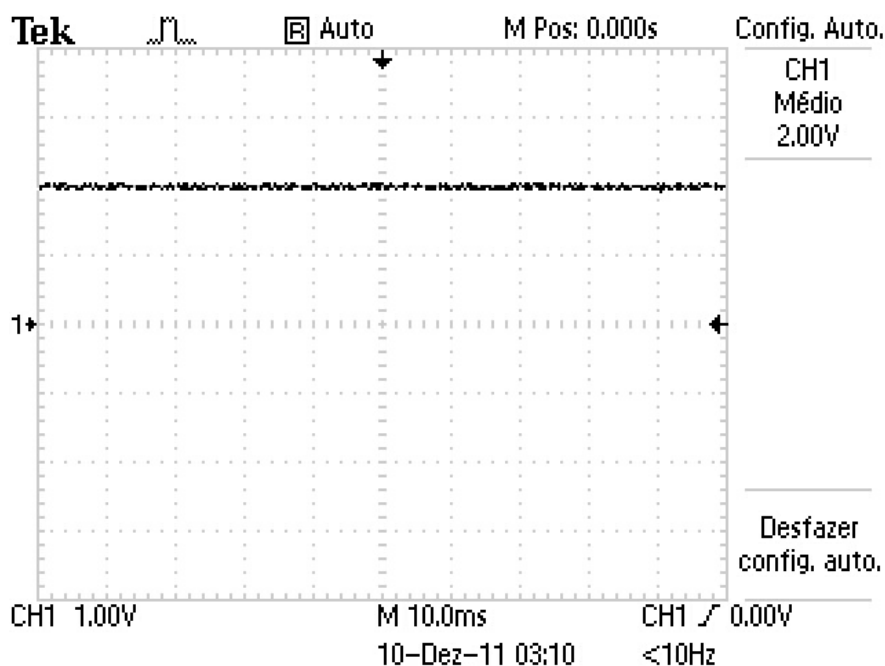


Figura 44: Medição de 2 V Osciloscópio

4.2.2 Teste de tensão alternada

O teste de tensão alternada foi feito através da medição da tensão na saída do transformador do circuito condicionador no LabVIEW e comparando sua forma de onda com o osciloscópio. Foram comparados também os valores RMS, máximos e mínimos. Sendo que o valor RMS também foi medido com o multímetro.

A Tabela 3 mostra os valores medidos na entrada do transformador, quando na faixa de 220V só foi medido no multímetro visto que o osciloscópio usado não tinha uma ponta de prova que pudesse medir tensão nessa faixa.

Tabela 3: Medição de Tensão AC - Entrada do Transformador

ENTRADA DO TRANSFORMADOR (Valores em RMS)	
Osciloscópio	Multímetro
-	221.1 V
124 V	122.4 V

A Tabela 4 mostra os valores RMS medidos na saída do transformador pelo osciloscópio, multímetro e LabVIEW. Para a medição no LabVIEW foi feito uma aplicação com lógica similar ao bloco “Aquisição de dados” descrito no tópico 3.1 deste trabalho.

Tabela 4: Medição de Tensão AC - Saída RMS do Transformador

Medição de Tensão AC – RMS				
Osciloscópio	Multímetro	LabVIEW	Erro osciloscópio	Erro multímetro
3.34 V	3.29 V	3.30 V	- 0.04 V	+ 0.01 V
6.01 V	6.0 V	5.96 V	- 0.05 V	- 0.04 V

A Tabela 5 mostra os valores de tensão mínima e a Tabela 6 mostra os valores de tensão máxima medidos na saída do transformador pelo osciloscópio e LabVIEW.

Tabela 5: Medição de Tensão AC - Saída Transformador Tensão Mínima

Medição de Tensão AC – Mínimo		
Osciloscópio	LabVIEW	Erro osciloscópio
-4.72 V	-4.63 V	+ 0.09 V
- 8.40 V	-8.40 V	0 V

Tabela 6: Medição de Tensão AC - Saída Transformador Tensão Máxima

Medição de Tensão AC – Máxima		
Osciloscópio	LabVIEW	Erro osciloscópio
4.72 V	4.63 V	- 0.09 V
8.40 V	8.40 V	0 V

A Figura 45 mostra a forma de onda medida no osciloscópio quando a saída do transformador esta em 3(três) Volts e a Figura 46 e a Figura 47 mostram a mesma medição agora feita pelo LabVIEW e pelo *Measurement & Automation Explorer*.

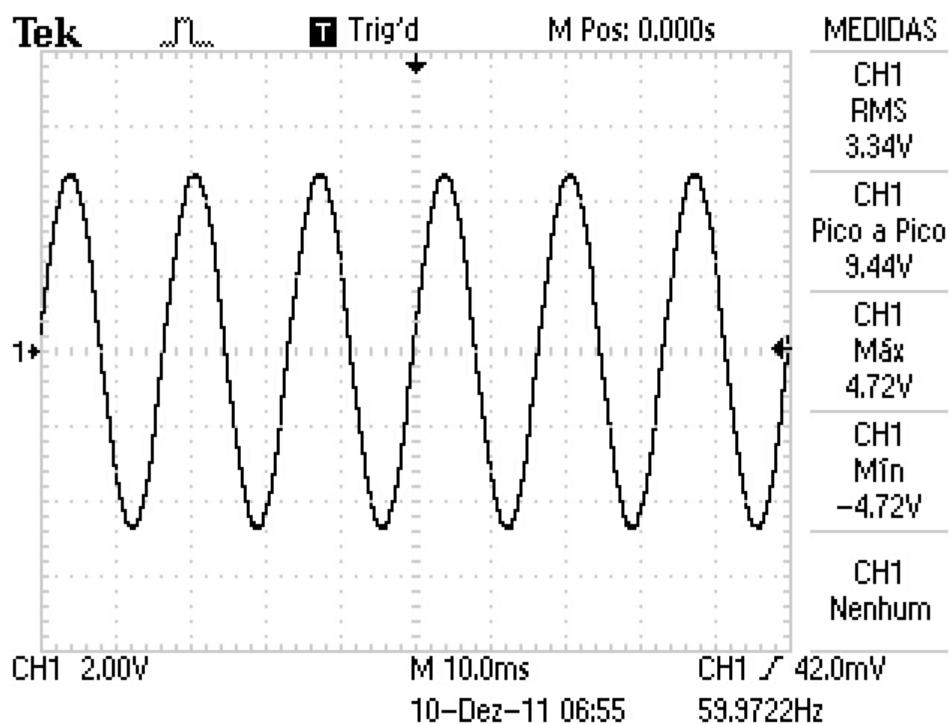


Figura 45: Forma de onda 3Vrms medida pelo Osciloscópio

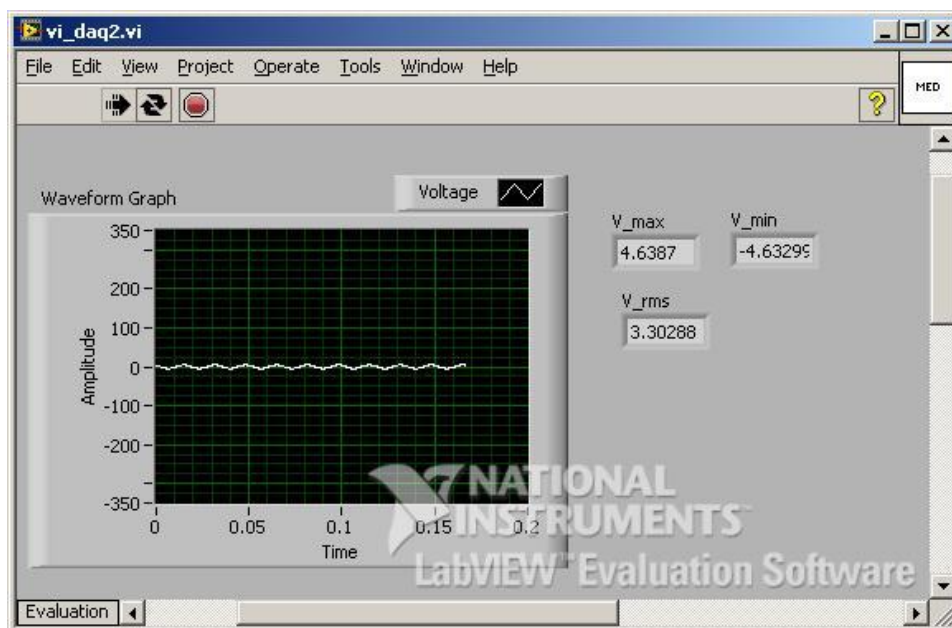


Figura 46: Forma de onda 3Vrms medida pelo LabVIEW

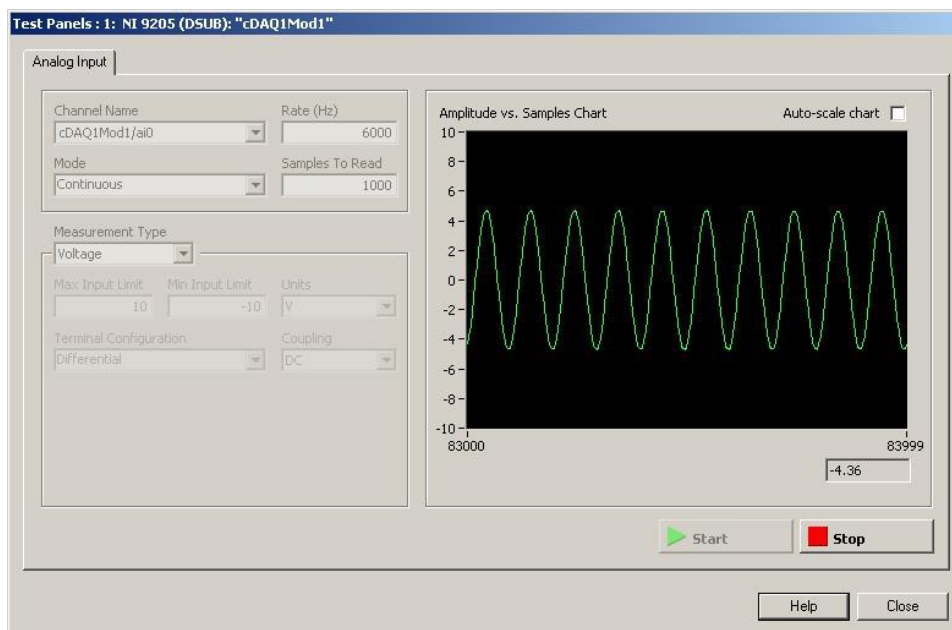


Figura 47: Forma de Onda 3Vrms *Measurement & Automation Explorer*

4.2.2.1 Correção da tensão CA medida

Para a medição do valor real de tensão CA de fase que irá alimentar o motor no LabVIEW deveria ser feita uma multiplicação para compensar a tensão abaixada no transformador.

O valor da constante de multiplicação foi estimado através das medições na entrada e na saída do transformador pelo multímetro e pelo osciloscópio.

A Tabela 7 mostra a relação medida em cada instrumento.

Tabela 7: Cálculo do fator de correção de tensão

Fator de correção			
	Tensão de Entrada	Tensão de saída	Fator
Osciloscópio	124 V	3.34 V	37.1257
Multímetro	122.4 V	3.29 V	37.2036

O valor usado foi uma média entre os dois fatores mostrados na Tabela 7 que ficou igual a 37.1646.

4.2.3 Simulação do ensaio de resistência de enrolamento do rotor

Para a realização do ensaio de resistência é necessário fazer a medição da tensão e da corrente contínua que é aplicada nos enrolamentos do estator do motor e efetuar a divisão desses valores medidos.

Para testar o VI que é responsável pelo teste de resistência foi simulado esses valores de tensão e corrente através de duas fontes de tensão contínua.

O valor da tensão no enrolamento seria o próprio valor da fonte e o valor da corrente seria o valor da fonte multiplicado por dez.

Essa escala realizada no valor da corrente foi utilizada para simular um sensor de efeito hall genérico que tem como saída uma tensão dez vezes menor que o valor de corrente medido. Assim uma corrente de cinquenta Amperes iria produzir uma saída de cinco volts, se a entrada for vinte Amperes a saída seria de dois volts.

A Tabela 8 mostra os valores medidos comparando com a medição do osciloscópio.

Tabela 8: Ensaio de Resistência de Enrolamento

Resistência de Enrolamento				
	Tensão do enrolamento	Corrente do Enrolamento	Resistência de enrolamento	Erro
LabVIEW	7.91 V	2.56 V - 26.56 A	0.2980 Ohms	+0.0017 Ohms
Osciloscópio	8 V	2.7V - 27 A	0.2963 Ohms	

A Figura 48 mostra o painel frontal do VI que faz o ensaio de resistência de enrolamento.

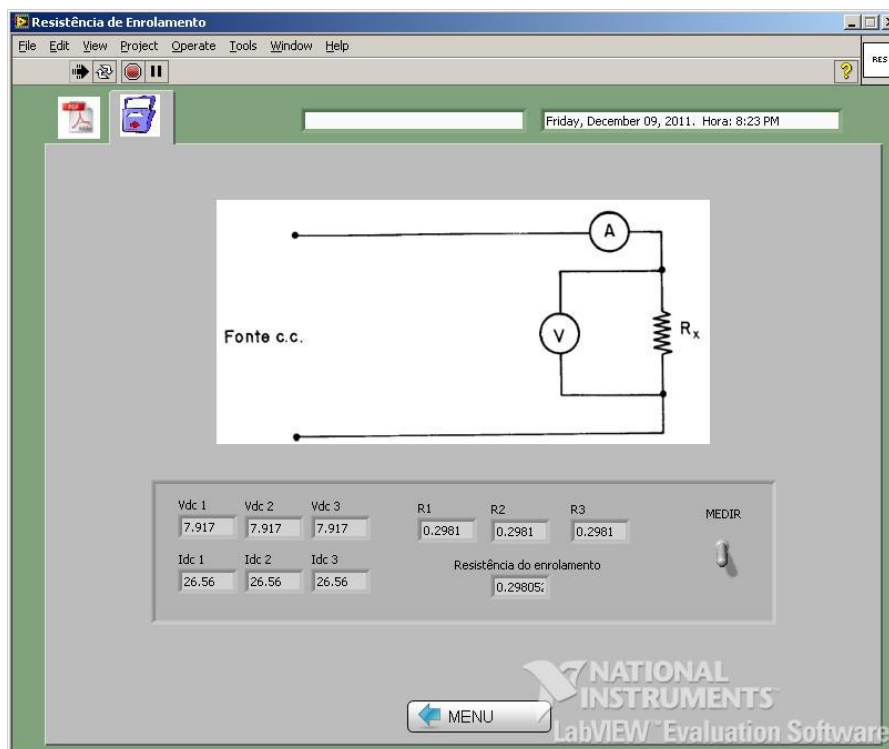


Figura 48: Painel Frontal do VI de teste de enrolamento

4.3 DISCURSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A validação da aplicação através da execução do programa utilizando valores de simulação mostra que o algoritmo desenvolvido atende o que foi previsto, de forma que ele executa os cálculos descritos no tópico 2.3 deste trabalho seguindo uma ordem definida.

Os testes efetuados para a validação do sistema de aquisição de dados mostram que o sistema atende bem, pois sempre adquiriu valores próximos com os medidos pelos instrumentos definidos aqui como padrão.

Analisando a Tabela 2, que mostra as medições de tensão contínua, comparando com o multímetro o sistema proposto teve o maior erro para a medição de dez volts. Nesse caso o erro medido foi de -0.04V, e com os outros valores de tensão contínua o erro máximo obtido foi de +-0.01V. Uma das possíveis causas do erro ter sido maior para 10V seria que o cartão NI 9205 não tem capacidade para medir valores de tensão maior que dez volts. Assim deve-se evitar trabalhar próximo desse valor.

Ainda analisando a Tabela 2, mas comparando com o osciloscópio, observa-se que o maior erro medido foi de $-0.07V$, porém os erros mais comuns foram de no máximo $+0.04V$.

Na medição de tensões alternadas o sistema se distanciou um pouco mais do padrão obtendo o maior erro quando comparado com o osciloscópio, $-0.05V$ de erro na medida de valores RMS e $+0.09$ de erro na medida de valores máximos e mínimos.

Um ponto positivo na medição do sistema principalmente para tensões alternadas foi a representação gráfica da medição, a forma de onda reproduzida está próxima da que foi mostrada no osciloscópio.

A aquisição de dados seria mais precisa se houvesse maior cuidado com o ambiente de teste e através da implementação de técnicas que diminuem o ruído na medição.

4.4 DIFICULDADES ENCONTRADAS

A falta de um espaço onde pudesse alocar todos os equipamentos para a realização de um teste que integrasse tudo que foi estudado foi um dos maiores empecilhos para que o trabalho fosse validado da melhor forma, porém os testes realizados a parte mostram que a bancada proposta está bem próxima do que se espera.

Outra dificuldade foi na programação do LabVIEW que apesar de ser intuitiva é bastante diferente da programação em texto. Entender como ocorre o fluxo de dados no LabVIEW e os problemas que surgem quando é realizado uma aquisição de dados acabou por atrasar o cronograma.

5 CONCLUSÃO

Com o termino desse trabalho pode-se concluir que é possível montar uma bancada de testes em motores de indução trifásicos utilizando a instrumentação virtual e que com essa bancada quem for executar os ensaios não terá que realizar anotações e os cálculos seriam efetuados de forma automática pelo computador.

Se os ensaios forem realizados de forma didática, apenas para a demonstração para alunos, essa bancada pode ser formada pelos equipamentos e pela aplicação aqui descritos.

Porém se houver necessidade de maior precisão, outras grandezas devem ser levadas em conta. Assim seria necessário a utilização de mais sensores, o que aumenta o número de cartões a serem usados no CompactDAQ, e fazendo necessária a modificação do programa proposto.

Com isso pode-se concluir também que o trabalho desenvolvido atende a pelo menos uma das demandas previstas que é a utilização da bancada por instituições de ensino.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5383-1, Máquinas elétricas girantes – Parte 1: Motores de Indução Trifásicos – Ensaios**, 2002.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17094-1, Máquinas elétricas girantes – Parte 1: Motores de Indução Trifásicos – Especificação**, 2008.

Del Toro, Vicente, **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro – RJ, Brasil: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1994.

Fitzgerald, A. E., **Máquinas Elétricas**. Nova York – NY: MacGraw-Hill Inc, Sexta Edição, 2006.

IEEE - *Institute of Electrical and Electronic Engineers*. **IEEE Std 112 – 2004, Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**, 2004.

Kosow, Irving L., **Máquinas Elétricas e Transformadores**. São Paulo – SP, Brasil: Editora Globo S.A., 14. Ed., 2000.

National Instruments, **Manual de treinamento do LabVIEW Básico I**, *National Instruments Corporation*, 2001.

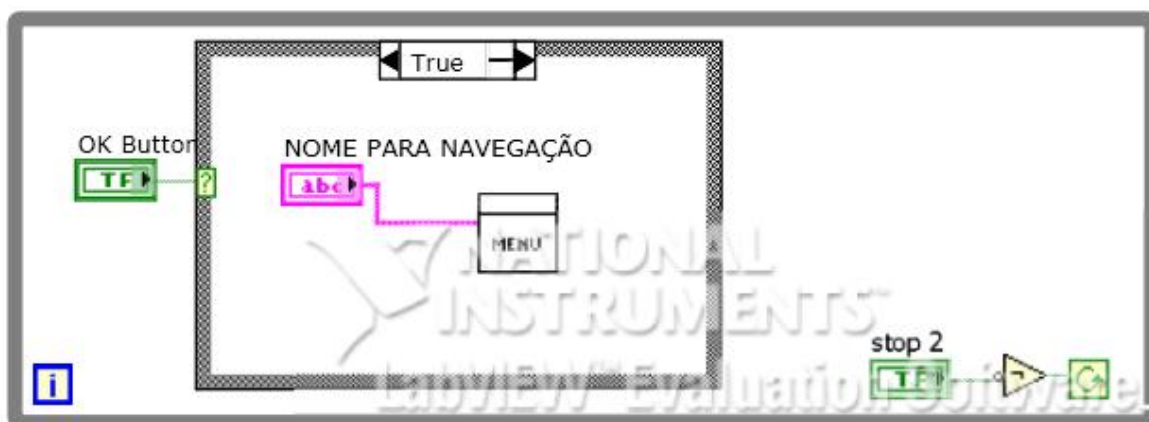
National Instruments, “**What Is NI CompactDAQ?**”. Disponível em www.ni.com. Acesso em: Dezembro de 2010.

National Instruments, **NI 9205 Operating Instructions and Specifications**, 2008. Disponível em www.ni.com. Acesso em: Setembro de 2011.

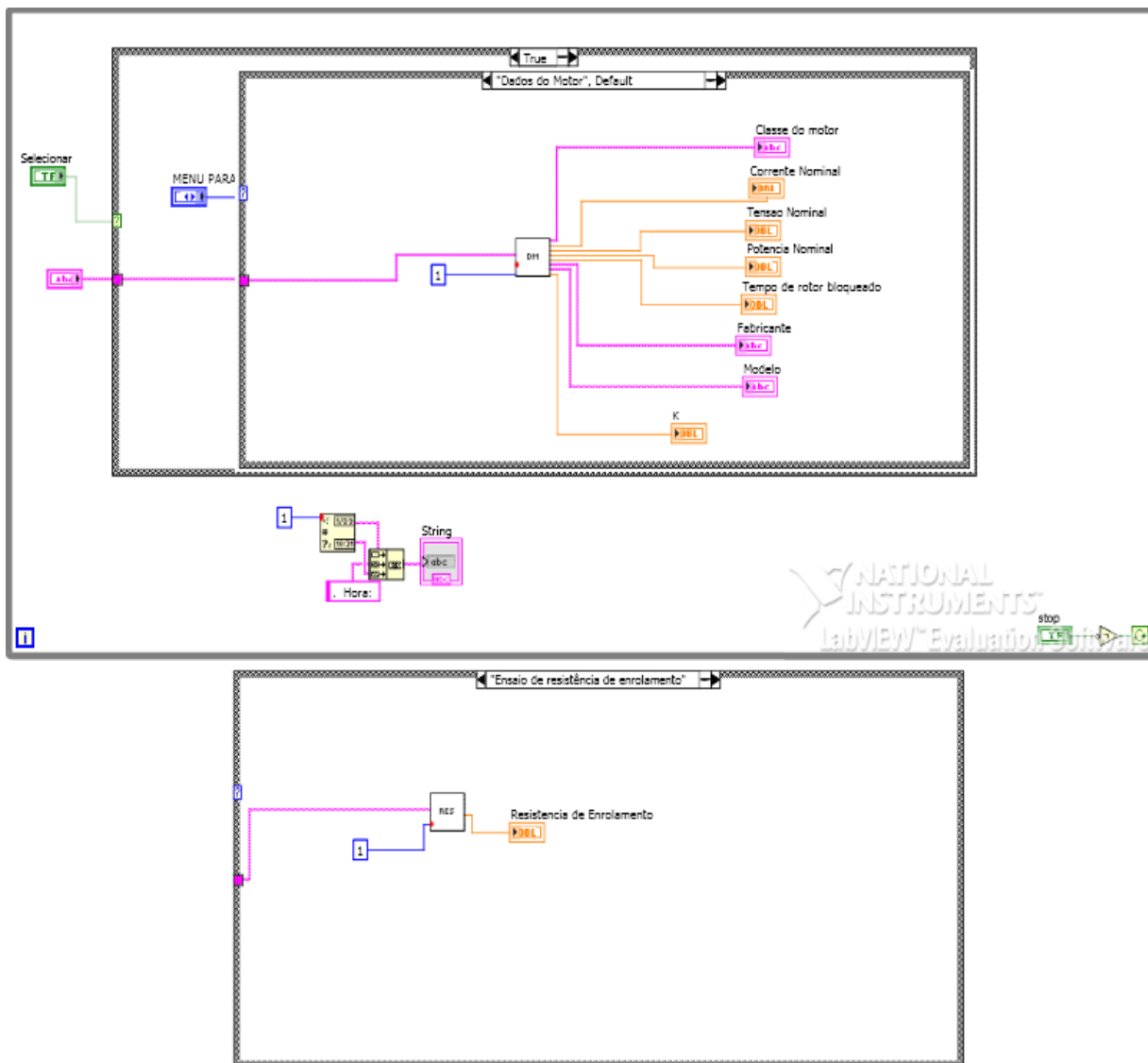
SIEMENS, **STEP Series Courses: Basis of AC Motors**, Siemens Industry Inc. Disponível em: <http://sea.siemens.com/step/flash/STEPACMotors/index.htm>. Acesso em: Agosto de 2011.

WEG, **Motores Elétricos - Baixa Tensão (Mercado Brasil)**, WEG Equipamentos Elétricos S/A - Motores, Jaraguá do Sul - SC, Brasil, 2009. Disponível em: <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Geral/Central-de-Downloads>. Acesso em: Agosto de 2011.

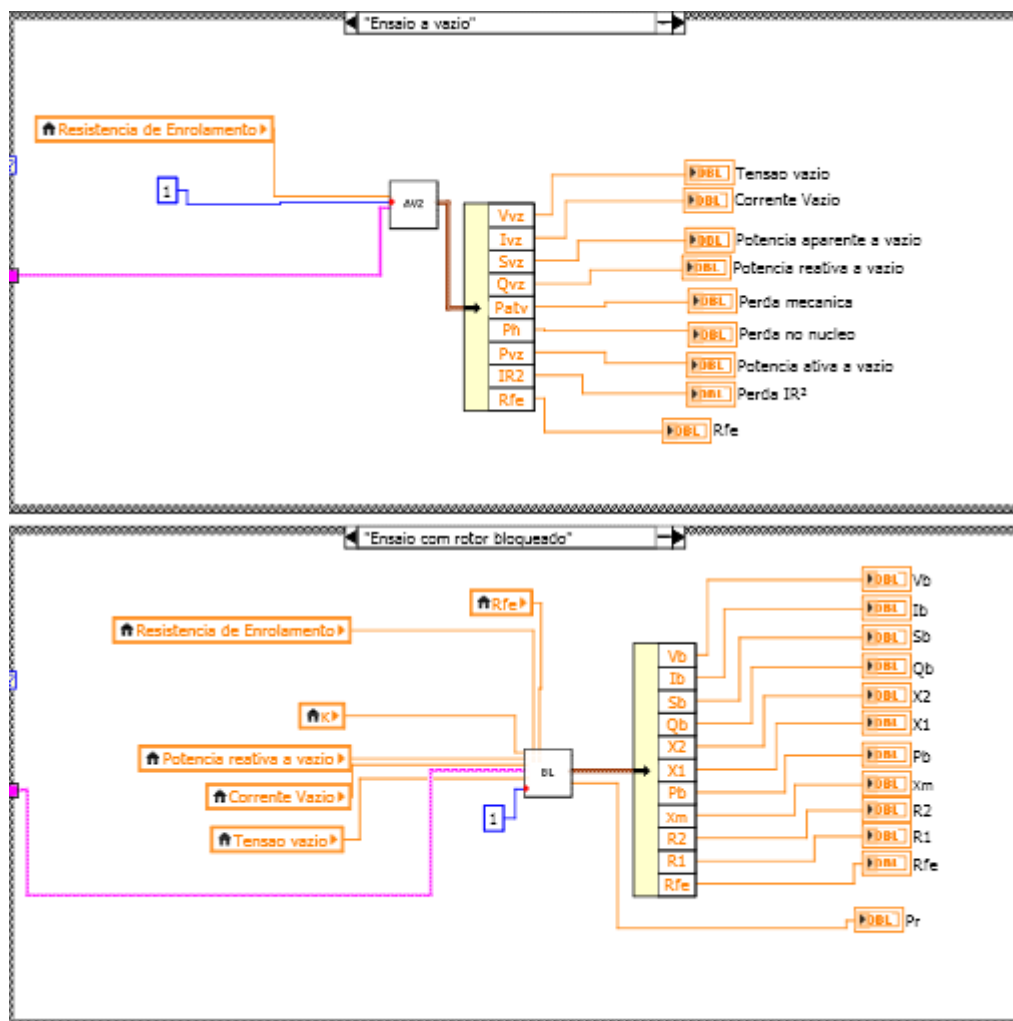
APÊNDICE A – Diagrama de blocos: PaginaInicial.vi



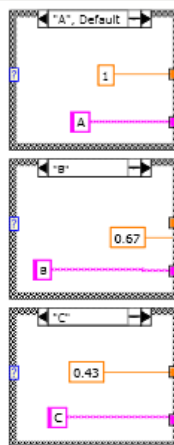
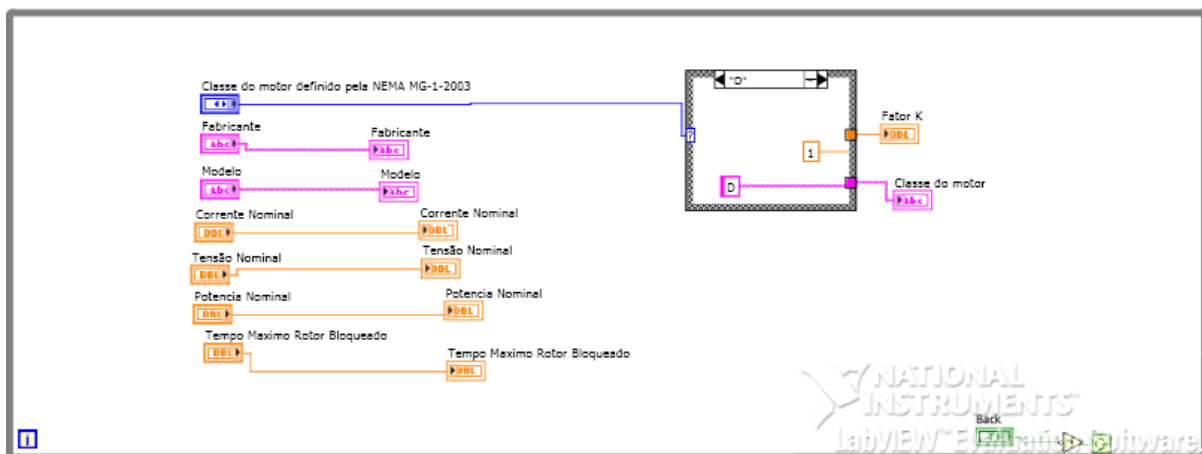
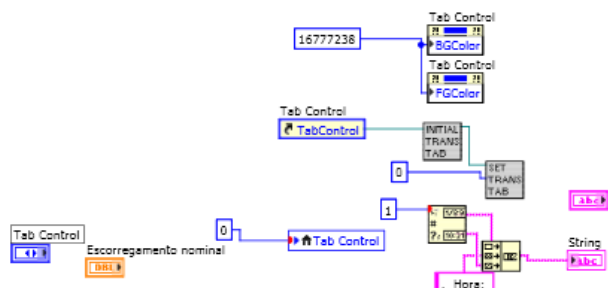
APÊNDICE B – Diagrama de blocos: Menudeensaio.vi



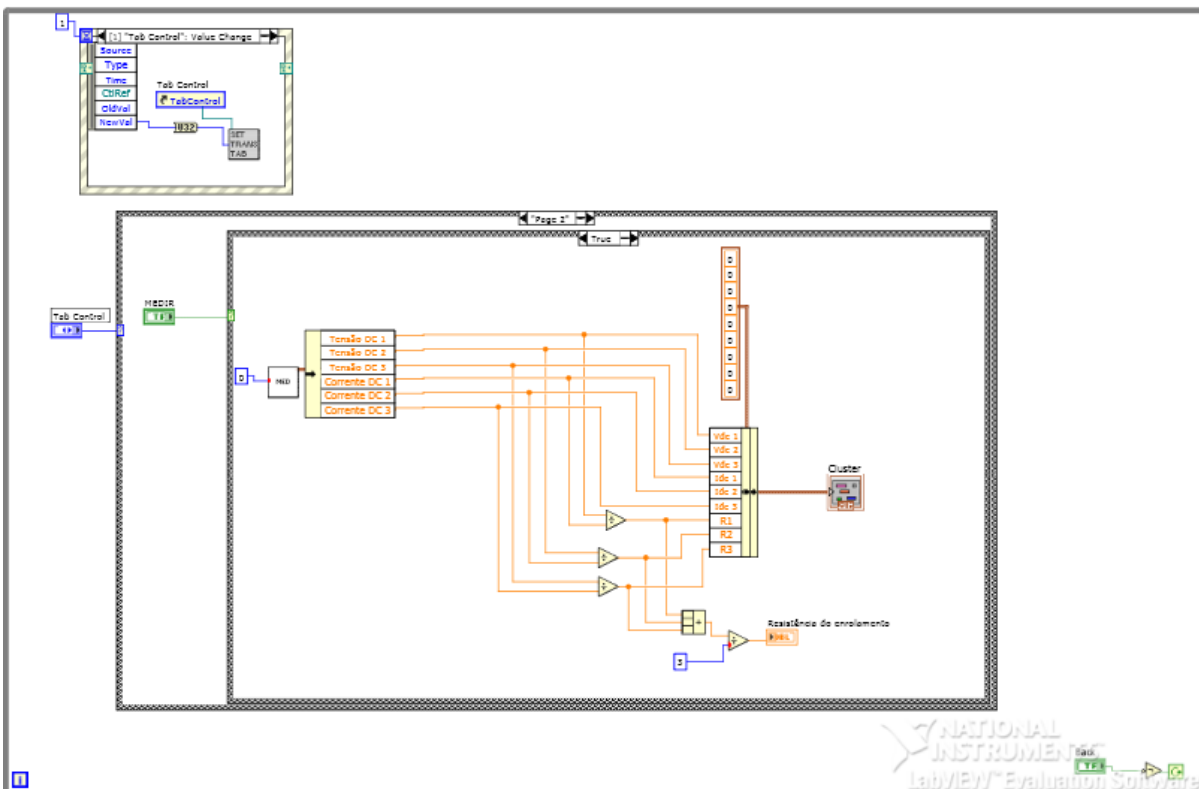
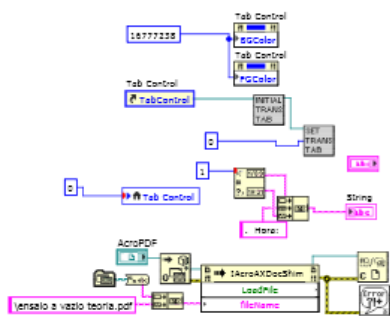
APÊNDICE B (continuação) – Diagrama de blocos: Menudeensaivos.vi



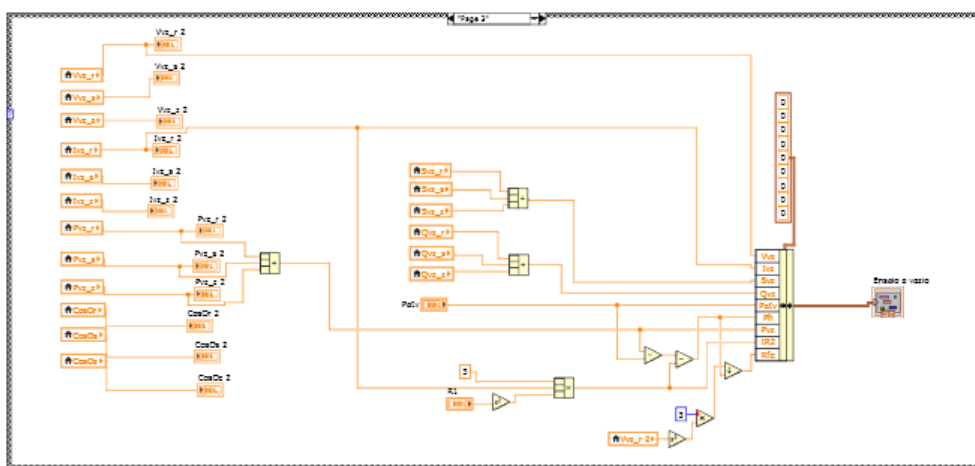
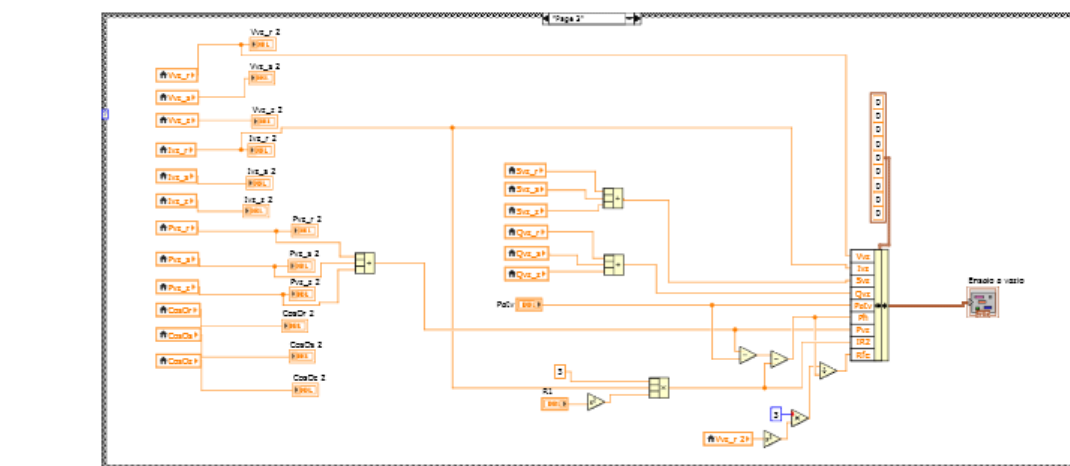
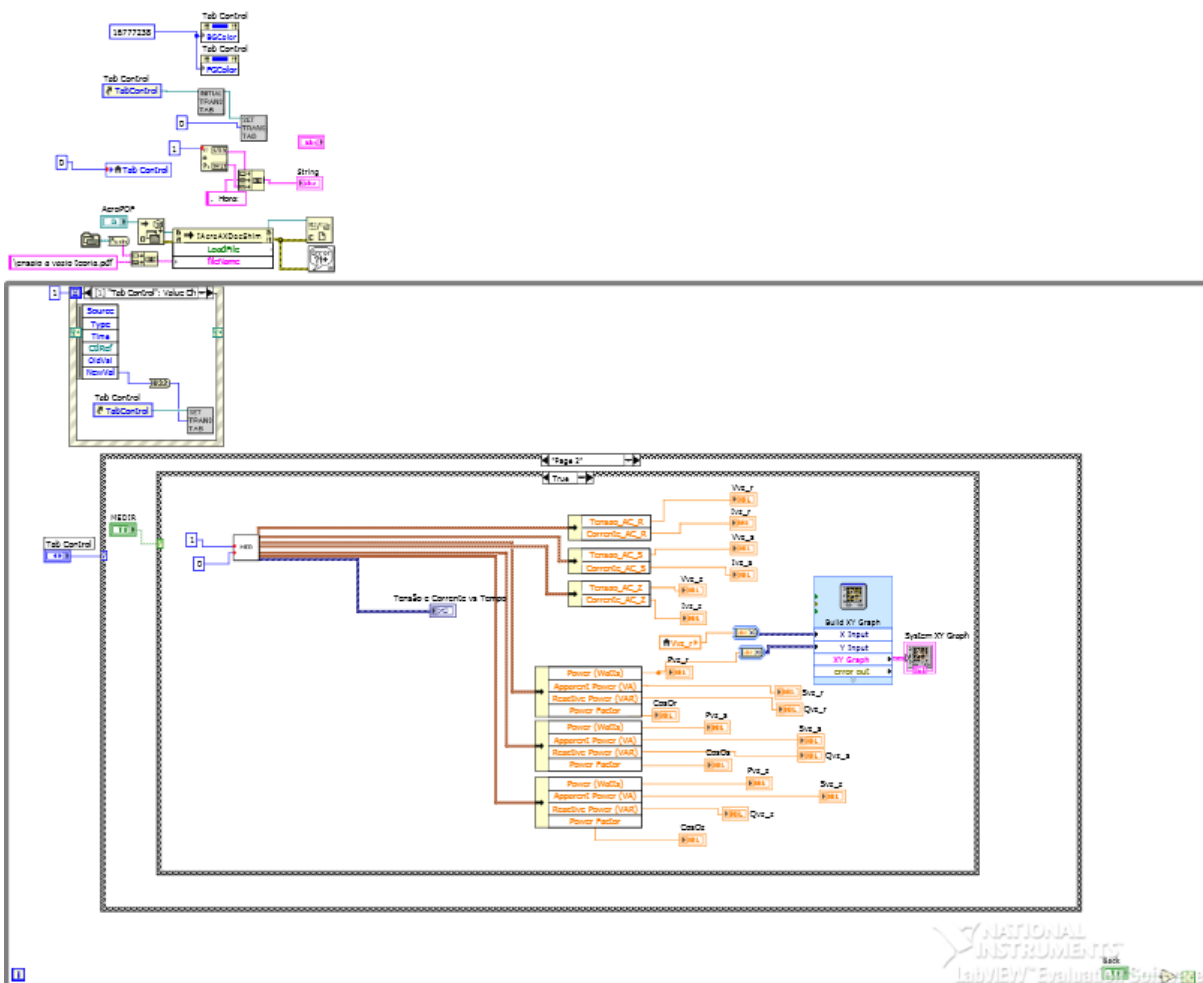
APÊNDICE C – Diagrama de blocos: Dadosdofabricante.vi



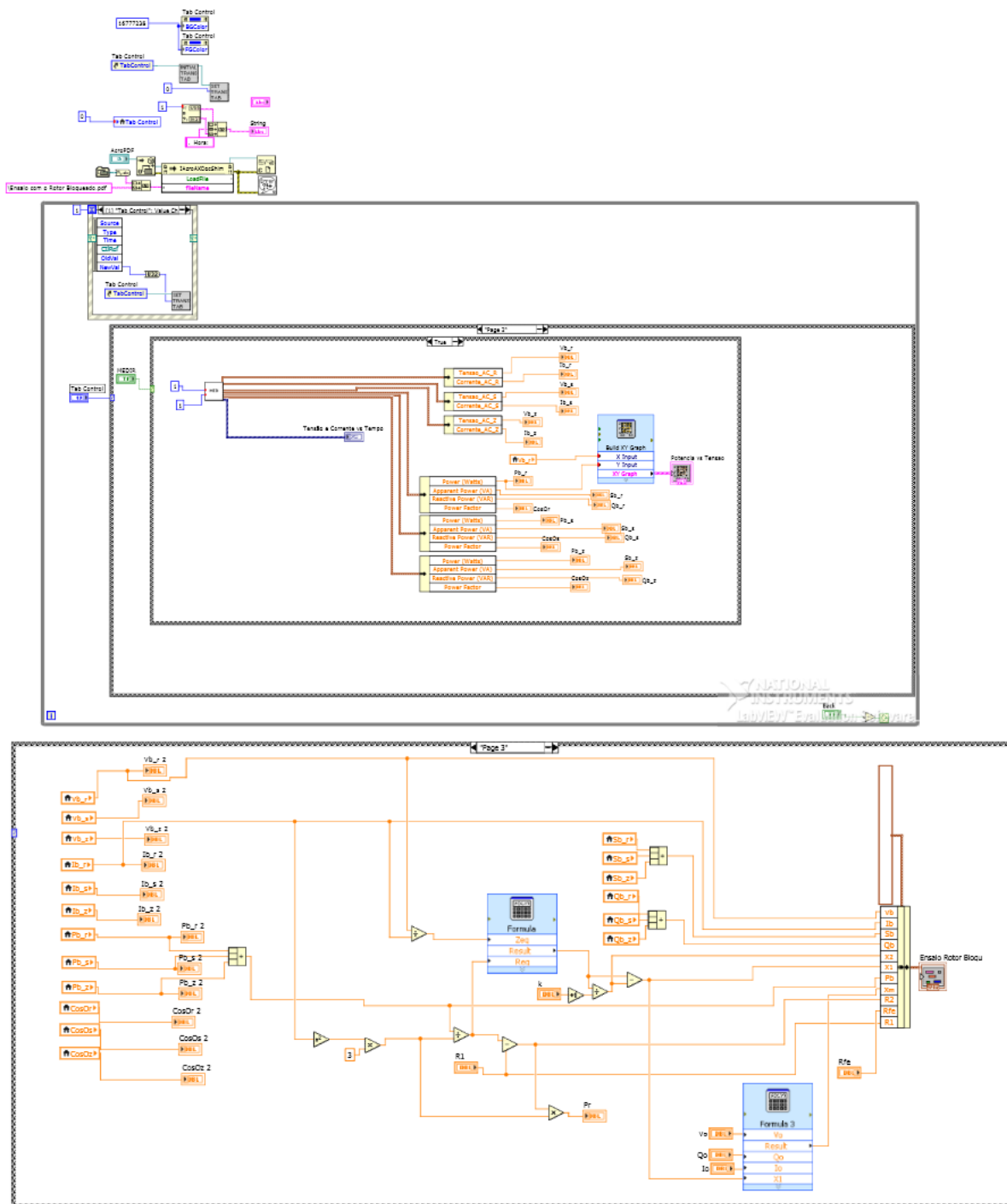
APÊNDICE D – Diagrama de blocos: Resistenciadeenrolamento.vi



APÊNDICE E – Diagrama de blocos: Ensaioavazio.vi



APÊNDICE F – Diagrama de blocos: Ensaio com rotor bloq.vi



ANEXO A – FOLHA DE DADOS DO MULTÍMETRO TENMA

TENMA 72-7735/72-7740/72-7745

SPECIFICATIONS

Basic Functions	Range	Best Accuracy		
		72-7735	72-7740	72-7745
DC Voltage	400mV/4V/40V/400V/1000V	±(0.8%+1)	±(0.8%+1)	±(0.8%+1)
AC Voltage	4V/40V/400V/750V	±(1%+5)	±(1%+5)	±(1%+5)
DC Current	400µA/4000µA/40mA/400mA/4A/10A	±(1%+2)	±(1%+2)	±(1%+2)
AC Current	400µA/4000µA/40mA/400mA/4A/10A	±(1.5%+5)	±(1.5%+5)	±(1.5%+5)
Resistance	400Ω/4kΩ/40kΩ/400kΩ/4MΩ/40MΩ	±(1%+2)	±(1%+2)	±(1%+2)
Capacitance	40nF/400nF/4µF/40µF/100µF	±(3%+5)	±(3%+5)	±(3%+5)
Temperature (°C)	-40°C ~ 1000°C	±(1%+3)	±(1%+3)	±(1%+3)
Frequency	10Hz-10MHz	±(0.1%+3)	±(0.1%+3)	±(0.1%+3)
Duty Cycle	0.1% ~ 99.9%	✓	✓	✓
Special Functions				
Fused 10A Range		✓	✓	✓
Auto Ranging		✓	✓	✓
Diode		✓	✓	✓
Continuity Buzzer		✓	✓	✓
True RMS	AC			✓
Relative Mode		✓	✓	✓
Data Hold		✓	✓	✓
RS232C		✓	✓	✓
Display Backlight			✓	✓
Full Icon Display		✓	✓	✓
Sleep Mode			✓	✓
Low Battery Display		✓	✓	✓
Input Impedance for DC Voltage Measurement	Around 10MΩ	✓	✓	✓
Max. Display	3999	✓	✓	✓

GENERAL CHARACTERISTICS

Power	9V Battery (6F22)
LCD Size	63 x 31 mm
Product Colour	Red and Grey
Product Net Weight	72-7735/72-7740 - 340g 72-7745 - 320g
Product Size	177 x 85 x 40 mm
Standard Accessories	72-7735 - Test Lead, Battery, English Manual, Test Clip, RS232C Interface Cable, Software 72-7740 - Test Lead, Battery, English Manual, Point Contact Temperature Probe, Test Clip 72-7745 - Test Lead, Battery, English Manual, Point Contact Temperature Probe, Test Clip, RS232C Interface Cable, Software
Optional Accessories*	Clip-On Test Lead Light (UT-L), Built-In Test Lead Light (UT-L1), Built-In Test Lead Light Plus (UT-L2)
Standard Individual Packing	Gift Box
Standard Quantity Per Carton	40pcs
Standard Carton Measurement	595 x 400 x 326 mm (0.078 CBM Per Standard Carton)
Standard Carton Gross Weight	72-7735 - 24.6kg 72-7740 - 21.5kg 72-7745 - 26.6kg

* Available at Extra Cost

19

TENMA®



72-7735



72-7740



72-7745



Registered Design No.: 0011438. 1M002

ANEXO B – Folha de dados do Osciloscópio TEKTRONIX

Digital Storage Oscilloscopes

► TDS1000B Series • TDS2000B Series



TDS1000B and TDS2000B Series Oscilloscopes

Instantly Productive. Incredibly Easy.

The TDS1000B and TDS2000B Series digital storage oscilloscopes deliver an unbeatable combination of performance and ease-of-use at a price you can afford.

Affordable Digital Precision

With up to 200 MHz bandwidth and 2 GS/s maximum sample rate, no other color digital storage oscilloscope offers as much bandwidth and sample rate for the price. The TDS1000B and TDS2000B Series oscilloscopes provide accurate real-time acquisition up to their full bandwidth, the same record length at all time base settings, advanced triggers to isolate signals of interest, and 11 standard automatic measurements on all models. Their Fast Fourier Transform (FFT) and waveform add, subtract, and multiply math functions allow you to analyze, characterize and troubleshoot circuits.

Quick and Easy Waveform Capture

The simple user interface with classic analog-style controls makes these instruments easy to use, reducing learning time and increasing efficiency. Innovative features such as the Autoset Menu, Probe Check Wizard, Context-Sensitive Help Menu and color LCD display (TDS2000B Series) optimize instrument setup and operation.

Flexible Data Transfer

With USB host and device ports which enable removable data storage, seamless PC connectivity, and direct printing, no other color or monochrome digital storage oscilloscope offers as much flexibility and ease of data transfer for the price.

► Features & Benefits

40 MHz, 60 MHz, 100 MHz and 200 MHz Bandwidths

Sample Rates up to 2 GS/s Real Time

2 or 4 Channels

Color or Monochrome LCD Display

Removable Data Storage via Front Panel USB Port

Seamless PC Connectivity via USB Device Port, with OpenChoice® and NI SignalExpress® PC Software

Advanced Triggers Including Pulse Width Trigger and Line-selectable Video Trigger

FFT Standard on All Models

11 Automatic Measurements

Multiple Language User Interface and Context-sensitive Help

Direct Print to all PictBridge® Compatible Printers via USB Device Port

Lifetime Warranty¹

► Applications

Design and Debug

Education and Training

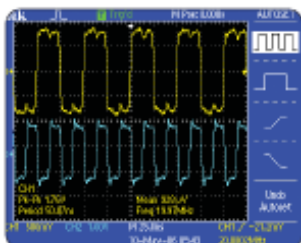
Manufacturing Test and Quality Control

Service and Repair

¹ Limitations apply. For terms and conditions, visit www.tektronix.com/lifetimewarranty.

Digital Storage Oscilloscopes

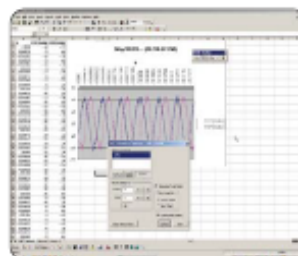
► TDS1000B Series • TDS2000B Series



► Quickly and easily capture waveforms.



► Conveniently use your USB flash drive to store screen shots and waveform data.



► Easily capture, save and analyze measurement results with OpenChoice® PC Communications Software.

Simple Documentation and Analysis

Easily capture, save and analyze measurement results with OpenChoice® PC Communications Software. Simply pull screen images and waveform data into the stand-alone desktop application or directly into Microsoft Word and Excel. To complement OpenChoice, National

Instruments SignalExpress Tektronix Edition Software provides you with extended capabilities, including advanced analysis, remote oscilloscope control and live waveform analysis. Alternatively, if you prefer not to use the PC, you can simply print your image directly to any PictBridge compatible printer via the USB device port.

Performance You Can Count On

Depend on Tektronix to provide you with performance you can count on. In addition to industry leading service and support, every TDS1000B and TDS2000B Series oscilloscope comes backed with a Lifetime Warranty¹ as standard.

¹ Limitations apply. For terms and conditions, visit www.tektronix.com/lifetimewarranty

► Characteristics

► TDS1000B and TDS2000B Series Digital Storage Oscilloscopes

	TDS1001B	TDS1002B	TDS1012B	TDS2002B	TDS2004B	TDS2012B	TDS2014B	TDS2022B	TDS2024B
Display (1/4 VGA LCD)	Mono	Mono	Mono	Color	Color	Color	Color	Color	Color
Bandwidth ²	40 MHz	60 MHz	100 MHz	60 MHz	60 MHz	100 MHz	100 MHz	200 MHz	200 MHz
Channels	2	2	2	2	4	2	4	2	4
External Trigger Input	Included on all models								
Sample Rate on each channel	500 MS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	2.0 GS/s	2.0 GS/s
Record Length	2.5 K points at all time-bases on all models								
Vertical Resolution	8-bits								
Vertical Sensitivity	2 mV to 5 V/div on all models with calibrated fine adjustment								

² Bandwidth is 20 MHz at 2 mV/div, all models.

Digital Storage Oscilloscopes

► TDS1000B Series • TDS2000B Series

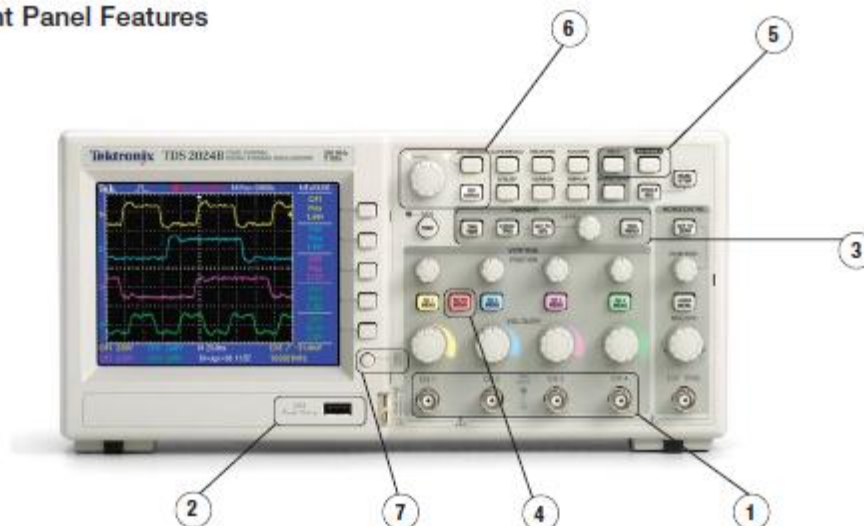
► TDS1000B and TDS2000B Series Digital Storage Oscilloscopes (continued)

	TDS1001B	TDS1002B	TDS1012B	TDS2002B	TDS2004B	TDS2012B	TDS2014B	TDS2022B	TDS2024B
DC Vertical Accuracy	+3% on all models								
Vertical Zoom	Vertically expand or compress a live or stopped waveform								
Maximum Input Voltage	300V _{AC} CAT II; derated at 20 dB/decade above 100 kHz to 13V _{pk-pk} AC at 3 MHz								
Position Range	2 mV to 200 mV/div +2 V; >200 mV to 5 V/div +50 V								
Bandwidth Limit	20 MHz for all models								
Input Coupling	AC, DC, GND on all models								
Input Impedance	1 M Ω in parallel with 20pF								
Time Base Range	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	2.5 ns to 50 sec/div	2.5 ns to 50 sec/div
Time Base Accuracy	50 ppm								
Horizontal Zoom	Horizontally expand or compress a live or stopped waveform								
I/O Interfaces									
USB Ports	Included on all models: 2 USB 2.0 Ports USB host port on front panel supports USB flash drives USB device port on back of instrument supports connection to PC and all PictBridge compatible printers								
GPIO	Optional								
Non-volatile Storage									
Reference Waveform Display	(2) 2.5 K point reference waveforms								
Waveform Storage w/o USB Flash Drive	(2) 2.5 K point	(2) 2.5 K point	(2) 2.5 K point	(2) 2.5 K point	(4) 2.5 K point	(2) 2.5 K point	(4) 2.5 K point	(2) 2.5 K point	(4) 2.5 K point
Waveform Storage with USB Flash Drive	96 or more reference waveforms per 8 MB								
Setups w/o USB Flash Drive	10 front panel setups								
Setups with USB Flash Drive	4000 or more front panel setups per 8 MB								
Screen Images with USB Flash Drive	128 or more screen images per 8 MB (the number of images depends on file format selected)								
Save All with USB Flash Drive	12 or more Save All operations per 8 MB A single Save All operation creates 3 to 9 files (setup, image, plus one file for each displayed waveform)								

Digital Storage Oscilloscopes

► TDS1000B Series • TDS2000B Series

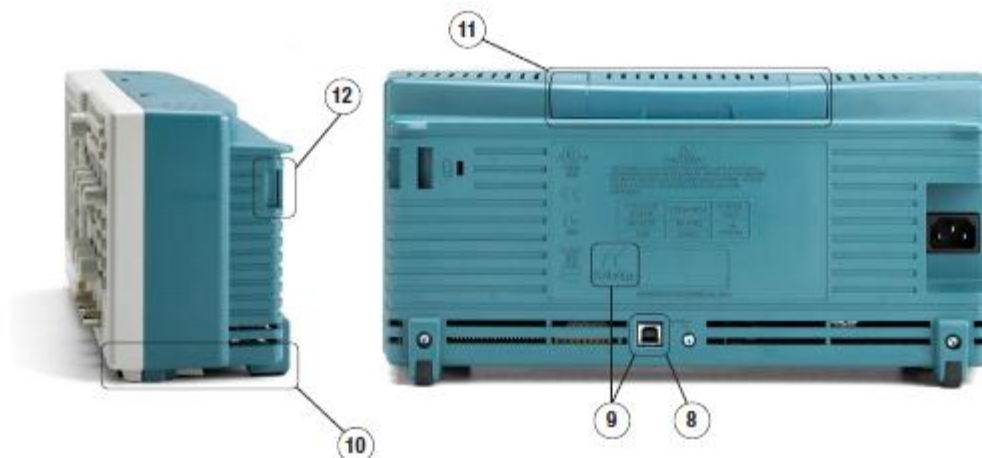
► Front Panel Features



- 1 Digital Real-Time Technology** – Quickly debug and characterize a wide range of signal types on four channels simultaneously with Tektronix' unique digital real-time (DRT) sampling technology. This acquisition technology allows you to capture high-frequency, non-repetitive information, such as glitches and edge anomalies, that eludes other oscilloscopes in its class.
- 2 USB Host Port** – Conveniently use your USB flash drive to store your personal oscilloscope setups, screen shots, and waveform data for later use. Also use the USB host port to easily update your instrument firmware.
- 3 Advanced Triggers** – Quickly capture your event of interest with advanced triggers including pulse width and the selectable video triggers.
- 4 Easy and Precise On-board Analysis** – Fast Fourier Transform (FFT) and waveform add, subtract and multiply math functions come standard on all models. FFT function displays frequency domain spectrums for fast harmonic distortion analysis or other frequency based analysis.
- 5 Simple Setup and Operation** – Simplify setup with smart Autoset function which identifies the type of waveform, adjusts controls to produce a usable display of the input signal, and allows you to select how the waveform should be presented (for example, single versus multiple cycles).
Built-in context-sensitive help further eases the operation by providing indexed and linked topics that allow you to selectively learn about the operation of various oscilloscope features and functions. Help is provided in the same languages as the user interface.
- 6 Simple User Interface** – The most frequently used functions are brought forth to the panel for direct accessibility (for example, single sequence button, print button and default setup button).
Dedicated reference button allows you to quickly recall your "golden" waveform for quick comparisons.
Autorange function automatically scales each waveform as you move your probe from test point to test point.
- 7 Probe Check Wizard** – Quickly verify that your probe is calibrated and operating properly.

Digital Storage Oscilloscopes
 ▶ TDS1000B Series • TDS2000B Series

▶ Side and Rear Panel Features



- 8 USB Device Port Combined with OpenChoice® and NI SignalExpress® TE for Seamless PC Connectivity** – Easily communicate with other instruments, peripherals or systems via USB or GPIB (optional). The USB device port allows you full programmable control for automated measurements and remote display and archiving.
- For seamless integration to your PC without programming, OpenChoice PC communications software and NI SignalExpress TE interactive measurement software enable transferring of waveform data, screen images and front panel setups between the oscilloscope and the PC. Both allow you to transfer your data into a stand-alone desktop application, Microsoft Word or Microsoft Excel. NI SignalExpress TE software provides extended capabilities, including advanced analysis, remote oscilloscope control and live waveform analysis.
- 9 USB Device Port Combined with PictBridge® for Direct Print** – Directly print your screen image to any PictBridge compatible printer via the USB device port. Each image can be stamped with date, time and instrument model and serial number (if supported by printer).
- 10 Compact 124.2 mm (4.8 In) Depth** – Free up valuable space on your bench or desktop.
- 11 Integrated Handle** – Easily carry your ultra-lightweight (2.0 kg [4.4 lb]) portable instrument into the field or to another room on a different floor of your building.
- 12 Integrated Security Loop and Kensington Lock** – If necessary, secure your oscilloscope in place. Security slots connect to Kensington lock or allow cable to pass through.

Digital Storage Oscilloscopes

► TDS1000B Series • TDS2000B Series

Acquisition Modes

Peak Detect –

High frequency and random glitch capture. Captures glitches as narrow as 12 ns (typical) using acquisition hardware at all time base settings from 5 μ s/div to 50 s/div.

Sample – Sample data only.

Average –

Waveform averaged, selectable: 4, 16, 64, 128.

Single Sequence –

Use the Single Sequence button to capture a single triggered acquisition sequence at a time.

Roll Mode –

All acquisition time base settings of >100 ms/div.

Trigger System

Trigger Modes – Auto, Normal, Single Sequence.

Trigger Types

Edge (Rising/Falling) –

Conventional level-driven trigger. Positive or negative slope on any channel. Coupling selections: AC, DC, Noise Reject, HF Reject, LF Reject.

Video –

Trigger on all lines or individual lines, odd/even or all fields from composite video, or broadcast standards (NTSC, PAL, SECAM).

Pulse Width (or Glitch) –

Trigger on a pulse width less than, greater than, equal to, or not equal to, a selectable time limit ranging from 33 ns to 10 s.

Trigger Source

2-channel Models – CH1, CH2, Ext, Ext/5, AC Line.

4-channel Models –

CH1, CH2, CH3, CH4, Ext, Ext/5, AC Line.

Trigger View

Displays trigger signal while trigger view button is depressed.

Trigger Signal Frequency Readout

Provides a frequency readout of the trigger source.

Cursors

Types – Amplitude, Time.

Measurements – Δ T, $1/\Delta$ T (frequency), Δ V.

► Autoset Menu

Single-button, automatic setup of all channels for vertical, horizontal and trigger systems, with undo Autoset.

Signal Type	Autoset Menu Choices
Square Wave	Single-cycle, Multi-cycle, Rising or Falling Edge
Sine Wave	Single-cycle, Multi-cycle, FFT Spectrum
Video (NTSC, PAL, SECAM)	Field: All, Odd or Even Line: All or Selectable Line Number

Automatic Waveform Measurements

Period, Frequency, +Width, –Width, Rise Time, Fall Time, Max, Min, Peak-to-Peak, Mean, Cycle RMS.

Waveform Math

Operators – Add, Subtract, Multiply, FFT.

FFT –

Windows, Hanning, Flat Top, Rectangular, 2048 sample points.

Sources –

2-channel Models: CH1 to CH2, CH2 to CH1, CH1+CH2, CH1xCH2.

4-channel Models: CH1 to CH2, CH2 to CH1, CH3 to CH4, CH4 to CH3, CH1+CH2, CH3+CH4, CH1xCH2, CH3xCH4.

Autorange

Automatically adjust vertical and/or horizontal oscilloscope settings when probe is moved from point to point, or when the signal exhibits large changes.

Display Characteristics

Display –

Color models: X VGA passive color LCD with color on black background with adjustable multi-level contrast.

Monochrome models: X VGA backlit passive LCD with adjustable multi-level contrast and inverse video selectable from front panel.

Interpolation – Sin(x)/x.

Display Types – Dots, vectors.

Persistence – Off, 1 s, 2 s, 5 s, Infinite.

Format – YT and XY.

Environmental and Safety

Temperature –

Operating: 0 °C to +50 °C.

Non-operating: –40 °C to +71 °C.

Humidity –

Operating and Non-operating: Up to 80% RH at or below +40 °C. Operating and Non-operating: Up to 45% RH up to +50 °C.

Altitude –

Operating and Non-operating: Up to 3,000 m.

Electromagnetic Compatibility –

Meets Directive 89/336/EEC, amended by 93/68/EEC, meets or exceeds EN55011 Class A Radiated and Conducted Emissions; FCC 47 CFR, Part 15, Subpart B, Class A; Australian EMC Framework, demonstrated per Emission Standard AS/NZS 2064; Russian GOST EMC regulations.

Safety –

UL61010-1:2003, CSA22.2 No. 61010-1:2003, EN61010-1:2001, IEC61010-1:2001.

Physical Characteristics

Instrument

Dimensions	mm	In.
Width	326.3	12.85
Height	158.0	6.22
Depth	124.2	4.89
Weight	kg	lbs.
Instrument only	2.0	4.4
With accessories	2.2	4.9

Instrument Shipping

Package Dimensions	mm	In.
Width	476.2	18.75
Height	266.7	10.5
Depth	228.6	9

RM2000B Rackmount	mm	In.
Width	482.6	19
Height	177.8	7
Depth	108	4.25

Digital Storage Oscilloscopes

► TDS1000B Series • TDS2000B Series

► Ordering Information

TDS1001B: 40 MHz, 2 Ch, 500 MS/s, Monochrome DSO.

TDS1002B: 60 MHz, 2 Ch, 1 GS/s, Monochrome DSO.

TDS1012B: 100 MHz, 2 Ch, 1 GS/s, Monochrome DSO.

TDS2002B: 60 MHz, 2 Ch, 1 GS/s, Color DSO.

TDS2004B: 60 MHz, 4 Ch, 1 GS/s, Color DSO.

TDS2012B: 100 MHz, 2 Ch, 1 GS/s, Color DSO.

TDS2014B: 100 MHz, 4 Ch, 1 GS/s, Color DSO.

TDS2022B: 200 MHz, 2 Ch, 2 GS/s, Color DSO.

TDS2024B: 200 MHz, 4 Ch, 2 GS/s, Color DSO.

Standard Accessories

P2220 – 200 MHz 10x to 1x Switchable Passive Probes (one per channel).

Power Cord – Please specify plug option.

NIM/NIST – Traceable Certificate of Calibration.

Documentation – User Manual (Please specify preferred language option).

OpenChoice® PC Communications Software – Enables fast and easy communication between a Windows PC and the TDS1000B and TDS2000B Series via USB. Transfer and save settings, waveforms, measurements and screen images.

National Instruments SignalExpress Tektronix Edition Interactive Measurement Software – Base Version – A fully interactive measurement software environment optimized for the TDS1000B and TDS2000B Series. Enables you to instantly acquire, generate, analyze, compare, import and save measurement data and signals using intuitive drag-and-drop user interface that does not require any programming. Standard TDS1000B and TDS2000B Series support for acquiring, controlling, viewing and exporting your live signal. A 30-day trial period of the Professional Version provides additional signal processing, advance analysis, mixed signal, sweeping, limit testing and user-defined step capabilities. Order SIGEXPTE for permanent Professional Version capability.

Limited Lifetime Warranty² – Covering labor and parts for defects in materials and workmanship for a minimum of 10 years, excluding probes and accessories.²

¹ Lifetime is defined as two years after Tektronix discontinues manufacturing the product, but the warranty length shall be at least ten years from date of original purchase. Lifetime warranty is non-transferable, proof of original purchase is required. Limitations apply. For terms and conditions visit www.tektronix.com/lifetimewarranty.

² Probes and accessories are not covered by the oscilloscope warranty and Service Offerings. Refer to the datasheet of each probe and accessory model for its unique warranty and calibration terms.

International Power Plugs

Opt. A0 – North America power.

Opt. A1 – Universal Euro power.

Opt. A2 – United Kingdom power.

Opt. A3 – Australia power.

Opt. A5 – Switzerland power.

Opt. A6 – Japan power.

Opt. A10 – China power.

Opt. A11 – India power.

Opt. A99 – No power cord or AC adapter.

User Manual Options

Opt. L0 – English manual.

Opt. L1 – French manual.

Opt. L2 – Italian manual.

Opt. L3 – German manual.

Opt. L4 – Spanish manual.

Opt. L5 – Japanese manual.

Opt. L6 – Portuguese manual.

Opt. L7 – Simplified Chinese manual.

Opt. L8 – Standard Chinese manual.

Opt. L9 – Korean manual.

Opt. L10 – Russian manual.

Translated front panel overlays included with their respective user manuals.

Recommended Accessories

TEK-USB-488 – GPIB-to-USB converter.

SIGEXPTE – National Instruments SignalExpress Tektronix Edition Interactive Measurement Software – Professional Version.

AC2100 – Soft carrying case for instrument.

HCTEK4321 – Hard plastic carrying case for instrument (requires AC2100).

RM2000B – Rackmount kit.

071-1075-xx – Programmer Manual – English only.

071-1828-xx – Service Manual – English only.

TNGTDS01 – Operator Training Kit – Extensive instructions and step-by-step lab exercises provide education about the operation of TDS1000B and TDS2000B Series oscilloscopes. Kit includes self-paced CD-ROM based manual and signal source board.

174-4401-00 – USB host-to-device cable, 3 feet long.

Recommended Probes

P2220 – 10x to 1x Switchable Passive Probe (200 MHz when 10x is selected).

P6101B – 1X passive probe (15 MHz, 300 V_{RMS} CAT II rating).

P6015A – 1000X high-voltage passive probe (75 MHz).

P5100 – 100X high-voltage passive probe (75 MHz).

P5200 – High-voltage active differential probe (25 MHz).

P6021 – 15 A, 60 MHz AC current probe.

P6022 – 6 A, 120 MHz AC current probe.

A621 – 2000 A, 5 to 50 kHz AC current probe.

A622 – 100 A, 100 kHz AC/DC current probe.

TCP303/TCPA300 – 15 A, 15 MHz AC/DC current probe/amplifier.

TCP305/TCPA300 – 50 A, 50 MHz AC/DC current probe/amplifier.

TCP312/TCPA300 – 30 A, 100 MHz AC/DC current probe/amplifier.

TCP404XL/TCPA400 – 500 A, 2 MHz AC/DC current probe/amplifier.

Service Options²

Opt. C3 – Calibration Service 3 years.

Opt. C5 – Calibration Service 5 years.

Opt. D1 – Calibration Data Report.

Opt. D3 – Calibration Data Report 3 years (with Opt. C3).

Opt. D5 – Calibration Data Report 5 years (with Opt. C5).

Opt. CA1 – Provides a single calibration event or coverage for the designated calibration interval, whichever comes first.

Service Offerings (Available After Purchase)

TDSxxxxB-CA1 – Provides a single calibration event or coverage for the designated calibration interval, whichever comes first.

Digital Storage Oscilloscopes

► TDS1000B Series • TDS2000B Series

The Complete Measurement Solution

The AFG3000 Series arbitrary function generator pairs with the TDS2000B and TDS1000B Series digital storage oscilloscopes to deliver the two elements of a complete measurement solution – stimulus and acquisition. This instrument combines the capabilities of a function generator with the power of an arbitrary waveform generator, offering the performance needed to accurately verify, validate and characterize designs with ease and confidence at a price you can afford.

The Tektronix Customer Service Advantage

You can trust Tektronix to offer unequalled engineering expertise and a customer-centric approach to ensure the optimal performance of your Tektronix products and maximize the lifetime value of your Tektronix investment. With service from Tektronix you get:

- Access to the source of product knowledge; unsurpassed technical expertise
- Your challenges solved via front-line technical experts, design engineering reinforcement and online support tools
- Comprehensive and thorough support provided worldwide, including software and firmware updates, data reports and adjustments
- Efficiency and convenience; no hassle service from initial service call to turnaround and delivery
- Flexible repair and calibration service with access to the best on-call technical trouble shooting staff in the industry, with over 20 years of training per support engineer



- Customer-centric approach dedicated to serving your needs everyday with services designed to optimize your product performance, increase productivity and ROI by delivering a fixed cost of ownership and efficient management of service

Get checked by Tektronix.
Visit www.tektronix.com/serviceandsupport

Contact Tektronix:

ASEAN / Australasia 65 6366 3900

Austria +41 52 675 3777

Balkans, Israel, South Africa and other ISE Countries +41 52 675 3777

Belgium 07 81 60166

Brazil & South America 55 (11) 3741-8960

Canada 1 (800) 961-9625

Central East Europe, Ukraine and the Baltics +41 52 675 3777

Central Europe & Greece +41 52 675 3777

Denmark +45 80 88 1401

Finland +41 52 675 3777

France +33 (3) 1 69 86 81 81

Germany +49 (21) 94 77 400

Hong Kong (852) 2585-6688

India (91) 80-22275577

Italy +39 (02) 25096 1

Japan 81 (3) 6714-3010

Luxembourg +44 (3) 1344 330400

Mexico, Central America & Caribbean 52 (55) 5404700

Middle East, Asia and North Africa +41 52 675 3777

The Netherlands 090 02 021797

Norway 800 16396

People's Republic of China 86 (10) 6236 1230

Poland +41 52 675 3777

Portugal 80 08 12370

Republic of Korea (82 (2) 525-5299

Russia & CIS +7 (495) 7484900

South Africa +27 11 254 8360

Spain (+34) 901 968 054

Sweden 020 06 80371

Switzerland +41 52 675 3777

Taiwan 886 (2) 2722-9622

United Kingdom & Eire +44 (3) 1344 330400

USA 1 (800) 426-2200

For other areas contact Tektronix, Inc. at: 1 (503) 627-7111

Updated 12 May 2006

Our most up-to-date product information is available at:
www.tektronix.com



Product(s) are manufactured in ISO registered facilities.

Product(s) comply with EMI Standard 406.1-1997, IEC 232-C, and with Tektronix Standard Order and Form(s).

Copyright © 2006, Tektronix. All rights reserved. Tektronix products are covered by U.S. and foreign patents, issued and pending. Information in this publication supersedes that in all previously published material. Specification and price change privileges reserved. TEKTRONIX and TDK are registered trademarks of Tektronix, Inc. All other trade names referenced are the service marks, trademarks or registered trademarks of their respective companies.

0201 18/W06

32W 13662-0

Tektronix
Enabling Innovation

