

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**UMA CONTRIBUIÇÃO À AUTOMAÇÃO DE ENSAIOS
EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA
EM MÉDIA TENSÃO**

Tese apresentada à banca examinadora de doutorado como pré-requisito à obtenção do título de doutor em engenharia elétrica.

Autor: **José Manuel Esteves Vicente**

Orientador: **Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Rezek**

Co-orientador: **Prof. Dr. Carlos Alberto Mohallem Guimarães**

Itajubá, Outubro de 2006

*Aos meus pais **Joaquim e Ângela**,
à minha inigualável esposa **Aparecida**
e aos meus queridos filhos **Aurélio e Fernanda**.*

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por ter me guiado espiritualmente nesta caminhada de crescimento pessoal e profissional.

Aos orientadores deste trabalho, Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Rezek e Prof. Dr. Carlos Alberto Mohallem Guimarães, pelo apoio, paciência e amizade.

Aos estimados amigos, de diversas fábricas de transformadores, pela cooperação e confiança.

À coordenação do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, pela oportunidade e apoio logístico.

Aos membros da banca examinadora, pela predisposição em analisar este trabalho e pelas sugestões recebidas.

Finalmente agradeço a todos que direta ou indiretamente colaboraram na elaboração desta tese.

*“Tantas vezes pensamos ter chegado,
tantas vezes é preciso ir além...”*

Fernando Pessoa

RESUMO

Com a grande expansão do mercado de transformadores de distribuição no Brasil verificada nos últimos anos e com a necessidade de implementação, pela maioria de seus fabricantes da ISO9001 (*International Organization for Standardization*), que estabelece padrões mínimos de qualidade nos produtos fabricados, muitos fabricantes e reformadoras de transformadores, precisam automatizar e adaptar os procedimentos de realização de seus ensaios visando a documentação e padronização dos mesmos. É neste contexto que se insere este trabalho “*Uma contribuição à automação de ensaios em transformadores de potência em média tensão*”. As técnicas e métodos apontados pela sistematização aqui proposta, são explorados na prática, através do projeto e montagem dos equipamentos MONITEK9443, MONITEK9610 e MONITEK9920, e pelo desenvolvimento dos programas computacionais TRANS4, RTMED, RHMED, MEGAMED, ELEVA e SATURA, que permitem, trabalhando em conjunto, realizar ensaios em vazio e em curto-circuito, medição de relação de transformação, medição de resistência ôhmica, medição de resistência de isolamento, medição de índice de polarização, emissão de relatórios, análises estatísticas, histórico de não-conformidades, levantamento de curvas de saturação, determinação de elevação de temperatura e método de correção para frequência de 50 [Hz]. Existem atualmente no Brasil mais de 50 empresas, do ramo de transformadores, usando estes instrumentos e programas, inclusive companhias de distribuição de eletricidade tais como: ENERGIPE, ENERSUL, CEMAT, CFLCL, CELPE, CELG, CEMIG, etc. Com este trabalho espera-se que haja uma contribuição efetiva para a padronização, automação e aumento de produtividade no que se refere à realização dos ensaios de rotina.

ABSTRACT

With the increasing expansion of the distribution transformers market in the last years in Brazil and considering the implementation necessity of ISO 9001 (*International Organization for Standardization*), by the majority of transformer's manufacturers, which establish minimum standard of quality in the manufactured products, a large of manufacturers and refurbish companies need to adapt and automate its tests in order to document and standarize them. Is in this context that is inserted this work: "*A contribution to the automation of tests in medium voltage power transformers*". The techniques and methods of the proposed automation are explored in practice through the project and implementation of MONITEK9443, MONITEK9610 and MONITEK9920 equipments and by the development of the computational programs: TRANS4, RTMED, RHMED, ELEVA and SATURA, which permit working together, realize tests in no-load conditions and in short circuit, as well, transformer turn ratio and ohmic resistance measurements, report emissions, statistical analysis, disagreement history register, saturation curves obtainment, elevation temperature determination and frequency correction method for 50[Hz]. Nowadays in Brazil there are more than 50 companies in distribution transformers area, using these developed programs and instruments, including electricity distribution companies, such as ENERGIPE, ENERSUL, CEMAT, CFLCL, CELPE, CELG and CEMIG. With this work is expected to contribute effectively to the standardization, automation and production increase, with respect to the realization of routine tests.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1:	Ligações entre os instrumentos e seus respectivos programas.	22
Figura 2.1:	Foto da placa 1 com as fontes de alimentação.	24
Figura 2.2:	Foto frontal da placa 1 com as fontes de alimentação.	25
Figura 2.3:	Foto da placa da CPU.	26
Figura 2.4:	Foto frontal da placa da CPU.	26
Figura 2.5:	Foto da placa de comunicação serial.	27
Figura 2.6:	Foto frontal da placa de comunicação serial.	28
Figura 2.7:	Foto da placa de aquisição de dados.	29
Figura 2.7:	Vista frontal da placa de aquisição de dados.	30
Figura 2.8:	Circuito do divisor resistivo.	31
Figura 2.9:	Princípio de funcionamento do sensor de efeito hall.	33
Figura 2.10:	Foto da placa de condicionamento de sinais elétricos.	34
Figura 2.11:	Foto frontal da placa de condicionamento de sinais elétricos.	34
Figura 2.12:	Foto da placa de medição de temperatura e acionamento de relés.	36
Figura 2.13:	Foto do termômetro PT100, sem o respectivo cabo de ligação.	36
Figura 2.14:	Foto da vista frontal das placas interligadas.	37
Figura 2.15:	Foto da vista traseira das placas interligadas.	37
Figura 2.16:	Foto da vista traseira do bastidor de alumínio.	38
Figura 2.17:	Foto da vista frontal do bastidor de alumínio.	38
Figura 2.18:	Parte do programa com os comandos de comunicação implementados.	41
Figura 2.19:	Calibrador Fluke modelo 5500A.	47
Figura 3.1:	Tela Principal do programa Trans4.	49
Figura 3.2:	Tela de cadastro do transformador.	51
Figura 3.3:	Início do ensaio em vazio.	53
Figura 3.4:	Primeira parte do ensaio em vazio.	53
Figura 3.5:	Segunda parte do ensaio em vazio.	54
Figura 3.6:	Fim do ensaio em vazio.	54
Figura 3.7:	Resumo do ensaio em vazio.	55
Figura 3.8:	Início do ensaio em curto-circuito.	58
Figura 3.9:	Corrente do ensaio em curto-circuito próxima à nominal.	58
Figura 3.10:	Resumo do ensaio em curto-circuito.	59
Figura 3.11:	Digitação do ensaio de resistência dos enrolamentos.	60
Figura 3.12:	Leitura automática das medições de resistência ôhmica.	61

Figura 3.13: Digitação do ensaio de relação de transformação.	62
Figura 3.14: Leitura automática das medições de relação de transformação.	62
Figura 3.15: Resistências de isolamento entre AT, BT e MASSA.	63
Figura 3.16: Curvas das componentes da corrente medida durante o ensaio de isolamento.	63
Figura 3.17: Digitação do ensaio de isolamento.	64
Figura 3.18: Ensaio de resistência de isolamento realizado com o programa MEGAMED.	65
Figura 3.19: Digitação ou confirmação do ensaio de tensão aplicada.	66
Figura 3.20: Digitação ou confirmação do ensaio de tensão induzida.	67
Figura 3.21: Digitação do ensaio do óleo isolante.	68
Figura 3.22: Digitação do ensaio de pintura e estanqueidade.	69
Figura 3.23: Digitação de informações complementares.	69
Figura 3.24: Digitação dos dados da firma inspetora.	70
Figura 3.25: Alguns cálculos efetuados.	71
Figura 3.26: Tabela comparativa com a norma NBR5440/99 com ensaio aprovado.	71
Figura 3.27: Tabela comparativa com a norma NBR5440/99 com ensaio reprovado.	72
Figura 3.28: Seleção da impressora.	77
Figura 3.29: Seleção do tipo de relatório.	78
Figura 3.30: Seleção de relatórios múltiplos.	79
Figura 3.31: Seleção do modelo do relatório.	80
Figura 3.32: Exemplo de relatório padrão [cortesia “ROMAGNOLE”].	81
Figura 3.33: Exemplo de relatório modelo 1 [cortesia “ITB”].	82
Figura 3.34: Exemplo de relatório modelo 2 [cortesia “COMTRAFO”].	83
Figura 3.35: Exemplo de relatório modelo 3 [cortesia “TRAFO”].	84
Figura 3.36: Exemplo de relatório resumido [cortesia “ITAIPU”].	85
Figura 3.37: Exemplo de relatório mensal de defeitos [cortesia “ELETROPAULO”].	86
Figura 3.38: Tela de seleção de ferramentas.	87
Figura 3.39: Pagina 1 do relatório gráfico de análise estatística [cortesia “CEMEC”].	88
Figura 3.40: Pagina 2 do relatório gráfico de análise estatística [cortesia “CEMEC”].	89
Figura 3.41: Página 7 de um total de 13, da listagem de análise estatística [cortesia “CEMEC”].	90
Figura 3.42: Histórico de defeitos em um transformador.	91
Figura 3.43: Menu de configurações gerais.	93
Figura 3.44: Menu de cadastro dos tp’s e tc’s.	94
Figura 3.45: Configuração da porta serial.	95
Figura 3.46: Configurações funcionais.	95

Figura 4.1:	Circuito básico de excitação e ligação dos relés ao transformador sob ensaio.	97
Figura 4.2:	Diagrama de ligações Dy1.	98
Figura 4.3:	Foto da placa 5A com a fonte e relés.	101
Figura 4.4:	Foto frontal da placa 5A com a fonte e relés.	102
Figura 4.5:	Foto da placa 6A.	103
Figura 4.6:	Foto da vista frontal da placa 6A.	103
Figura 4.7:	Detalhe da placa 5A interligada com a placa 6A.	104
Figura 4.8:	Vista traseira do conjunto de placas interligadas.	104
Figura 4.9:	Vista frontal do conjunto de placas interligadas.	105
Figura 4.10:	Instrumento MONITEK9610 completamente montado.	105
Figura 4.11:	Tela Principal do programa Rtmed.	108
Figura 4.12:	Tela do menu de configurações gerais.	109
Figura 4.13:	Tela de seleção do transformador a ser ensaiado.	110
Figura 4.14:	Tela do programa RTMED pronto para iniciar o ensaio.	111
Figura 4.15:	Tela do programa RTMED solicitando a mudança de tap.	111
Figura 4.16:	Tela do programa RTMED mostrando o final do ensaio.	112
Figura 4.17:	Tela do programa RTMED mostrando os defeitos possíveis.	112
Figura 5.1:	Medição de resistência a dois fios.	114
Figura 5.2:	Medição de resistência a quatro fios.	114
Figura 5.3:	Ponte Kelvin 2769 faixa de medição de 0,1 [mΩ] a 110 [Ω].	115
Figura 5.4:	Ponte Wheatstone 2755 faixa de medição de 1 [Ω] a 10 [MΩ].	115
Figura 5.5:	Diagrama das partes principais para medição de resistência.	116
Figura 5.6:	Onda de corrente durante o ensaio, aplicada pelo MONITEK9920.	117
Figura 5.7:	Foto da placa 1A com as fontes de alimentação.	118
Figura 5.8:	Foto frontal da placa 1A.	119
Figura 5.9:	Foto da placa 5B.	120
Figura 5.10:	Foto da vista frontal da placa 5B.	120
Figura 5.11:	Vista traseira do conjunto de placas interligadas.	121
Figura 5.12:	Vista frontal do conjunto de placas interligadas.	121
Figura 5.13:	Instrumento MONITEK9920 completamente montado.	122
Figura 5.14:	Tela Principal do programa Rhmed.	124
Figura 5.15:	Tela do menu de configurações gerais do programa RHMED.	125
Figura 5.16:	Tela de seleção do transformador a ser ensaiado no programa RHMED.	126
Figura 5.17:	Tela de seleção dos taps a serem ensaiados no programa RHMED.	126
Figura 5.18:	Tela do programa RHMED pronto para iniciar o ensaio.	127
Figura 5.19:	Tela do programa RHMED mostrando o final do ensaio.	127

Figura 6.1:	Tela inicial do programa ELEVA.	132
Figura 6.2:	Arranjo para comutação rápida.	134
Figura 6.3:	Gráfico do ensaio de elevação de temperatura sem sobrecarga inicial.....	136
Figura 6.4:	Gráfico do ensaio de elevação de temperatura com sobrecarga inicial.....	136
Figura 6.5:	Pontos lidos de resistência ôhmica nas bobinas da AT e as curvas interpolantes para $t=0$	137
Figura 6.6:	Pontos lidos de resistência ôhmica nas bobinas da AT e as curvas interpolantes para $t=0$	137
Figura 6.7:	Gradientes de temperatura do topo do óleo e dos enrolamentos.	138
Figura 6.8:	Tela principal do programa SATURA.	140
Figura 6.9:	Tela de ajuste das configurações gerais do programa SATURA.	140
Figura 6.10:	Tela do gráfico: $B \times \text{Watt/kg}$	141
Figura 6.11:	Tela do gráfico: $B \times \text{VA/kg}$	142
Figura 6.12:	Tela do gráfico: $U \times I$	142
Figura 6.13:	Diagrama fasorial para corrente a vazio.	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Planilha de calibração do MONITEK9443.....	47
Tabela 4.1: Procedimento para algumas ligações trifásicas.....	99
Tabela 4.2: Procedimento para transformadores monofásicos.....	100
Tabela 4.3: Planilha de calibração do MONITEK9610.....	107
Tabela 5.1: Planilha de calibração do MONITEK9920.....	123
Tabela 6.1: Resultados e comparação dos ensaios em 50 e 60 [Hz].....	147

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

EFEI:	Escola Federal de Engenharia de Itajubá	19
ISO 9001:	<i>International Organization for Standardization</i> <i>(Organização Internacional para padronização)</i>	20
RBC :	Rede Brasileira de Calibração.....	46
DKD:	<i>Deutscher kalibrierdienst</i> (Laboratórios de Calibração da Alemanha)	46
AT:	Alta tensão	50
BT:	Baixa Tensão	50
RTC:	Relação de transformação do transformador de corrente.....	52
RTP:	Relação de transformação do transformador de potencial	52
TP:	Transformador de potencial	93
TC:	Transformador de corrente.....	93
RT:	Relação de Transformação	96
TTR:	<i>Transformer Turn Ratio</i> (Relação de espiras do transformador).....	96
PDF:	<i>Portable Document Format</i> (Formato portátil de arquivos)	77
PCL5:	<i>Printer Command Language</i> (Sintaxe de comandos para impressora)	77
PGA:	Amplificador operacional com ganho programável	117
IEEE:	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	151
ENERSUL:	Companhia Energética de Mato Grosso do Sul	148
CEMAT:	Centrais Elétricas Mato-Grossense S/A.....	148
ENERGIPE:	Companhia Energética de Sergipe S/A.....	148
CELG:	Companhia Energética de Goiás	148
CELPE:	Companhia Energética de Pernambuco	148
CFLCL:	Companhia Força e Luz Cataguazes-Leopoldina	148
CEMIG:	Companhia Energética de Minas Gerais.....	148
ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas	152
INMETRO:	Instituto Nacional de Metrologia	152

LISTA DE SÍMBOLOS E NOTAÇÕES

U_o :	Tensão em vazio.....	51
I_{cc_N} :	Corrente de curto-circuito nominal.....	56
P_{cc_N} :	Perdas de curto circuito nominais.....	56
U_{cc} :	Tensão do ensaio de curto circuito.....	56
U_{cc_N} :	Tensão de curto-circuito nominal.....	56
I_{cc} :	Corrente do ensaio de curto circuito.....	56
IA :	Índice de absorção.....	64
IP :	Índice de polarização.....	64
R_{30s} :	Resistência de isolamento medida a 30 segundos.....	64
R_{60s} :	Resistência de isolamento medida a 60 segundos.....	64
R_{600s} :	Resistência de isolamento medida a 600 segundos.....	64
α_{COBRE} :	Constante de variação com a temperatura para o cobre.....	72
α_{ALU} :	Constante de variação com a temperatura para o alumínio.....	72
T_{AE} :	Temperatura ambiente do ensaio de resistência ôhmica.....	72
T_{AC} :	Temperatura ambiente do ensaio de curto-circuito.....	72
$K1_{AT}$:	Constante de correção da temperatura ambiente do ensaio de medição de resistência ôhmica da AT, para a temperatura do ensaio em curto-circuito ..	72
$K1_{BT}$:	Constante de correção da temperatura ambiente do ensaio de medição de resistência ôhmica da BT, para a temperatura do ensaio em curto-circuito ..	72
$K2_{AT}$:	Constante de correção para a AT, da temperatura do ensaio de curto para a temperatura de referência.....	72
$K2_{BT}$:	Constante de correção para a BT, da temperatura do ensaio de curto para a temperatura de referência.....	72
R_{H1H2} :	Resistência ôhmica entre as buchas H1 e H2 à temperatura ambiente T_{AE}	73
R_{H1H3} :	Resistência ôhmica entre as buchas H1 e H3 à temperatura ambiente T_{AE}	73
R_{H2H3} :	Resistência ôhmica entre as buchas H2 e H3 à temperatura ambiente T_{AE}	73
R_{X1X2} :	Resistência ôhmica entre as buchas X1 e X2 à temperatura ambiente T_{AE}	73

R_{X1X3} :	Resistência ôhmica entre as buchas X1 e X3 à temperatura ambiente T_{AE}	73
R_{X2X3} :	Resistência ôhmica entre as buchas X2 e X3 à temperatura ambiente T_{AE}	73
$R_{c_{H1H2}}$:	Resistência ôhmica entre as buchas H1 e H2 corrigida para a temperatura T_{AC}	73
$R_{c_{H1H3}}$:	Resistência ôhmica entre as buchas H1 e H3 corrigida para a temperatura T_{AC}	73
$R_{c_{H2H3}}$:	Resistência ôhmica entre as buchas H2 e H3 corrigida para a temperatura T_{AC}	73
$R_{c_{X1X2}}$:	Resistência ôhmica entre as buchas X1 e X2 corrigida para a temperatura T_{AC}	73
$R_{c_{X1X3}}$:	Resistência ôhmica entre as buchas X1 e X3 corrigida para a temperatura T_{AC}	73
$R_{c_{X2X3}}$:	Resistência ôhmica entre as buchas X2 e X3 corrigida para a temperatura T_{AC}	73
R_{AT} :	Resistência média da AT à temperatura ambiente do ensaio de curto-circuito.....	74
R_{BT} :	Resistência média da BT à temperatura ambiente do ensaio de curto-circuito.....	74
I_o :	Corrente em vazio.....	74
$I_o\%$:	Corrente em vazio percentual	74
$P_{j_{BT}}$:	Perdas por efeito joule da BT.....	74
$P_{j_{AT}}$:	Perdas por efeito joule da AT.....	74
S_N :	Potência nominal.....	75
P_j :	Soma das perdas por efeito joule da AT e BT	75
P_a :	Perdas adicionais à temperatura ambiente.....	75
$P'_{j_{AT}}$:	Perdas joule da AT à temperatura de referência	75
$P'_{j_{BT}}$:	Perdas joule da BT à temperatura de referência	75
P'_a :	Perdas adicionais à temperatura de referência	75
P'_j :	Soma das perdas joule à temperatura de referência	75

$P'e$:	Perdas em carga à temperatura de referência	75
P_{TOT} :	Perdas totais na temperatura de referência.....	75
U_{N_AT} :	Tensão nominal da AT	76
U_{N_BT} :	Tensão nominal da BT	76
$Z\%$:	Impedância percentual.....	76
$R\%$:	Resistência percentual.....	76
$X\%$:	Reatância percentual	76
$R'\%$:	Resistência percentual à temperatura de referência	76
$Z'\%$:	Impedância percentual à temperatura de referência	76
RT_1 :	Relação de transformação da fase A.....	98
RT_2 :	Relação de transformação da fase B.....	98
RT_3 :	Relação de transformação da fase C.....	98
$\Delta\theta_o$:	Elevação de temperatura do óleo sobre a temperatura do meio refrigerante com perdas totais em [°C].....	133
$\Delta\theta_r$:	elevação de temperatura do óleo sobre a temperatura de meio refrigerante com perdas reduzidas em [°C].....	133
$B_{[T]}$:	Indução magnética em Tesla	139
K_h :	constante de histerese	144
K_f :	constante de <i>Foucault</i>	144
$P_{0(60Hz)}$:	Perdas em vazio em 60 [Hz]	144
$P_{0(50Hz)}$:	Perdas em vazio em 50 [Hz]	144
I_{o60Hz} :	Corrente em vazio em 60 [Hz]	145
I_{o50Hz} :	Corrente em vazio em 50 [Hz]	145
I_{P60Hz} :	Parcela ativa da corrente em vazio em 60 [Hz]	145
I_{P50Hz} :	Parcela ativa da corrente em vazio em 50 [Hz]	145
I_{Q60Hz} :	Parcela reativa da corrente em vazio em 60 [Hz]	145
I_{Q50Hz} :	Parcela reativa da corrente em vazio em 50 [Hz]	145
$COS\theta_{60Hz}$:	Fator de potência em 60 [Hz].....	145
P_{AD50Hz} :	Perdas adicionais em 50 [Hz]	146

P_{CC50Hz} :	Perdas de curto-circuito em 50 [Hz]	146
U_{CC60Hz} :	Tensão de curto-circuito em 60 [Hz]	147
U_{CC50Hz} :	Tensão de curto-circuito em 50 [Hz]	147

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 MOTIVAÇÃO	18
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO	19
1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE	19
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
CAPÍTULO 2 INSTRUMENTO MONITEK9443	23
2.1 DESCRIÇÃO DETALHADA DO HARDWARE.....	23
2.2 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO	39
2.3 CÁLCULO DAS PRINCIPAIS GRANDEZAS ELÉTRICAS.....	42
2.4 CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO E PRECISÃO OBTIDA.....	45
CAPÍTULO 3 PROGRAMA TRANS4.EXE	48
3.1 CADASTRO DO TRANSFORMADOR	49
3.2 ENSAIO EM VAZIO	51
3.3 ENSAIO EM CURTO-CIRCUITO	56
3.4 OUTROS ENSAIOS	59
3.5 EXECUTAR CÁLCULOS.....	70
3.6 RELATÓRIO IMPRESSO	76
3.7 FERRAMENTAS GERAIS	87
3.8 CONFIGURAÇÃO GERAL	93
CAPÍTULO 4 INSTRUMENTO MONITEK9610 E PROGRAMA RTMED.EXE.....	96
4.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	96
4.2 DESCRIÇÃO DETALHADA DO HARDWARE.....	101
4.3 CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO E PRECISÃO OBTIDA.....	106
4.4 PROGRAMA RTMED.EXE.....	107
CAPÍTULO 5 INSTRUMENTO MONITEK9920 E PROGRAMA RHMED.EXE	113
5.1 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ÔHMICA.....	113
5.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO IMPLEMENTADO	116
5.3 DESCRIÇÃO DETALHADA DO HARDWARE.....	118
5.4 CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO E PRECISÃO OBTIDA.....	122
5.5 PROGRAMA RHMED.EXE	123

CAPÍTULO 6 OUTRAS FERRAMENTAS IMPLEMENTADAS.....	128
6.1 ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA.....	128
6.2 ENSAIO DE CURVA DE SATURAÇÃO	139
6.3 CORREÇÃO DOS ENSAIOS FEITOS EM 60 PARA 50 [HZ]	143
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES.....	148
7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	148
7.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	149
REFERÊNCIAS	151
APÊNDICE A.....	154

CAPÍTULO1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O mercado de transformadores de distribuição no Brasil, que nos últimos cinco anos crescia a taxas superiores às anteriores verificadas no País, a partir de 2004, com o programa “luz para todos” apoiado pelo governo federal, experimenta um forte crescimento, representando um aumento real do mercado pois a quantidade de transformadores demandada mais que duplica, e em valor, o crescimento representa cerca de 35%. A meta do programa “luz para todos” é: “garantir o acesso e o uso da energia elétrica em todo o meio rural brasileiro até 2008. Para tanto, serão efetivados 2 milhões de novos atendimentos”¹.

Como o aumento da demanda é para o meio rural, onde os transformadores típicos são monofásicos e de pequena potência, este crescimento atinge diretamente os fabricantes mais competitivos neste perfil de transformador. Uma destas fábricas que em 2004 produzia 2500 unidades por mês, em 2005 passou a produzir 4500 e atualmente produz 7500, com previsão de crescimento, para o ano de 2007, de fabricar 10000 unidades por mês.

Como por norma [1] e [3] existe um conjunto de ensaios elétricos, denominados “ensaios de rotina”, obrigatórios para todos os transformadores fabricados, é obvio que a quantidade de ensaios de rotina a serem realizados, acompanhou estes números, chegando em algumas fábricas, a mais de 300 ensaios por dia.

O conjunto de ensaios de rotina é formado por vários ensaios elétricos como por exemplo: ensaio em vazio, ensaio em curto-circuito, ensaio de relação de transformação, ensaio de resistência ôhmica e ensaios de isolamento. A maioria destes ensaios é feita com equipamentos diferentes e além disso, com os valores medidos, ainda são efetuados vários cálculos, comparações com valores de norma e por fim gerados os relatórios. Em face do exposto, com a implementação de

¹ Diário Oficial da União, portaria nº 501 de 13 de Dezembro de 2004

metodologias de automação eficientes para realizar ensaios, é mais fácil atender à demanda crescente de produção.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia que organize e efetue ensaios, de rotina e alguns de tipo, em transformadores através da implementação de instrumentos e programas computacionais que permitam a automação destes ensaios

O programa de automação (*software*) deve gerenciar as seguintes etapas:

- Cadastro dos transformadores;
- Realização dos ensaios, por meio de comunicação com os instrumentos;
- Efetuar cálculos;
- Comparações com valores de referência de norma;
- Identificar problemas e emitir alertas;
- Emitir relatórios;

Os instrumentos devem atender, em medição, aos valores máximos e mínimos característicos para transformadores de distribuição e em precisão ao recomendado por norma [3] e [4]. Precisam ser totalmente compatíveis e se comunicar com o programa de automação.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A primeira versão do programa de automação foi desenvolvida em 1993, para ser usada em conjunto com um protótipo de instrumento digital de medição de grandezas elétricas [6], para realizar ensaios de rotina em transformadores em um laboratório de ensaios elétricos da antiga Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), atual Universidade Federal de Itajubá. Já na época, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) exigia que qualquer transformador de empresa privada, a ser ligado em seu sistema de distribuição, independentemente de ser novo ou usado, fosse submetido aos ensaios de rotina de acordo com normas técnicas.

Como a CEMIG só aceitava que estes ensaios de rotina fossem realizados por laboratórios de ensaios elétricos privados credenciados ou por laboratórios de universidades ou escolas públicas de ensino superior, e pelo fato de a EFEI ser a única qualificada na região, uma quantidade razoável de ensaios eram feitos usando-se equipamentos de medição analógicos. Além disso os resultados calculados eram digitados em editor de texto, para só então serem impressos. Pelos motivos descritos, a primeira versão funcional deste programa, permitiu que os ensaios fossem realizados com maior rapidez, precisão e confiabilidade.

Na maioria das vezes estes ensaios eram acompanhados por um inspetor da CEMIG e pelo próprio fabricante. Isto permitiu que este início de automação dos ensaios de rotina fosse divulgado para diversos fabricantes de transformadores, alguns demonstrando muito interesse em adquirir o conjunto programa e equipamento e também contribuindo com diversas sugestões para implementação de novos recursos.

Com o desenvolvimento do equipamento MONITEK9443, em conjunto com o programa TRANS4, foi possível começar a fornecer, este primeiro conjunto, para que fabricantes de transformadores iniciassem a automação de seus laboratórios de ensaios elétricos. Com a experiência positiva adquirida e o contato direto com estes fabricantes, foi possível desenvolver o restante dos instrumentos, completando a automação dos ensaios de rotina.

Atualmente, com a implementação, pela maioria dos fabricantes de transformadores da ISO 9001 (*International Organization for Standardization*), que visa estabelecer padrões mínimos de qualidade nos produtos fabricados, sendo necessário documentar e padronizar os ensaios de rotina e em vista do crescente aumento da produção, a tese proposta contribui efetivamente para este fim.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho tem a seguinte organização:

O capítulo 1 é uma introdução que descreve as motivações que levaram ao desenvolvimento do trabalho, além de apresentar os objetivos e as contribuições

O capítulo 2 apresenta o instrumento MONITEK9443 enfatizando-se a descrição do hardware, protocolo de comunicação, cálculo das principais grandezas elétricas e finalmente a calibração, exatidão e precisão do instrumento.

O capítulo 3 descreve o programa TRANS4 versão 4.83, detalhando os ensaios em vazio, em curto-circuito e ensaios complementares. São apresentados cálculos dos parâmetros de transformadores e análise dos ensaios realizados bem como várias amostras de relatórios impressos e análises estatísticas.

O capítulo 4 apresenta o instrumento MONITEK9610, seu princípio de funcionamento, calibração e precisão. Trata também do programa RTMED versão 2.21 que opera em conjunto com este instrumento.

O capítulo 5, da mesma forma que o capítulo 4, descreve o instrumento MONITEK9920 e o programa RHMED versão 3.05.

No capítulo 6 são apresentados: o programa ELEVA versão 2.45, que gerencia os ensaios de elevação de temperatura do óleo e enrolamentos; o programa SATURA versão 2.10, que permite determinar a curva de saturação de um núcleo de transformador e por último o método proposto para correção dos ensaios feitos em 60 para 50 [Hz].

No capítulo 7 apresentam-se conclusões a respeito deste trabalho, com sugestões para futuros desenvolvimentos em relação aos assuntos aqui abordados.

O sinótico, visto na figura 1.1, ilustra as ligações entre os instrumentos e os programas desenvolvidos na automação dos ensaios em transformadores.

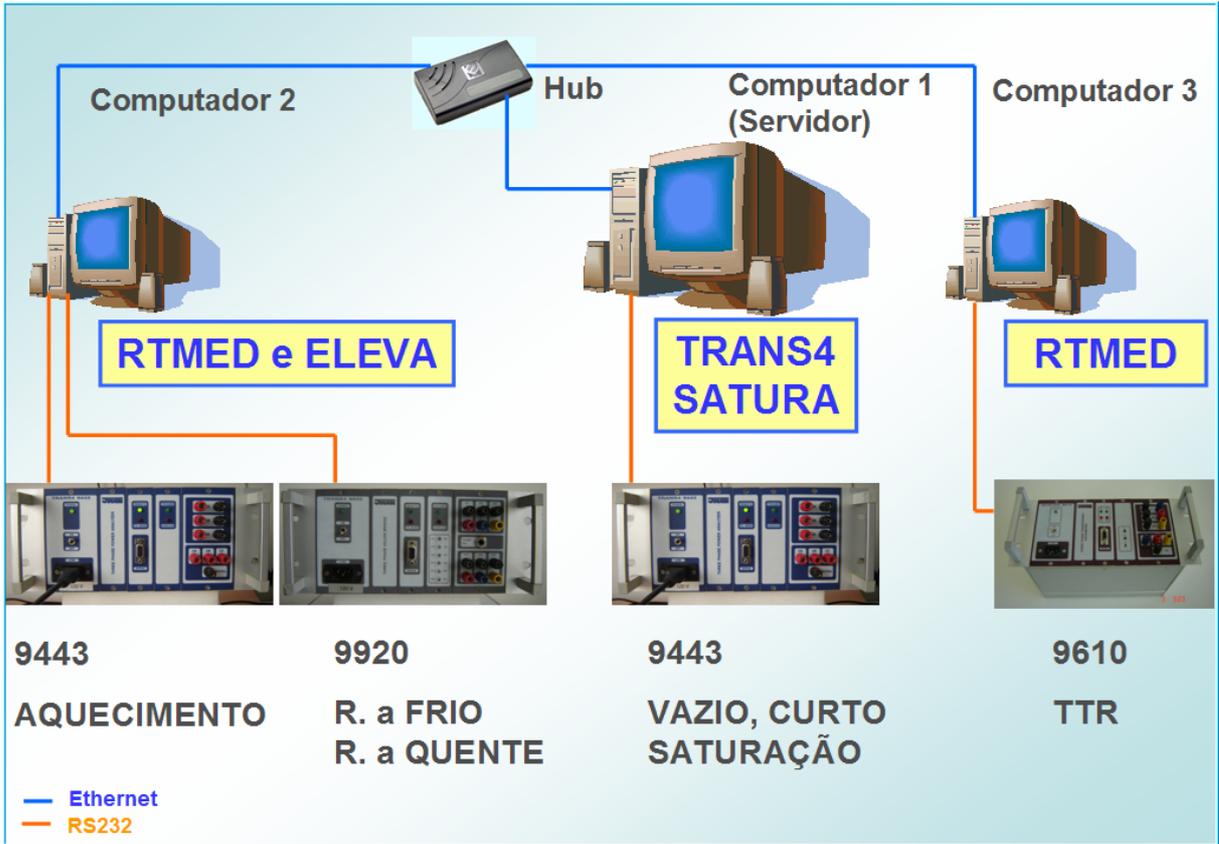


Figura 1.1: Ligações entre os instrumentos e seus respectivos programas.

CAPÍTULO 2 INSTRUMENTO MONITEK9443

O MONITEK9443 é um instrumento digital trifásico que permite medir as principais grandezas elétricas em um sistema elétrico de potência trifásico [7], [8], [9] e [10] e, foi desenvolvido para ser usado na automação dos seguintes ensaios em transformadores: ensaio em vazio, ensaio em curto, ensaio de elevação da temperatura e ensaio de levantamento de curva de saturação.

O *hardware* foi projetado para garantir precisão de leitura melhor que 0,5 [%] e pode ser dividido em uma parte digital e outra analógica. A parte digital contém os componentes típicos de um micro computador: CPU, memórias, circuitos lógicos e um conversor análogo digital que faz a ligação com a parte analógica que é composta por amplificadores operacionais e circuitos condicionadores para as tensões e correntes que se desejam medir.

2.1 DESCRIÇÃO DETALHADA DO HARDWARE

Neste instrumento o *hardware* desenvolvido foi distribuído em cinco placas de circuito impresso:

- Placa 1 - Fontes de alimentação com tensões e +5 [V], +15 [V] e -15 [V];
- Placa 2 - Unidade central de processamento, memórias e circuitos lógicos;
- Placa 3 - Circuito com *interface* de comunicação de dados;
- Placa 4 - Circuitos de conversão análogo-digital (aquisição de dados);
- Placa 5 - Circuitos condicionadores de sinais para as tensões e correntes;
- Placa 6 - Circuitos para medição de temperaturas e acionamento de relés.

Os circuitos implementados nas placas de 1 a 4, são básicos a qualquer instrumento de medição. Estas placas serão utilizadas também nos instrumentos MONITEK9610 e MONITEK9920 que serão tratados nos capítulos 4 e 5. Este conjunto de placas é definido como sistema básico.

2.1.1 PLACA 1 – FONTES DE ALIMENTAÇÃO

Como este instrumento apresenta um consumo de energia relativamente baixo, optou-se por implementar uma fonte de alimentação do tipo linear, que apesar de ficar mais pesada e esquentar mais, tem a vantagem de ser mais simples e gerar menos ruído.

É composta por um transformador com tensão primária de 127 [VAC] ou 220 [VAC] e tensões secundárias de 8 [V] e 16 [V]. Estas tensões depois de retificadas e filtradas, são estabilizadas por meio dos reguladores de tensão, resultando nas tensões contínuas de +5 [V], +15 [V] e -15 [V]. O consumo de corrente deste instrumento é de 500 [mA] em 5 [V] e 150 [mA] em cada fonte de 15 [V]. O transformador também tem a função de isolar galvanicamente o circuito da rede elétrica. No apêndice A encontra-se o esquema elétrico completo desta placa. As figuras 2.1 e 2.2 ilustram a placa montada.

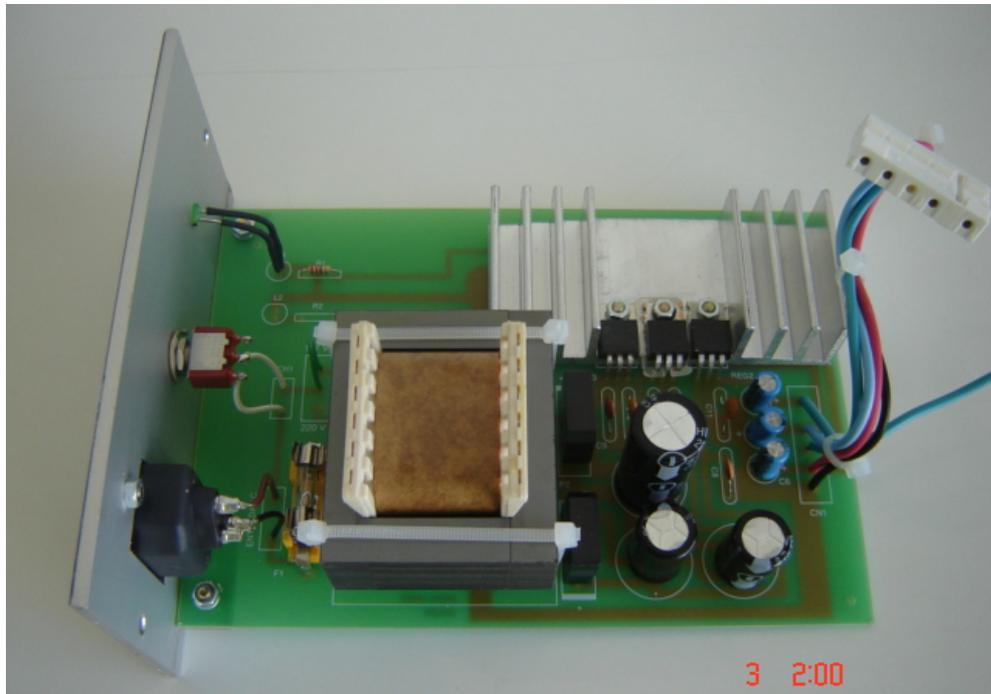


Figura 2.1: Foto da placa 1 com as fontes de alimentação.



Figura 2.2: Foto frontal da placa 1 com as fontes de alimentação.

2.1.2 PLACA 2 - CPU

Nesta placa está implementado o micro computador [11] [12] que é composto por uma unidade central de processamento (CPU) Z80B (ZILOG, USA), memória EPROM 27256 não volátil apenas de leitura, memória RAM 62256 de leitura e escrita e diversos circuitos lógicos digitais tipo TTL. Na memória EPROM está gravado o programa monitor, responsável pelo controle e operação de todo o *hardware* [14], este programa foi desenvolvido diretamente em linguagem *Assembly* [15]. A frequência escolhida para a operação da CPU Z80B é de 4,9152 [MHz], que também é dividida por 2, resultando em 2,4576 [MHz], esta última frequência é utilizada na placa 3 e placa 4. Também foi implementado um circuito do tipo *watchdog* que supervisiona a CPU e a tensão de +5 [V], se qualquer anomalia for detectada, um comando de *reset* é aplicado à CPU. A conexão entre esta placa e as placas 3 e 4 é feita por meio de um cabo de ligação multi-vias, com 50 fios. No apêndice A encontra-se o esquema elétrico completo desta placa que pode ser vista nas figuras 2.3 e 2.4.



Figura 2.3: Foto da placa da CPU.

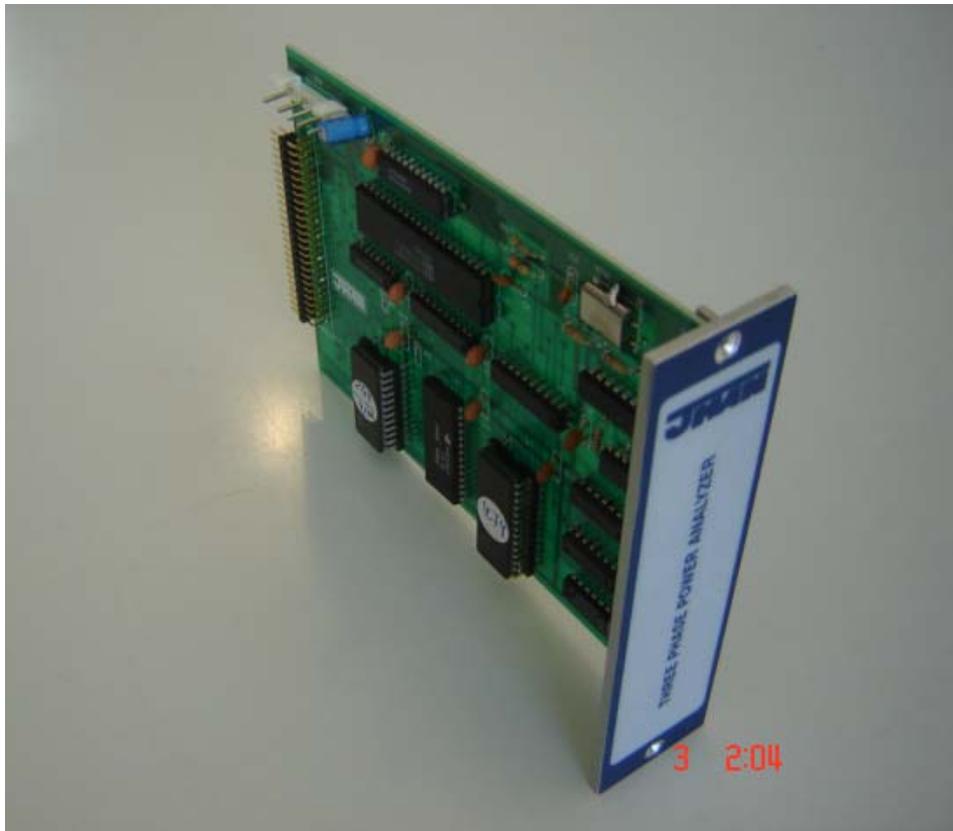


Figura 2.4: Foto frontal da placa da CPU.

2.1.3 PLACA 3 – COMUNICAÇÃO SERIAL

Nesta placa está implementado o circuito responsável pela comunicação serial, padrão RS232, entre o instrumento e um micro computador padrão IBM PC. É composta pelo circuito integrado 8251 (INTEL USA), acopladores ópticos TIL111 e diversos circuitos lógicos digitais TTL. O 8251 recebe um sinal de *clock* de 2,4576 [MHz] e por meio de divisão disponibiliza as velocidades de 38400, 19200 e 9600 *bauds/s*. A escolha da velocidade de comunicação a ser usada depende do comprimento do cabo serial e do ambiente de trabalho do instrumento.

Uma questão importante em termos de segurança, tanto para o instrumento quanto para o computador ligado pelo cabo serial, é a isolação galvânica entre os mesmos. O uso de acopladores ópticos, representa uma solução simples e eficiente, que garante isolação de até 2500 [VAC]. O esquema elétrico completo desta placa encontra-se no apêndice A. As figuras 2.5 e 2.6 mostram esta placa.

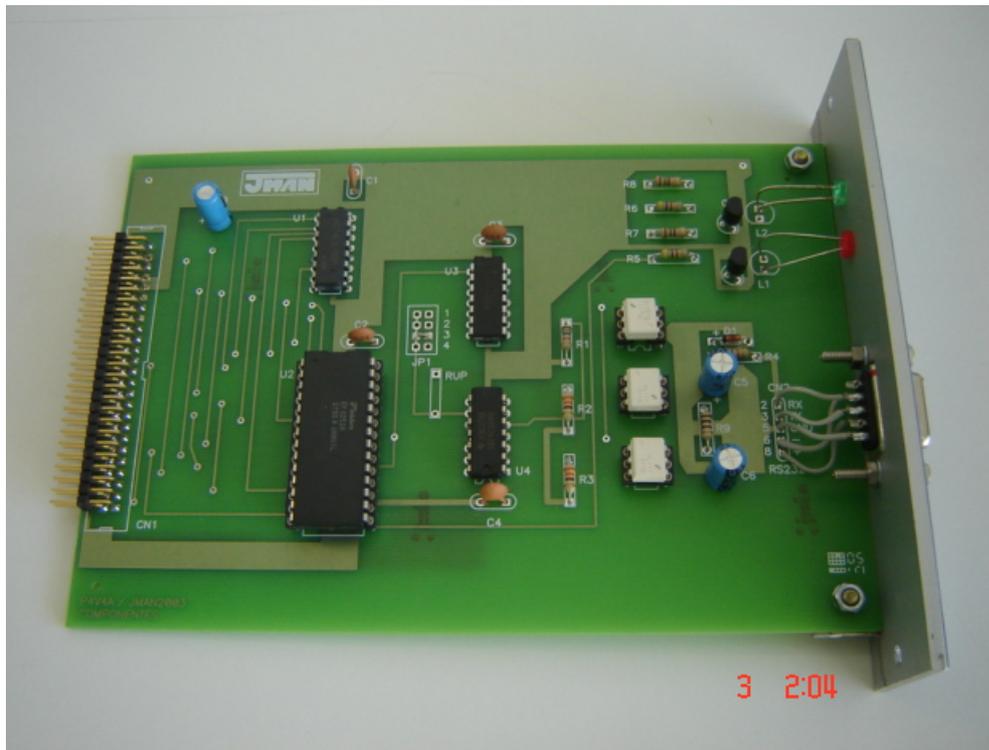


Figura 2.5: Foto da placa de comunicação serial.

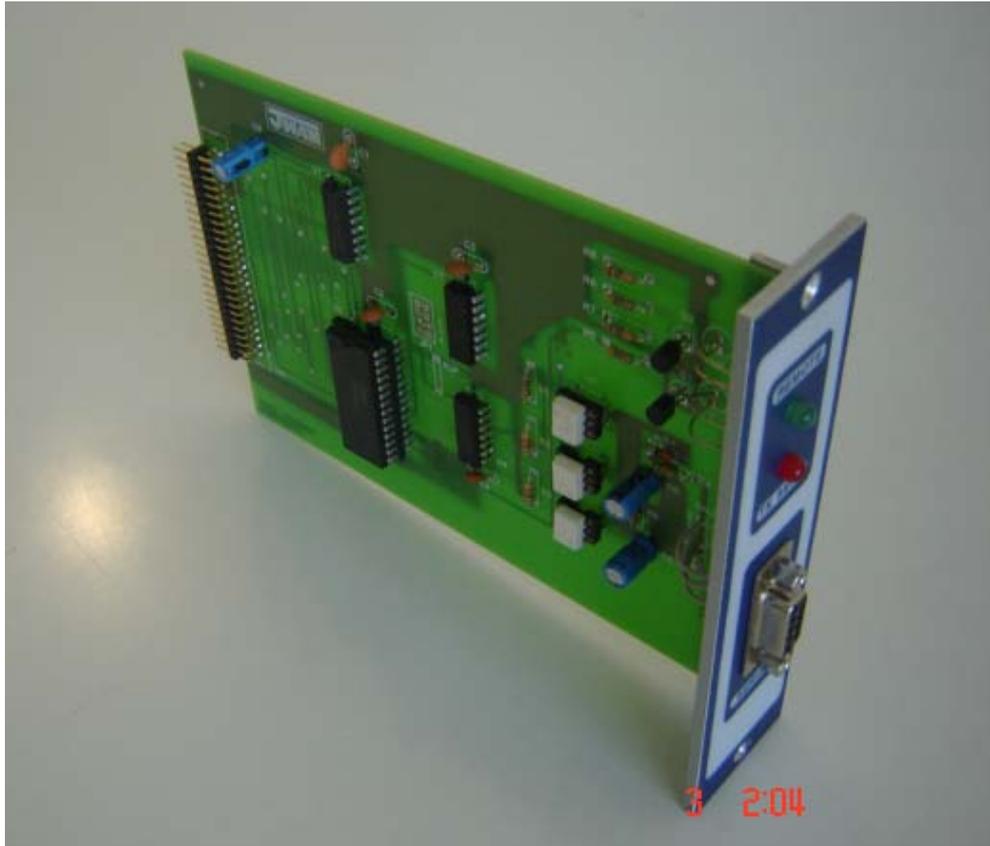


Figura 2.6: Foto frontal da placa de comunicação serial.

2.1.4 PLACA 4 – CONVERSÃO ANÁLOGO-DIGITAL (Aquisição de dados)

Nesta placa encontra-se o circuito de conversão análogo-digital composto por:

- Conversor AD7572AJN (ANALOG DEVICES USA);
- Multiplexador analógico AD7501 (ANALOG DEVICES USA);
- *Sample and Hold* LF 398 (NATIONAL USA);
- Diversos circuitos lógicos.

A técnica de aquisição de dados utilizada neste circuito [6] consiste na amostragem simultânea de seis canais de entrada com 128 pontos por ciclo em cada canal. Possui também, seis canais de entrada com amostragem não simultânea, que são utilizados para a medição de temperaturas no ensaio de elevação de temperatura descrito no Capítulo 6.

Características gerais:

- Seis canais de entrada simultâneos, faixa de $\pm 2,5$ [V] com amostragem de 128 pontos por ciclo;
- Seis canais de entrada não simultâneos, faixa de 0 a 5 [V] com amostragem de 128 pontos por ciclo;
- Conversor análogo-digital de 12 bits de resolução que garante precisão melhor que 0,10 [%].

Esta placa além da ligação com as placas 2 e 3, possui conectores ligando-a à placa analógica de condicionamento das tensões e correntes alternadas (placa 5) e também à placa de expansão para medição de temperatura utilizando termômetros do tipo PT100 (placa 6). No apêndice A encontra-se o esquema elétrico completo desta placa que pode ser vista nas figuras 2.7 e 2.8.

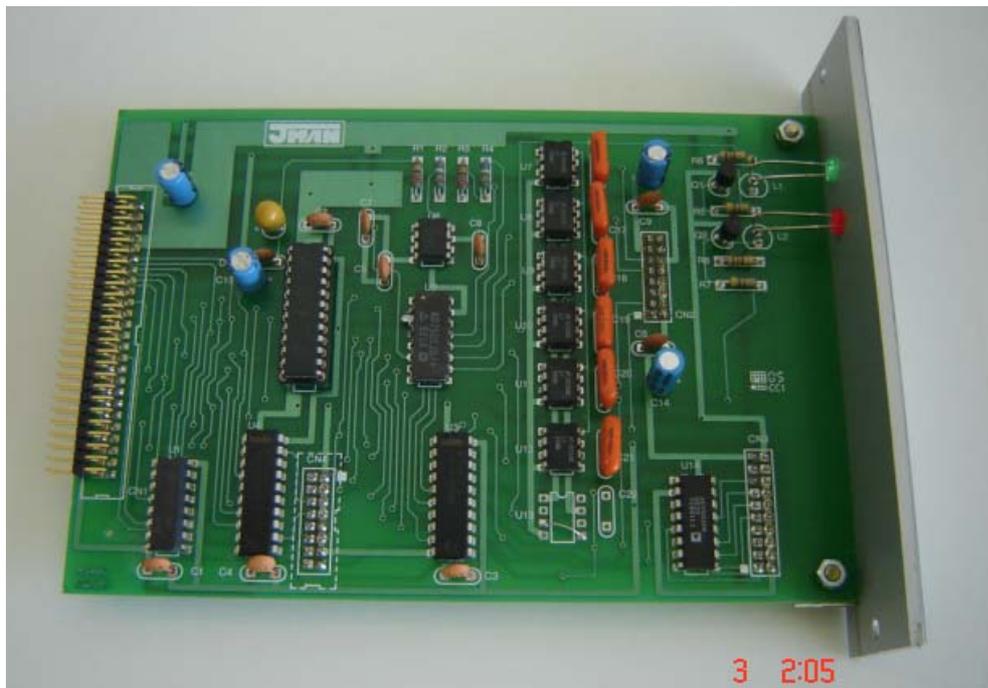


Figura 2.7: Foto da placa de aquisição de dados.

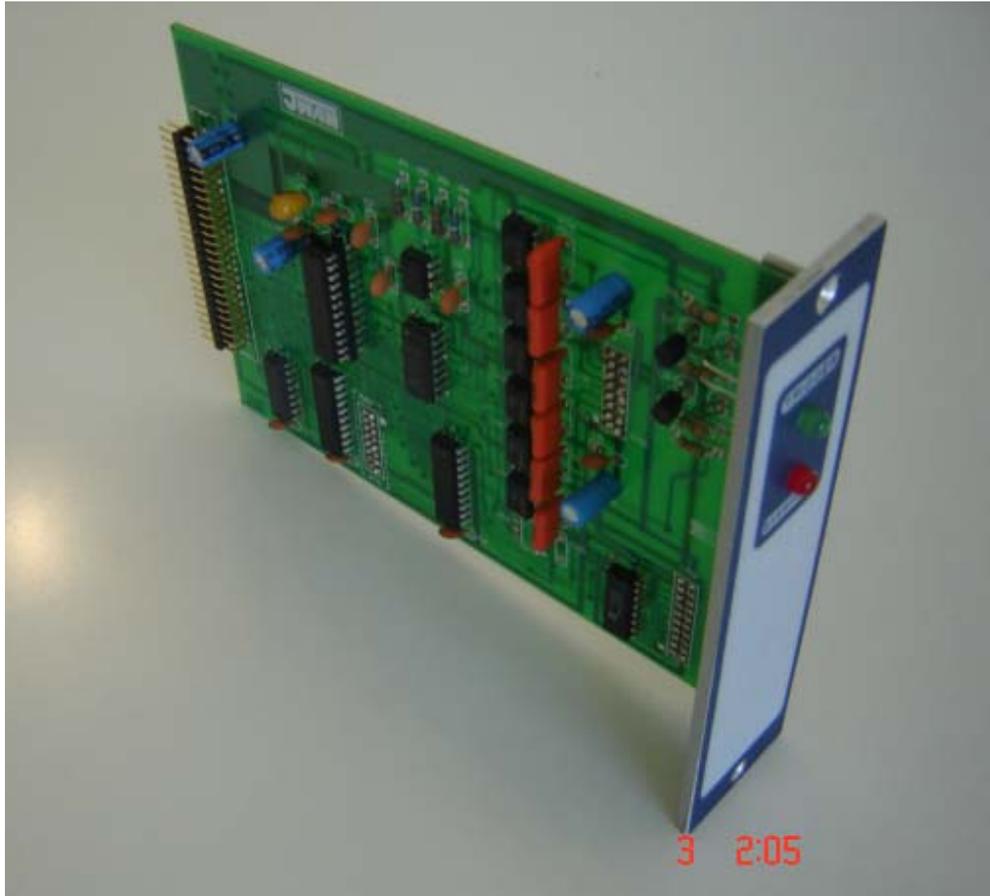


Figura 2.7: Vista frontal da placa de aquisição de dados.

2.1.5 PLACA 5 – CONDICIONAMENTO DOS SINAIS ELÉTRICOS

Esta placa é responsável pela adequação de tensões e correntes alternadas, respectivamente na faixa de 0 a 350 Volts e de 0 a 5 Amperes, com a faixa de tensões de entrada da placa 4 de conversão análogo-digital.

Como o método de medição escolhido foi o de medição por fase, existem três circuitos idênticos, um para cada entrada de tensão e três circuitos idênticos, um para cada entrada de corrente.

Cada circuito de tensão recebe na entrada uma tensão máxima alternada de 350 [V] e atenua-a para uma tensão alternada de 1,7 [V], mantendo a originalidade da onda de entrada em relação à forma de onda e ao defasamento angular. Este circuito foi implementado usando-se a divisão resistiva, ilustrada na Figura 2.8.

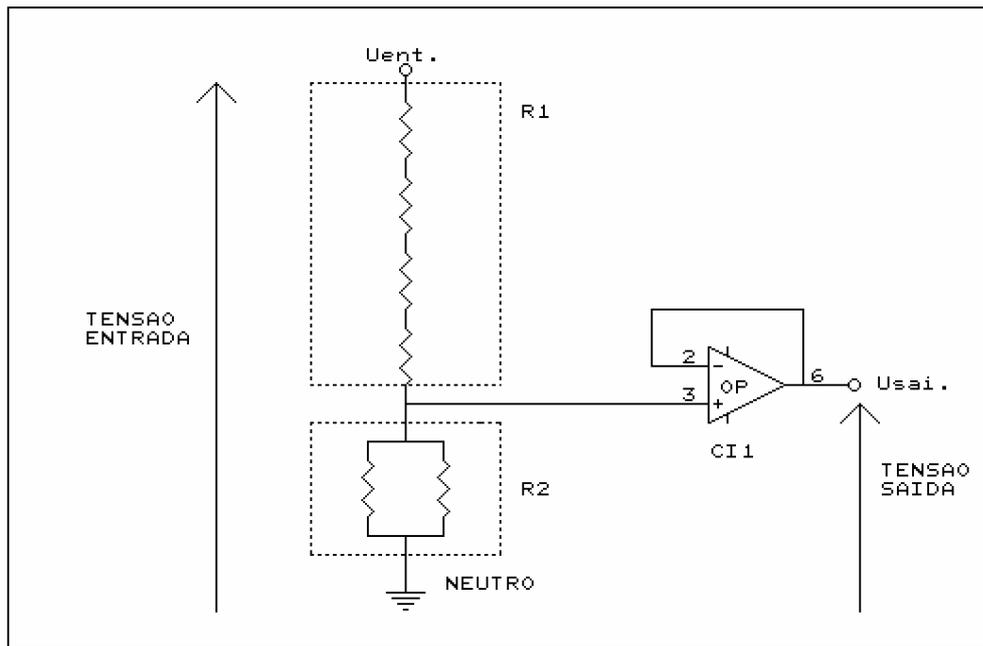


Figura 2.8: Circuito do divisor resistivo

A constante de divisão é obtida através da expressão:

$$K = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{U_{ENT.}}{U_{SAI.}} \quad (2.1)$$

Supondo, apenas para efeito de projeto, que a tensão de entrada seja senoidal, para um valor de tensão eficaz de entrada de 350 [V], têm-se um valor de pico de 495 [V], por outro lado, na entrada bipolar do conversor análogo digital, a tensão máxima é de 2,5 [V], cujo valor eficaz vale 1,77 [V]. Desta forma a constante de divisão para este circuito é:

$$K = \frac{350}{1,77} = 198$$

Todos os resistores são de filme metálico com 1 [%] de precisão, 0,25 [W] de dissipação e fator térmico de 25 [ppm].

Como não é recomendável aplicar mais de 150 [V] neste tipo de resistor, R_1 é composto por quatro resistores em série e R_2 é obtido pela associação de dois resistores em paralelo, apesar de neste a tensão ser baixa, o fato de ter o paralelo garante que, caso um deles fique em aberto, a tensão de entrada não seja aplicada integralmente ao amplificador operacional do circuito de entrada.

Este amplificador operacional, opera na configuração de ganho unitário, apresentando alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, fatores importantes em circuitos de divisores resistivos.

Os valores ôhmicos dos resistores também devem ser suficientemente grandes para que a potência dissipada nos mesmos não seja maior que 10 [%] da sua capacidade nominal, evitando o auto-aquecimento.

Adotando-se $R_2 = 2,06 \text{ [K}\Omega\text{]}$, composto pela associação de dois resistores de $4,12 \text{ [K}\Omega\text{]}$ em paralelo, o valor calculado de R_1 é de $405,8 \text{ [K}\Omega\text{]}$ portanto, cada um dos quatro resistores em série tem um valor teórico de $101,4 \text{ [K}\Omega\text{]}$. O valor comercial mais próximo é de $107 \text{ [K}\Omega\text{]}$, desta forma o valor de R_1 é de $428 \text{ [K}\Omega\text{]}$ e a potência dissipada:

$$Pd = \frac{U^2}{R} \quad (2.2)$$

$$Pd = \frac{350^2}{428} = 286 \text{ [mW]}$$

Como R_1 é formado por quatro resistores em série, cada um dissipa um quarto desta potência.

Para os canais de corrente é necessário converter a corrente máxima de entrada de 5 [A] para uma tensão alternada de $1,7 \text{ [V]}$ mantendo também a originalidade da onda conforme visto anteriormente.

Devido a uma série de vantagens, optou-se por usar um sensor de corrente que trabalha por efeito Hall, modelo LA 55-P (LEM SWISS).

As principais características do LA 55-P são:

- Corrente primária de 50 [A] ;
- Corrente secundária de 25 [mA] ;
- Resposta em frequência de 0 a 200 [kHz] ;
- Precisão típica de $0,15 \text{ [%]}$;
- Erro de Linearidade menor que $0,1 \text{ [%]}$.

Com este sensor tem o primário tipo janela, nesta foram enroladas 10 espiras alterando a corrente primária de 50 para 5 [A]. No secundário a corrente eficaz é de 25 [mA], cujo valor de pico vale 35,35 [mA], como a tensão de entrada do conversor análogo digital é de 2,5 [V] de pico, o resistor usado em série no secundário de sensor é calculado como:

$$R_M = \frac{U}{I_s} = \frac{2,5}{35,35 \times 10^{-3}} = 70,7 \text{ } [\Omega] \quad (2.3)$$

A figura 2.9 ilustra o princípio de funcionamento do sensor de efeito hall.

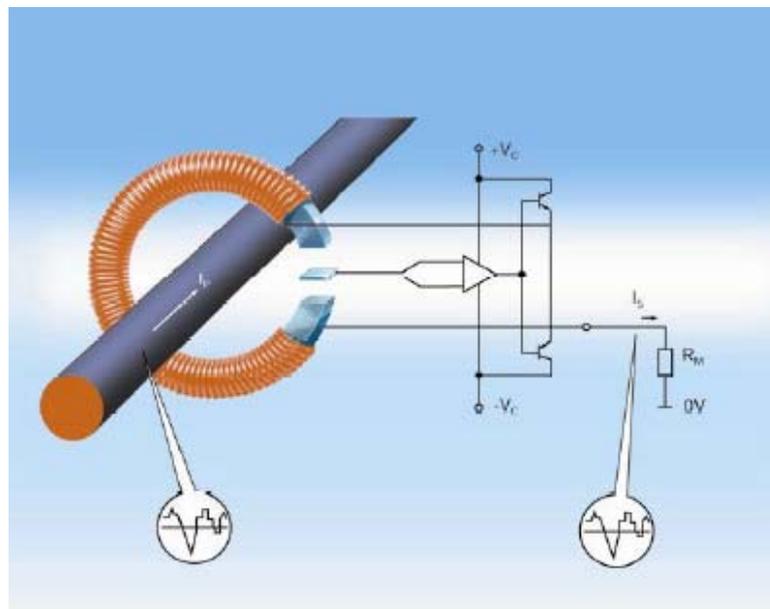


Figura 2.9: Princípio de funcionamento do sensor de efeito hall.

Acrescente-se ainda que com este tipo de sensor garante-se também total isolação galvânica entre entrada e saída; que neste caso é da ordem de 2500 [V].

Esta placa é completada por outros componentes como resistores, capacitores, conectores e também por uma painel, de fixação frontal, na qual estão instalados conectores do tipo borne.

Apesar de o processamento e os circuitos digitais serem altamente eficientes, precisos e flexíveis, as grandezas elétricas a serem medidas, desde a sua origem, são analógicas, por isso é muito importante que as mesmas, até serem convertidas para informações digitais, não sejam degradadas no que se refere à forma de onda e ao defasamento angular.

No Apêndice A encontra-se o diagrama elétrico completo desta placa e na figuras 2.10 e 2.11 fotos da mesma.

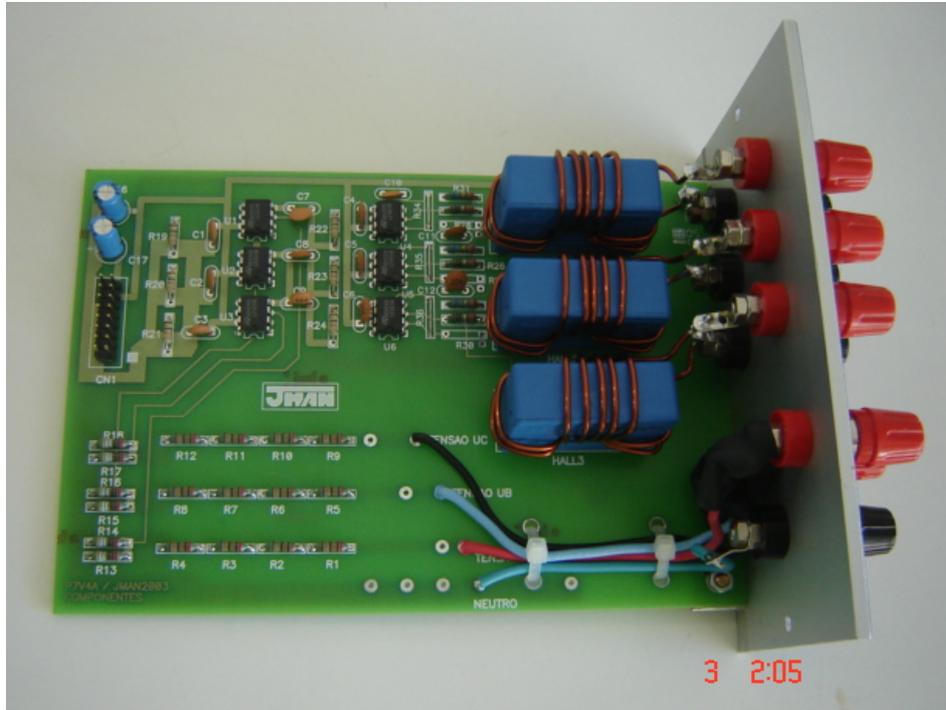


Figura 2.10: Foto da placa de condicionamento de sinais elétricos.

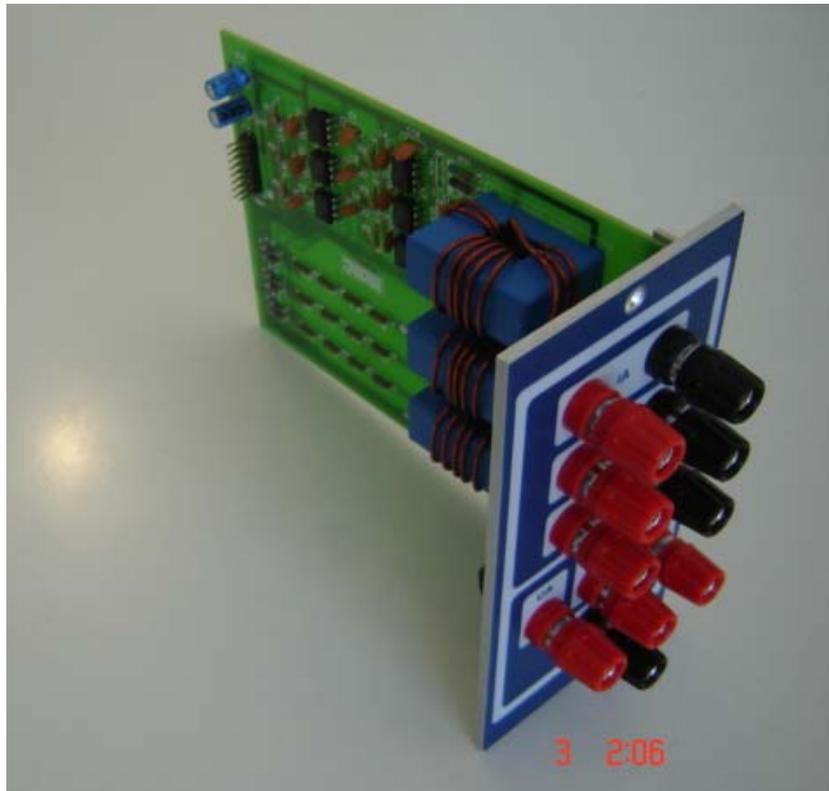


Figura 2.11: Foto frontal da placa de condicionamento de sinais elétricos.

2.1.7 PLACA 6 – MEDIÇÃO DE TEMPERATURAS E ACIONAMENTO DE RELÉS

Como pode ser visto no capítulo 6, também foi automatizado o ensaio de elevação de temperatura. Este ensaio consiste basicamente em manter constantes ao longo do tempo, o valor das perdas totais até que ocorra a estabilização térmica entre a temperatura do topo do óleo e a temperatura do ar ambiente.

A medição da potência ativa das perdas totais é feita com o sistema já descrito. Para garantir que este valor de potência ativa não se altere ao longo do tempo, foi implementado nesta placa um circuito eletrônico que permite ligar e desligar dois relés, do tipo normalmente aberto, que atuam no sentido de aumentar ou diminuir a tensão da fonte primária de energia, mantendo constante o valor da potência ativa de perdas desejada.

Para determinar a estabilização de temperatura são utilizados quatro termômetros do tipo PT100, um instalado no topo do óleo e três medindo a temperatura do ar ambiente de acordo com a norma NBR5380.

Estes termômetros têm escala de medição de 0 a 100 [°C] e saída em *loop* de corrente no padrão 4 a 20 [mA]. O circuito eletrônico para medição das correntes dos quatro termômetros também está implementado nesta placa. No apêndice A encontra-se o diagrama elétrico completo desta placa e a sua foto nas figuras 2.12 e 2.13.



Figura 2.12: Foto da placa de medição de temperatura e acionamento de relés.



Figura 2.13: Foto do termômetro PT100, sem o respectivo cabo de ligação.

2.1.6 BASTIDOR (CAIXA) DE MONTAGEM DAS PLACAS

As placas de circuito impresso descritas anteriormente, possuem todas as mesmas dimensões, e foram alojadas em um bastidor de alumínio padrão IMS. Nas figuras pode-se observar como todas as placas são interligadas e alojadas no bastidor de alumínio.



Figura 2.14: Foto da vista frontal das placas interligadas.

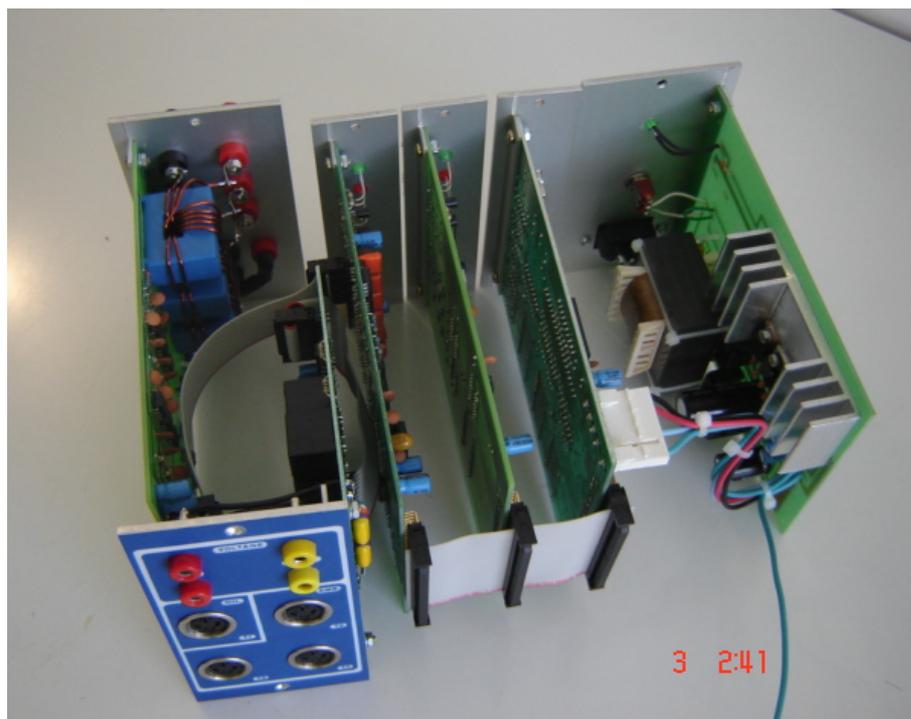


Figura 2.15: Foto da vista traseira das placas interligadas.



Figura 2.16: Foto da vista traseira do bastidor de alumínio.



Figura 2.17: Foto da vista frontal do bastidor de alumínio.

2.2 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO

A filosofia de automação adotada é de se ter um computador padrão PC, com programas específicos, solicitando as medidas necessárias aos diversos ensaios. O computador envia comandos, pela porta serial, para o instrumento a ser controlado, este por sua vez, interpreta-os, executa as tarefas pertinentes e devolve ao computador os resultados obtidos. A seguir serão descritos, os principais comandos de controle, enviados pelo computador e seus respectivos retornos.

2.2.1 COMANDO VR0

Consiste em escrever na porta serial o código **VR0**. Retorna 22 caracteres com a identificação do instrumento. Por exemplo:

MONITEK9443–4.74A-00112

(a) (b) (c)

onde:

- (a) modelo do instrumento;
- (b) versão do software interno (*firmware*);
- (c) número de série.

2.2.2 COMANDO KT0

Retorna seis constantes de calibração, ou seja, as constantes de calibração dos canais correspondentes às tensões **U_a**, **U_b** e **U_c** e das correntes **I_a**, **I_b** e **I_c**, no seguinte formato:

- | | |
|---------------------|--------------------------|
| 1) X.XXXXXX [CR LF] | cte. de U _a ; |
| 2) X.XXXXXX [CR LF] | cte. de U _b ; |
| 3) X.XXXXXX [CR LF] | cte. de U _c ; |
| 4) X.XXXXXX [CR LF] | cte. de I _a ; |
| 5) X.XXXXXX [CR LF] | cte. de I _b ; |
| 6) X.XXXXXX [CR LF] | cte. de I _c . |

onde X é um caractere de 0 a 9.

2.2.3 COMANDO ERO

Retorna seis constantes do ajuste de zero (*offset*) das tensões e correntes no formato:

- 1) **XXXX** [CR LF] ajuste de zero de Ua;
- 2) **XXXX** [CR LF] ajuste de zero de Ub;
- 3) **XXXX** [CR LF] ajuste de zero de Uc;
- 4) **XXXX** [CR LF] ajuste de zero de Ia;
- 5) **XXXX** [CR LF] ajuste de zero de Ib;
- 6) **XXXX** [CR LF] ajuste de zero de Ic.

2.2.3 COMANDO VX0

Como visto anteriormente, o conversor análogo-digital utilizado na placa 4 tem 12 bits de resolução, como o barramento de dados é de 8 *bits*, é necessário enviar o resultado da conversão em dois *bytes*, um denominado *byte* baixo (*Lbyte*), com os 8 *bits* inferiores e outro denominado *byte* alto (*Hbyte*), com os 4 *bits* superiores.

Este comando retorna os *bytes*, baixo e alto da conversão AD dos seis canais, com 128 pontos por canal, mais um *byte* de validação (*checksum*), no formato:

Ua_L, Ua_H, Ia_L, Ia_H, Ub_L, Ub_H, Ib_L, Ib_H, Uc_L, Uc_H, Ic_L, Ic_H,...

Os 12 *bytes* nesta linha, representam a conversão de um ponto em cada canal. Esta linha é repetida 128 vezes totalizando a leitura de 1537 *bytes* (12x128+*byte checksum*).

A seguir, será mostrado um algoritmo simplificado e um trecho de programa feito em Turbo Pascal, que exemplificam o uso destes comandos, tendo como objetivo armazenar em vetores a digitalização das ondas de tensão e corrente, amostradas com 128 pontos por ciclo.

Algoritmo simplificado:

- Configurar a comunicação serial como: 19200 *BAUDS*, 8, *ODD*,1;
- Usar o comando VR0 para identificar o instrumento e verificar se o mesmo ou a comunicação serial está funcionando;
- Usando os comandos KT0 e ER0, obter as constantes de calibração e de zero, uma única vez, no início do programa;
- Usando o comando VX0 ler os 1537 bytes da conversão AD e reconstruir os seis vetores reais, três das ondas de tensão e três das ondas de corrente.

```

File Edit Search Run Compile Debug Tools Options Window Help
[.] EXEMPLO.PAS 1-[1]
[variaveis]
i,l,h,soma,cksum : byte;
cal               : array[1..6] of real;
offset           : array[1..6] of integer;
vetint           : array[1..6,1..128] of integer;
vetor            : array[1..6,1..128] of real;

conf_serial(0,19200,8,odd,1); {configura a serial}

envia('KT0');                { obtem as const. de calibracao   }
for i:=1 to 6 do             { envia um comando pela serial }
begin
  call[i]:=le_real;          { le 8 caracteres da serial -> real }
end;

envia('ER0');                { obtem as const. de offset   }
for i:=1 to 6 do
begin
  offset[i]:=le_int;        { le 4 caracteres da serial -> inteiro }
end;

repeat                       { obtem o vetor de pontos lidos }
  soma:=0;
  envia('VX0');
  for i:=1 to 128 do
  begin
    for canal:=1 to 6 do
    begin
      l:=le_byte;           { le um byte da serial }
      h:=le_byte;
      vetint[canal,i]:=(l*256+h)-offset[canal];
      soma:=soma+l*h;
    end;
  end;
  cksum:=le_byte;
until soma=cksum;

for canal:=1 to 6 do         { montagem do vetor real }
begin
  for i:=1 to 128 do
  begin
    vetor[canal,i]:=(vetint[canal,i]/4096*5)*cal[canal];
  end;
end;
24:63
F1 Help F2 Save F3 Open Alt+F9 Compile F9 Make Alt+F10 Local menu

```

Figura 2.18: Parte do programa com os comandos de comunicação implementados.

2.3 CÁLCULO DAS PRINCIPAIS GRANDEZAS ELÉTRICAS

2.3.1 CÁLCULO DAS TENSÕES E CORRENTES EFICAZES

Calcula-se o valor eficaz de uma onda periódica por (2.4).

$$U_{EF.} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \mu(t)^2 . dt} \quad (2.4)$$

A integração da onda $\mu(t)$ no período T , foi aproximada e discretizada com 128 pontos, que estão armazenados no vetor correspondente, desta forma a tensão eficaz pode ser calculada pela aproximação:

$$U_{EF.} = \sqrt{\frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} U_{[i]}^2} \quad (2.5)$$

Analogamente, para a corrente eficaz:

$$I_{EF.} = \sqrt{\frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} I_{[i]}^2} \quad (2.6)$$

2.3.2 CÁLCULO DAS POTÊNCIAS ATIVA, REATIVA, APARENTE E FATOR DE POTÊNCIA

Calcula-se a potência ativa média em um período por (2.7).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \mu(t) . i(t) . dt \quad (2.7)$$

Que também pode ser aproximada pela discretização de $\mu(t)$ e $i(t)$, com 128 pontos por ciclo, resultando na expressão:

$$P = \frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} U_{[i]} \cdot I_{[i]} \quad (2.8)$$

Para o cálculo da potência reativa foi usada a mesma definição de produto instantâneo da tensão pela corrente, só que com a corrente defasada de 90 graus que ao ser discretizada com 128 pontos por período, resulta na expressão:

$$Q = \frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} U_{[i]} \cdot I_{[i+32]} \quad (2.9)$$

Portanto as grandezas elétricas: tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa e potência reativa são calculadas diretamente, ou seja, usando-se os vetores dos pontos lidos das ondas de tensão e corrente. As demais grandezas elétricas potência aparente e fator de potência são calculadas indiretamente pelas expressões:

Potência aparente:

$$S = U_{EF.} \cdot I_{EF.} \quad (2.10)$$

Fator de potência:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.11)$$

2.3.3 CÁLCULO DA TENSÃO DE VALOR MÉDIO

De acordo com a norma NBR 3580, o ensaio em vazio deve ser feito aplicando-se aos enrolamentos a tensão nominal de valor médio.

Calcula-se o valor médio por (2.12).

$$U_{MED.} = \frac{1}{T} \int_0^T |\mu(t)| \cdot dt \quad (2.12)$$

Que ao ser discretizada com 128 pontos por período, resulta na expressão:

$$U_{MED.} = \frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} |U_{[i]}| \quad (2.13)$$

2.3.4 CÁLCULO DO FATOR DE FORMA

Calcula-se o fator de forma por (2.14).

$$FF = \frac{U_{EF.}}{U_{MED.}} \quad (2.14)$$

2.3.6 CÁLCULO DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS POR FASE E TRIFÁSICAS

As demais grandezas elétricas são calculadas de acordo com as expressões:

$$U_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N (Ua_{[l]})^2}; \quad U_B = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N (Ub_{[l]})^2}; \quad U_C = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N (Uc_{[l]})^2} \quad (2.15)$$

$$U_{AB} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N (Ua_{[l]} - Ub_{[l]})^2}; \quad U_{BC} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N (Ub_{[l]} - Uc_{[l]})^2}; \quad U_{CA} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N (Uc_{[l]} - Ua_{[l]})^2} \quad (2.16)$$

$$P_A = \frac{I}{N} \sum_{l=1}^N Ua_{[l]} \cdot Ia_{[l]}; \quad P_B = \frac{I}{N} \sum_{l=1}^N Ub_{[l]} \cdot Ib_{[l]}; \quad P_C = \frac{I}{N} \sum_{l=1}^N Uc_{[l]} \cdot Ic_{[l]} \quad (2.17)$$

$$S_A = U_A \cdot I_A; \quad S_B = U_B \cdot I_B; \quad S_C = U_C \cdot I_C \quad (2.18)$$

$$FP_A = \frac{P_A}{S_A}; \quad FP_B = \frac{P_B}{S_B}; \quad FP_C = \frac{P_C}{S_C} \quad (2.19)$$

$$U_{3\phi} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}; \quad I_{3\phi} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}; \quad P_{3\phi} = P_A + P_B + P_C \quad (2.20)$$

$$Q_{3\phi} = Q_A + Q_B + Q_C; \quad S_{3\phi} = \sqrt{(P_{3\phi})^2 + (Q_{3\phi})^2}; \quad FP_{3\phi} = \frac{P_{3\phi}}{S_{3\phi}} \quad (2.21)$$

onde N é igual a 128 (número de pontos aquisitados por ciclo).

2.4 CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO E PRECISÃO OBTIDA

Todo o instrumento de medição, mesmo digital, possui circuitos analógicos de entrada. Como foi descrito no item 2.1.5, o condicionamento das tensões e correntes analógicas é feito por meio de resistores e circuitos operacionais. Até mesmo o sensor de efeito *hall*, bastante preciso, apresenta uma tolerância de mais ou menos 0,15 [%] no seu valor nominal. Estes componentes são calculados em função dos valores máximos de tensão e corrente que se deseja medir, cuja precisão fica dependente das tolerâncias nos valores comerciais desses componentes.

Em alguns instrumentos de medição são utilizados resistores variáveis, conhecidos como *trimpots*, que facilitam o ajuste no processo de calibração, entretanto, a longo prazo, em instrumentos industriais, estes *trimpots* são os principais responsáveis pela alteração na precisão dos instrumentos, pois o valor ajustado, pode com o tempo, sofrer alterações significativas, devido a mau contato, variações de temperatura, umidade e vibrações.

Nos instrumentos descritos neste trabalho, não são empregados componentes de ajuste, a calibração é feita por meio de constantes de calibração, para cada canal, que são gravadas na memória do próprio instrumento. Estas constantes são determinadas para duas condições: sem sinal nas entradas (zero) e grandeza máxima nas entradas (*spam*).

Este processo de calibração exige o uso de um padrão de calibração estável e preciso, uma vez que a precisão do instrumento desenvolvido é transferida pela comparação com o padrão utilizado. A precisão do padrão deve ser, no mínimo, dez vezes maior que a precisão desejada para o instrumento a ser calibrado.

Para atestar a precisão final do instrumento calibrado de acordo com o processo descrito, são realizadas calibrações para valores intermediários de tensão, corrente e potência ativa. Como este instrumento é utilizado para realizar o ensaio em vazio e o ensaio em curto-circuito, cujos fatores de potência típicos são respectivamente 0,2 e 0,5 indutivo, a calibração de potência ativa deve ser feita para estes dois valores.

O erro absoluto para este instrumento deve ser inferior a 0,15 [%] para as tensões, 0,25 [%] para as corrente e 0,5 [%] para a potência ativa.

2.4.1 NORMAS E PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA A CALIBRAÇÃO

- Para cada ponto foram feitas três leituras, a calibração foi realizada pelo método da comparação. A incerteza expressa é baseada em uma incerteza combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k=2$, para um nível de confiabilidade de 95% [16];
- A temperatura ambiente do local de calibração foi mantida em: $25 [^{\circ}\text{C}] \pm 3 [^{\circ}\text{C}]$ e a umidade relativa do ar menor que 60 [%];
- Procedimento específico de calibração proc2002_jman9443_01;
- Critérios específicos para calibração de instrumentos analógicos e digitais de medição na área de eletricidade [17];
- Guia para a expressão da incerteza de medição [5] [16].

O padrão utilizado neste processo de calibração é o modelo 5500 A (FLUKE USA), que possui certificados de calibração rastreados à *Deutscher kalibrierdienst* (DKD) e à Rede Brasileira de Calibração (RBC).

A figura 2.18 ilustra a foto deste padrão e a Tabela 2.1 apresenta a planilha de calibração.



Figura 2.19: Calibrador Fluke modelo 5500A.

Tabela 2.1: Planilha de calibração do MONITEK9443.

Frequência: 60 [Hz]		Canal: UA (Vrms)			Canal: UB (Vrms)			Canal: UC (Vrms)		
	Tensão real [Vrms]	Tensão	Desvio	Incerteza total (+/-)	Tensão	Desvio	Incerteza total (+/-)	Tensão	Desvio	Incerteza total (+/-)
	100,00	100,02	0,02	0,05	100,05	0,05	0,06	100,04	0,04	0,06
	150,00	150,04	0,04	0,08	150,03	0,03	0,08	150,05	0,05	0,08
	200,00	200,05	0,05	0,11	200,06	0,06	0,11	200,05	0,05	0,10
	250,00	250,06	0,06	0,13	250,07	0,07	0,14	250,05	0,05	0,13
	300,00	300,08	0,08	0,15	300,07	0,07	0,16	300,08	0,08	0,15
	350,00	350,04	0,04	0,18	350,04	0,04	0,18	350,05	0,05	0,18

Frequência: 60 [Hz]		Canal: IA (Arms)			Canal: IB (Arms)			Canal: IC (Arms)		
	Corrente Real [Arms]	Corrente	Desvio	Incerteza total (+/-)	Corrente	Desvio	Incerteza total (+/-)	Corrente	Desvio	Incerteza total (+/-)
	0,5000	0,4992	-0,0008	0,0004	0,4993	-0,0007	0,0004	0,4994	-0,0006	0,0004
	1,0000	0,9992	-0,0008	0,0007	0,9991	-0,0009	0,0006	0,9991	-0,0009	0,0007
	2,0000	1,9994	-0,0006	0,0013	1,9996	-0,0004	0,0013	1,9997	-0,0003	0,0011
	3,0000	3,0002	0,0002	0,0016	3,0003	0,0003	0,0016	3,0005	0,0005	0,0016
	4,0000	4,0007	0,0007	0,0021	4,0008	0,0008	0,0020	4,0009	0,0009	0,0020
	5,0000	5,0016	0,0016	0,0025	5,0017	0,0017	0,0025	5,0016	0,0016	0,0026

Frequência: 60 [Hz]		Canal: A (W)			Canal: B (W)			Canal: C (W)		
Fp=0,2 (ind.)	Potência real [W]	P. ativa	Desvio	Incerteza total (+/-)	P. ativa	Desvio	Incerteza total (+/-)	P. ativa	Desvio	Incerteza total (+/-)
100Vx0,5Ax0,2	10,000	10,00	0,00	0,05	10,00	0,00	0,10	10,01	0,01	0,04
150Vx1Ax0,2	30,000	30,00	0,00	0,09	29,99	-0,01	0,11	29,97	-0,03	0,10
200Vx2Ax0,2	80,000	79,96	-0,04	0,27	79,98	-0,02	0,33	79,97	-0,03	0,20
250Vx3Ax0,2	150,00	149,9	-0,08	0,5	150,1	0,06	0,4	150,1	0,07	0,4
300Vx4Ax0,2	240,00	240,1	0,12	0,6	240,1	0,13	0,6	240,3	0,25	0,6
350Vx5Ax0,2	350,00	350,0	0,04	0,9	350,1	0,14	0,9	350,2	0,23	0,9

Frequência: 60 [Hz]		Canal: A (W)			Canal: B (W)			Canal: C (W)		
Fp=0,5 (ind.)	Potência real [W]	P. ativa	Desvio	Incerteza total (+/-)	P. ativa	Desvio	Incerteza total (+/-)	P. ativa	Desvio	Incerteza total (+/-)
100Vx0,5Ax0,5	25,000	24,96	-0,04	0,08	24,96	-0,04	0,07	24,95	-0,05	0,06
150Vx1Ax0,5	75,000	74,89	-0,11	0,20	74,98	-0,02	0,19	74,93	-0,07	0,23
200Vx2Ax0,5	200,00	199,8	-0,16	0,5	199,9	-0,13	0,5	199,9	-0,08	0,5
250Vx3Ax0,5	375,00	375,0	-0,04	0,9	374,9	-0,05	1,0	375,0	0,00	0,9
300Vx4Ax0,5	600,00	599,9	-0,14	1,6	600,0	-0,01	1,5	600,1	0,06	1,5
350Vx5Ax0,5	875,00	874,8	-0,18	2,2	874,9	-0,15	2,2	874,9	-0,09	2,2

CAPÍTULO3 PROGRAMA TRANS4.EXE

O programa TRANS4 é o *software* principal e central dos vários desenvolvidos neste trabalho. Precisa ser instalado em um micro computador padrão PC, com CPU superior ou igual a Pentium I (Intel USA), disco rígido com pelo menos 10 *Gbytes* e demais acessórios padrão.

Através dele são feitos ou integrados os ensaios elétricos de rotina exigidos por norma. Permite fazer o cadastro do transformador a ser ensaiado, o ensaio em vazio, o ensaio em curto-circuito, lançamento de outros ensaios, cálculos diversos, relatórios impressos, análises estatísticas, análises críticas, etc. Este programa, assim como os demais, foi escrito usando-se a linguagem de programação Turbo Pascal (BORLAND USA).

O menu principal que é a tela inicial do programa, como pode ser visualizado na figura 3.1, contém as seguintes funções:

- Cadastro do Transformador;
- Ensaio em Vazio;
- Ensaio em Curto-circuito;
- Outros Ensaios;
- Executar Cálculos;
- Relatório Impresso;
- Ferramentas Gerais;
- Configuração Geral;
- Fim (Sair).

A seguir serão detalhadas as funções citadas.



Figura 3.1: Tela Principal do programa Trans4.

3.1 CADASTRO DO TRANSFORMADOR

Esta função permite cadastrar transformadores no programa de forma rápida. O cadastro pode ser individual ou seqüencial. Ao se entrar nesta opção, se for a primeira vez depois que se entrou no programa, o mesmo verifica se a data do computador é a correta, caso seja, em seguida são mostrados os nomes dos arquivos de cadastros já existentes e é solicitado que se digite o nome ou número que identifica o transformador a ser cadastrado. O primeiro item que é solicitado no cadastro do transformador é o nome do modelo (ou projeto). Ao ser digitado um nome para o modelo, se for a primeira vez que esse nome é digitado, é criado um arquivo de dados com as características desse cadastro (Classe de tensão, potência, taps, conexão, etc..). Caso esse modelo já exista, as suas características serão automaticamente inseridas na tela, dispensando a digitação do restante do cadastro.

Se por acaso não se desejar criar nenhum modelo, este campo deverá ser deixado em branco. Caso o modelo ainda não exista, na seqüência será necessário que se digite, confirme ou selecione, conforme o caso, os seguintes dados:

- Fabricante;
- Tipo construtivo;
- Data de fabricação;
- Tipo de instalação (aéreo convencional, aéreo autoprotegido², subterrâneo, média força, força, seco e auto-transformador);
- Número ou nome de série do transformador;
- Classe de tensão (15, 25, 36 [Kv] ou outra);
- Tipo de ligação (monofásico, bifásico, trifásico, mono religável, trifásico religável);
- Polaridade ou defasamento angular (subtrativa, aditiva, Dy1, Dy7, Dy11, Dy5, Dz0, Dz6, Yy0, Yy6, Yz1, Yz5, Yz11, Dd0, Yd1);
- Material do fio condutor das bobinas (AT e BT cobre, AT e BT alumínio, AT Cobre e BT alumínio, AT alumínio e BT cobre);
- Freqüência (60 ou 50 [Hz]);
- Potência aparente;
- Tensões da AT;
- Tensões da BT;
- Estado do transformador (novo, usado ou reformado);
- Temperatura de referência (75, 85, 115 ou outra em graus celsius);
- Massa total;
- Norma a ser atendida (NBR5440/99, NBR5440/87, perdas garantidas ou outra norma);
- Nome do lote, se existir;
- Nome do comprador ou companhia de distribuição;
- Número do patrimônio se existir.

No cadastro seqüencial também é solicitado a quantidade de transformadores e o número de série do primeiro. Esta opção é utilizada apenas para lotes de transformadores idênticos. A figura 3.2 ilustra a tela final do cadastro.

² Para transformadores do tipo autoprotegido é solicitado o valor de perdas, em watts, do disjuntor.

NÚMERO DO TRANSFORMADOR : 398780A	CLASSE 15 [Kv]
AT:Delta BT:Estrela DY1	Modelo: NADTQP11
Trans4 Trans4 Trans4 Trans4 Trans4 Trans4 Trans4 Trans4 Trans4	
FABRICANTE ou MARCA: INDÚSTRIA	
DATA de FABRICAÇÃO : 08/06/2006	CONDUTOR : COBRE
FREQUÊNCIA [HZ]: 60	TEMP. REF. : 75 [°C]
POTÊNCIA [KVA]: 45.0	
MAIOR TAP da ALTA TENSÃO [V]: 13800	
MENOR TAP da ALTA TENSÃO [V]: 13800	
TENSÕES DA BAIXA TENSÃO [V]: 220/127	
ALTA TENSÃO LIGADA [V]: 13800	
BAIXA TENSÃO NOMINAL [V]: 220	
ESTADO DO TRANSFORMADOR : NOVO	
TIPO INSTALAÇÃO: AÉREO AUTOPROTEGIDO-RDI	Pdj. [W]: 52.0
MASSA [Kg] : 100	
VALORES MÁXIMOS DE PERDAS DE ACORDO COM:	
	NBR 5440/99
	NBR 5440/87
	PERDAS GARANTIDAS
	SEM NORMA
ESC Sair	Digite o nome do CLIENTE ou deixe em BRANCO
	+↑↓ Move

Figura 3.2: Tela de cadastro do transformador.

3.2 ENSAIO EM VAZIO

Para uma onda de tensão senoidal, a tensão de valor médio vale 0,9 da tensão eficaz (*true RMS*). No ensaio em vazio, a tensão de valor médio, apresentada pelo programa TRANS4, é multiplicada por 1,11. Desta forma se a onda de tensão for senoidal, na tela do ensaio em vazio, os valores de tensão de valor médio e tensão eficaz são iguais.

Esta função permite gerenciar totalmente a execução do ensaio em vazio conforme recomendado [18], cujo objetivo é aplicar tensão nominal de valor médio [2] aos enrolamentos e medir nestas condições a potência ativa em vazio³ (P_o), a corrente em vazio (I_o) a tensão eficaz, a tensão de valor médio (U_o) o fator de potência o fator de forma e a frequência. Este programa lê estas grandezas elétricas do MONITEK9443 descrito no capítulo 2, através da *interface* serial. Os resultados do ensaio são armazenados em arquivo de dados.

³ A potência ativa em vazio também é conhecida como *perdas em vazio* ou *perdas no ferro*.

3.2.1 EXECUÇÃO DO ENSAIO EM VAZIO

O ensaio em vazio é iniciado escolhendo-se um transformador já cadastrado e selecionando as relações RTP e RTC, previamente cadastradas no programa, compatíveis com as tensões e correntes esperadas para o ensaio. Como os transformadores na tensão nominal já apresentam algum grau de saturação, uma pequena variação na tensão pode implicar em variações significativas na potência ativa e na corrente em vazio, por isso é obrigatório aplicar exatamente a tensão nominal de valor médio, ou seja se esta for 220 [V] deve-se aplicar 220,0 [V]. Na prática a tensão de ensaio proveniente de um variador de tensão ou mesmo de um gerador apresenta oscilações, o que dificulta a aplicação da tensão exata e aumenta o tempo do ensaio. Para contornar este problema, optou-se por fazer este ensaio em duas partes, descritas a seguir:

- Primeira parte – Ajusta-se a tensão abaixo da nominal em no máximo 2 [%]⁴, nestas condições são feitas 4 leituras.
- Segunda parte – Ajusta-se a tensão acima da nominal em no máximo 2 [%]⁵, nestas condições são feitas mais 4 leituras.

Ao final do ensaio existem 4 leituras de grandezas elétricas abaixo da tensão nominal e 4 acima. Usando-se o método de interpolação por mínimos quadrados com grau 2 [19], obtêm-se os valores exatos de corrente e potência ativa para a tensão nominal.

As figuras 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 ilustram respectivamente o início do ensaio, a primeira parte, com a tensão na janela de 2 [%] abaixo da nominal, a segunda parte, com a tensão na janela de 2 [%] acima da nominal, a tensão sendo diminuída para terminar o ensaio com segurança e um resumo do ensaio em vazio.

⁴ Por exemplo tensão na faixa de 216 a 220 [V].

⁵ Por exemplo tensão na faixa de 220 a 224 [V].

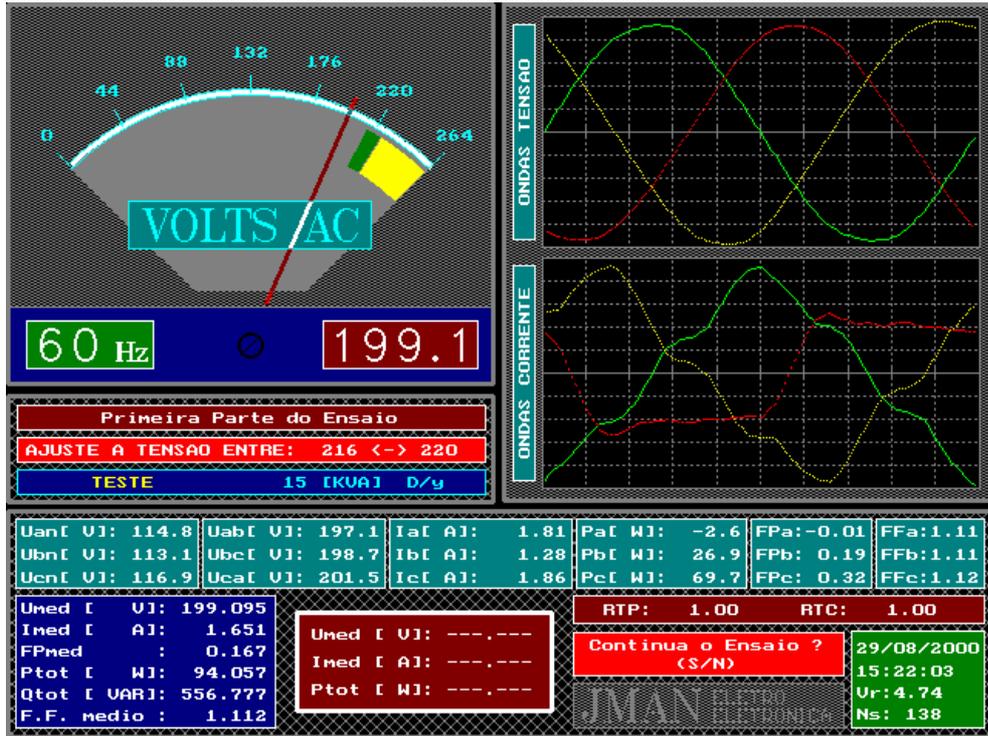


Figura 3.3: Início do ensaio em vazio.

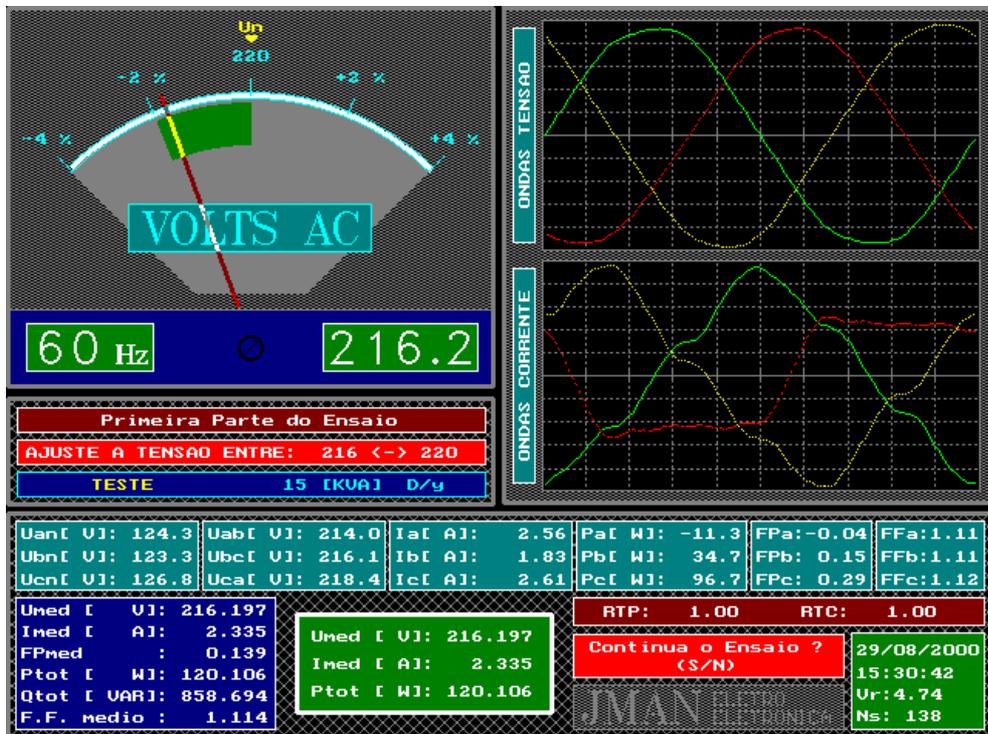


Figura 3.4: Primeira parte do ensaio em vazio.

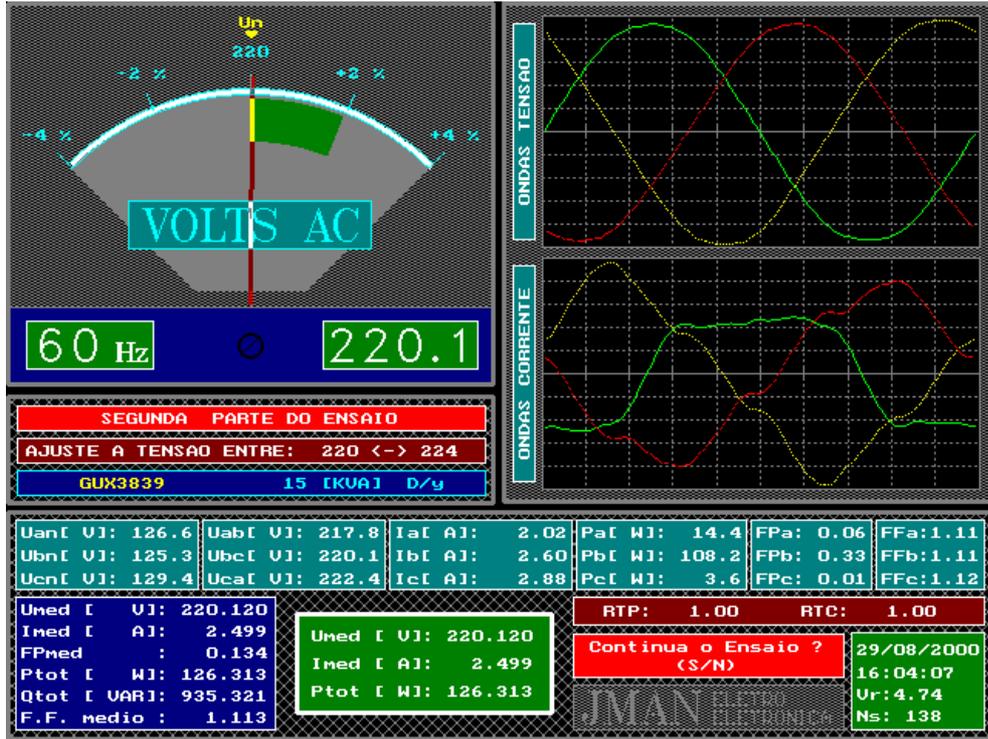


Figura 3.5: Segunda parte do ensaio em vazio.

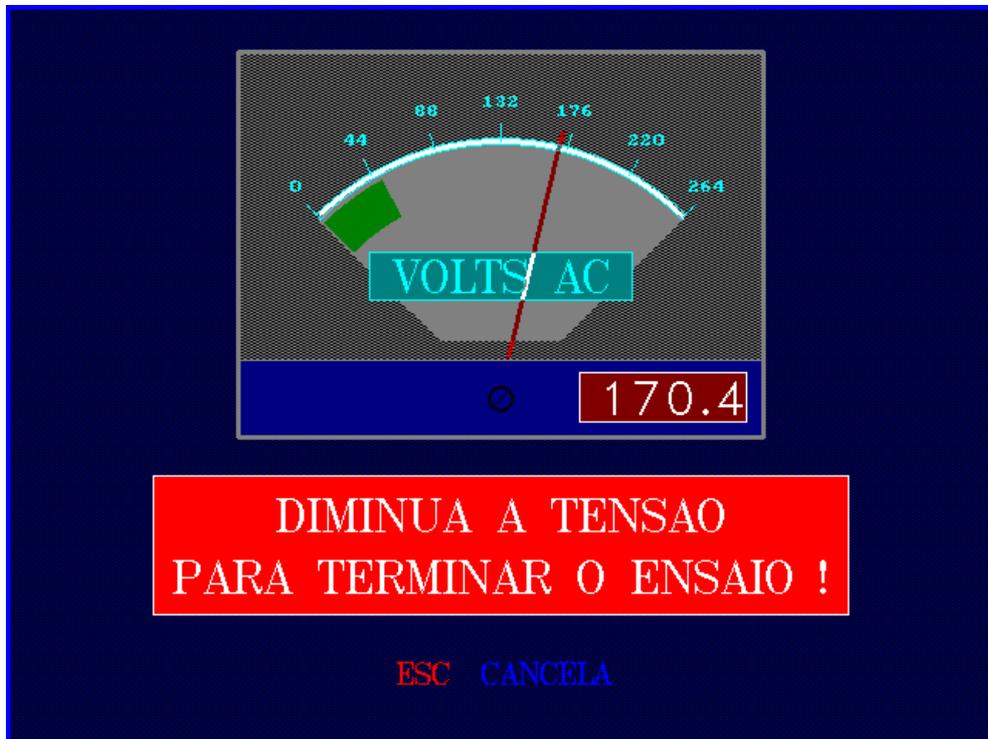


Figura 3.6: Fim do ensaio em vazio.



Figura 3.7: Resumo do ensaio em vazio.

Como pode ser observado na figura 3.7, a tensão eficaz é maior que a tensão de valor médio (que foi multiplicada por 1,11), sinal de que as ondas de tensão não se mantiveram perfeitamente senoidais ao se aplicar tensão nominal, comprovado pelo fator de forma maior que 1,11. Como as perdas em vazio são compostas pelas perdas de histerese e de Foucault, sendo a primeira função do valor médio e a segunda do valor eficaz da tensão e como a tensão eficaz passou da nominal foi necessário aplicar o método de correção descrito em [2].

3.2.2 ENSAIO EM VAZIO COM CORREÇÃO DE 60 PARA 50 [Hz]

Como alguns fabricantes produzem transformadores para operarem com frequência industrial de 50 [Hz], e nem sempre têm os seus laboratórios aptos a operar com esta frequência, foi implementado no programa TRANS4, um método que permite realizar o ensaio em vazio com frequência de 60 [Hz] e corrigi-lo para 50 [Hz]. Como são necessárias também correções no ensaio em curto-circuito e no cálculo de outros parâmetros, o método de correção completo de 60 para 50 [Hz] é descrito em 6.3 (capítulo 6 seção 3).

3.3 ENSAIO EM CURTO-CIRCUITO

Da mesma forma que para o ensaio em vazio esta função permite também gerenciar totalmente a execução do ensaio em curto-circuito, cujo objetivo é aplicar corrente nominal aos enrolamentos, ligando-se um dos enrolamentos em curto-circuito (de preferência e para maior facilidade o de tensão menor) e medir nestas condições a potência ativa⁶ (P_{cc_N}), a corrente de curto-circuito (I_{cc_N}) a tensão eficaz (U_{cc_N}), o fator de potência e a frequência. Este programa lê estas grandezas elétricas do MONITEK9443 descrito no capítulo 2, através da *interface* serial. Os resultados do ensaio são armazenados em arquivo de dados.

3.2.1 EXECUÇÃO DO ENSAIO EM CURTO-CIRCUITO

O ensaio em curto-circuito é iniciado escolhendo-se um transformador já cadastrado e selecionando as relações de RTP e RTC, previamente cadastradas no programa, compatíveis com as tensões e correntes esperadas para o ensaio. O programa solicita que se aumente a tensão até que a corrente do ensaio atinja uma janela de 5 [%] em torno da corrente nominal do enrolamento medido.

A tensão aplicada para conseguir circular a corrente nominal, em transformadores de distribuição, é tipicamente inferior a 5% da tensão nominal do enrolamento, nestas condições a relação tensão corrente é totalmente linear permitindo, caso não seja possível circular a corrente nominal no enrolamento, geralmente por limitações da fonte de tensão, fazer o ensaio com tensão reduzida e aplicar a seguinte correção:

$$P_{cc_N} = p_{cc} \cdot \left(\frac{I_{cc_N}}{I_{cc}} \right)^2 \quad (3.1)$$

$$U_{cc_N} = U_{cc} \cdot \frac{I_{cc_N}}{I_{cc}} \quad (3.2)$$

Apesar destas correções na prática serem feitas nos casos em que a corrente do ensaio é menor que a corrente nominal, também podem ser aplicadas caso a corrente do ensaio seja maior que a corrente nominal.

⁶ A potência ativa do ensaio de curto também é conhecida como *perdas em carga*.

O programa faz quatro leituras das grandezas elétricas e aplica as correções descritas em (3.1) e (3.2) obtendo exatamente os valores nominais da tensão e potência ativa de curto circuito.

Como a potência ativa de curto circuito, ou potência de perdas em carga, é função de $R \times I^2$ e a resistência ôhmica do enrolamento varia com a temperatura é necessário medir também a temperatura ambiente dos enrolamentos, que para transformadores de distribuição é a própria temperatura do óleo do transformador. Ao se iniciar o ensaio em curto-circuito, a temperatura do óleo isolante deve estar em equilíbrio térmico com a temperatura do meio ambiente.

Para efeito de comparação dos valores calculados com a norma [4], este ensaio pode ser feito apenas no *tap* nominal. Para determinar as perdas totais, para o ensaio de aquecimento, deve ser feito também no menor *tap*. O programa permite fazer este ensaio em todos os *taps*.

As figuras 3.8, 3.9 e 3.10 ilustram respectivamente o início do ensaio, a corrente do ensaio dentro da janela de mais ou menos 5 [%] e um resumo do ensaio em curto-circuito.

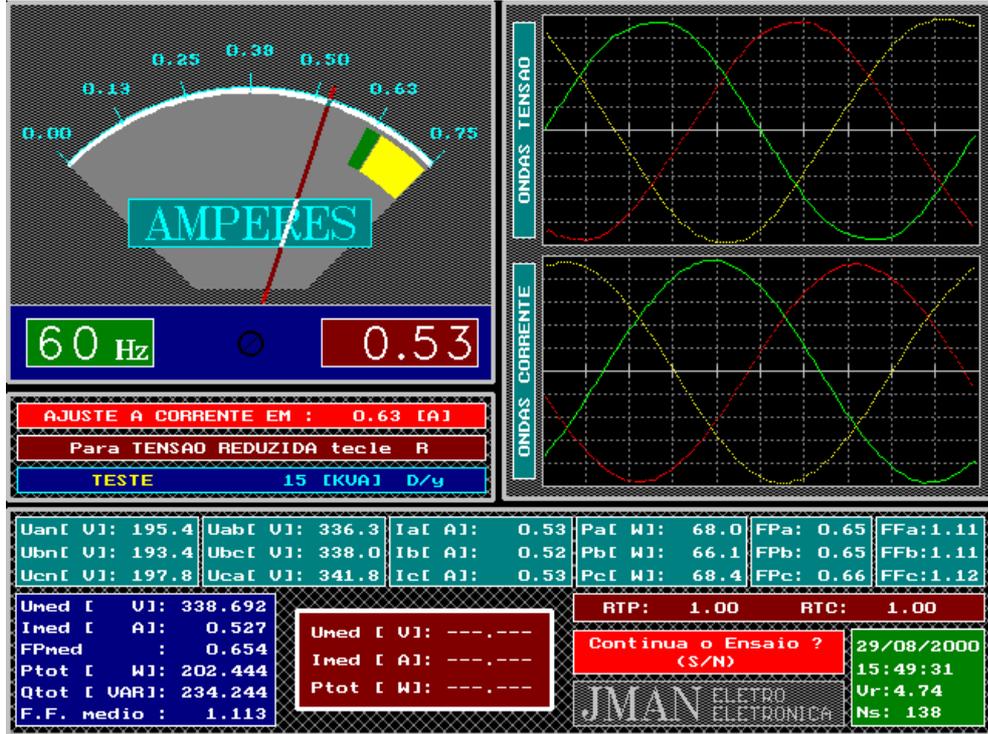


Figura 3.8: Início do ensaio em curto-circuito.

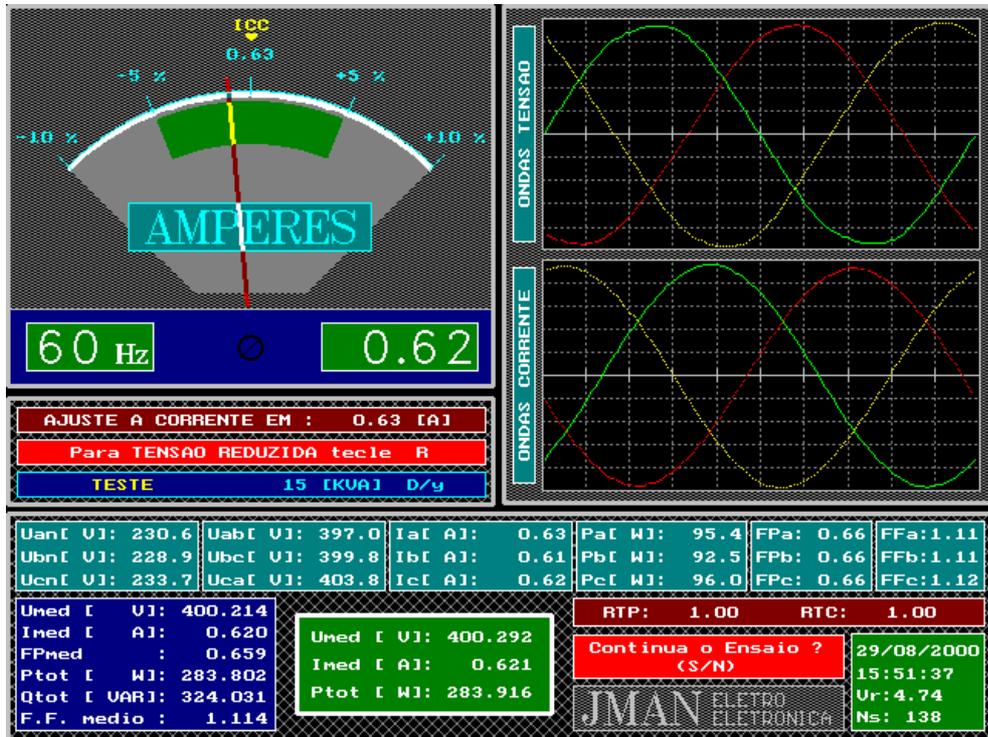


Figura 3.9: Corrente do ensaio em curto-circuito próxima à nominal.

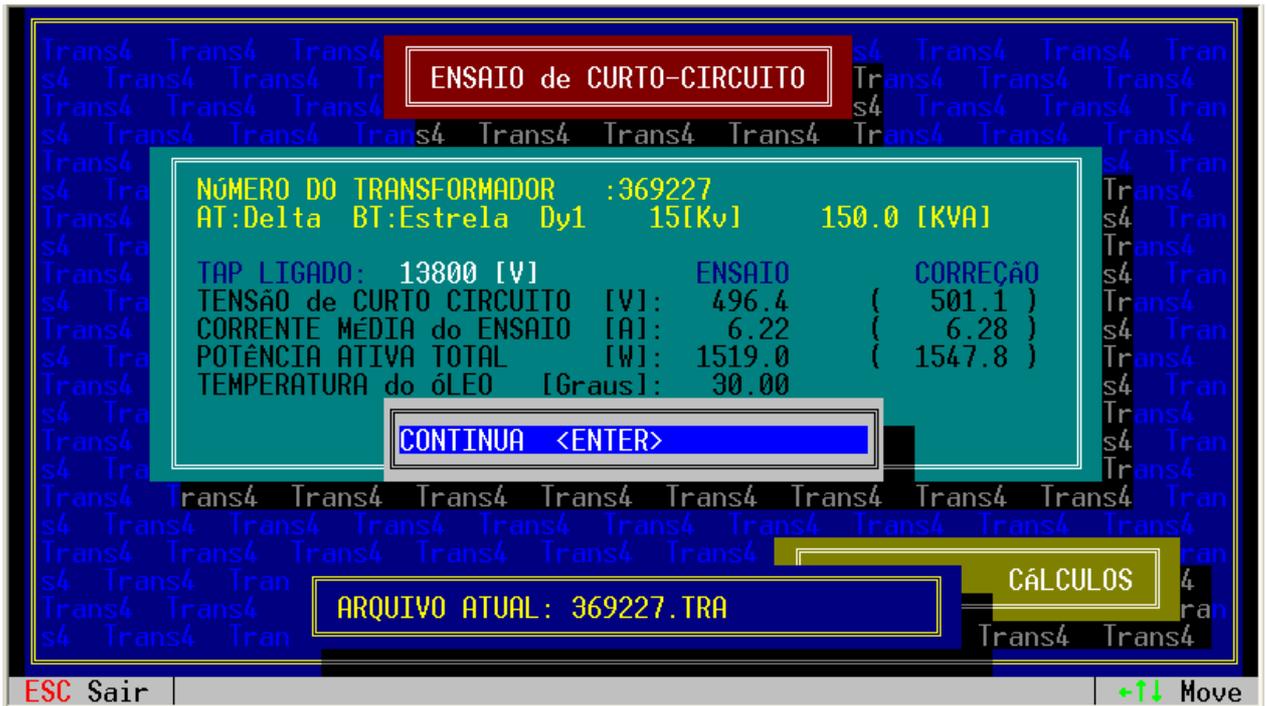


Figura 3.10: Resumo do ensaio em curto-circuito.

3.4 OUTROS ENSAIOS

De acordo com a norma NBR 5380, além dos ensaios em vazio e ensaio em curto-circuito, outros ensaios devem ser realizados, alguns necessários à realização dos cálculos de parâmetros, outros para verificação de erros máximos e outros apenas informativos.

Conforme visto, os ensaios em vazio e em curto-circuito consistem em se fazer a medição de grandezas elétricas através do MONITEK9443, os demais ensaios que serão descritos a seguir, são realizados com instrumentos específicos e os seus resultados devem ser digitados no programa TRANS4.

3.4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA ÔHMICA DOS ENROLAMENTOS

Este ensaio consiste em se medir a resistência ôhmica de todos os enrolamentos, pelo menos no *tap* nominal. Pode ser feito também no menor ou em todos os *taps*.

O instrumento adequado para a realização deste ensaio é a ponte kelvin. Devem ser medidas as resistências: R_{X1X2} , R_{X1X3} , R_{X2X3} , R_{H1H2} , R_{H1H3} , R_{H2H3} e estes valores

digitados no programa. Também é obrigatório medir e digitar a temperatura ambiente dos enrolamentos.

Conforme pode ser visto no capítulo 6 deste trabalho, foi desenvolvida uma ponte kelvin especial, controlada por um *software* próprio que permite fazer estas medições sem trocar os cabos de ligação, e fornecendo os valores medidos, inclusive a temperatura ambiente diretamente ao TRANS4. As figuras 3.11 e 3.12 ilustram respectivamente a digitação ou a leitura automática destas medições.



Figura 3.11: Digitação do ensaio de resistência ôhmica dos enrolamentos.



Figura 3.12: Leitura automática das medições de resistência ôhmica.

3.4.2 ENSAIO DE RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

Este ensaio visa determinar os erros de transformação de tensão. Deve ser feito obrigatoriamente em todas as fases e em todos os *taps*. O instrumento mais adequado à realização deste ensaio é conhecido como TTR (*Transform Turn Ratio*), Devem ser medidas as relações: H_1H_2/X_1X_2 , H_1H_3/X_1X_3 , H_2H_3/X_2X_3 em todos os *taps* e estes valores digitados no programa.

Conforme pode ser visto no capítulo 5 deste trabalho, foi desenvolvido um TTR especial, controlado por um *software* próprio que permite fazer estas medições sem trocar os cabos de ligação, e fornecendo os valores medidos diretamente ao TRANS4. As figuras 3.13 e 3.14 ilustram respectivamente a digitação e a leitura automática destas medições.



Figura 3.13: Digitação do ensaio de relação de transformação.



Figura 3.14: Leitura automática das medições de relação de transformação.

3.4.3 ENSAIO DE ISOLAMENTO COM MEGÔMETRO

Este ensaio permite analisar o comportamento do isolamento dielétrico entre três partes básicas do transformador, que devem estar muito bem isoladas entre si: Bobinas da AT, bobinas da BT e massa (núcleo e tanque). Estas resistências de isolamento estão representadas na figura 3.15 por R1, R2 e R3.

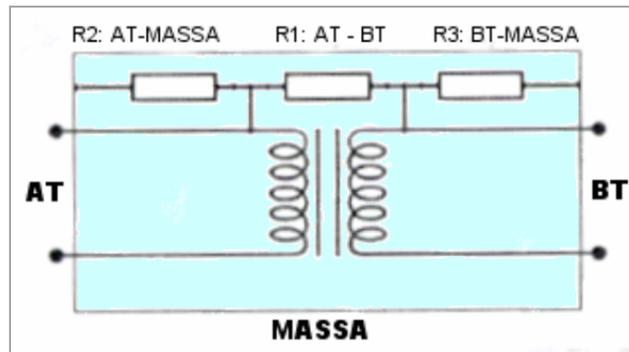


Figura 3.15: Resistências de isolamento entre AT, BT e MASSA.

O instrumento utilizado para este fim é conhecido por megômetro, basicamente é composto por uma fonte de tensão contínua e um galvanômetro responsável por medir a corrente de fuga entre as partes ensaiadas. Há vários fatores que influenciam esta corrente, como temperatura e umidade do isolamento. Esta corrente é composta por três componentes: corrente capacitiva de carga, corrente de absorção do dielétrico e corrente de condução. Na figura 3.16 pode-se visualizar o comportamento típico destas correntes durante o ensaio.

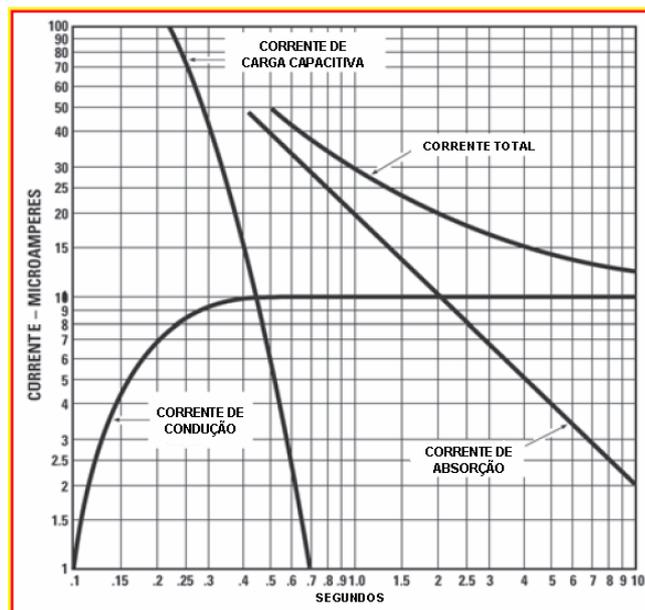


Figura 3.16: Curvas das componentes da corrente medida durante o ensaio de isolamento.

Com as leituras de resistência de isolamento obtidas com 30, 60 e 600 segundos de ensaio, pode-se calcular os índices de absorção (IA) e de polarização (IP) de acordo com as expressões (3.3) e (3.4). Estes índices dão uma idéia do estado do isolamento.

$$IA = \frac{R_{60s}}{R_{30s}} \quad (3.3)$$

$$IP = \frac{R_{600s}}{R_{60s}} \quad (3.4)$$

Para as classes de tensão maiores ou iguais a 15 [kV] a norma NBR 5380 recomenda que a tensão aplicada pelo megômetro seja superior a 1000 [V], sejam curto-circuitados os terminais de cada enrolamento e após ligado, esperar pelo menos 1 minuto antes de efetuar a leitura. A resistência de isolamento é medida entre AT e BT, entre AT e MASSA e entre BT e MASSA.

Os valores medidos são digitados no TRANS4. A figura 3.17 ilustra este procedimento.



Figura 3.17: Digitação do ensaio de isolamento.

As leituras de resistência de isolamento também podem ser automatizadas. Para tanto foi desenvolvido um programa específico chamado MEGAMED que comunicando-se, por meio de porta serial RS232, com um megômetro digital modelo 5060e (MEGABRÁS Brasil), permite transferir os valores medidos ao programa TRANS4. A figura 3.18 ilustra o resultado deste ensaio feito pelo programa MEGAMED.

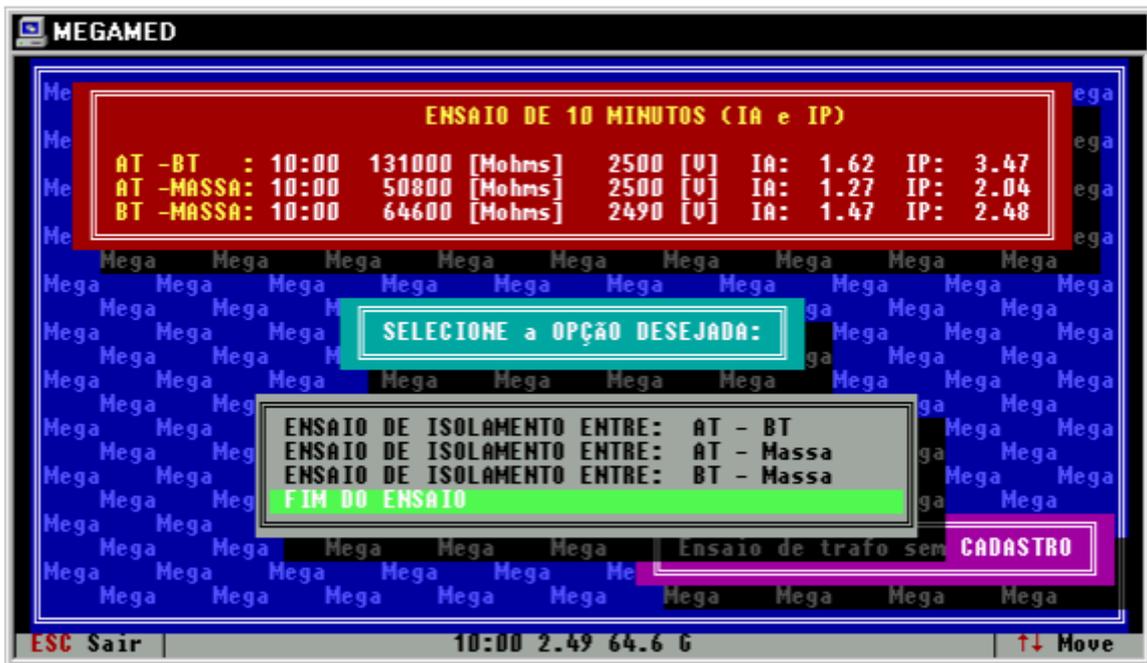


Figura 3.18: Ensaio de resistência de isolamento realizado com o programa MEGAMED.

3.4.4 ENSAIO DE TENSÃO APLICADA

Também conhecido como ensaio de tensão suportável nominal à frequência industrial. Neste ensaio todos os terminais externos do enrolamento ensaiado devem ser ligados ao terminal de alta tensão da fonte. Todos os terminais dos demais enrolamentos e parte metálicas (inclusive tanque e núcleo) devem ser ligados ao outro terminal da fonte e ao terra.

Deve ser aplicada, durante um minuto, a tensão correspondente ao nível de isolamento especificado de acordo com a norma NBR 5356.

O programa TRANS4, sugere os valores corretos de tensão a ser aplicada de acordo com a norma citada. A figura 3.19 ilustra este procedimento



Figura 3.19: Digitação ou confirmação do ensaio de tensão aplicada.

3.4.5 ENSAIO DE TENSÃO INDUZIDA

De acordo com a norma NBR 5356, a duração deste ensaio deve ser de 7200 ciclos, com frequência de ensaio não inferior a 120 [Hz] e não superior a 480 [Hz], sendo que o transformador deve ser excitado, de preferência como o é em funcionamento normal e deve ser aplicada uma tensão igual ao dobro da nominal da respectiva tensão do enrolamento utilizado no ensaio.

O programa TRANS4 sugere os valores corretos de tensão a ser aplicada de acordo com a norma citada e permite que se escolha a frequência . A figura 3.20 ilustra este procedimento



Figura 3.20: Digitação ou confirmação do ensaio de tensão induzida.

3.4.5 ENSAIO DO ÓLEO ISOLANTE

Para transformadores imersos em óleo isolante, este óleo deve ser submetido a ensaios físico-químicos e de rigidez dielétrica. Os resultados devem ser digitados no programa TRANS4 para que constem no relatório. Na figura 3.21 pode-se apreciar esta operação.

ENSAIO de RIGIDEZ DIELETRICA DO ÓLEO

IDENTIFICAÇÃO : 345164 40.0 [KVA]
 AT:Delta BT:Estrela 25[Kv]

TIPO do ÓLEO : óleo TIPO B	VOLUME DE ÓLEO [L] :
RIGIDEZ DIELETRICA MÉDIA	Kv: 52.00 (MB 330)
TENSÃO INTERFACIAL	mNm/m: 43.00 (MB 320)
TEOR DE ÁGUA	ppm: 14.10 (MB 936)
DENSIDADE	: 0.850 (MB 104)
ÍNDICE DE NEUTRALIZAÇÃO <	mgKOH/g: 0.01 (ASTM D 974)
FATOR DE POTÊNCIA a 100°C	%: 0.14 (ASTM D 924)
FATOR DE DISSIPACÃO a 90°C	%: (IEC 247)

CONTINUA ?:

SIM
 NÃO (Volta)
 NÃO (Altera UNIDADES ou NORMA)

ESC Sair SELECIONE A OPÇÃO DESEJADA: +↑↓ Move

Figura 3.21: Digitação do ensaio do óleo isolante.

3.4.6 ENSAIO DE PINTURA E ESTANQUEIDADE

Também por norma devem ser informados, quando for o caso os ensaios de pintura, aderência e estanqueidade. A figura 3.22 ilustra este procedimento.

3.4.7 OBSERVAÇÕES

Podem ser acrescentadas informações complementares ao relatório de ensaio através desta opção. A figura 3.23 ilustra este procedimento.

3.4.8 INSPEÇÃO

As empresas distribuidoras de energia elétrica, as principais compradoras de transformadores de distribuição, ao adquirirem um lote de transformadores enviam um inspetor credenciado para realizar ou acompanhar alguns ensaios de recebimento, deve constar no relatório a firma inspetora, o inspetor e a norma da inspeção. A figura 3.24 ilustra este procedimento.

ENSAIO de PINTURA / ESTANQUEIDADE

IDENTIFICAÇÃO : S1825001 1000.0 [KVA]
 AT:Delta BT:Estrela

ESPESSURA -> Especificação	[microns]: 80.0	(ASTM E 376)
ESPESSURA -> Mínimo	[microns]: 117.0	(ASTM E 376)
ESPESSURA -> Médio	[microns]: 133.0	(ASTM E 376)
ESPESSURA -> Máximo	[microns]: 180.0	(ASTM E 376)
ESPESSURA -> Pintura fundo	[microns]:	(ASTM E 376)
ESPESSURA -> Pintura final	[microns]: 120.0	(ASTM E 376)
ADERÊNCIA ->	Grav : 0	(MB 985)
ESTANQUEIDADE-> PRESSÃO [Kgf/cm2]	: 0.7	
ESTANQUEIDADE-> TEMPO [Horas]	: 1.0	

CONTINUA ?:

SIM
 NÃO (Volta)
 NÃO (Altera UNIDADES ou NORMA)

ESC Sair SELECIONE A OPÇÃO DESEJADA: ←↑↓ Move

Figura 3.22: Digitação do ensaio de pintura e estanqueidade.

OBSERVAÇÕES

IDENTIFICAÇÃO : 353328 5.0 [KVA]
 MONO. : AT> 1 FASE 15[Kv]

OBS1: O TRANSFORMADOR ACIMA REFERIDO ESTA APROVADO PELA GARANTIA DA
 OBS2: QUALIDADE.

Cliente: CEMIG

Número Patrimônio (Cia) : 278535
 Número Lacre1: 0002104 Número Lacre2: 0002135

CONTINUA ?:

SIM
 NÃO (Volta)

ESC Sair SELECIONE A OPÇÃO DESEJADA: ←↑↓ Move

Figura 3.23: Digitação de informações complementares.



Figura 3.24: Digitação dos dados da firma inspetora.

3.5 EXECUTAR CÁLCULOS

Esta função permite que logo após realizados os ensaios em vazio, em curto-circuito e lançamento de outros ensaios, possam ser visualizados, na tela do computador, os resumos destes ensaios, os principais cálculos efetuados e uma tabela comparativa das grandezas P_0 , $I_0\%$, P_{TOTALS} , $Z_{REF}\%$ e $E_{MAX_TTR}\%$ com os valores máximos admissíveis pela norma NBR5440. Esta norma permite uma tolerância de mais 20 [%] para a corrente percentual em vazio, mais 10 [%] para as perdas em vazio, mais 6 [%] para as perdas totais a 75 [°C] e mais ou menos 7,5 [%] para a impedância percentual a 75 [°C]. O erro máximo permitido para as relações de tensão é de mais ou menos 0,5 [%]. A figura 3.25 ilustra alguns desses cálculos, as figuras 3.26 e 3.27 mostram a comparação com a norma NBR 5440, sendo que o resultado do ensaio visto na figura 3.27 apresenta valor de perdas totais maiores que o máximo permitido.

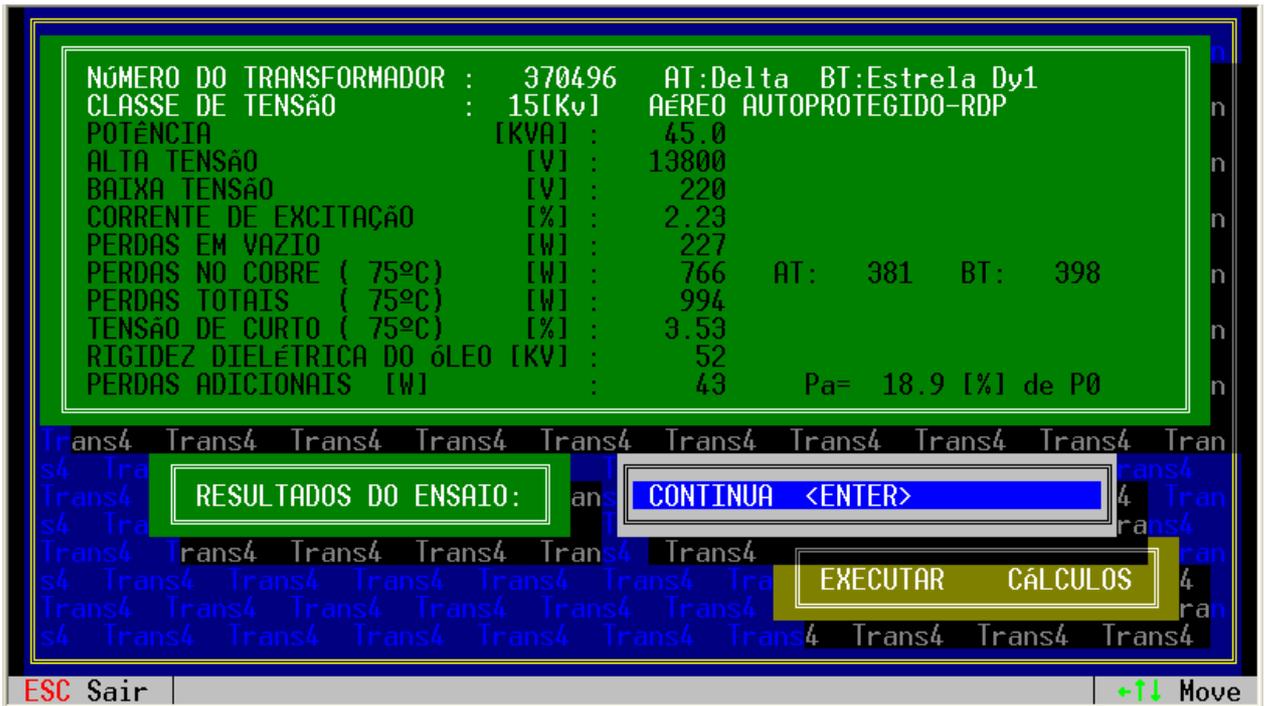


Figura 3.25: Alguns cálculos efetuados.



Figura 3.26: Tabela comparativa com a norma NBR5440/99 com ensaio aprovado.

VALORES MÁXIMOS DE NORMA		NBR5440/99	
Potência [KVA]	: 225	(TRI-25 [Kv])	
Corrente Vazio [%]	: 2.7	(+ 20 [%])	
Perdas Vazio [W]	: 820	(+ 10 [%])	
Perdas Totais [W]	: 3730	(+ 6 [%])	
Impedância (75 °C) [%]	: 5.0	(-/+ 7.5 [%])	
- VALORES do ENSAIO			
Número do Transformador	: 83058	AT:Delta	BT:Estrela Dy1
Potência [KVA]	: 225		
Corrente Vazio [%]	: 1.3	(-50.7 [%])	
Perdas Vazio [W]	: 588	(-28.3 [%])	
Perdas Totais [W]	: 4431	(18.8 [%])	**
Impedância (75 °C) [%]	: 4.65	(-7.0 [%])	*
Erro Máximo TTR	: 0.31		

ESC Saír ←↑↓ Move

Figura 3.27: Tabela comparativa com a norma NBR5440/99 com ensaio reprovado.

3.5.1 DETALHAMENTO DOS CÁLCULOS EFETUADOS

Como os condutores empregados na fabricação dos enrolamentos podem ser de cobre ou de alumínio, os coeficientes de variação da resistência ôhmica destes materiais com a temperatura são $\alpha_{COBRE} = 234,5$ e $\alpha_{ALU.} = 225$. As constantes α_{AT} e α_{BT} assumem os valores de α_{COBRE} ou de $\alpha_{ALU.}$ conforme os materiais utilizados nos enrolamentos da AT e BT.

Como a temperatura ambiente, ao se medirem as resistências ôhmicas dos enrolamentos T_{AE} , pode ser diferente da temperatura ambiente, ao se realizar o ensaio em curto-circuito T_{AC} , os valores das resistências devem ser corrigidas para a temperatura do ensaio em curto-circuito através das constantes:

$$K1_{AT} = \frac{\alpha_{AT} + T_{AC}}{\alpha_{AT} + T_{AE}} \quad (3.5)$$

$$K1_{BT} = \frac{\alpha_{BT} + T_{AC}}{\alpha_{BT} + T_{AE}} \quad (3.6)$$

As constantes de correção das resistências dos enrolamentos da temperatura ambiente T_{AC} para a temperatura de referência são:

$$K2_{AT} = \frac{\alpha_{AT} + T_{REF}}{\alpha_{AT} + T_{AC}} \quad (3.7)$$

$$K2_{BT} = \frac{\alpha_{BT} + T_{REF}}{\alpha_{BT} + T_{AC}} \quad (3.8)$$

A constante de correção das perdas adicionais da temperatura ambiente T_{AC} para a temperatura de referência é:

$$K3 = \frac{\alpha_{BT} + T_{AC}}{\alpha_{BT} + T_{REF}} \quad (3.9)$$

Para ligação estrela, as resistências ôhmicas de fase são:

$$R_{H1H0} = \frac{R_{H1H2} + R_{H1H3} - R_{H2H3}}{2} \quad (3.10)$$

$$R_{H2H0} = \frac{R_{H1H2} + R_{H2H3} - R_{H1H3}}{2} \quad (3.11)$$

$$R_{H3H0} = \frac{R_{H2H3} + R_{H1H3} - R_{H1H2}}{2} \quad (3.12)$$

$$R_{X1X0} = \frac{R_{X1X2} + R_{X1X3} - R_{X2X3}}{2} \quad (3.13)$$

$$R_{X2X0} = \frac{R_{X1X2} + R_{X2X3} - R_{X1X3}}{2} \quad (3.14)$$

$$R_{X3X0} = \frac{R_{X2X3} + R_{X1X3} - R_{X1X2}}{2} \quad (3.15)$$

Correção das resistências da temperatura ambiente T_{AE} para T_{AC} :

$$R_{C_{H1H2}} = R_{H1H2} \cdot K1_{AT} \quad (3.16)$$

$$R_{C_{H1H3}} = R_{H1H3} \cdot K1_{AT} \quad (3.17)$$

$$R_{C_{H2H3}} = R_{H2H3} \cdot K1_{AT} \quad (3.18)$$

$$R_{C_{H1H0}} = R_{H1H0} \cdot K1_{AT} \quad (3.19)$$

$$R_{C_{H2H0}} = R_{H2H0} \cdot K1_{AT} \quad (3.20)$$

$$R_{C_{H3H0}} = R_{H3H0} \cdot K1_{AT} \quad (3.21)$$

$$R_{C_{X1X2}} = R_{X1X2} \cdot K1_{BT} \quad (3.22)$$

$$R_{C_{X1X3}} = R_{X1X3} \cdot K1_{BT} \quad (3.23)$$

$$R_{C_{X2X3}} = R_{X2X3} \cdot K1_{BT} \quad (3.24)$$

$$R_{C_{X1X0}} = R_{X1X0} \cdot K1_{BT} \quad (3.25)$$

$$R_{C_{X2X0}} = R_{X2X0} \cdot K1_{BT} \quad (3.26)$$

$$R_{C_{X3X0}} = R_{X3X0} \cdot K1_{BT} \quad (3.27)$$

Corrente percentual para ensaio em vazio realizado pela BT:

$$I_0 \% = \frac{I_0}{I_{N_BT}} \cdot 100 \quad (3.28)$$

Corrente percentual para ensaio em vazio realizado pela AT:

$$I_0 \% = \frac{I_0}{I_{N_AT}} \cdot 100 \quad (3.29)$$

Resistência média da bobina AT para ligação em delta:

$$R_{AT} = \frac{Rc_{H1H2} + Rc_{H1H3} + Rc_{H2H3}}{3} \cdot \frac{3}{2} \quad (3.30)$$

Resistência média da bobina AT para ligação em estrela:

$$R_{AT} = \frac{Rc_{H1H0} + Rc_{H2H0} + Rc_{H3H0}}{3} \quad (3.31)$$

Resistência média da bobina BT para ligação em delta:

$$R_{BT} = \frac{Rc_{X1X2} + Rc_{X1X3} + Rc_{X2X3}}{3} \cdot \frac{3}{2} \quad (3.32)$$

Resistência média da bobina BT para ligação em estrela:

$$R_{BT} = \frac{Rc_{X1X0} + Rc_{X2X0} + Rc_{X3X0}}{3} \quad (3.33)$$

Perdas *joule* totais da AT para ligação em delta:

$$Pj_{AT} = 3 \cdot \left(\frac{I_{N_AT}}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot R_{AT} \quad (3.34)$$

Perdas *joule* totais da AT para ligação em estrela:

$$Pj_{AT} = 3 \cdot (I_{N_AT})^2 \cdot R_{AT} \quad (3.35)$$

Perdas *joule* totais da BT para ligação em delta:

$$P_{j_{BT}} = 3 \cdot \left(\frac{I_{N_{BT}}}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot R_{BT} \quad (3.36)$$

Perdas *joule* totais da BT para ligação em estrela:

$$P_{j_{BT}} = 3 \cdot (I_{N_{BT}})^2 \cdot R_{BT} \quad (3.37)$$

Perdas *joule* totais da AT mais BT:

$$P_j = P_{j_{AT}} + P_{j_{BT}} \quad (3.38)$$

Perdas adicionais:

$$P_a = P_{cc_N} - P_j \quad (3.39)$$

Perdas *joule* totais da AT corrigidas para a temperatura de referência:

$$P'_{j_{AT}} = P_{j_{AT}} \cdot K_{2_{AT}} \quad (3.40)$$

Perdas *joule* totais da BT corrigidas para a temperatura de referência:

$$P'_{j_{BT}} = P_{j_{BT}} \cdot K_{2_{BT}} \quad (3.41)$$

Perdas adicionais corrigidas para a temperatura de referência:

$$P'_a = P_a \cdot K_3 \quad (3.42)$$

Perdas *joule* totais da AT mais BT na temperatura de referência:

$$P'_j = P'_{j_{AT}} + P'_{j_{BT}} \quad (3.43)$$

Perdas em carga na temperatura de referência:

$$P'_e = P'_j + P'_a \quad (3.44)$$

Perdas totais na temperatura de referência:

$$P_{TOT} = P'_e + P_0 \quad (3.45)$$

Resistência percentual na temperatura ambiente T_{AC} :

$$R\% = \frac{P_{cc_n}}{S_N} \cdot 100 \quad (3.46)$$

Impedância percentual na temperatura ambiente T_{AC} com ensaio em curto-circuito realizado pela AT:

$$Z\% = \frac{U_{cc_N}}{U_{N_AT}} \cdot 100 \quad (3.47)$$

Impedância percentual na temperatura ambiente T_{AC} com ensaio em curto-circuito realizado pela BT:

$$Z\% = \frac{U_{cc_N}}{U_{N_BT}} \cdot 100 \quad (3.48)$$

Reatância percentual:

$$X\% = \sqrt{Z\%^2 - R\%^2} \quad (3.49)$$

Resistência percentual na temperatura de referência:

$$R'\% = \frac{P'e}{S_N} \cdot 100 \quad (3.50)$$

Impedância percentual na temperatura de referência:

$$Z'\% = \sqrt{R'\% + X\%} \quad (3.51)$$

3.6 RELATÓRIO IMPRESSO

Foram implementados neste programa, diversos modelos de relatórios, cada um com uma finalidade específica. Destacam-se os relatórios completos de uma página,

geralmente fornecidos ao cliente junto com o transformador, os relatórios resumidos, geralmente para controle interno do fabricante ou para efeitos de inspeção e os relatórios mensais e anuais de defeitos⁷. O cabeçalho com logotipo mais o rodapé podem ser personalizados.

3.6.1 IMPRESSORAS SUPORTADAS E FORMATO PDF

Podem ser usadas as seguintes impressoras:

- Matricial, padrão Epson;
- Jato de tinta, padrão HP;
- Laser, padrão HP ou compatível com PCL5.

Os relatórios também podem ser convertidos para o formato PDF e fornecidos por meio eletrônico.

As figuras 3.28 e 3.29 ilustram respectivamente a seleção da impressora e do tipo de relatório.



Figura 3.28: Seleção da impressora.

⁷ Não conformidades durante o processo de fabricação e ensaios.

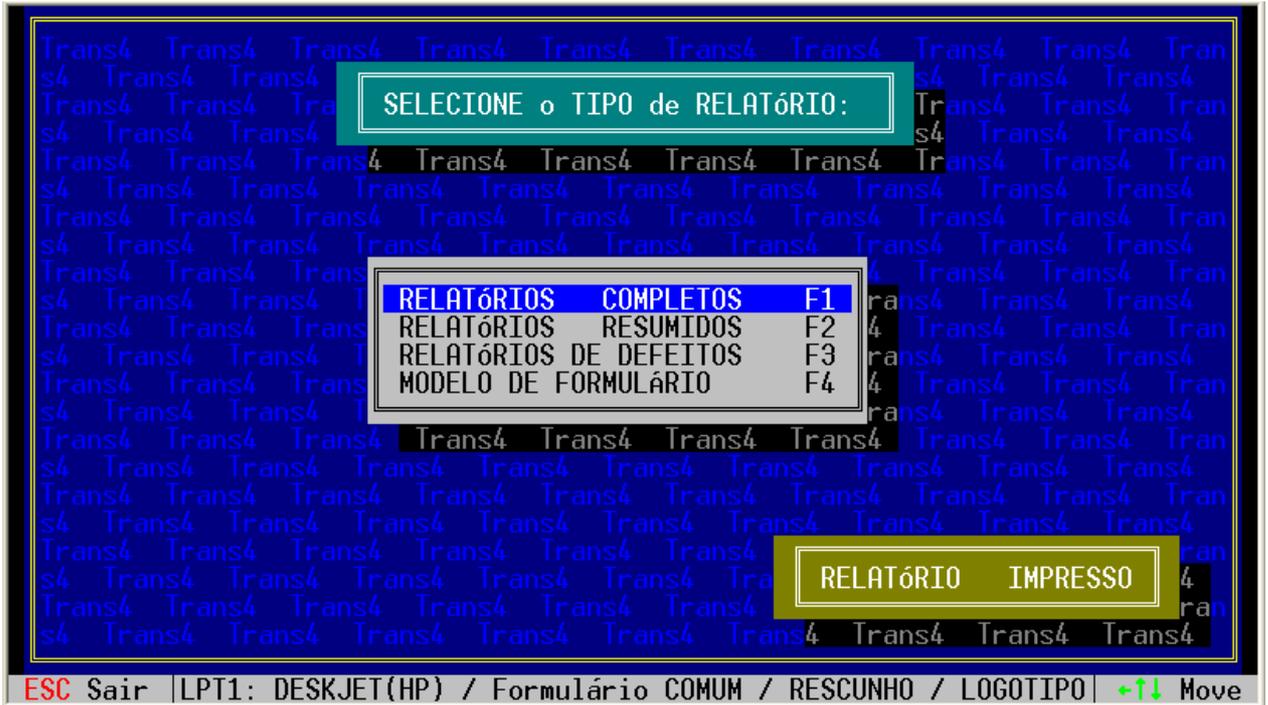


Figura 3.29: Seleção do tipo de relatório.

3.6.2 TIPOS DE RELATÓRIOS

Foram implementadas algumas funcionalidades visando agilizar o processo de impressão, tanto para relatórios completos como resumidos, as seguintes se destacam:

- Relatório individual;
- Todos do dia;
- Todos do mês;
- De arquivo a arquivo;
- Seleciona arquivos;
- Todos de um lote.

3.6.3 MODELOS DE RELATÓRIOS

Os principais modelos de relatórios foram implementados:



Figura 3.31: Seleção do modelo do relatório.



ROMAGNOLE PRODUTOS ELÉTRICOS LTDA.
QUALIDADE É NOSSO COMPROMISSO

RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE TRANSFORMADOR

R.Q.: 47024-2004

ENSAIO DE ROTINA DO TRANSFORMADOR COM AS CARACTERÍSTICAS ABAIXO:

CLIENTE :		FREQUÊNCIA [Hz]:	60	CORRENTE A.T. [A]:	1,88
NÚMERO :	281547	TENSÕES A.T. [kV]:	13,80 a 10,20	CORRENTE B.T. [A]:	118,09
POTÊNCIA [kVA]:	45,0	TENSÕES B.T. [V]:	220/127	DATA FABRICAÇÃO:	01/07/2004
FASES :	3	DERIVAÇÕES :	7	ESTADO :	NOVO
LIGAÇÃO:	Triângulo/Estrela Dy1	A.T. LIGADA EM [kV]:	13,80	MASSA [Kg]:	
TIPO :	AEREO CONVENCIONAL	B.T. LIGADA EM [V]:	220	FABRICANTE :	ITB
MODELO :	YADTQE71				

ENSAIO DE RESISTÊNCIA ÔHMICA DOS ENROLAMENTOS

H1H2: 64,04 [OHMS]	X1X2: 15,53 [mOHMS]
H1H3: 63,13 [OHMS]	X1X3: 15,52 [mOHMS]
H2H3: 64,04 [OHMS]	X2X3: 15,42 [mOHMS]

TEMPERATURA AMBIENTE [°C]: 37,0

DESLOCAMENTO ANGULAR

30 Graus

RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

LEITURA AT/BT [MOHMS]:	22000	IA: 1,62
LEITURA AT/MASSA [MOHMS]:	23000	IA: 1,27
LEITURA BT/MASSA [MOHMS]:	10000	IA: 1,47
TENSÃO DO MEGÔMETRO [V]:	2500	

TENSÃO APLICADA

AT/BT À MASSA [kV]:	34,00
BT/AT À MASSA [kV]:	10,00
FREQUÊNCIA [Hz]:	60
TEMPO DO ENSAIO [S]:	60

TENSÃO INDUZIDA

TENSÃO INDUZIDA [V]:	440
FREQUÊNCIA [Hz]:	120
TEMPO DO ENSAIO [S]:	60
MÉTODO DO ENSAIO :	NORMAL

ENSAIO DE RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

TAP [V]:	13800	13200	12600	12000	11400	10800	10200
FASE 1 :	108,51	103,77	99,07	94,31	89,59	84,87	80,14
FASE 2 :	108,68	103,95	99,20	94,47	89,76	85,01	80,27
FASE 3 :	108,55	103,81	99,09	94,33	89,60	84,88	80,13
ERRO[%]:	-0,13	-0,15	-0,13	-0,18	-0,18	-0,19	-0,21

ENSAIO EM VAZIO

TENSÃO DO ENSAIO [V]:	220
CORRENTE DE EXCITAÇÃO [A]:	2,57
CORRENTE DE EXCITAÇÃO [%]:	2,18
PERDAS EM VAZIO [W]:	217

ENSAIO EM CURTO CIRCUITO

CORRENTE DE CURTO CIRCUITO [A]:	1,88
TENSÃO DE CURTO CIRCUITO [V]:	451,69
POTÊNCIA DE CURTO CIRCUITO [W]:	628
TEMPERATURA AMBIENTE [°C]:	21,0

VALORES CORRIGIDOS A 75 [°C]

PERDAS NO COBRE [W]:	759
PERDAS TOTAIS [W]:	976
RENDIMENTO A PLENA CARGA [%]:	97,4
IMPEDÂNCIA DE CURTO CIRCUITO [%]:	3,41

ENSAIO DE PINTURA

Espessura da Camada: (ASTM 376)	
ESPECIFICAÇÃO:	120
MÍNIMO :	120
MÉDIO :	160
MÁXIMO :	220
Unidade:	microns
Aderência	()
GRAU: 0	RESULTADO: SATISFATÓRIO

ENSAIOS DO ÓLEO ISOLANTE

TIPO DO ÓLEO :	ÓLEO TIPO A
RIGIDEZ DIELÉTRICA:	60,00 Kv (MB 330)
TENSÃO INTERFACIAL:	49,00 mNm/m (MB 320)
TEOR DE ÁGUA :	13,18 ppm (MB 936)
DENSIDADE :	0,892 (MB 104)
ÍND. NEUTRALIZAÇÃO:	<0,03 mgKOH/g (ASTM D 974)
F.P. A 100 [°C]:	0,05 % (ASTM D 924)
F. DISS. A 90 [°C]:	

ESTANQUEIDADE E RESISTÊNCIA À PRESSÃO

PRESSÃO [Kg/cm ²]:	0,7	TEMPO [Horas]:	1
--------------------------------	-----	----------------	---

OBSERVAÇÕES

O TRANSFORMADOR ACIMA REFERIDO ESTA "APROVADO" PELA GARANTIA DA QUALIDADE. Número Cia: 164690

16/07/2004

DATA

INSPETOR

RESPONSÁVEL PELO ENSAIO

RODOVIA BR376, Km 394, P. INDUSTRIAL, CEP: 86975-000, MANDAGUARI-PR FONE: (44) 233-8000 FAX: (44) 233-1338

JMAN 2000

Figura 3.32: Exemplo de relatório padrão [cortesia "ROMAGNOLE"].

ITB EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS LTDA.

R.Q.: Campo a ser conf.

LAUDO DE TRANSFORMADORES

Objetivo: Ensaio de rotina de transformador com as características abaixo:

<i>Firma Inspetora</i>	000001 Código	CSE CN SV ENG LTDA Nome	VALDIR SIMOES DA SILVA Nome do Inspetor
<i>Dados Do Transformador</i>	Fabricante: ITB Modelo: NADTQP11		Número de Série: 370496
	Potência [kVA]: 45,0 Nº de Fases : 3 Tipo: () Aéreo Convencional () Aéreo Autoprotegido-RDI (x) Aéreo Autoprotegido-RDP () Subterrâneo	Tensão Primária [kV]: 13,800 Tensão Secundária [V]: 220/127 Nº de Derivações: 1 Massa [Kg] : 300 Lacre1: 0006414 Lacre2: 0006426	
RESULTADO DOS ENSAIOS			
<i>Transformador</i>	Tensão suportável à frequência industrial durante um minuto: AT/(BT+M) [kV]: 34,00 BT/(AT+M) [kV]: 10,00		Tensão Induzida [V]: 440 Frequência [Hz]: 120 Tempo de Aplicação [S]: 60
	Perdas em Vazio (Wo) [W]: 227		Corrente de Excitação [%]: 2,23
	Perdas Totais a 75°C (Wt) [W]: 994 Tensão de Curto Circuito A 75°C [%]: 3,53		Relação de tensões (erro %) Derivação Nº 1: -0,15 Derivação Nº 2: Derivação Nº 3:
<i>Óleo Tipo:</i>	Rigidez Dielétrica [kV/2,54 mm] MB 330: 52		Tensão Interfacial [mN/m] MB 320: 46,80
	Teor de Água [ppm] MB 936: 18,62		Densidade [20/4 °C] MB 104-20/4c: 0,852
	() A (x) B Fator de Potência a 100 °C [%] ASTM D 924: 0,13		Fator de Dissipação a 90 °C [%] IEC 247:
<i>Transformador Inspeccionado Segundo:</i> (*) 02118-CEMIG-0319K			
Declaro que o transformador foi inspeccionado segundo a especificação acima, e de acordo com as normas técnicas NBR5440, NBR5380 e NBR5356, tendo sido: (x) APROVADO			
Data de Emissão do Laudo : 17/01/2006			
Data de Fabricação : 04/01/2006			
_____		_____	
Ass. e Carimbo do Inspetor		Assinatura do Fornecedor	
A ser preenchido Pela CEMIG	Cliente: Local de instalação: Empresa instaladora:	Nº do Projeto: Nº do Patrimônio:	

RUA DEVANIR TERENCE, 161 - CEP: 16206-012 - BIRIGUI-SP
CNPJ: 46.151.130/0001-26

FONE: (18) 3643-8023 - FAX: (18) 3643-8022 e-mail: qualidade@itb.ind.br
INSCR. ESTADUAL: 214.009.850.112

JMAN 2005

Figura 3.33: Exemplo de relatório modelo 1 [cortesia "ITB"].



Registro dos Ensaio de Rotina

R.Q.: Campo a ser conf.

		Tipo SECO	No. Projeto TR3000	Unidade AP	O.S. Pedido 5T-0091-R-3A-A						
Cliente:	CASA DA MOEDA		U Nominal :	13800 [V]	Ligação :	Triângulo/Estrela					
A.T.:	13800/13500/13200/12900/12600 [V]		I. AT:	83.67 [A]	Potência:	2000 [KVA]					
B.T.:	380/220 [V]		I. BT:	3038.69 [A]	Frequência:	60 [Hz]					
Polaridade:	Deslocamento Angular:		30 [Graus]	Norma:							
ENSAIO DE RELAÇÃO DE TENSÃO											
Tap [V]	13800	13500	13200	12900	12600						
Fase 1	63,04	61,63	60,22	58,82	57,42						
Fase 2	63,04	61,63	60,22	58,82	57,42						
Fase 3	63,04	61,63	60,22	58,82	57,42						
RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO											
	AT/BT>	170000 [MOHMS]	AT/MASSA>	180000 [MOHMS]	BT/MASSA>	2500 [MOHMS]					
TENSÃO INDUZIDA											
	Tensão:	760 [V]	Frequência:	140 [Hz]	Tempo:	51 [Seg.]					
TENSÃO APLICADA											
	AT/BTMassa:	34.00 [Kv]	BT/ATMassa:	10.00 [Kv]	Tempo:	60 [Seg.]					
ENSAIO EM VAZIO											
	Tensão:	380 [V]	RTP:	5.00	RTC:	10.00					
Ia :	30.99 [A]	Ib :	29.67 [A]	Ic :	30.26 [A]	I0m :	30.31 [A]	I0% :	1.00 [%]		
Pa :	1623 [W]	Pb :	1581 [W]	Pc :	2131 [W]	Perdas em Vazio:	4837 [W]				
ENSAIO DE RESISTÊNCIA ÔHMICA											
Temperatura Ambiente: 17,0 [°C]											
AT	H1H2:	0,467000 [OHMS]	H1H3:	0,472000 [OHMS]	H2H3:	0,479000 [OHMS]	Pat :	5056 [W]	Pat115:	6974 [W]	
BT	X1X2:	0,397000 [mOHMS]	X1X3:	0,405000 [mOHMS]	X2X3:	0,410000 [mOHMS]	Pbt :	5700 [W]	Pbt115:	7862 [W]	
							Pr :	10756 [W]	Pr 115:	14836 [W]	
ENSAIO EM CURTO CIRCUITO											
					RTP:	10.00	RTC:	20.00			
Ia :	81.17 [A]	Ib :	85.47 [A]	Ic :	84.38 [A]	Icc:	83.67 [A]	Ucc:	879.7 [V]	U% :	6.37 [%]
Pa :	5549 [W]	Pb :	7017 [W]	Pc :	4426 [W]	Pcc:	16992 [W]	Pad:	6236 [W]	Pad115	4521 [W]
Temperatura Ambiente: 21.5 [°C]							Palum.115:	19357[W]	PO:	4837 [W]	
							PERDAS TOTAIS:	24194 [W]			
IMPEDÂNCIA											
		Resistêncial15:	0.97 [%]	Reatâncial15:	6.32 [%]	Impedâncial15:	6.39 [%]				
	Perdas C. Circuito	Perdas em Vazio	Perdas Totais	Corrente em Vazio	Impedância 115 °C						
	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]						
MEDIDO	19357 [W]	4837 [W]	24194 [W]	1.00 [%]	6.39 [%]						
OBSERVAÇÕES:							IP-20				
RESPONSÁVEL PELO ENSAIO:		CONTROLE DE QUALIDADE:		INSPEÇÃO DO CLIENTE:		DATA:					
						12/11/2002					

Av. Agostinho Ducci, 280 - Pq. Industrial | CEP: 86300-000 - CORNÉLIO PROCÓPIO - PR Fone:(43) 3520-3891 Fax:(43) 3520-3800
www.comtrafo.com.br JMAN 2005

Figura 3.34: Exemplo de relatório modelo 2 [cortesia "COMTRAFO"].



Registro dos Ensaio de Rotina

R.Q.: Campo a ser conf.

	Tipo TUC-3750/36.2/15	No. Projeto 3750085	Unidade HT	O.S. Pedido KA-2843-A-001-H
Cliente:	CELG	U Nominal :	34500 [V]	Ligação : Triângulo/Estrela
A.T.:	36225/35362/34500/33637/32775/31912/31050 [V]	I. AT:	62.76 [A]	Potência: 3750 [KVA]
B.T.:	13800 [V]	I. BT:	156.89 [A]	Frequência: 60 [Hz]
Polaridade:	Deslocamento Angular:	30 [Graus]	Norma: NBR-5356/93	

RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO	AT/BT>	10000 [MOHMS]	AT/MASSA>	7500 [MOHMS]	BT/MASSA>	2500 [MOHMS]
TENSÃO INDUZIDA	Tensão:	27600 [V]	Frequência:	180 [Hz]	Tempo:	40 [Seg.]
TENSÃO APLICADA	AT/BTMassa:	70.00 [Kv]	BT/ATMassa:	34.00 [Kv]	Tempo:	60 [Seg.]

ENSAIO DE RELAÇÃO DE TENSÃO								
Tap [V]	36225	35362	34500	33637	32775	31912	31050	
Fase 1	4,549	4,437	4,329	4,220	4,115	4,002	3,900	
Fase 2	4,550	4,438	4,331	4,221	4,114	4,002	3,900	
Fase 3	4,549	4,437	4,331	4,221	4,114	4,003	3,900	

ENSAIO DE RESISTÊNCIA ÔHMICA								
Tap [V]	36225	35362	34500	33637	32775	31912	31050	
H1H2 [OHMS]	1,13541	1,10917	1,07947	1,04908	1,02050	0,990357	0,961631	
H1H3 [OHMS]	1,13532	1,10528	1,07696	1,04741	1,01798	0,988413	0,960938	
H2H3 [OHMS]	1,13424	1,10601	1,07670	1,04662	1,01805	0,989053	0,959433	
BT	X1X2:	131,252 [mOHMS]	X1X3:	131,430 [mOHMS]	X2X3:	131,322 [mOHMS]	T. Amb.:	21,6 [°C]

ENSAIO EM VAZIO	Tensão:	13800 [V]	RTP:	100.00	RTC:	1.00			
Ia :	0.20 [A]	Ib :	0.16 [A]	Ic :	0.24 [A]	I0m :	0.20 [A]	I0% :	0.13 [%]
Pa :	1469 [W]	Pb :	1014 [W]	Pc :	1642 [W]	Perdas em Vazio:	4125 [W]		

ENSAIO DE CURTO CIRCUITO								
Condutor: Cobre Temperatura Ref.: 75 [°C]								
Tap [V]	36225	35362	34500	33637	32775	31912	31050	
T. Amb. [°C]	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	
Icc [A]	59,77	61,23	62,76	64,37	66,06	67,84	69,73	
Ucc [V]	2262,0	2182,8	2108,7	2035,4	1965,6	1911,3	1830,4	
Pcc [W]	15101	15078	15143	15249	15433	15741	15690	
Pcobre75 [W]	16661	16696	16804	16947	17159	17475	17500	
Ptotais75 [W]	20786	20821	20930	21072	21285	21601	21626	
Imp. 75 [%]	6,25	6,18	6,12	6,05	6,00	5,99	5,90	

OBSERVAÇÕES:			
RESPONSÁVEL PELO ENSAIO:	CONTROLE DE QUALIDADE:	INSPETOR DO CLIENTE:	DATA: 10/09/2004

Rod. SP101 Km 5,5 HORTOLÂNDIA - SP CEP: 13185-908 FONE: (19) 2119-2539 FAX: (19) 3281-2290

JMAN2008

Figura 3.35: Exemplo de relatório modelo 3 [cortesia "TRAFO"].



Indústria de Transformadores **ITAIPU** Ltda.



RELATÓRIO RESUMO do LOTE: ENEMON7 05/2006

PAG.: 01

Número série	Potência	F.	AT [Kv]	BT [V]	Iof[%]	Vazio	Cobre	Totais	Z[%]	P.Ad.	Modelo	Estado	Obs/Cia
393437	15,0	2	34,5-31,5	254/127	0,87	73	299	372	2,80	6	EBEBTE106E	Novo	ENTF080719
393438	15,0	2	34,5-31,5	254/127	2,35	89	296	385	2,85	3	EBEBTE106E	Novo	ENTF080720
393439	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,64	80	298	377	2,80	5	EBEBTE106E	Novo	ENTF080721
393440	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080722
393441	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,23	76	298	374	2,82	5	EBEBTE106E	Novo	ENTF080723
393442	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,03	72	296	368	2,81	3	EBEBTE106E	Novo	ENTF080724
393443	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,47	82	297	379	2,81	4	EBEBTE106E	Novo	ENTF080725
393444	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080726
393445	15,0	2	34,5-31,5	254/127	0,99	73	296	370	2,81	3	EBEBTE106E	Novo	ENTF080727
393446	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,19	71	291	362	2,81	-2	EBEBTE106E	Novo	ENTF080728
393447	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,51	74	298	372	2,82	5	EBEBTE106E	Novo	ENTF080729
393448	15,0	2	34,5-31,5	254/127	0,94	69	297	366	2,81	4	EBEBTE106E	Novo	ENTF080730
393449	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,83	78	298	376	2,84	5	EBEBTE106E	Novo	ENTF080731
393450	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080732
393451	15,0	2	34,5-31,5	254/127	2,14	78	297	375	2,80	4	EBEBTE106E	Novo	ENTF080733
393452	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,38	77	297	374	2,82	4	EBEBTE106E	Novo	ENTF080734
393453	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,58	70	299	369	2,82	6	EBEBTE106E	Novo	ENTF080735
393454	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080736
393455	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,59	74	295	369	2,81	2	EBEBTE106E	Novo	ENTF080737
393456	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,30	81	297	379	2,80	4	EBEBTE106E	Novo	ENTF080738
393457	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,23	69	297	366	2,83	4	EBEBTE106E	Novo	ENTF080739
393458	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,40	78	297	375	2,80	5	EBEBTE106E	Novo	ENTF080740
393459	15,0	2	34,5-31,5	254/127	2,24	79	298	377	2,80	5	EBEBTE106E	Novo	ENTF080741
393460	15,0	2	34,5-31,5	254/127	2,65	79	298	377	2,81	5	EBEBTE106E	Novo	ENTF080742
393461	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,08	76	298	374	2,83	5	EBEBTE106E	Novo	ENTF080743
393462	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,52	79	295	374	2,82	2	EBEBTE106E	Novo	ENTF080744
393463	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,00	69	301	370	2,78	8	EBEBTE106E	Novo	ENTF080745
393464	15,0	2	34,5-31,5	254/127	0,94	71	301	372	2,82	8	EBEBTE106E	Novo	ENTF080746
393465	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,61	74	299	373	2,81	6	EBEBTE106E	Novo	ENTF080747
393466	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,01	68	297	365	2,80	4	EBEBTE106E	Novo	ENTF080748
393467	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080749
393468	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,30	76	295	371	2,81	2	EBEBTE106E	Novo	ENTF080750
393469	15,0	2	34,5-31,5	254/127	0,95	56	294	350	2,81	1	EBEBTE106E	Novo	ENTF080751
393470	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080752
393471	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,52	79	297	376	2,84	4	EBEBTE106E	Novo	ENTF080753
393472	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /				EBEBTE106E	Novo	ENTF080754
393473	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080755
393474	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,31	70	307	377	2,86	14	EBEBTE106E	Novo	ENTF080756
393475	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080757
393476	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,35	75	299	375	2,84	6	EBEBTE106E	Novo	ENTF080758
393477	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080759
393478	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080760
393479	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080761
393480	15,0	2	34,5-31,5	254/127	1,58	83	305	387	2,90	12	EBEBTE106E	Novo	ENTF080762
393481	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080763
393482	15,0	2	34,5-31,5	254/127	2,17	88	297	384	2,82	4	EBEBTE106E	Novo	ENTF080764
393483	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080765
393484	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080766
393485	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080767
393486	15,0	2	34,5-31,5	254/127	/ FALTA	VAZIO / FALTA	CURTO / FALTA	OUTROS /			EBEBTE106E	Novo	ENTF080768

Responsável pelo Ensaio:

Inspetor do Cliente:

Figura 3.36: Exemplo de relatório resumido [cortesia "ITAIPU"].



CETEMEQ - Centro Técnico de Manutenção de Equipamentos
Rua Lavapés, 463 - Cambuci São Paulo SP Fone: (11) 3272-2147 Fax: 270-0462

Registro Mensal de Controle de Defeitos

MÊS:	MARÇO	META GERAL:	8.0 [%]	META ABERTURA:	2.0 [%]
------	-------	-------------	---------	----------------	---------

CLASSE [KV]	QUANTIDADE DE TRAFOS MONTADOS [PEÇAS]	QUANTIDADE DE DEFEITOS [PEÇAS]	ÍNDICE DE DEFEITOS GERAL [%]	QUANTIDADE DE DEFEITOS ABERTURA [PEÇAS]	ÍNDICE DE DEFEITOS ABERTURA [%]
15	2759	145	5.26	34	1.23
25	452	60	13.27	37	8.19
34,5	1394	43	3.08	11	0.79
TOTAL	4605	248	5.39	82	1.78

DESCRIÇÃO DOS DEFEITOS DO MÊS DE MARÇO				
TIPO DE DEFEITO	TOTAL [%]	15 [KV] [%]	25 [KV] [%]	34,5 [KV] [%]
CORRENTE EXCITAÇÃO	18.55	6.05	11.69	0.81
PERDAS EM VAZIO				
PERDAS TOTAIS				
IMPEDÂNCIA				
TTR FORA	11.29	5.65	2.42	3.23
TTR CURTO	2.02	0.81		1.21
TTR ABERTO	2.02	1.61	0.40	
BT CURTO	4.84	3.63		1.21
AT ABERTA	6.85	4.44	0.40	2.02
INDUZIDA	8.06	2.42	4.03	1.61
APLICADA AT	10.08	2.42	5.65	2.02
APLICADA BT	2.42	2.42		
ESTANQUEIDADE	32.26	27.02	0.40	4.84
OUTROS	6.85	5.24	0.81	0.81

ÍNDICE DE DEFEITOS DOS ÚLTIMOS 12 MESES												
MÊS	MAR.	FEV.	JAN.	DEZ.	NOV.	OUT.	SET.	AGO.	JUL.	JUN.	MAI.	ABR.
GERAL [%]	5.39	6.19	6.38		7.79	9.28					13.04	4.41
ABERTURA [%]	1.78	3.23	2.82		1.98	1.67					1.82	0.80

RESPONSÁVEL:	OBSERVAÇÕES:	DATA:
		29/07/2006

Figura 3.37: Exemplo de relatório mensal de defeitos [cortesia "ELETROPAULO"].

3.7 FERRAMENTAS GERAIS

Neste sub-menu do programa, pode-se ter acesso a várias ferramentas complementares à realização de ensaios, análise de ensaios realizados, transferência de arquivos, gerenciamento de lotes e consulta a valores máximos de norma. As principais ferramentas são detalhadas a seguir e a figura 3.38 mostra a tela de seleção das ferramentas disponíveis.



Figura 3.38: Tela de seleção de ferramentas.

3.7.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Esta é uma das ferramentas mais importantes implementadas, permite analisar para um conjunto de transformadores idênticos, através de gráficos e tabelas, o comportamento das grandezas elétricas $I_0\%$, P_0 , P_{TOT} e $Z\%_{REF}$ confrontando-as com os valores de norma. A média aritmética, valores máximos e mínimos e o desvio padrão também são calculados. As figuras 3.39, 3.40 e 3.41 ilustram esta análise para um lote de 670 transformadores.



Construções Eletromecânicas S.A.

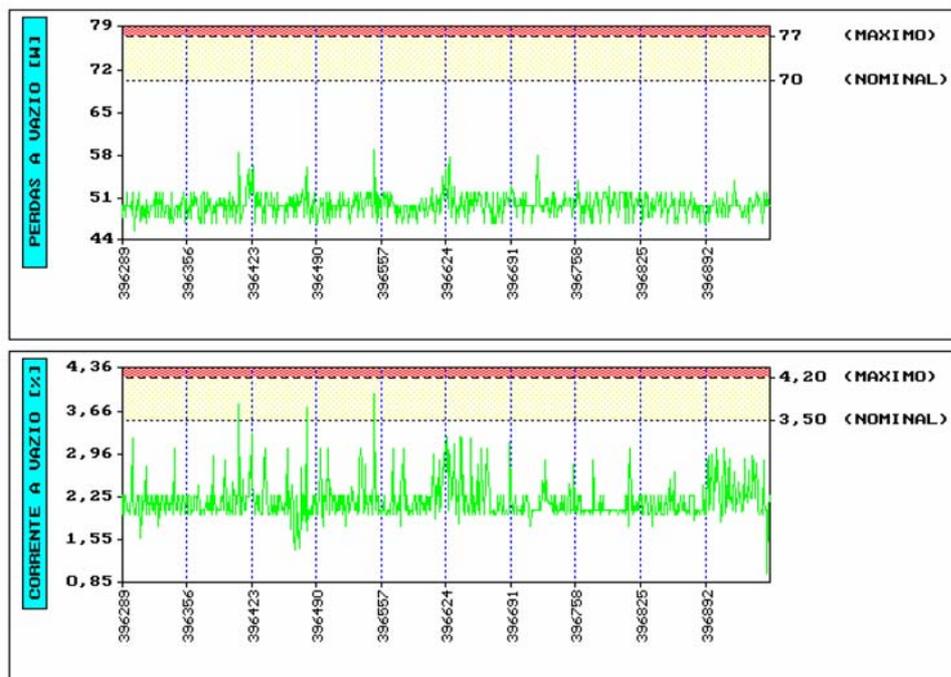
RELATÓRIO ESTATÍSTICO COM GRÁFICOS

Pág. : 01

<i>Ligação/Classe:</i>	MONO. - 15 [KV]	<i>Nome do LOTE :</i>	ESCMON4
<i>Potência :</i>	10 [KVA]	<i>Total Arquivos:</i>	670

<i>Perdas a Vazio [W]</i>				
<i>Mínimo:</i>	46	<i>Máximo:</i>	59	<i>Média :</i> 50
				<i>Desvio :</i> 2

<i>Corrente a Vazio [%]</i>				
<i>Mínimo:</i>	1.02	<i>Máximo:</i>	3.93	<i>Média :</i> 2.19
				<i>Desvio :</i> 0.32



Av. TENENTE LISBOA, 1000, ÁLVARO WEYNE, CEP 60350-070 - FORTALEZA-CE FONE (85) 4005-6666 - FAX (85) 4005-6665

Figura 3.39: Pagina 1 do relatório gráfico de análise estatística [cortesia "CEMEC"].



Construções Eletromecânicas S.A.

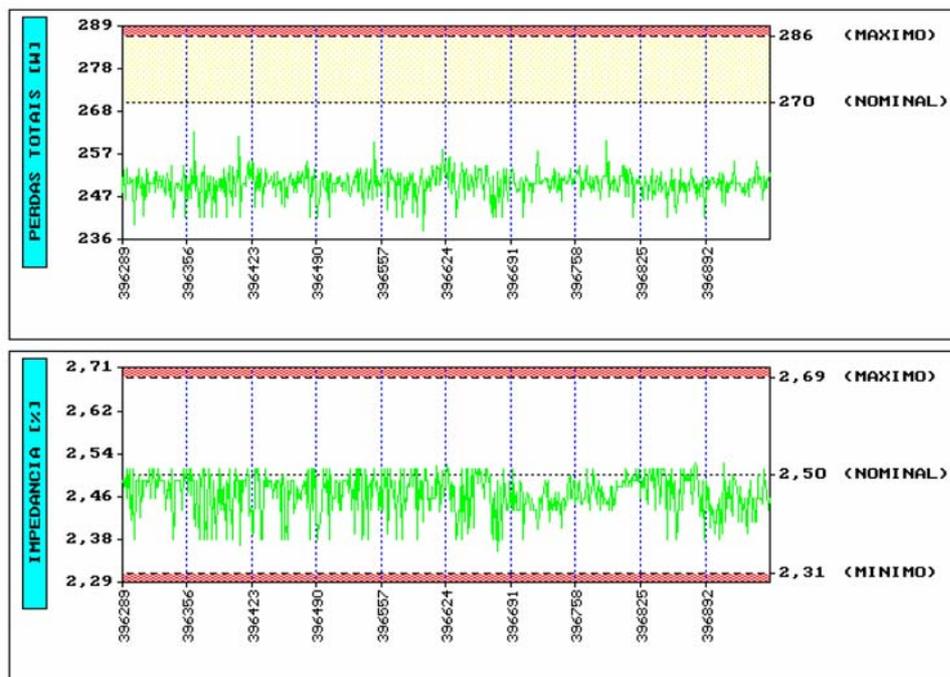
RELATÓRIO ESTATÍSTICO COM GRÁFICOS

Pág. : 02

<i>Ligação/Classe:</i>	MONO. - 15 [KV]	<i>Nome do LOTE :</i>	ESCMON4
<i>Potência :</i>	10 [KVA]	<i>Total Arquivos:</i>	670

<i>Perdas Totais [W]</i>					
<i>Mínimo:</i>	239	<i>Máximo:</i>	263	<i>Média :</i>	250
				<i>Desvio :</i>	3

<i>Impedância [%]</i>					
<i>Mínimo:</i>	2.35	<i>Máximo:</i>	2.52	<i>Média :</i>	2.46
				<i>Desvio :</i>	0.04



Av. TENENTE LISBOA, 1000, ÁLVARO WEYNE, CEP 60350-070 - FORTALEZA-CE FONE (85) 4005-6666 - FAX (85) 4005-6665

Figura 3.40: Pagina 2 do relatório gráfico de análise estatística [cortesia "CEMEC"].



Construções Eletromecânicas S.A.

MONO. -15 [KV] 10 [KVA] NT: 670 Pág. : 07

Número série	Perdas a vazio [W]	Corrente a vazio [%]	Perdas totais [W]	Impedância [%]	Patrimônio
396548	48	1.96	246	2.48	ESTF348436
396549	52	2.79	254	2.51	ESTF348437
396550	59	3.93 *	260	2.50	ESTF348438
396551	50	2.03	252	2.48	ESTF348439
396552	47	2.29	247	2.49	ESTF348440
396553	52	2.29	252	2.48	ESTF348441
396554	51	2.29	250	2.45	ESTF348442
396555	48	1.96	250	2.43	ESTF348443
396556	51	2.03	250	2.44	ESTF348444
396557	48	1.96	248	2.51	ESTF348445
396558	50	2.03	250	2.43	ESTF348446
396559	52	2.03	254	2.43	ESTF348447
396560	50	2.03	250	2.51	ESTF348448
396561	52	2.03	252	2.49	ESTF348449
396562	51	1.96	252	2.48	ESTF348450
396563	52	1.96	254	2.51	ESTF348451
396564	48	2.03	244	2.39	ESTF348452
396565	51	2.03	249	2.43	ESTF348453
396566	50	1.96	252	2.51	ESTF348454
396567	52	2.03	254	2.48	ESTF348455
396568	51	2.03	251	2.48	ESTF348456
396569	50	3.05	251	2.45	ESTF348457
396570	50	2.99	252	2.45	ESTF348458
396571	50	2.99	250	2.49	ESTF348459
396572	47	2.42	242	2.38	ESTF348460
396573	50	2.03	248	2.43	ESTF348461
396574	50	2.03	250	2.45	ESTF348462
396575	48	2.03	250	2.45	ESTF348463
396576	49	2.29	250	2.47	ESTF348464
396577	50	1.78	253	2.51	ESTF348465
396578	49	2.29	250	2.45	ESTF348466
396579	47	2.42	242	2.38	ESTF348467
396580	48	2.29	248	2.51	ESTF348468
396581	50	2.03	252	2.48	ESTF348469
396582	50	2.03	248	2.43	ESTF348470
396583	50	2.03	246	2.46	ESTF348471
396584	50	2.99	252	2.48	ESTF348472
396585	47	1.96	248	2.48	ESTF348473
396586	50	2.03	253	2.49	ESTF348474
396587	48	1.96	250	2.48	ESTF348475
396588	50	2.03	252	2.51	ESTF348476
396589	50	1.96	253	2.48	ESTF348477
396590	48	2.03	243	2.49	ESTF348478
396591	50	2.99	250	2.51	ESTF348479
396592	50	2.03	250	2.51	ESTF348480
396593	48	2.29	249	2.49	ESTF348481
396594	47	1.96	242	2.38	ESTF348482
396595	48	2.03	246	2.51	ESTF348483
396596	50	2.99	248	2.43	ESTF348484
396597	49	2.29	251	2.49	ESTF348485
396598	50	1.96	250	2.45	ESTF348486
396599	51	2.29	254	2.49	ESTF348487
396600	50	2.03	248	2.41	ESTF348488
396601	50	2.03	239	2.46	ESTF348489
396602	48	2.03	246	2.51	ESTF348490
396603	51	2.29	251	2.49	ESTF348491
396604	50	1.96	248	2.51	ESTF348492
396605	48	2.25	250	2.47	ESTF348493
396606	50	2.26	252	2.43	ESTF348494
396607	50	2.03	250	2.45	ESTF348495
396608	50	2.03	248	2.43	ESTF348496
396609	53	2.47	255	2.48	ESTF348497
396610	49	2.26	251	2.46	ESTF348498
396611	50	1.94	253	2.46	ESTF348499
396612	47	1.88	250	2.46	ESTF348500

* Na faixa de tolerância ** Fora de Norma

Figura 3.41: Página 7 de um total de 13, da listagem de análise estatística [cortesia "CEMEC"].

3.7.2 HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS

Visando melhorar o processo de controle de qualidade é necessário documentar os defeitos encontrados nos testes elétricos e mecânicos no próprio arquivo de dados para posterior análise. Inicialmente é aberta uma ocorrência aonde se informa o tipo de defeito e a data. Após a sua correção esta deve ser fechada. A figura 3.42 mostra um transformador com alguns defeitos corrigidos documentados.



Figura 3.42: Histórico de defeitos em um transformador.

3.7.3 OBSERVAÇÃO DO FABRICANTE

Esta opção permite ao fabricante, adicionar comentários técnicos ao arquivo de ensaios.

3.7.4 TRANSFERÊNCIA DE ARQUIVOS

Como pode ser visto nos capítulos 4 e 5, foram desenvolvidos os instrumentos MONITEK9610 e MONITEK9920 com seus respectivos softwares responsáveis pela automação dos ensaios medição de resistência ôhmica e relação de transformação. Como estes instrumentos normalmente estão ligados a um computador diferente daquele onde está instalado o programa TRANS4 e caso não estejam ligados em

rede, é necessário levar as informações de cadastro e trazer o resultado dos ensaios através de disquete usando-se esta ferramenta.

3.7.5 ALTERAÇÕES NOS LOTES

Um arquivo de lote contém os nomes de um determinado conjunto de transformadores que se desejam agrupar facilitando a análise estatística e a impressão de relatórios para esse lote. Esta ferramenta permite criar, alterar e excluir lotes.

3.7.6 CONSULTA A NORMA

Permite consultar os valores máximos permitidos para $I_0\%$, P_0 , P_{TOT} e $Z\%_{REF}$ por classe de tensão, de acordo com as normas NBR 5440/1987 e NBR 5440/1999.

3.7.7 LANÇA NÚMEROS SEQUENCIAIS DE PATRIMÔNIO

Ferramenta que facilita a inclusão posterior do número de patrimônio da companhia compradora, no arquivo de ensaios.

3.7.8 LIBERA ENSAIOS BLOQUEADOS

É possível bloquear automaticamente para impressão, transformadores com valores de $I_0\%$, P_0 , P_{TOT} e $Z\%_{REF}$ maiores que os permitidos por norma. Esta ferramenta permite liberar para impressão estes ensaios.

3.7.9 ENSAIO EM VAZIO COM 105% DE UN

A grande concorrência no mercado de transformadores de distribuição tem levado os fabricantes a projetarem seus transformadores cada vez mais próximos dos valores máximos permitidos por norma. Esta economia no projeto faz com que o transformador para tensão nominal já esteja quase saturado. Apesar de não estar normalizado, é prática comum as companhias de distribuição exigirem que o ensaio em vazio, que faz parte do cálculo das perdas totais, para o ensaio de elevação de

temperatura, seja feito com 105 [%] da tensão nominal. O objetivo é verificar o efeito do aumento das perdas em vazio, no aquecimento do transformador.

3.8 CONFIGURAÇÃO GERAL

Este menu permite configurar impressoras, unidades, métodos de cálculo, relações de TP e TC, etc. A figura 3.43 mostra as configurações possíveis. São detalhadas as mais importantes.



Figura 3.43: Menu de configurações gerais.

3.8.1 MÉTODO DE CÁLCULO DE PERDAS

Conforme visto no item 3.51 deste capítulo a equação 3.39 permite calcular as perdas adicionais em função do ensaio em curto-circuito e das perdas *joule*, denominado cálculo exato. Como as perdas *joule* dependem das resistências ôhmicas dos enrolamentos e se estas não forem medidas corretamente podem-se obter perdas adicionais negativas, o que é incoerente. Caso não seja possível medir as resistências ôhmicas pode-se usar um método aproximado no qual é escolhido um valor para as perdas adicionais como sendo uma porcentagem das perdas em vazio.

3.8.2 CONFIGURA RTP'S E RTC'S

Uma mesa de medição, para realizar os ensaios em vazio e em curto-circuito, precisa ter instalados transformadores de potencial (tp's) e de corrente (tpc's), para adequar as tensões e correntes de ensaio com os instrumentos de medição, para facilitar os ensaios, as relações dos tp's e dos tc's devem ser previamente cadastrados no programa TRANS4. A figura 3.44 ilustra este procedimento.

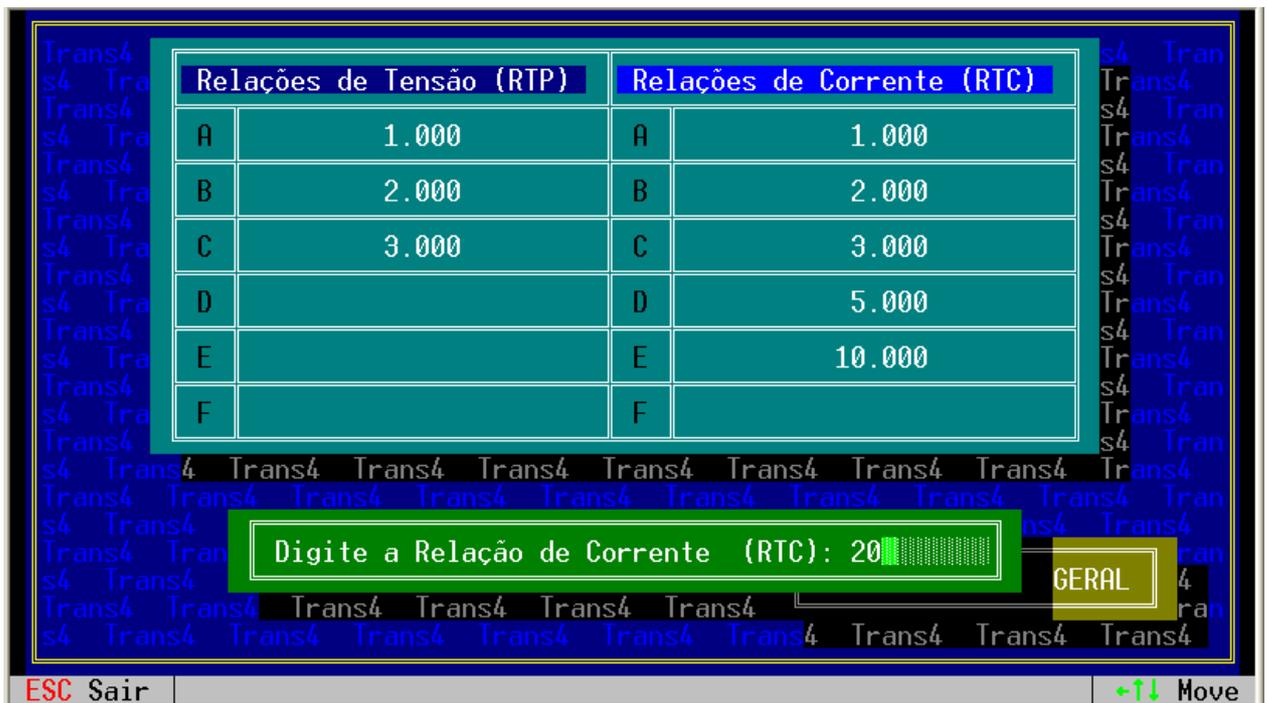


Figura 3.44: Menu de cadastro dos tp's e tc's.

3.8.3 CONFIGURA A PORTA SERIAL

Este sub-menu permite escolher a velocidade e porta serial⁸ do computador à qual está conectado o instrumento MONITEK9443. O programa também pode detectar automaticamente o instrumento. A figura 3.45 ilustra esta escolha.

⁸ COM1, COM2 e COM3



Figura 3.45: Configuração da porta serial.

3.8.4 CONFIGURAÇÕES FUNCIONAIS

Este sub-menu permite fazer mais uma série de configurações classificadas como funcionais, ilustradas na figura 3.46.



Figura 3.46: Configurações funcionais.

CAPÍTULO 4

INSTRUMENTO MONITEK9610 E PROGRAMA RTMED.EXE

O MONITEK9610 é um instrumento digital especialmente desenvolvido para realizar o ensaio de relação de transformação (RT) em transformadores de distribuição, nas três classes de tensão mais comuns: 15, 25 e 36 [kV]. Para estas classes, têm-se em um extremo⁹ transformadores com relação de transformação próxima de 25 e no outro extremo¹⁰ relações de 300, por este motivo o instrumento foi projetado para atender a esta faixa de medição. Além de medir a RT, também identifica defeitos comuns tais como:

- Bobinas abertas;
- Bobinas em curto;
- Defeito no comutador;
- Inversão de polaridade;
- Defasamento angular incorreto;
- Erros maiores que os permitidos.

4.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Um equipamento convencional (TTR) opera pelo princípio de que a relação de transformação, em um transformador sem carga, é praticamente igual à relação de espiras. A principal fonte de erro neste ensaio é que a impedância primária cai com a corrente de magnetização, desta forma, para minimizar este efeito, o instrumento deve aplicar uma pequena fração da tensão nominal do enrolamento.

Ao se usar um TTR convencional que mede uma RT por vez, em um transformador trifásico, para cada *tap* da AT são feitos três ensaios, um para cada fase, sendo necessário trocar as garras de medição das buchas AT e BT. Este processo é repetido para todos os *taps* e além disso, deve-se ter conhecimento do diagrama fasorial. Como se pode perceber, é um ensaio demorado e sujeito a vários erros por parte do operador.

⁹ Transformador monofásico com AT de 5989 [V] e BT de 230 [V]

¹⁰ Transformador monofásico com AT de 34500 [V] e BT de 115 [V]

O *hardware* deste instrumento foi desenvolvido para atender a todas as polaridades e defasamentos angulares (DA) implementados no programa TRANS4. A filosofia adotada no projeto consiste em se usar uma fonte de tensão alternada com frequência de 60 [Hz] e 7 [V] de tensão senoidal, que será aplicada consecutivamente às buchas da BT (X1, X2 e X3), selecionadas por meio dos relés K1, K2 ou K3 (figura 4.1). Os relés K11, K22 e K33 assim como os relés KH1, KH2 e KH3, permitem ligar respectivamente as buchas da BT e AT ao “terra” do circuito de medição. As tensões aplicadas aos enrolamentos da BT assim como as tensões induzidas na AT são lidas por um circuito de medição de seis canais (UX_1 , UX_2 , UX_3 , UH_1 , UH_2 e UH_3) detalhado junto com o restante do *hardware*.

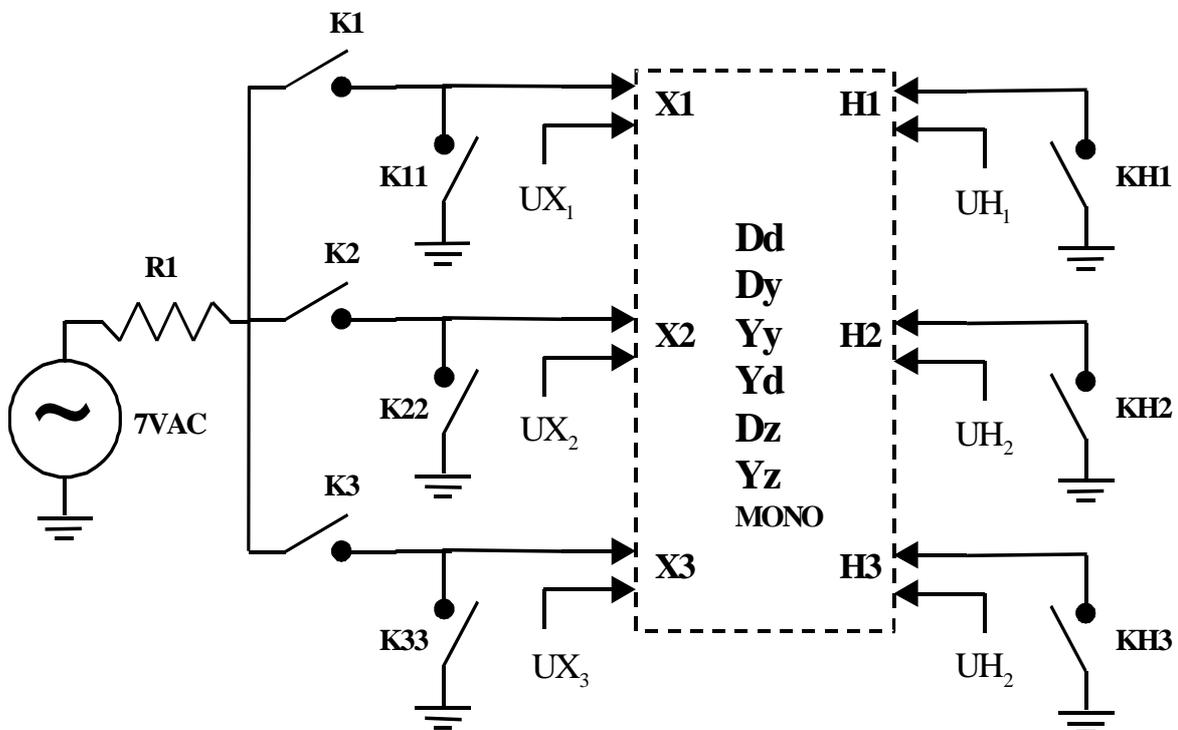


Figura 4.1: Circuito básico de excitação e ligação dos relés ao transformador sob ensaio.

4.1.1 MEDIÇÃO EM TRANSFORMADOR Dy1

Para um transformador Dy1, com diagrama de ligações ilustrado na figura 4.2, para obter a relação de espiras da fase A (RT_1), os relés K1, K22, KH2 e KH3 devem ser fechados (ligados). K1 é responsável por aplicar a tensão da fonte à bucha X1, enquanto que K22, KH2 e KH3 ligam as buchas X2, H2 e H3 ao “terra” do circuito. Como a bobina H3 (“coluna 3”) está curto-circuitada pelos relés KH2 e KH3, não há

tensão induzida na bobina X3, por isso a tensão medida em X3 é igual à tensão em X0.

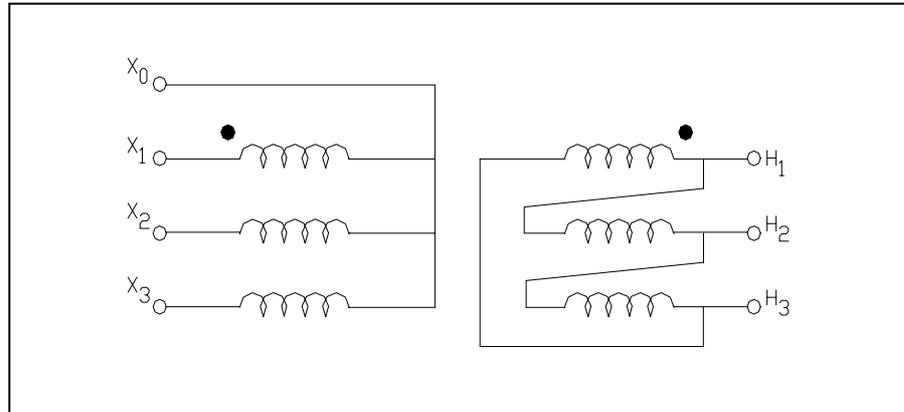


Figura 4.2: Diagrama de ligações Dy1.

Medindo-se as tensões em todos os canais, determina-se a relação RT_1 de acordo com a expressão:

$$RT_1 = \frac{UH_1}{UX_1 - UX_3} \quad (4.1)$$

Seguindo o procedimento anterior, agora para a medição da fase B, devem ser fechados os relés K2, K33, KH1 e KH3. Após a medição das tensões determina-se a relação RT_2 :

$$RT_2 = \frac{UH_2}{UX_2 - UX_1} \quad (4.2)$$

Por último para a fase C, os relés K3, K11, KH1 e KH2 devem ser fechados e obtendo-se RT_3 :

$$RT_3 = \frac{UH_3}{UX_3 - UX_2} \quad (4.3)$$

Para os demais defasamentos angulares, ou transformadores monofásicos, implementados até ao momento, o processo é similar, fechando-se os relés adequados e calculando RT_1 , RT_2 e RT_3 com equações próprias para cada caso de acordo com a tabela 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1: Procedimento para algumas ligações trifásicas.

DEFASAMENTO ANGULAR	RELÉS LIGADOS	CÁLCULO DE RT_1, RT_2, RT_3
Dy1, Dy7	K1, K22, KH2, KH3	$RT_1 = \frac{UH_1}{UX_1 - UX_3}$
	K2, K33, KH1, KH3	$RT_2 = \frac{UH_2}{UX_2 - UX_1}$
	K3, K11, KH1, KH2	$RT_3 = \frac{UH_3}{UX_3 - UX_2}$
Dy11, Dy5	K1, K33, KH2, KH3	$RT_1 = \frac{UH_1}{UX_1 - UX_2}$
	K2, K11, KH1, KH3	$RT_2 = \frac{UH_2}{UX_2 - UX_3}$
	K3, K22, KH1, KH2	$RT_3 = \frac{UH_3}{UX_3 - UX_1}$
Dz0, Dz6, Yy0, Yy6	K1, K22, KH2	$RT_1 = \frac{UH_1}{UX_1}$
	K2, K33, KH3	$RT_2 = \frac{UH_2}{UX_2}$
	K3, K11, KH1	$RT_3 = \frac{UH_3}{UX_3}$
Yz11, Yz5	K1, K33, KH2, KH3	$RT_1 = \frac{UH_1}{UX_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}$
	K2, K11, KH1, KH3	$RT_2 = \frac{UH_2}{UX_2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}$
	K3, K22, KH1, KH2	$RT_3 = \frac{UH_3}{UX_3 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}$

Tabela 4.1: (continuação).

DEFASAMENTO ANGULAR	RELÉS LIGADOS	CÁLCULO DE RT_1, RT_2, RT_3
Dd0	K1, K33, KH3	$RT_1 = \frac{UH_1}{UX_1}$
	K2, K11, KH1	$RT_2 = \frac{UH_2}{UX_2}$
	K3, K22, KH2	$RT_3 = \frac{UH_3}{UX_3}$
Yd1	K1, K22, K33, KH2	$RT_1 = \frac{UH_1 - UH_3}{UX_1}$
	K2, K11, K33, KH3	$RT_2 = \frac{UH_2 - UH_1}{UX_2}$
	K3, K11, K22, KH1	$RT_3 = \frac{UH_3 - UH_1}{UX_3}$

Tabela 4.2: Procedimento para transformadores monofásicos.

MONOFÁSICO	RELÉS LIGADOS	CÁLCULO DE RT_1, RT_2, RT_3
BT com X1 e X2	K1, K22, KH2	$RT_1 = \frac{UH_1}{UX_1}$
BT com X1, X2 e X3	K1, K22, KH2	$RT_1 = \frac{UH_1}{UX_1}$
	K2, K22, KH1	$RT_2 = \frac{UH_2}{UX_3}$
		$RT_3 = \frac{RT_1 \cdot RT_2}{RT_1 + RT_2}$

4.2 DESCRIÇÃO DETALHADA DO HARDWARE

Neste instrumento o *hardware* desenvolvido foi distribuído em seis placas de circuito impresso:

- Placa 1 - Fontes de alimentação com tensões e +5 [V], +15 [V] e -15 [V];
- Placa 2 - Unidade central de processamento, memórias e circuitos lógicos;
- Placa 3 - Circuito com interface de comunicação de dados;
- Placa 4 - Circuitos de conversão análogo-digital (aquisição de dados);
- Placa 5A - Fonte de excitação e circuito de acionamento dos relés;
- Placa 6A - Circuito condicionador das entradas de tensão (BT e AT).

As placas de 1 a 4 compõem o sistema básico conforme foi visto no capítulo 2.

4.2.1 PLACA 5A - FONTE DE EXCITAÇÃO E CIRCUITO DE ACIONAMENTO DOS RELÉS

Nesta placa está montado o circuito de excitação, composto por um transformador que fornece uma tensão de 7 [V] com capacidade de até 1 [A], o circuito de acionamento dos relés, nove relés, diodos zener de proteção, um resistor limitador de corrente e conectores para interligação com a placa 6A.

As figuras 4.1 e 4.2 ilustram esta placa e o seu circuito eletrônico encontra-se no apêndice A.

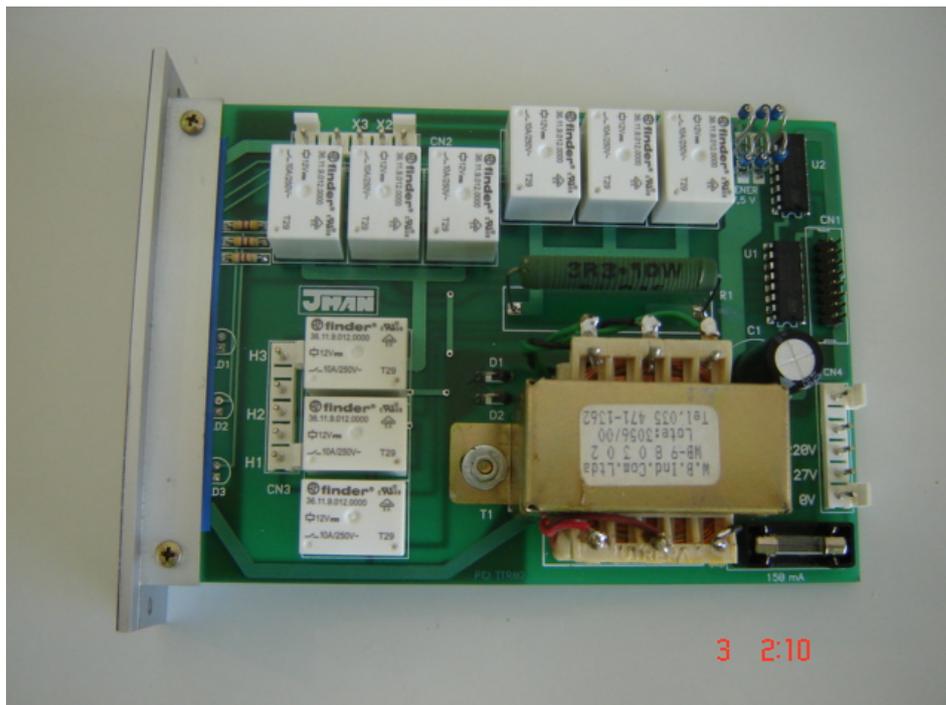


Figura 4.3: Foto da placa 5A com a fonte e relés.



Figura 4.4: Foto frontal da placa 5A com a fonte e relés.

4.2.2 PLACA 6A - CIRCUITO CONDICIONADOR DAS ENTRADAS DE TENSÃO

Esta placa é responsável por aplicar, ao transformador sob ensaio, a tensão de excitação proveniente da placa 5A por meio de bornes próprios e pela leitura desta mesma tensão só que retornando por bornes separados, garantindo a leitura da tensão correta na bucha. Também são lidas as tensões induzidas na AT.

Ao se excitar o enrolamento da BT com uma tensão que pode variar de 3 a 7 volts, para transformadores da classe 36 [kV], a tensão induzida na AT pode chegar a 1000 [V]. Como visto no capítulo 2, a tensão de entrada de cada canal, na placa 4 de conversão AD é de no máximo 1,7 [V].

O condicionamento para as tensões lidas na BT é feito por meio de amplificadores operacionais na configuração diferencial, atenuando de 7 [V] para 1,7 [V].

As tensões lidas da AT são atenuadas por meio de um circuito divisor resistivo formado por 8 resistores em série e dois em paralelo calculados de acordo com a equação 2.1. As figuras 4.5 e 4.6 ilustram esta placa.

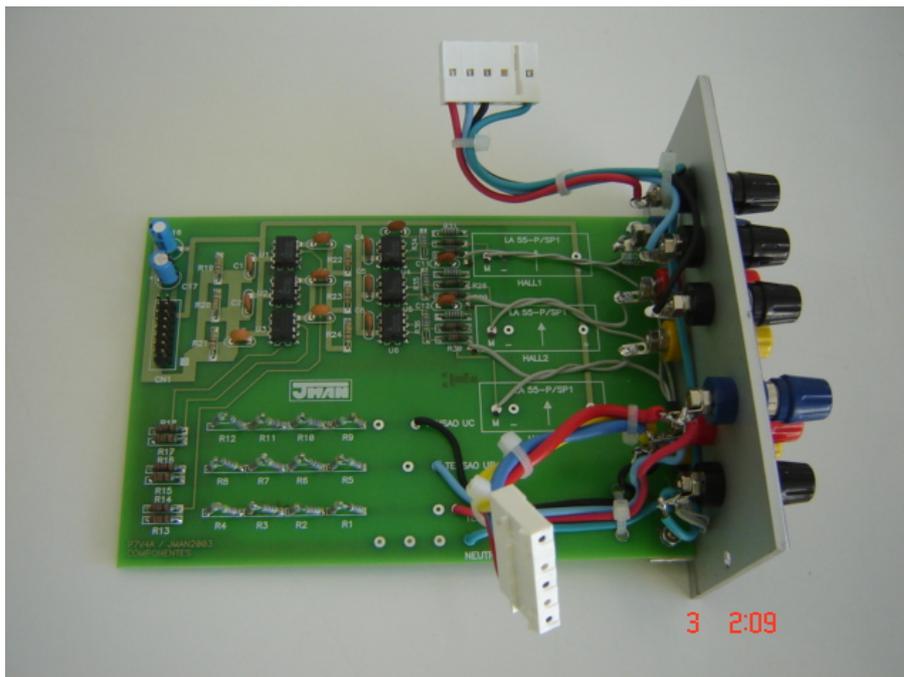


Figura 4.5: Foto da placa 6A.

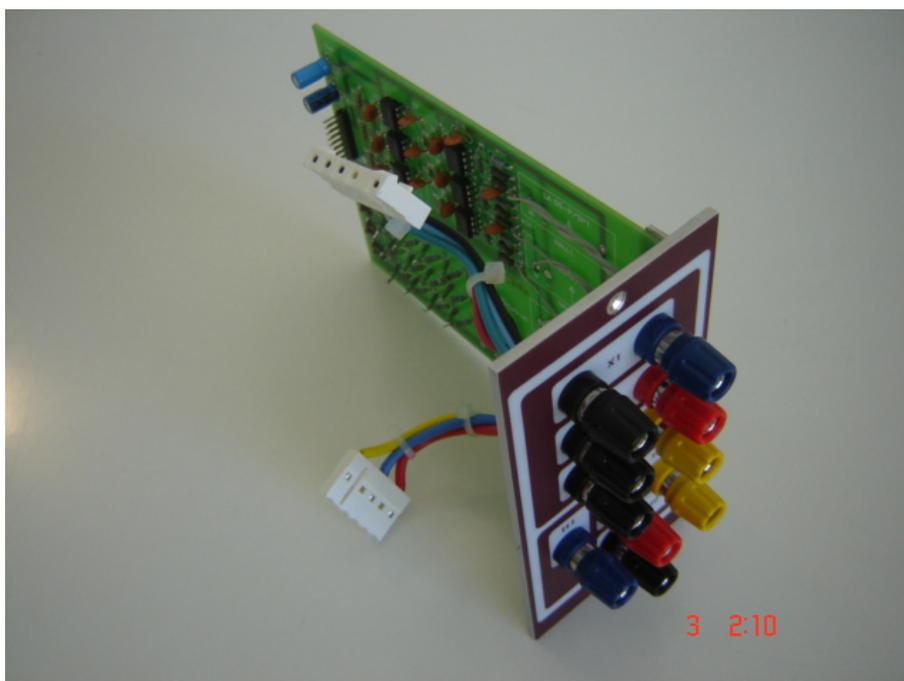


Figura 4.6: Foto da vista frontal da placa 6A.

4.2.3 BASTIDOR (CAIXA) DE MONTAGEM DAS PLACAS

As placas de circuito impresso deste instrumento foram alojadas em um bastidor de alumínio padrão IMS. Nas figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 pode-se observar como as placas são interligadas e alojadas no bastidor de alumínio.

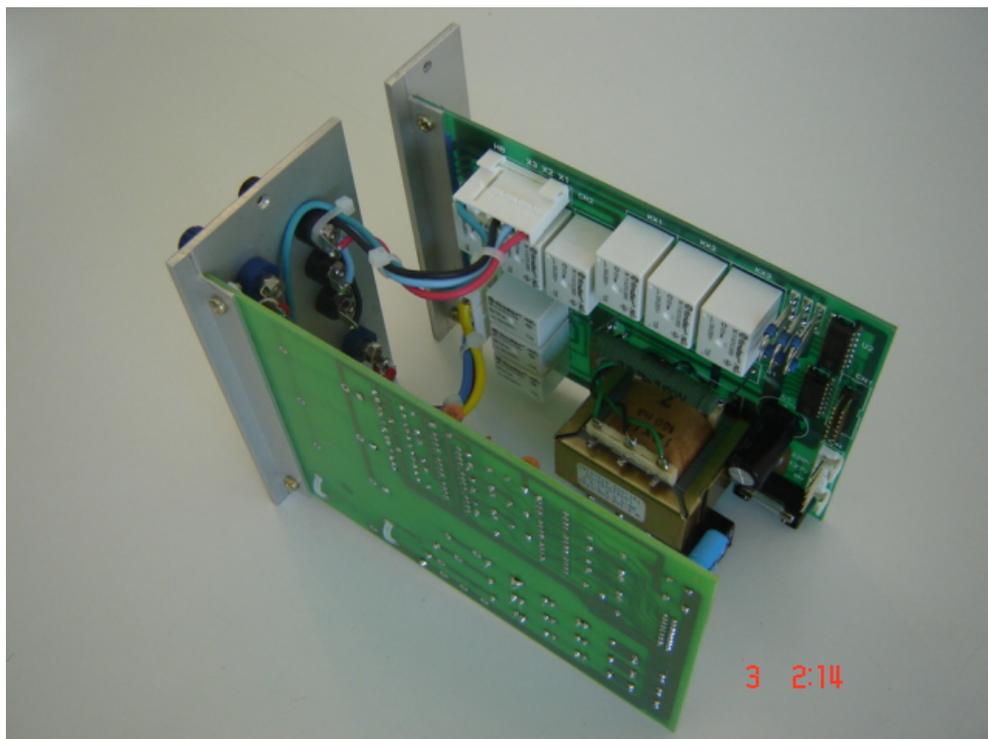


Figura 4.7: Detalhe da placa 5A interligada com a placa 6A.

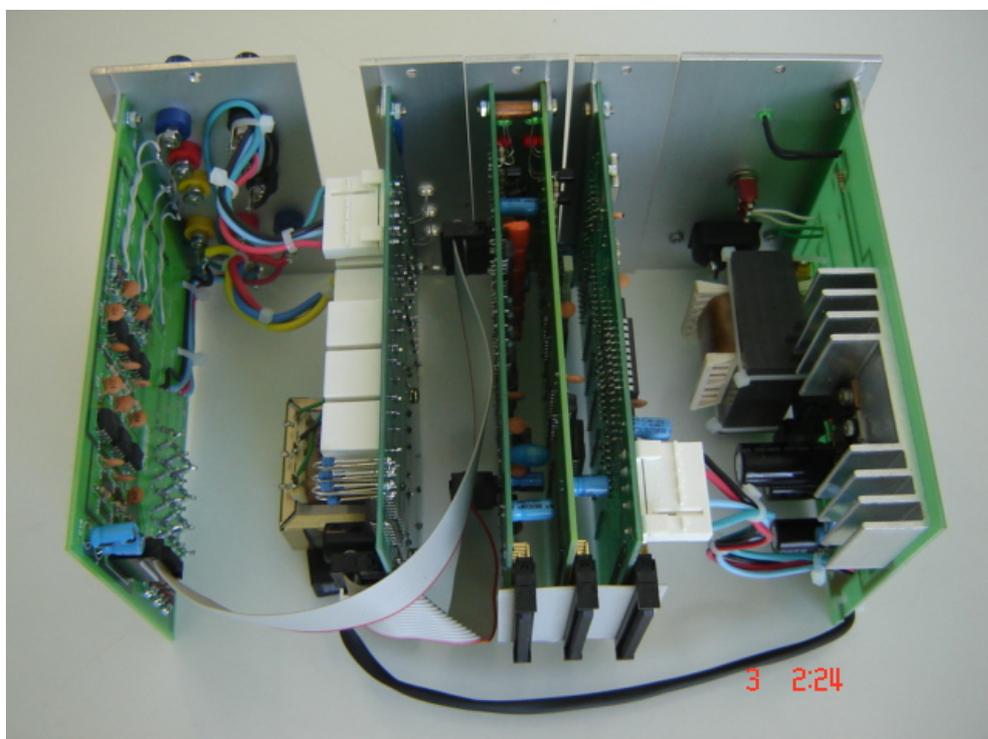


Figura 4.8: Vista traseira do conjunto de placas interligadas.

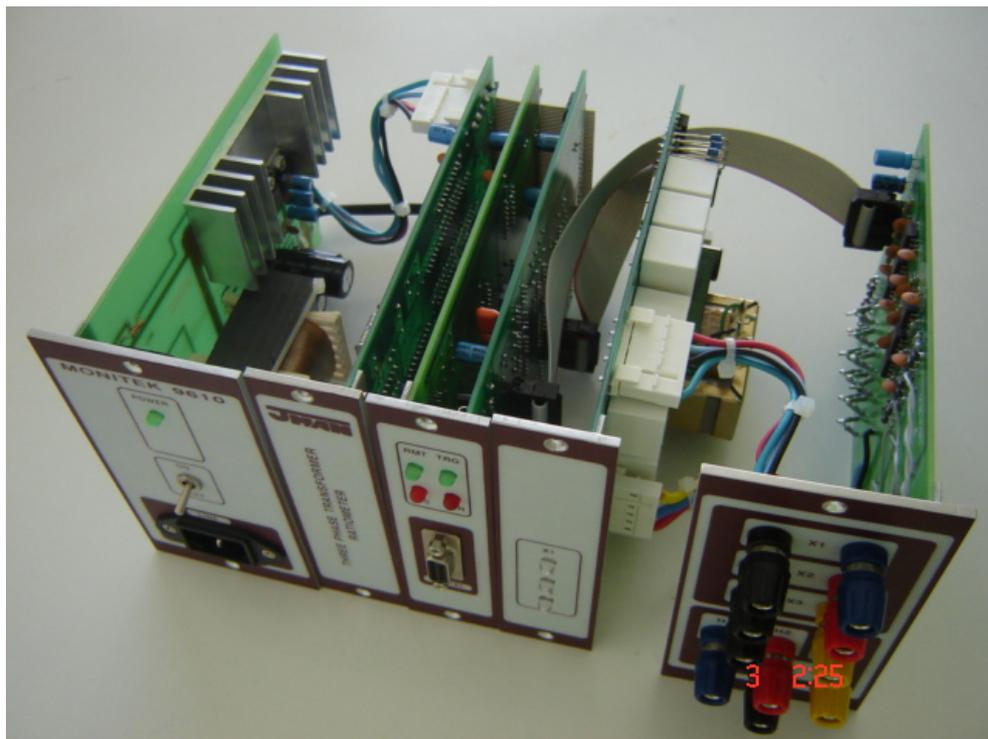


Figura 4.9: Vista frontal do conjunto de placas interligadas.



Figura 4.10: Instrumento MONITEK9610 completamente montado.

4.3 CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO E PRECISÃO OBTIDA

Pelos motivos expostos em 2.4 (capítulo 2, seção 4) a calibração foi feita por meio de constantes de calibração, para cada canal, que são gravadas na memória do próprio instrumento.

Por meio de calibrador padrão foram injetadas no instrumento simultaneamente, tensões nas entradas X1, X2 X3 e nas entradas H1, H2 e H3, simulando as mesmas tensões presentes na BT e AT durante o ensaio de RT. O valor calculado pelo instrumento é comparado com a divisão das tensões aplicadas.

O erro absoluto para este instrumento deve ser inferior a 0,15 [%].

4.3.1 NORMAS E PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA A CALIBRAÇÃO

- Para cada ponto foram feitas três leituras, a calibração foi realizada pelo método da comparação. A incerteza expressa é baseada em uma incerteza combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k=2$, para um nível de confiabilidade de 95% [16];
- A temperatura ambiente do local de calibração foi mantida em: $25 [^{\circ}\text{C}] \pm 3 [^{\circ}\text{C}]$ e a umidade relativa do ar menor que 60 [%];
- Procedimento específico de calibração proc2002_jman9610_01;
- Critérios específicos para calibração de instrumentos analógicos e digitais de medição na área de eletricidade [17];
- Guia para a expressão da incerteza de medição [5] [16].

O padrão utilizado neste processo de calibração é o FLUKE 5500A, que possui certificados de calibração rastreados à DKD e RBC.

A tabela 4.3 apresenta a planilha de calibração.

Tabela 4.3: Planilha de calibração do MONITEK9610.

Relação real	Relação medida H1/X1			Relação medida H2/X2			Relação medida H3/X3		
	Relação	Desvio	Incerteza total (+/-)	Relação	Desvio	Incerteza total (+/-)	Relação	Desvio	Incerteza total (+/-)
25,000	25,028	0,028	0,024	25,016	0,016	0,036	25,017	0,017	0,025
50,000	50,028	0,028	0,050	50,021	0,021	0,050	50,024	0,024	0,046
75,000	75,044	0,044	0,062	75,030	0,030	0,066	75,030	0,030	0,062
100,000	100,045	0,045	0,094	100,038	0,038	0,082	100,037	0,037	0,082
125,000	125,034	0,034	0,109	125,067	0,067	0,104	125,047	0,047	0,104
150,000	150,048	0,048	0,134	150,063	0,063	0,121	150,058	0,058	0,127
175,000	175,039	0,039	0,140	175,083	0,083	0,140	175,046	0,046	0,145
200,000	200,045	0,045	0,163	200,062	0,062	0,166	200,051	0,051	0,164
225,000	225,051	0,051	0,189	225,067	0,067	0,180	225,058	0,058	0,180
250,000	250,033	0,033	0,212	250,041	0,041	0,201	250,020	0,020	0,206
275,000	275,017	0,017	0,221	275,041	0,041	0,238	275,044	0,044	0,226
300,000	300,014	0,014	0,245	300,066	0,066	0,241	300,032	0,032	0,243

4.4 PROGRAMA RTMED.EXE

O programa RTMED é um *software* auxiliar responsável pela execução do ensaio de RT, recebe arquivos de dados do programa TRANS4, com todas as informações referentes aos transformadores cadastrados, como número de *taps*, tensões da AT, e BT, defasamento angular ou polaridade, etc. Com estas informações pode executar o ensaio, comunicando-se por porta serial com o MONITEK9610, enviando comandos de acionamento para os relés adequados, fazendo as leituras das tensões de excitação e induzidas e finalmente calculando as RT fase a fase de cada *tap*.

Ao final do ensaio o programa analisa se não ocorreram erros de tap aberto, tap em curto, polaridade ou defasamento angular, diferente do cadastrado e erro de RT maior que o ajustado no programa, geralmente 0,5 [%]. Caso o ensaio tenha passado por estes testes, um novo arquivo de dados é criado com valores medidos para ser lido automaticamente pelo programa TRANS4 no momento apropriado.

Conforme já visto no capítulo 3, caso os programas TRANS4 e RTMED não estejam no mesmo computador, fato comum em fábricas de transformadores, as quais realizam o ensaio de RT logo após a montagem da parte ativa ainda fora do tanque, em um ponto da fábrica diferente daquele aonde são realizados os ensaios vazio e

curto-circuito, neste caso se os computadores não estiverem interligados em rede é necessário transferir os arquivos de dados por meio de disquete.

O menu principal que é a tela inicial do programa, como pode ser visualizado na figura 4.11, contém as seguintes funções:

- Ensaio de transformador cadastrado;
- Ensaio de transformador sem cadastro;
- Ler Cadastros de Disquete;
- Gravar ensaios em disquete;
- Configurações gerais;
- Fim (Sair).

A seguir são descritas as funções citadas.

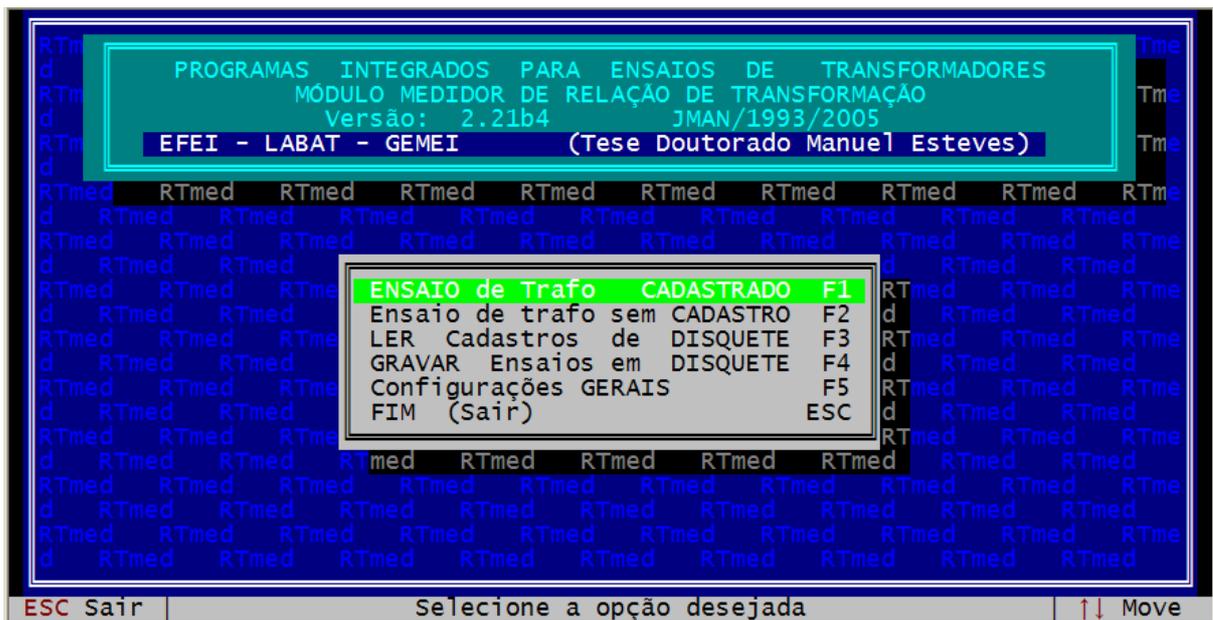


Figura 4.11: Tela Principal do programa Rtmed.

4.4.1 CONFIGURAOES GERAIS

Por meio deste menu, ilustrado na figura 4.12, podem-se configurar vários aspectos funcionais do programa como por exemplo: porta serial de comunicação, fator de correção, tolerância no erro e verifica defeitos.

“Fator de correção” é um ajuste que permite corrigir o erro sistemático do instrumento em +/- 0,15 [%]

“Tolerância no erro” é o valor máximo de erro permitido no ensaio de RT, pode ser ajustado entre 0 e 1 [%]

“Verifica defeitos” se habilitado, só permite gravar o ensaio realizado caso não tenha ocorrido nenhum erro.



Figura 4.12: Tela do menu de configurações gerais.

4.4.2 LER CADASTROS DE DISQUETE e GRAVAR ENSAIOS EM DISQUETE

Conforme já visto, estas ferramentas permitem: ler de disquete, os cadastros previamente gravados pelo TRANS4 e após a realização dos ensaios de RT, gravar novamente em disquete o resultado destes ensaios.

4.4.3 ENSAIO DE TRANSFORMADOR SEM CADASTRO

Para os ensaios de RT realizados por meio desta seleção é necessário fornecer os dados pertinentes a este ensaio. Geralmente esta opção é usada quando se trata de um transformador não cadastrado no TRANS4, ou para fins de teste.

4.4.5 ENSAIO DE TRANSFORMADOR CADASTRADO

Esta função só permite realizar os ensaios de RT, dos transformadores previamente cadastrados no TRANS4 e cujos arquivos criados para este fim, estejam acessíveis ao programa RTMED, conforme pode ser apreciado na figura 4.13



Figura 4.13: Tela de seleção do transformador a ser ensaiado.

Após a leitura do arquivo de cadastro conforme se pode ver, pela tela da figura 4.14, o RTMED identifica o defasamento angular e as RT nominais de todos os *taps*. Na seqüência solicita que sejam ligadas as garras de medição e se selecione o *tap* de maior tensão para se iniciar o ensaio.

Caso o transformador não apresente nenhum defeito, após a leitura de RT_1 , RT_2 e RT_3 (fase A, fase B e fase C) do maior *tap* (*tap* 1) o programa solicita que se comute para o próximo *tap*, conforme visto na figura 4.15. Assim que o operador realiza esta comutação, a rotina de medição, percebendo que houve uma alteração na RT medida, inicia automaticamente as leituras deste novo *tap*. Este procedimento é repetido para todos os *tap*'s. Os valores medidos são gravados em arquivo de dados e apresentados na tela do computador conforme a figura 4.16. Finalmente a figura 4.17 ilustra os defeitos possíveis de serem detectados pelo programa RTMED.

INICIO do ENSAIO

- 1) Conectar as Garras no Trafo
- 2) Selecionar o TAP 1 (13800 [v])
- 3) Tecla <ENTER> para INICIAR

(73336T) 30.0 [KVA] AT:Delta BT:Estrela DY1

TAP	TENSÕES	RTN	FASE I	FASE II	FASE III
1	13800-220/127	108.647			
2	13200-220/127	103.923			
3	12600-220/127	99.199			
4	12000-220/127	94.475			
5	11400-220/127	89.752			
6	10800-220/127	85.028			
7	10200-220/127	80.304			

1 : 7

JMAN ELETRO ELETRONICA

Figura 4.14: Tela do programa RTMED pronto para iniciar o ensaio.

MUDE PARA O TAP 2

ESPERANDO O TAP 2 (13200)

F1 muda de : REAL <-> PORCENTO

Tecla F2 para Ignorar
detecao Automatica

Tecla F3 para Provocar uma PAUSA

(73336T) 30.0 [KVA] AT:Delta BT:Estrela DY1

TAP	TENSÕES	RTN	FASE I	FASE II	FASE III
1	13800-220/127	108.647	0.29 %	-0.32 %	0.20 %
2	13200-220/127	103.923			
3	12600-220/127	99.199			
4	12000-220/127	94.475			
5	11400-220/127	89.752			
6	10800-220/127	85.028			
7	10200-220/127	80.304			

2 : 7

ESC - Abortar o Ensaio

JMAN ELETRO ELETRONICA

Figura 4.15: Tela do programa RTMED solicitando a mudança de tap.

FIM do ENSAIO

F1 muda de : REAL <-> PORCENTO

Tecla <ENTER> para TERMINAR

(73336T) 30.0 [KVA] AT:Delta BT:Estrela DY1

TAP	TENSÕES	RTN	FASE I	FASE II	FASE III
1	13800-220/127	108.647	0.29 %	-0.32 %	0.20 %
2	13200-220/127	103.923	0.29 %	-0.36 %	0.23 %
3	12600-220/127	99.199	0.30 %	-0.38 %	0.21 %
4	12000-220/127	94.475	0.30 %	0.31 %	0.24 %
5	11400-220/127	89.752	0.29 %	0.30 %	0.20 %
6	10800-220/127	85.028	0.29 %	0.30 %	0.23 %
7	10200-220/127	80.304	0.27 %	0.28 %	0.22 %

ESC - Abortar o Ensaio

JMAN ELETRO ELETRONICA

Figura 4.16: Tela do programa RTMED mostrando o final do ensaio.

TRAFO com DEFEITO

FASES ABERTAS : Fase 1 # Fase 2 # Fase 3
 EXISTE(M) FASE(S) EM CURTO
 POLARIDADE : Cadastro=ADITIVA Ensaio=SUBTRATIVA
 EXISTE(M) ERRO(S) MAIORES QUE 0.5 %

Ensaio Cancelado!

Tecla <ENTER> para TERMINAR

(73336T) 30.0 [KVA] AT:Delta BT:Estrela DY1

Figura 4.17: Tela do programa RTMED mostrando os defeitos possíveis.

CAPÍTULO 5

INSTRUMENTO MONITEK9920 E PROGRAMA RHMED.EXE

O MONITEK9920 é um instrumento digital especialmente desenvolvido para realizar o ensaio de medição da resistência ôhmica dos enrolamentos em transformadores de distribuição. Para estes, a menor resistência ôhmica a ser medida, encontra-se no enrolamento da BT (220 [V]) do transformador de maior potência e a maior resistência ôhmica na AT (34,5 [kV]) do transformador de menor potência.

De acordo com a norma NBR 5440 a maior potência padronizada para a distribuição é de 300 [kVA] , cuja resistência ôhmica do enrolamento da BT é tipicamente da ordem de poucos [mΩ]. Por outro lado a menor potência padronizada é de 3 [kVA], cuja resistência ôhmica dos enrolamentos da AT pode passar de 1000 [Ω].

Em transformadores trifásicos de distribuição, se o conjunto de ensaios realizados for apenas para comparação com norma, é suficiente medir apenas as resistências do *tap* nominal, se for necessário fazer o ensaio de elevação de temperatura devem também ser medidas as do *tap* menor e em casos especiais podem ser medidas em todos os *taps*.

5.1 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ÔHMICA

A medição de resistência [20] [21], pode ser feita por meio de equipamentos que utilizam dois ou quatro fios. Na medição a dois fios, ilustrada na figura 5.1, a resistência dos fios é incluída na medição, ou seja:

$$R_{MEDIDO} = \frac{U_{METER}}{I_{TEST}} = R_X + (2 \cdot R_{CABO})$$

Enquanto que a resistência real vale:

$$R_{REAL} = \frac{U_X}{I_{TEST}} = R_X$$

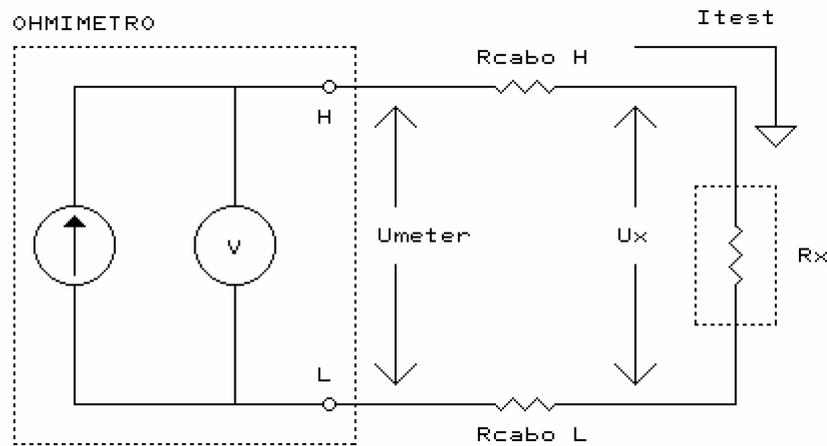


Figura 5.1: Medição de resistência a dois fios.

Na medição a quatro fios (Kelvin), ilustrada na figura 5.2, a resistência dos fios não é incluída na medição, uma vez que a corrente passa por dois fios e a medição de tensão é feita por outros dois, nos quais a queda de tensão é desprezível, desta forma têm-se:

$$U_{METER} = U_X$$

$$R_{MEDIDO} = \frac{U_{METER}}{I_{TEST}} = \frac{U_X}{I_{TEST}} = R_X$$

conclui-se que a resistência medida é a resistência real.

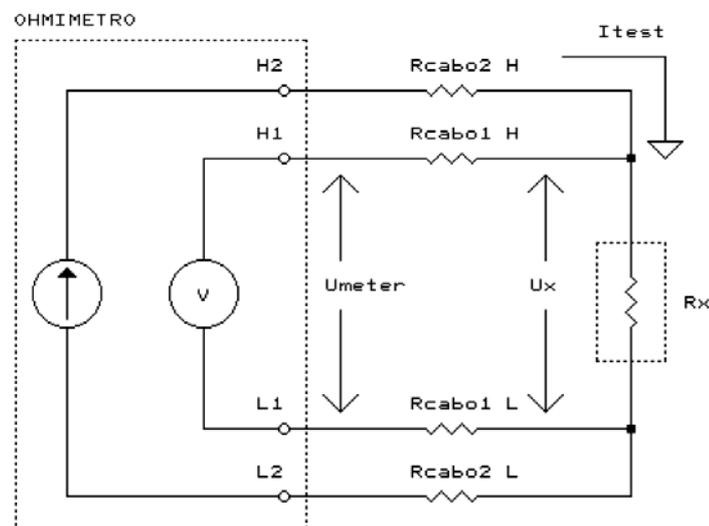


Figura 5.2: Medição de resistência a quatro fios.

Os ohmímetros comuns, que usam dois fios para a medição, não servem para medir resistências de baixo valor, a própria ponta de prova, já acrescenta quase 1 $[\Omega]$ à medição. Para a medição das resistências mais elevadas, típicas dos enrolamentos do lado da AT, também não devem ser usados, devido ao grande tempo de estabilização da leitura provocado pelo efeito indutivo da bobina.

Os instrumentos analógicos mais adequados para a medição de resistências ôhmicas em transformadores são as pontes de medição, destacando-se a de *Kelvin* e a de *Wheatstone*. Dois modelos clássicos de fabricação da YOKOGAWA (Japan) podem ser vistos nas figuras 5.3 e 5.4.



Figura 5.3: Ponte Kelvin 2769 faixa de medição de 0,1 $[m\Omega]$ a 110 $[\Omega]$.



Figura 5.4: Ponte Wheatstone 2755 faixa de medição de 1 $[\Omega]$ a 10 $[M\Omega]$.

5.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO IMPLEMENTADO

A figura 5.5 ilustra as partes principais, na medição de resistência ôhmica, do instrumento desenvolvido que usa a técnica de medição a quatro fios.

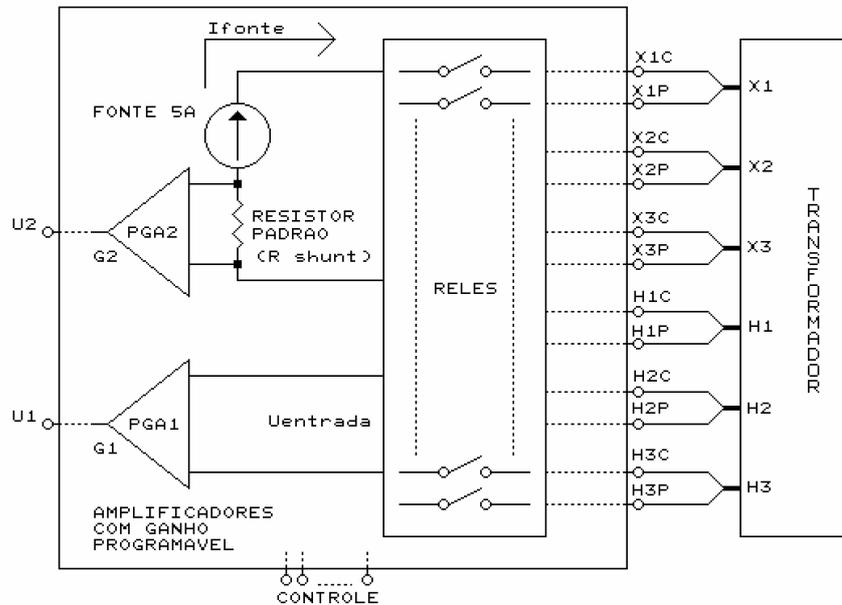


Figura 5.5: Diagrama das partes principais para medição de resistência.

A resistência ôhmica é obtida pela seguinte expressão:

$$R_{MEDIDO} = R_{SHUNT} \cdot \frac{G_2 \cdot U_1}{G_1 \cdot U_2} \quad (5.1)$$

A fonte de corrente é capaz de fornecer até 5 amperes. É do tipo *softstart* para minimizar sobre-tensões induzidas durante o transitório inicial da medição. A figura 5.6 mostra a onda de corrente no início, meio e fim do ensaio.

O resistor padrão (*shunt*) permite converter a corrente para tensão.

Apesar de fazer uma medição de resistência ôhmica por vez, o instrumento possui um conjunto interno de relés que permite, medir seqüencialmente as resistências:

$$R_{X1X2}, R_{X1X3}, R_{X2X3}, R_{H1H2}, R_{H1H3} \text{ e } R_{H2H3}.$$

Como a tensão proveniente do *shunt*, ou a própria tensão medida nas buchas, pode variar de poucos milivolts até alguns volts, foram utilizados amplificadores operacionais com ganho variável (PGA).

O bloco de proteção é composto em um primeiro estágio, na entrada do instrumento, por centelhadores a gás e em um segundo estágio por varistores. A sua função é de proteger o instrumento contra sobre-tensões provocadas por abertura acidental dos fios de medição.

O algoritmo de medição, controlado pelo *software* RHMED, é responsável pelo acionamento dos relés e configuração do ganho em cada PGA, em função da leitura a ser realizada.

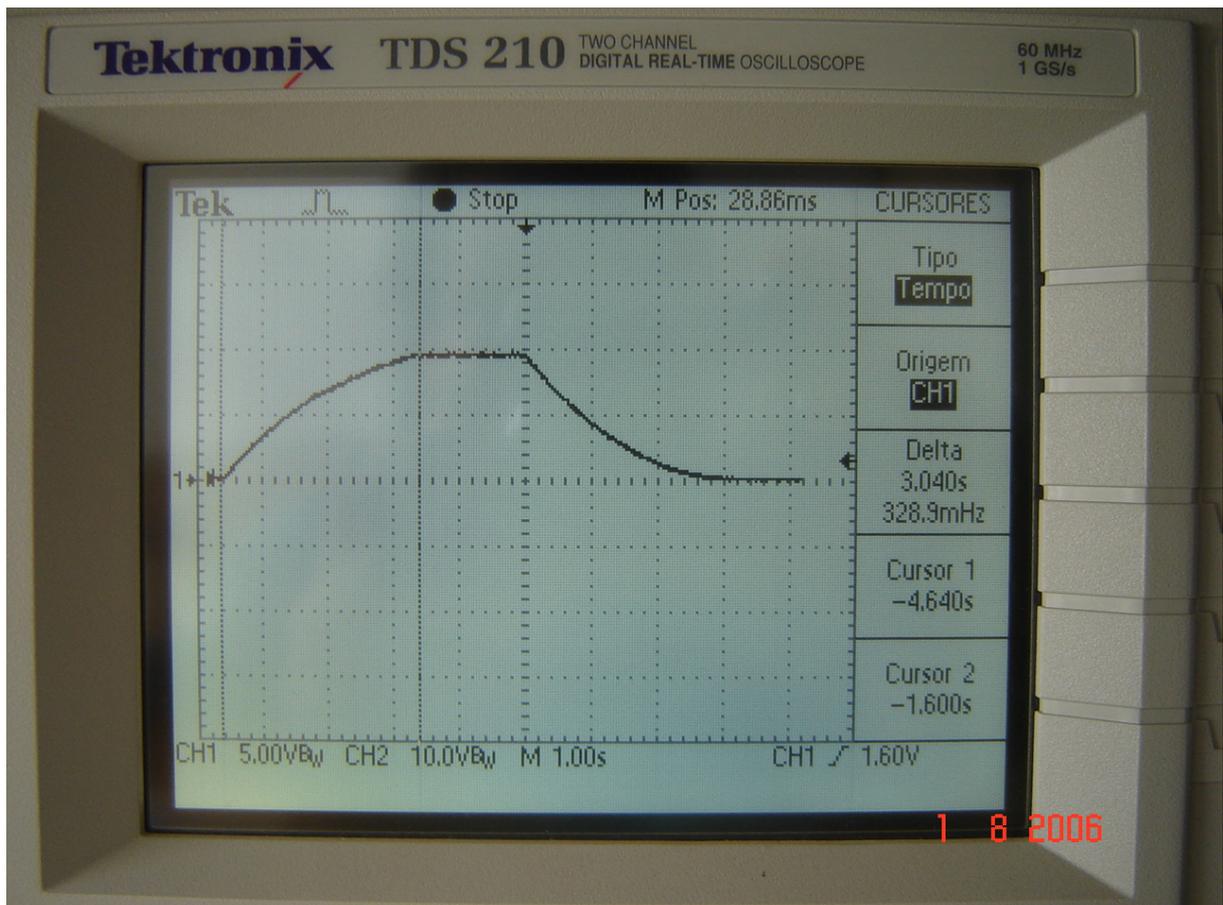


Figura 5.6: Onda de corrente durante o ensaio, aplicada pelo MONITEK9920.

5.3 DESCRIÇÃO DETALHADA DO HARDWARE

Neste instrumento o *hardware* desenvolvido foi distribuído em cinco placas de circuito impresso:

- Placa 1A - Fontes de alimentação com tensões e +5 [V], +15 [V], -15 [V] e 12 [V];
- Placa 2 - Unidade central de processamento, memórias e circuitos lógicos;
- Placa 3 - Circuito com interface de comunicação de dados;
- Placa 4 - Circuitos de conversão análogo-digital (aquisição de dados);
- Placa 5B – Entrada de medição e controle dos relés.

As placas de 2 a 4 compõem o sistema básico conforme foi visto no capítulo 2.

5.3.1 PLACA 1A – FONTES DE ALIMENTAÇÃO

Esta placa, vista nas figuras 5.7 e 5.8, além das fontes de +5 [V], +15 [V] e -15 [V], responsáveis pela alimentação geral do instrumento, possui também a fonte de +12 [V] com capacidade de fornecer 5 [A] de corrente (fonte de corrente), para o circuito de medição de resistência ôhmica. O seu circuito eletrônico encontra-se no apêndice A.

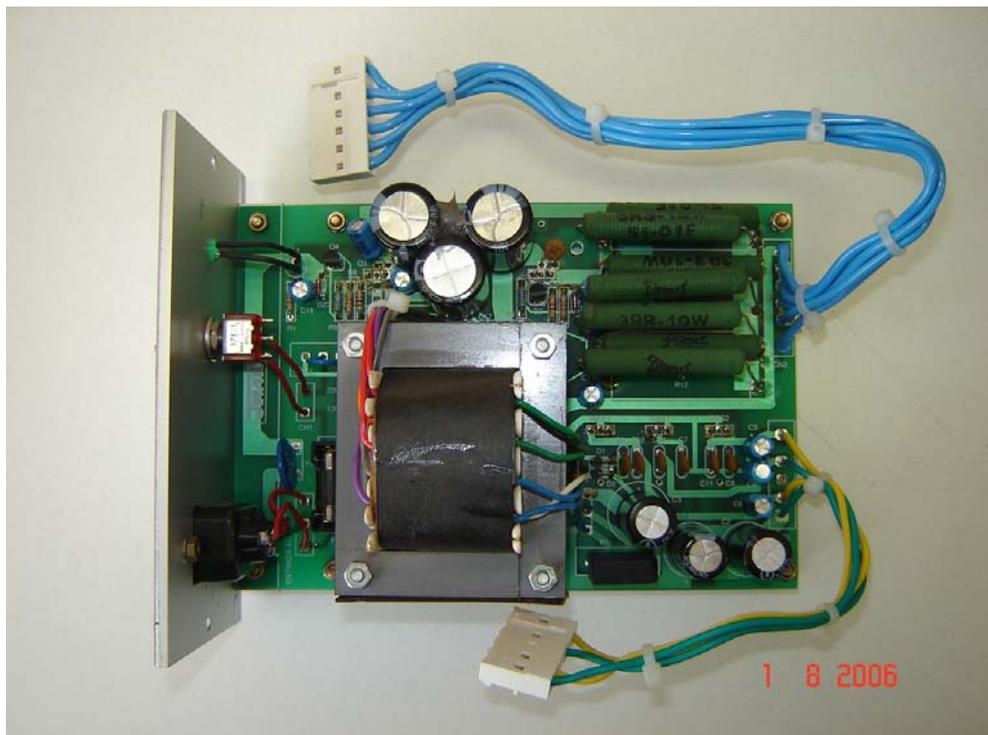


Figura 5.7: Foto da placa 1A com as fontes de alimentação.



Figura 5.8: Foto frontal da placa 1A.

5.3.2 PLACA 5B – ENTRADA DE MEDIÇÃO E CONTROLE DOS RELÉS

Por meio desta placa, ilustrada nas figuras 5.9 e 5.10, é feita a ligação do instrumento às buchas do transformador que se deseja medir as resistências ôhmicas. Possui o circuito de acionamento dos relés, amplificadores com ganho programável, resistor *shunt*, centelhadores a gás, varistores e circuito de medição de temperatura para PT100. O seu circuito eletrônico encontra-se no apêndice A.

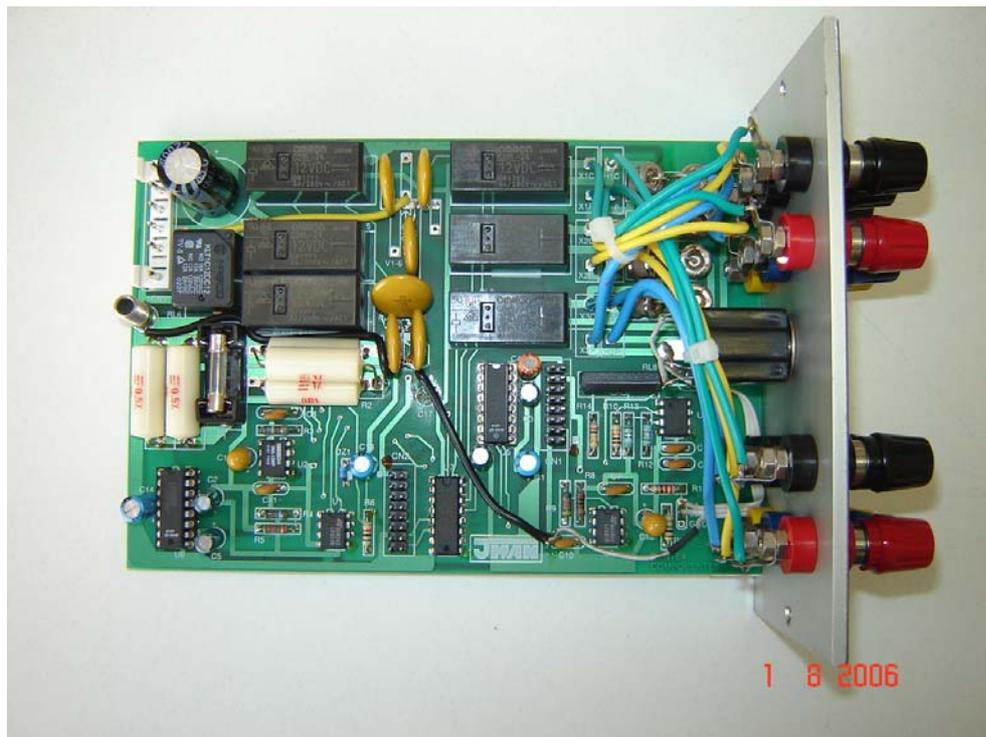


Figura 5.9: Foto da placa 5B.



Figura 5.10: Foto da vista frontal da placa 5B.

5.3.3 BASTIDOR (CAIXA) DE MONTAGEM DAS PLACAS

As placas de circuito impresso deste instrumento foram alojadas em um bastidor de alumínio padrão IMS. Nas figuras 5.11, 5.12 e 5.13 pode-se observar como as placas são interligadas e alojadas no bastidor de alumínio.

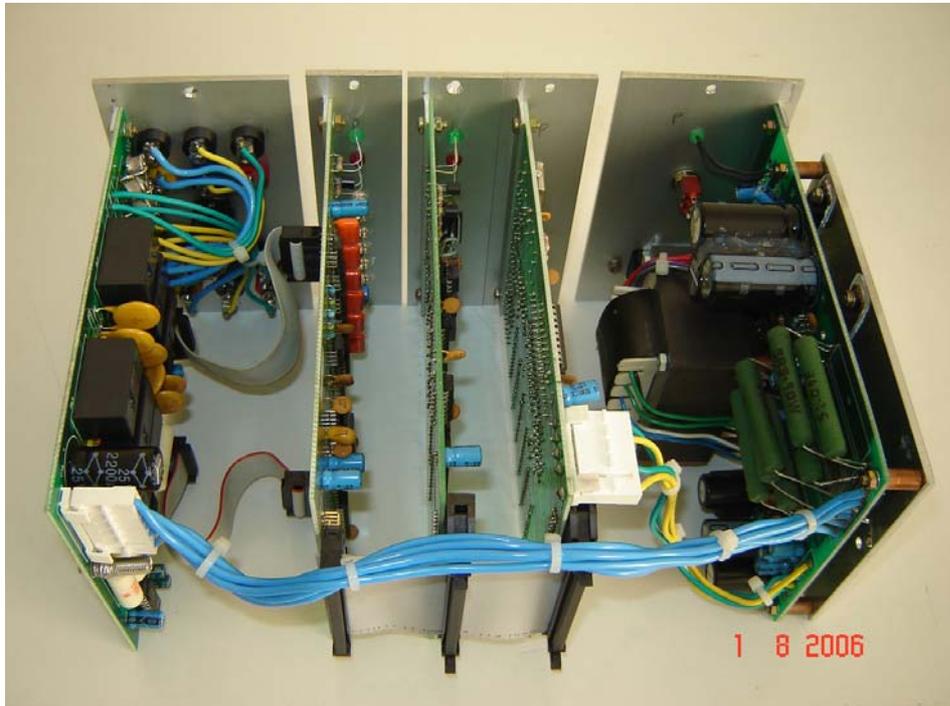


Figura 5.11: Vista traseira do conjunto de placas interligadas.

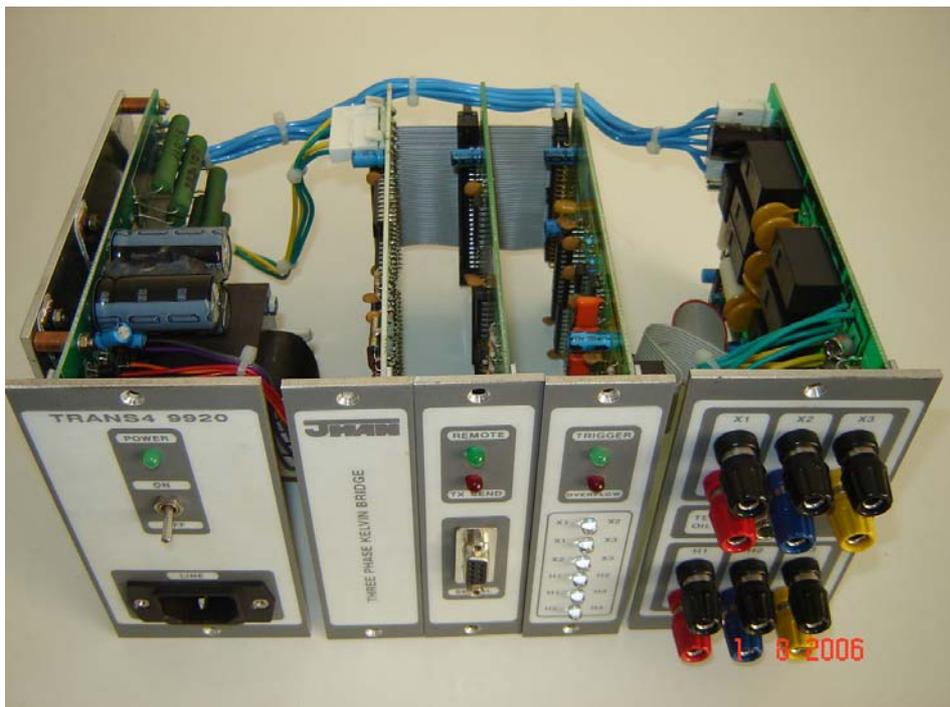


Figura 5.12: Vista frontal do conjunto de placas interligadas.



Figura 5.13: Instrumento MONITEK9920 completamente montado.

5.4 CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO E PRECISÃO OBTIDA

Pelos motivos expostos em 2.4 (capítulo 2, seção 4) a calibração foi feita por meio de constantes de calibração, para cada canal, que são gravadas na memória do próprio instrumento.

O erro absoluto para este instrumento deve ser inferior a 0,5 [%].

5.4.1 NORMAS E PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA A CALIBRAÇÃO

- Para cada ponto foram feitas três leituras, a calibração foi realizada pelo método da comparação. A incerteza expressa é baseada em uma incerteza combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k=2$, para um nível de confiabilidade de 95% [16];
- A temperatura ambiente do local de calibração foi mantida em: $25\text{ [}^\circ\text{C]} \pm 3\text{ [}^\circ\text{C]}$ e a umidade relativa do ar menor que 60 [%];
- Procedimento específico de calibração proc2002_jman9920_01;
- Critérios específicos para calibração de instrumentos analógicos e digitais de medição na área de eletricidade [17];
- Guia para a expressão da incerteza de medição [5] [16].

O padrão utilizado neste processo de calibração é a medição de resistores padrão, com valores de: 1 [mΩ], 10 [mΩ], 100 [mΩ], 1 [Ω], 10 [Ω], 100 [Ω] e 1000 [Ω].

A tabela 5.1 apresenta a planilha de calibração.

Tabela 5.1: Planilha de calibração do MONITEK9920.

Resistência real [Ohms]	Canal: X1X2 [OHMS]			Canal: X1X3 [OHMS]			Canal: X2X3 [OHMS]		
	R. Lido	Desvio	Incerteza total (+/-)	R. Lido	Desvio	Incerteza total (+/-)	R. Lido	Desvio	Incerteza total (+/-)
0,001000	0,0009991	-0,0000009	0,0000004	0,0009989	-0,0000011	0,0000004	0,0009988	-0,0000012	0,0000004
0,010000	0,009999	-0,000001	0,000003	0,009998	-0,000002	0,000003	0,009997	-0,000003	0,000003
0,10000	0,09996	-0,00004	0,00003	0,09996	-0,00004	0,00003	0,09995	-0,00005	0,00003
1,0000	0,9994	-0,0006	0,0029	0,9986	-0,0014	0,0042	0,9992	-0,0008	0,0011

Resistência real [Ohms]	Canal: H1H2 [OHMS]			Canal: H1H3 [OHMS]			Canal: H2H3 [OHMS]		
	R. Lido	Desvio	Incerteza total (+/-)	R. Lido	Desvio	Incerteza total (+/-)	R. Lido	Desvio	Incerteza total (+/-)
1,0000	1,0005	0,0005	0,0011	0,9995	-0,0005	0,0009	1,0008	0,0008	0,0012
10,000	10,002	0,002	0,010	10,000	0,000	0,005	10,000	0,000	0,005
100,00	99,86	-0,14	0,02	99,99	-0,01	0,01	99,95	-0,05	0,02
1000,0	999,2	-0,8	0,2	1000,7	0,7	0,1	1000,5	0,5	0,2

5.5 PROGRAMA RHMED.EXE

O programa RTMED é um *software* auxiliar responsável pela execução do ensaio de medição de resistência dos enrolamentos, de forma análoga ao RTMED, recebe arquivos de dados do programa TRANS4, com todas as informações referentes aos transformadores cadastrados, como número de *taps* e tensões da AT e BT. Com estas informações pode executar o ensaio, comunicando-se por porta serial com o MONITEK9920, enviando comandos para: acionamento dos relés seletores das resistências a serem medidas; ajuste do ganho dos amplificadores operacionais e leitura dos mesmos. Finalmente é efetuado o cálculo da resistência de acordo com a expressão 5.1. Também é registrado o tempo de estabilização das leituras de resistência ôhmica dos enrolamentos da AT e BT.

Ao final do ensaio um novo arquivo de dados é criado, com os valores medidos das resistências desejadas, para ser lido automaticamente pelo programa TRANS4 no momento apropriado.

O menu principal que pode ser visualizado na figura 5.14, contém as seguintes funções:

- Ensaio de transformador cadastrado;
- Ensaio de transformador sem cadastro;
- Ler Cadastros de Disquete;
- Gravar ensaios em disquete;
- Configurações gerais;
- Fim (Sair).

A seguir serão descritas as funções citadas.



Figura 5.14: Tela Principal do programa Rhmed.

4.5.1 CONFIGURAÇÕES GERAIS

Por meio deste menu, ilustrado na figura 5.15, podem-se configurar aspectos funcionais do programa como por exemplo: porta serial de comunicação e fator de correção.

“Fator de correção” é um ajuste que permite corrigir o erro sistemático do instrumento em +/- 0,25 [%].



Figura 5.15: Tela do menu de configurações gerais do programa RHMED.

5.5.2 LER CADASTROS DE DISQUETE e GRAVAR ENSAIOS EM DISQUETE

Conforme já visto, estas ferramentas permitem: ler de disquete ou CD, os cadastros previamente gravados pelo TRANS4 e após a realização dos ensaios de medição de resistência ôhmica, gravar novamente em disquete ou CD, o resultado destes ensaios.

5.5.3 ENSAIO DE TRANSFORMADOR SEM CADASTRO

Para os ensaios realizados por meio desta seleção é necessário fornecer os dados pertinentes a este ensaio. Geralmente esta opção é usada quando se trata de um transformador não cadastrado no TRANS4, ou para fins de teste.

5.5.5 ENSAIO DE TRANSFORMADOR CADASTRADO

Esta função só permite realizar os ensaios dos transformadores previamente cadastrados no TRANS4 e cujos arquivos criados para este fim, estejam acessíveis ao programa RHMED, conforme pode ser visto na figura 5.16



Figura 5.16: Tela de seleção do transformador a ser ensaiado no programa RHMED.

Após a leitura do arquivo de cadastro é solicitado que se escolha quais *taps* da AT serão ensaiados, conforme se pode ver pela tela da figura 5.17.



Figura 5.17: Tela de seleção dos taps a serem ensaiados no programa RHMED.

Na tela seguinte o RHMED solicita que sejam ligadas as garras de medição e se selecione o *tap* de maior tensão, conforme a figura 5.18.

INICIO do ENSAIO

- 1) Conectar as Garras no Trafo
- 2) Selecionar o TAP (13800 [v])
- 3) Tecla <ENTER> para INICIAR

< ESC Cancela >

(470404A) 15.0 [KVA] AT:Delta BT:Estrela

-----TENSOES----- t [s]-----		R _{x1x2}	R _{x1x3}	R _{x2x3}
BT	220/127			
TAP--TENSOES----- t [s]-----		R _{H1H2}	R _{H1H3}	R _{H2H3}
1	13800			
2	13200			
3	12600			
4	12000			
5	11400			
6	10800			
7	10200			
8	9600			

X1 X2

JMAN ELETRO ELETRONICA

Figura 5.18: Tela do programa RHMED pronto para iniciar o ensaio.

Na seqüência são lidas as resistências ôhmicas da BT R_{X1X2} , R_{X1X3} e R_{X2X3} e depois as da AT R_{H1H2} , R_{H1H3} e R_{H2H3} do tap inicial. Este procedimento é repetido para todos os tap's desejados. Os valores medidos são gravados em arquivo de dados e apresentados na tela do computador conforme a figura 5.19.

FIM do ENSAIO

Tecla <ENTER> para TERMINAR

(470404A) 15.0 [KVA] AT:Delta BT:Estrela

-----TENSOES----- t [s]-----		R _{x1x2}	R _{x1x3}	R _{x2x3}
BT	220/127	12	2.486E-02	2.473E-02 2.473E-02
TAP--TENSOES----- t [s]-----		R _{H1H2}	R _{H1H3}	R _{H2H3}
1	13800	20	173.259	173.756 173.546
2	13200	20	166.066	166.146 165.766
3	12600	20	158.086	158.133 158.379
4	12000	20	150.681	150.858 150.984
5	11400	20	143.201	143.335 143.210
6	10800	20	135.610	135.686 135.616
7	10200	20	128.194	128.240 127.972
8	9600	20	120.679	120.766 120.735

H2 H3

JMAN ELETRO ELETRONICA

Figura 5.19: Tela do programa RHMED mostrando o final do ensaio.

CAPÍTULO 6 OUTRAS FERRAMENTAS IMPLEMENTADAS

Os ensaios de rotina são obrigatórios para todos os transformadores fabricados. A automação destes ensaios, vista nos capítulos anteriores, facilita e padroniza a execução dos mesmos atendendo à demanda diária de fabricação. Entretanto existem outros ensaios, denominados “de tipo”, realizados esporadicamente, que também foram automatizados. São eles:

- Ensaio de elevação de temperatura;
- Ensaio de curva de saturação;
- Correção dos ensaios feitos em 60 para 50 [Hz].

6.1 ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

O ensaio de elevação de temperatura historicamente era feito apenas nos primeiros protótipos dos fabricantes e por poucas companhias de energia elétrica no momento da compra. Desta forma, apesar de ser um ensaio longo e trabalhoso, como era feito raramente, não compensava ao fabricante investir na automação deste ensaio, sendo mais vantajoso, quando solicitado, enviá-lo a um laboratório credenciado, onde o mesmo era feito, geralmente com acompanhamento de um representante do fabricante e um inspetor representando o comprador.

Outro fator relevante é que os transformadores mais antigos, principalmente os de distribuição, tendo que atender às normas vigentes em relação às suas perdas, tinham o seu projeto feito com técnicas e ferramental mais antigo, resultando em um núcleo maior e mais pesado que aqueles obtidos com as técnicas atuais.

Desta forma, para uma certa potência os transformadores mais antigos são maiores que os atuais; como os valores das perdas permitidas quase não se alteraram, os transformadores atuais têm mais dificuldade em dissipar o calor gerado internamente, com isso o projeto do tanque e dos radiadores ficou mais crítico. Por estes motivos, o fabricante está sendo obrigado a realizar mais ensaios de elevação de temperatura, justificando portanto a implementação da automação deste ensaio em seu laboratório.

6.1.1 O ENSAIO CLÁSSICO

O ensaio de elevação de temperatura consiste de duas partes distintas, inicialmente a elevação de temperatura do topo do óleo e em seguida a elevação de temperatura dos enrolamentos.

Através dos ensaios de rotina realizados anteriormente, calcula-se o valor das perdas totais, valor este que deve ser mantido constante ao longo de todo o ensaio de elevação de temperatura do topo do óleo.

Iniciando-se o ensaio, deve-se também medir a temperatura no topo do óleo e pelo menos três temperaturas do ar ambiente, com termômetros colocados ao redor do transformador, para que em intervalos regulares de tempo o operador anote os valores das temperaturas, verifique se o valor das perdas totais está correto e calcule o gradiente de temperatura do óleo em relação à medida das temperaturas ambientes.

O ensaio é considerado estabilizado quando o gradiente de temperatura do topo do óleo, com relação à temperatura média do ambiente, não tiver variado mais que 1 [°C] durante as últimas três horas.

O valor da elevação de temperatura do topo do óleo deve ser menor ou igual aos valores tabelados na norma NBR 5356.

A segunda parte do ensaio consiste em circular corrente nominal nos enrolamentos durante uma hora, fazer o desligamento, desconectar os cabos, ligar a “ponte Kelvin” em um enrolamento e fazer um conjunto de leituras de resistência ôhmica e seus respectivos tempos dentro de um período máximo de quatro minutos.

Com os pares: *resistência x tempo* pode-se traçar um gráfico e fazendo uma extrapolação logarítmica para t igual a zero, obter-se o valor da resistência ôhmica do enrolamento no momento do desligamento.

Desta forma a temperatura média de um enrolamento no momento do desligamento, através do método de variação da resistência ôhmica é determinada pela equação:

$$\theta = \frac{R_{\theta}}{R_0} \cdot (K + \theta_0) - K \quad (6.1)$$

Onde $K = 234,5$ para o cobre e 225 para o alumínio.

Este ensaio apresenta duas principais dificuldades; a primeira é a necessidade constante de um operador que esteja sempre atento ao valor das perdas totais aplicadas ao objeto de ensaio e corrigindo-as sempre que necessário, além de estar lendo as temperaturas e anotando-as. A segunda dificuldade, e talvez a mais crítica, é normalmente a do desligamento, onde se exige bastante experiência e prática no manuseio e leitura dos equipamentos de medição.

6.1.2 A AUTOMAÇÃO DO ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

Para se automatizar este ensaio é necessário usar os instrumentos MONITEK9443, MONITEK9920 e o programa ELEVA.

6.1.2.1 Elevação da Temperatura do Topo do Óleo

O programa ELEVA, inicialmente comanda o fechamento do relé do varivolt motorizado, fazendo a tensão subir até que a potência ativa lida no MONITEK9443, seja igual à potência das perdas totais calculada anteriormente e cadastrada no programa. Se a potência ativa for maior que a desejada, será comandado o fechamento de outro relé que fará a tensão diminuir. Este processo, garante que o valor das perdas totais fique constante ao longo de todo o ensaio. Paralelamente também são medidas as temperaturas e calculado a elevação de temperatura do topo do óleo.

Desta forma o programa de controle fica repetindo o processo descrito, armazenando todos os dados medidos e calculados, até que ocorra o equilíbrio térmico, ou seja, até que a variação acumulada, do gradiente de temperatura do topo do óleo, seja inferior a 1 [°C] nas últimas três horas.

6.1.2.2 Elevação da Temperatura dos Enrolamentos

Após ocorrer o equilíbrio térmico, deve-se determinar a elevação de temperatura dos enrolamentos. O método usado é o da variação de resistência ôhmica, que consiste na determinação da temperatura comparando-se a resistência ôhmica do enrolamento na temperatura a ser determinada, com a sua resistência ôhmica numa temperatura conhecida.

A resistência ôhmica à temperatura conhecida, é obtida durante os ensaios de rotina e é tecnicamente chamada de “resistência a frio”, ou seja medida à temperatura ambiente antes do início de qualquer ensaio pelo MONITEK9920 e programa RHMED.

Para esta segunda parte do ensaio, deve-se circular a corrente nominal dos enrolamentos por pelo menos uma hora. Desta forma, agora o programa de controle, ajusta a tensão do variador de tensão até que a corrente seja igual à desejada. Este processo se repete durante uma hora, após a qual é necessário desligar a alimentação do transformador, e ligar o MONITEK9920 às buchas do transformador.

O programa de controle faz um conjunto de leituras de resistência ôhmica, do enrolamento selecionado, armazenando-as com os seus respectivos tempos, sempre dentro do prazo de quatro minutos.

Para os demais enrolamentos, repete-se o ensaio sempre aplicando a corrente nominal por uma hora.

Para determinar o valor da resistência ôhmica, no momento de desligamento, é feita uma regressão exponencial pelo método dos mínimos quadrados.

6.1.3 O PROGRAMA ELEVA.EXE

Este programa, cuja tela principal pode ser vista na figura 6.1, permite realizar o ensaio de elevação de temperatura. As principais funções e recursos são detalhadas a seguir.



Figura 6.1: Tela inicial do programa ELEVA.

6.1.3.1 Cadastro do ensaio

Esta opção permite que se cadastre um transformador para realizar o ensaio. Pode ser feita de forma automática ou manual. No último caso é solicitado ao operador que digite todos os dados necessários ao ensaio como: tipo de ligação, potência, tensão da “AT”, tensão da “BT”, perdas totais, valores das resistências ôhmica “a frio” com sua respectiva temperatura e também o tempo em segundos que a “ponte Kelvin” demorou para estabilizar ao realizar estas leituras.

No modo automático o programa procura no banco de dados do programa TRANS4 todas as informações necessárias ao cadastro do ensaio.

6.1.3.2 Ensaio elevação de temperatura do óleo

Como o nome diz, esta opção é usada para realizar a primeira parte do ensaio, entretanto permite ainda que o operador faça o ensaio de três formas distintas, que são:

- ensaio padrão, com perdas totais desde o início;
- ensaio com sobrecarga inicial de 30% durante cinco horas [2];
- ensaio com perdas totais reduzidas de 20%.

No segundo caso, o ensaio é abreviado em algumas horas, devido à sobrecarga inicial.

O terceiro caso é permitido por norma e é usado quando a fonte de energia aplicada ao transformador não é suficiente para que o mesmo atinja o valor das perdas totais calculadas. Neste caso, de acordo com a norma NBR 5380, a seguinte correção é aplicada pelo programa:

$$\Delta\theta_o = \Delta\theta_r \cdot \left(\frac{W_o}{W_{or}} \right)^n \quad (6.2)$$

onde:

$\Delta\theta_o$ = elevação de temperatura do óleo sobre a temperatura do meio refrigerante, com perdas totais em °C;

$\Delta\theta_r$ = elevação de temperatura do óleo sobre a temperatura de meio refrigerante; com perdas reduzidas em °C;

W_o = perdas totais em watts;

W_{or} = perdas reduzidas em watts;

$n = 0,8$ (expoente para circulação natural de ar).

6.1.3.3 Ensaio elevação de temperatura do enrolamento

Esta opção do programa permite aplicar a corrente nominal nos enrolamentos durante uma hora, ao fim da qual pode-se passar para a medição de resistência a quente.

6.1.3.4 Medição da resistência ôhmica dos enrolamentos a quente

Nesta opção o programa, usando o MONITEK9920, faz um conjunto de dez leituras, com os seus respectivos tempos nos enrolamentos seleccionados. Pode-se escolher entre fazer a leitura de um ou de dois enrolamentos no mesmo desligamento respeitando-se o tempo limite de quatro minutos. Para os demais enrolamentos é necessário repetir o procedimento descrito no item 6.1.3.3.

Para facilitar e se gastar o menor tempo possível no desligamento do transformador, é interessante preparar um sistema de comutação rápida ente o transformador e o MONITEK9920. A figura 6.2 ilustra uma opção de comutação rápida. Por questão de segurança, as chaves ch1 e ch2 devem ser substituídas por contatores ou chaves comutadoras blindadas, que suportem as tensões e correntes de cada ensaio.

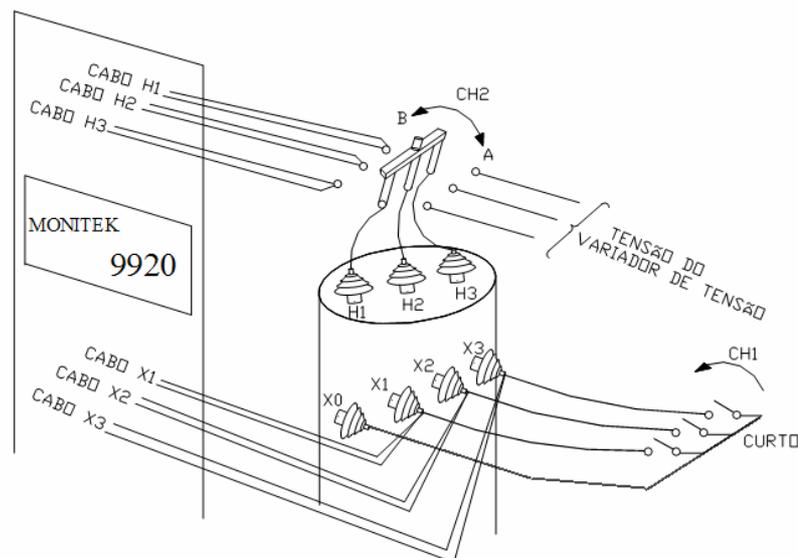


Figura 6.2: Arranjo para comutação rápida.

Durante o ensaio de elevação de temperatura a chave CH1 está fechada, mantendo o secundário em curto-circuito e a chave CH2 está fechada na posição A, alimentando o transformador. A comutação é feita na seguinte sequência:

- Desliga-se o variador de tensão e dispara-se manualmente um cronômetro;
- Comuta-se a chave CH2 de A para B;
- Abre-se a chave CH1;
- Inicia-se a leitura.

Ao se iniciar a leitura nos enrolamentos selecionados, deve-se anotar o tempo registrado pelo cronômetro. Este tempo será solicitado mais tarde pelo programa. Se foi selecionado para se fazer apenas a leitura de um enrolamento, as dez leituras serão feitas distribuídas ao longo dos quatro minutos permitidos. Se a opção foi a de leitura em dois enrolamentos, inicialmente são lidos dez pontos no enrolamento da BT, no intervalo de um minuto e em seguida mais dez leituras no enrolamento da AT no intervalo restante de três minutos.

6.1.3.5 Cálculos e Relatórios

Esta opção do programa permite analisar o resultado dos ensaios realizados, tanto na tela do computador quanto em relatório impresso. As informações fornecidas são:

- Gráficos da elevação de temperatura ao longo do tempo sem e com sobrecarga inicial, vistos nas figuras 6.3 e 6.4 respectivamente;
- Gráfico contendo os pares de pontos medidos (resistência x tempo) e a curva de extrapolação para $t = 0$, para as medições de resistência da AT e BT, ilustrados nas figuras 6.5 e 6.6;
- Os valores calculados das temperaturas do enrolamento em relação ao óleo e do enrolamento em relação à temperatura ambiente, conforme visto na figura 6.7.

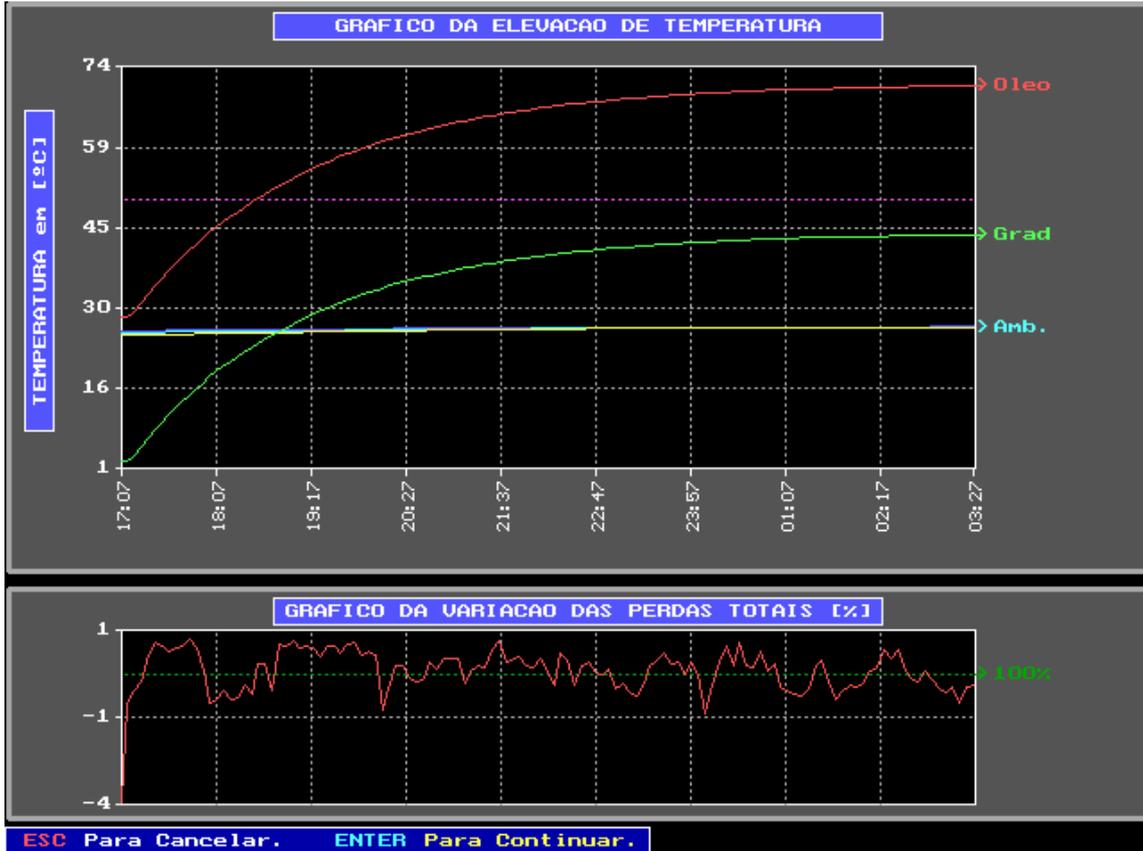


Figura 6.3: Gráfico do ensaio de elevação de temperatura sem sobrecarga inicial.

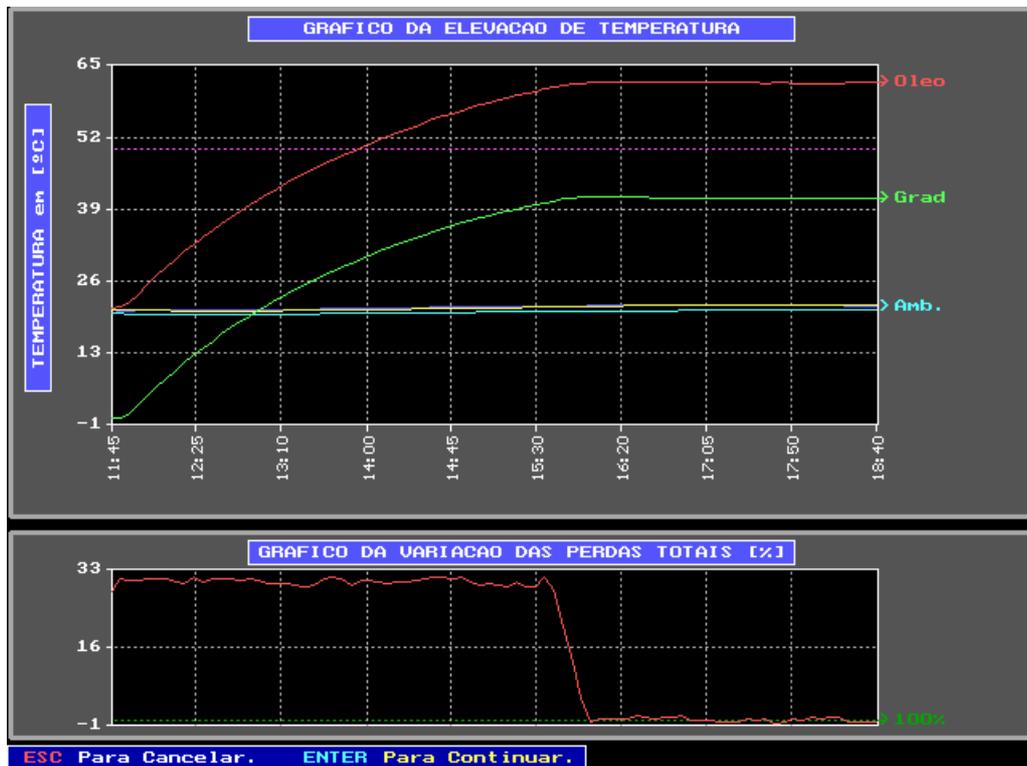


Figura 6.4: Gráfico do ensaio de elevação de temperatura com sobrecarga inicial.

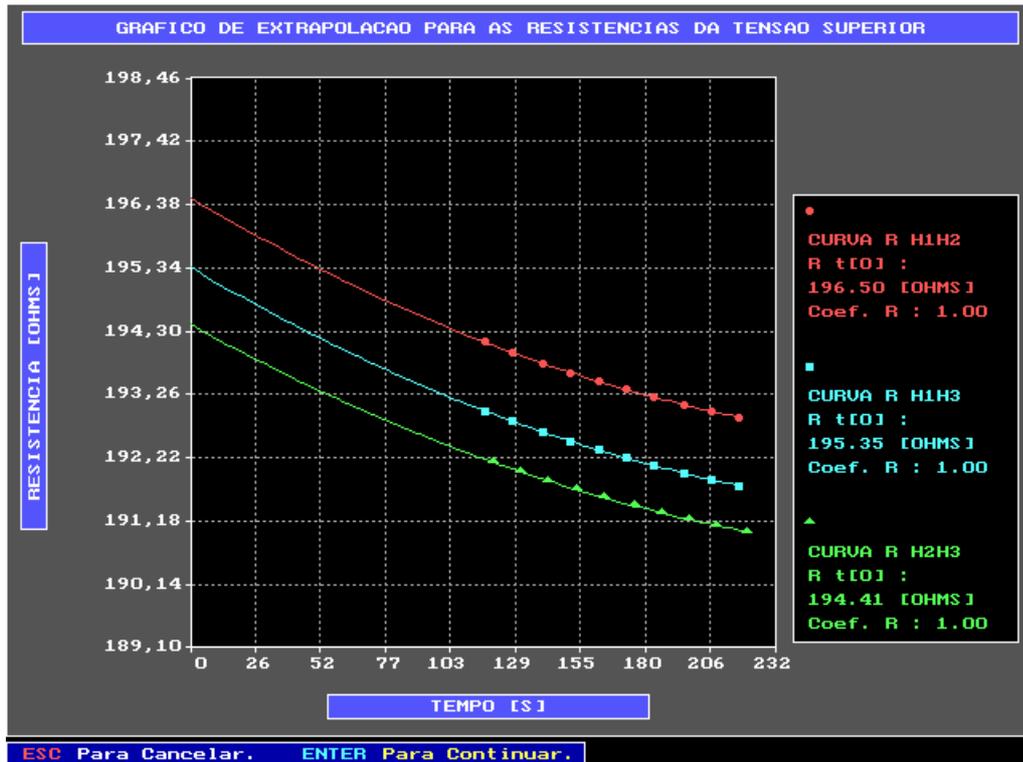


Figura 6.5: Pontos lidos de resistência ôhmica nas bobinas da AT e as curvas interpolantes para $t=0$.

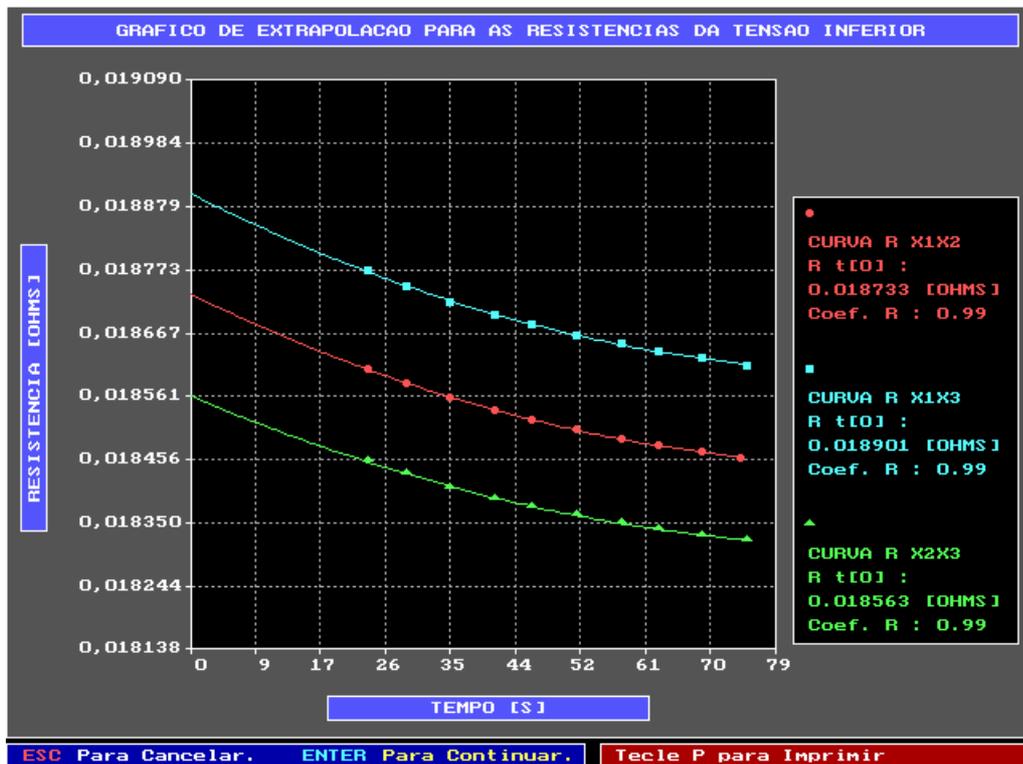


Figura 6.6: Pontos lidos de resistência ôhmica nas bobinas da AT e as curvas interpolantes para $t=0$.

Número: 162792	TRIF. - 25 [KV]	Potência: 45 [KVA]
AT: 20900 [V] BT: 220 [V]	Perdas Totais: 1058 [W]	In AT: 1.24 [A]
--- Ensaio de Elevação de Temperatura ---		
Topo do óleo: 70.57 [°C]	Média Amb.: 26.98 [°C]	Grad. óleo: 43.59 [°C]
--- Resistências dos enrolamentos a 26.7 [°C] ---		
Rh1h2 [Ohms]: 165.45	Rh1h3 [Ohms]: 165.48	Rh2h3 [Ohms]: 166.18
Rx1x2 [Ohms]: 0.015830	Rx1x3 [Ohms]: 0.015990	Rx2x3 [Ohms]: 0.015800
--- Ensaio de Aquecimento dos Enrolamentos: ---		
H1H2	H1H3	H2H3
R(t=0) [Ohms]: 196.50	R(t=0) [Ohms]: 195.35	R(t=0) [Ohms]: 194.41
T. óleo [°C]: 66.4	T. óleo [°C]: 64.4	T. óleo [°C]: 63.3
T. Amb. [°C]: 26.8	T. Amb. [°C]: 27.0	T. Amb. [°C]: 27.3
T. Enr. [°C]: 75.7	T. Enr. [°C]: 73.9	T. Enr. [°C]: 71.1
Enr/óleo [°C]: 9.3	Enr/óleo [°C]: 9.4	Enr/óleo [°C]: 7.8
Enr/Amb. [°C]: 52.9	Enr/Amb. [°C]: 53.0	Enr/Amb. [°C]: 51.3
X1X2	X1X3	X2X3
R(t=0) [Ohms]: 0.018733	R(t=0) [Ohms]: 0.018901	R(t=0) [Ohms]: 0.018563
T. óleo [°C]: 66.4	T. óleo [°C]: 64.4	T. óleo [°C]: 63.3
T. Amb. [°C]: 26.8	T. Amb. [°C]: 27.0	T. Amb. [°C]: 27.3
T. Enr. [°C]: 74.6	T. Enr. [°C]: 74.3	T. Enr. [°C]: 72.4
Enr/óleo [°C]: 8.2	Enr/óleo [°C]: 9.8	Enr/óleo [°C]: 9.1
Enr/Amb. [°C]: 51.8	Enr/Amb. [°C]: 53.4	Enr/Amb. [°C]: 52.6
Ensaio: APROVADO		

Figura 6.7: Gradientes de temperatura do topo do óleo e dos enrolamentos.

6.2 ENSAIO DE CURVA DE SATURAÇÃO

O ensaio de curva de saturação é uma ferramenta usada pelos fabricantes de transformadores, em especial pelos projetistas, que auxilia no desenvolvimento de novos projetos, no que se refere à parte magnética, ou seja, permite levantar as curvas de (*Indução x Perdas*) e (*U x I*).

Inicialmente é feito o cadastro do transformador a ser ensaiado, no qual além dos dados básicos de identificação, são fornecidos também o peso do núcleo (P_{ferro}), o número de espiras (N) da BT e a área (S) da seção transversal de uma “coluna” do núcleo magnético.

Este ensaio é essencialmente o ensaio em vazio e a sua execução consiste em se elevar a tensão aplicada à BT, desde zero até ultrapassar a nominal em 10%. Ao longo desta variação são medidas e armazenadas as grandezas: U_0 , I_0 e P_0 para vários pontos.

Para cada ponto medido é calculado a indução magnética no núcleo, o Watt/kg e o VA/kg, de acordo com as expressões:

$$B_{[T]} = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot N \cdot S} \quad (6.3)$$

$$W / kg = \frac{P_0}{P_{ferro}} \quad (6.4)$$

$$VA / kg = \sqrt{3} \cdot \frac{I_0 \cdot U_N}{P_{ferro}} \quad (6.5)$$

O resultado do ensaio é apresentado por meio de tabelas e gráficos, identificando em cada gráfico, os valores máximos de norma.

6.2.1 O PROGRAMA SATURA.EXE

Este programa permite fazer o cadastro, a medição, o cálculo e o relatório do ensaio descrito. A sua tela principal pode ser vista na figura 6.8



Figura 6.8: Tela principal do programa SATURA.

As configurações gerais, vistas na tela da figura 6.9, permitem ajustar vários parâmetros do programa.

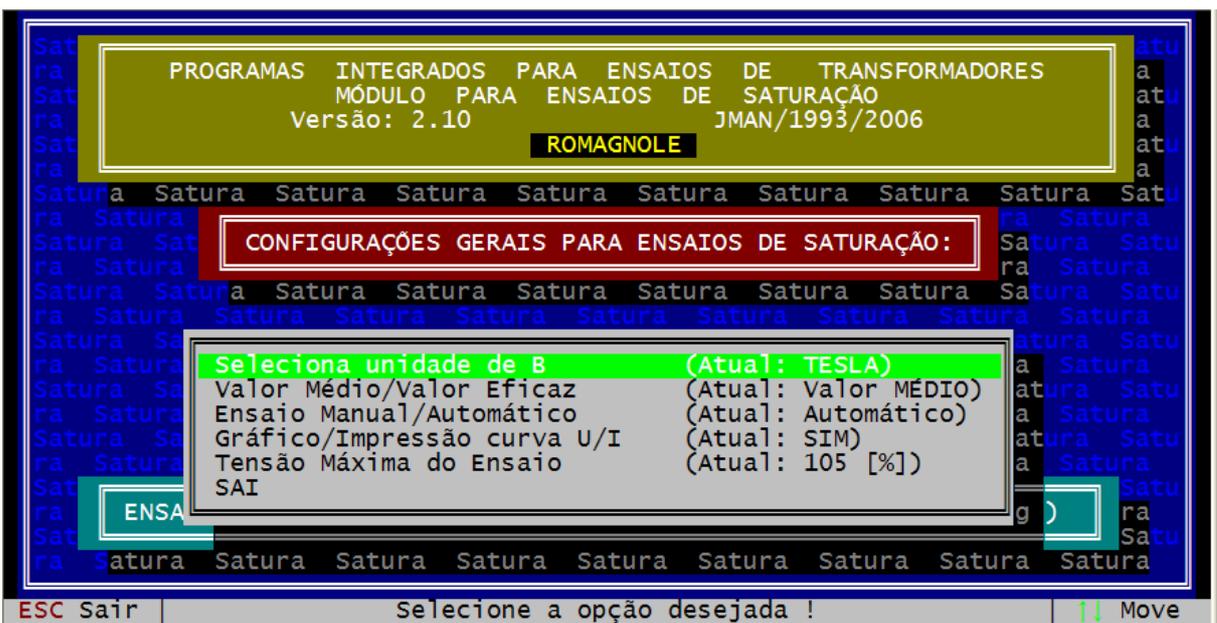


Figura 6.9: Tela de ajuste das configurações gerais do programa SATURA.

6.2.1.1 – RELATÓRIO DO ENSAIO DE SATURAÇÃO

A figura 6.10 ilustra o gráfico $B \times \text{Watt/kg}$, no qual se pode analisar o comportamento da curva, o ponto de operação e o limite de norma para P_0 .

A figura 6.11 ilustra o gráfico $B \times \text{VA/kg}$, no qual se pode analisar o comportamento da curva, o ponto de operação e o limite de norma para I_0 .

A figura 6.12 ilustra o gráfico $U \times I$, no qual se pode analisar o comportamento da curva, o ponto de operação e o limite de norma para I_0 .

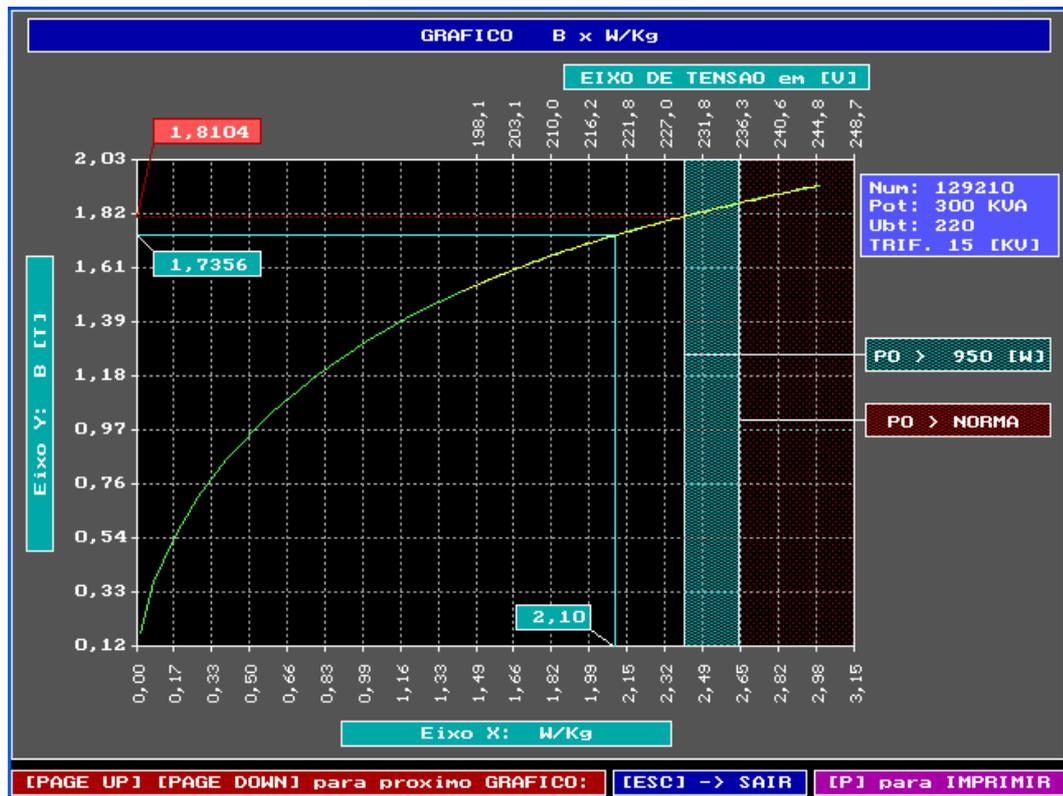


Figura 6.10: Tela do gráfico: $B \times \text{Watt/kg}$

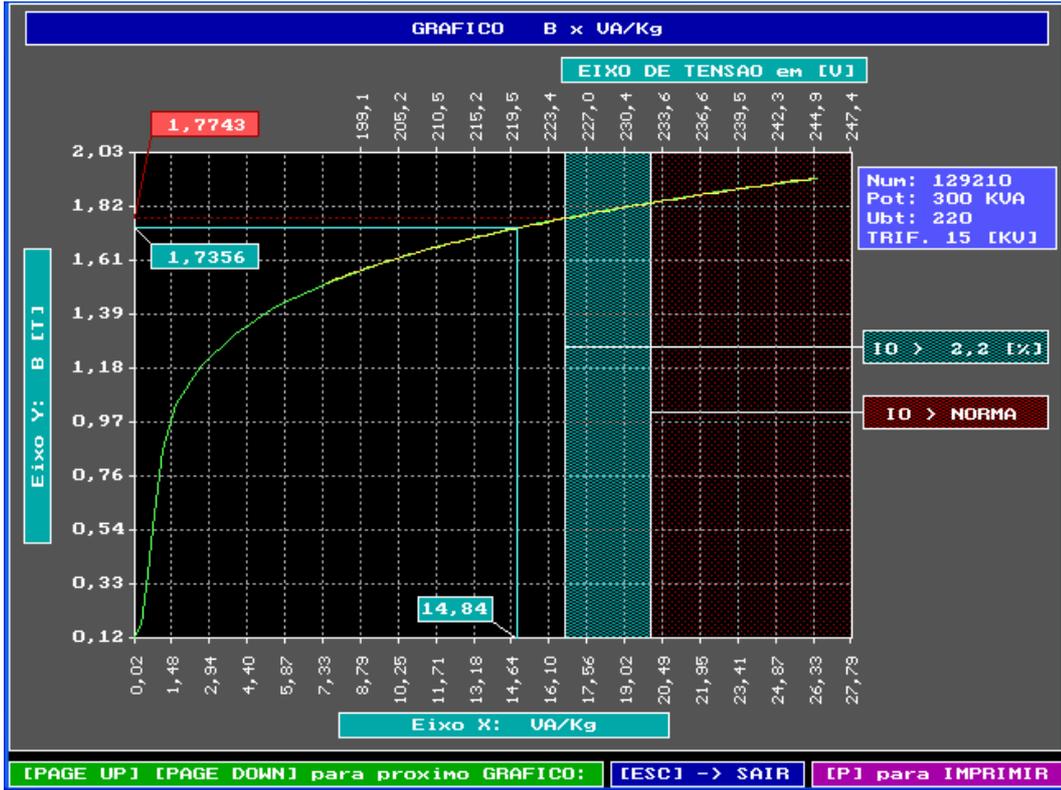


Figura 6.11: Tela do gráfico: B x VA/kg

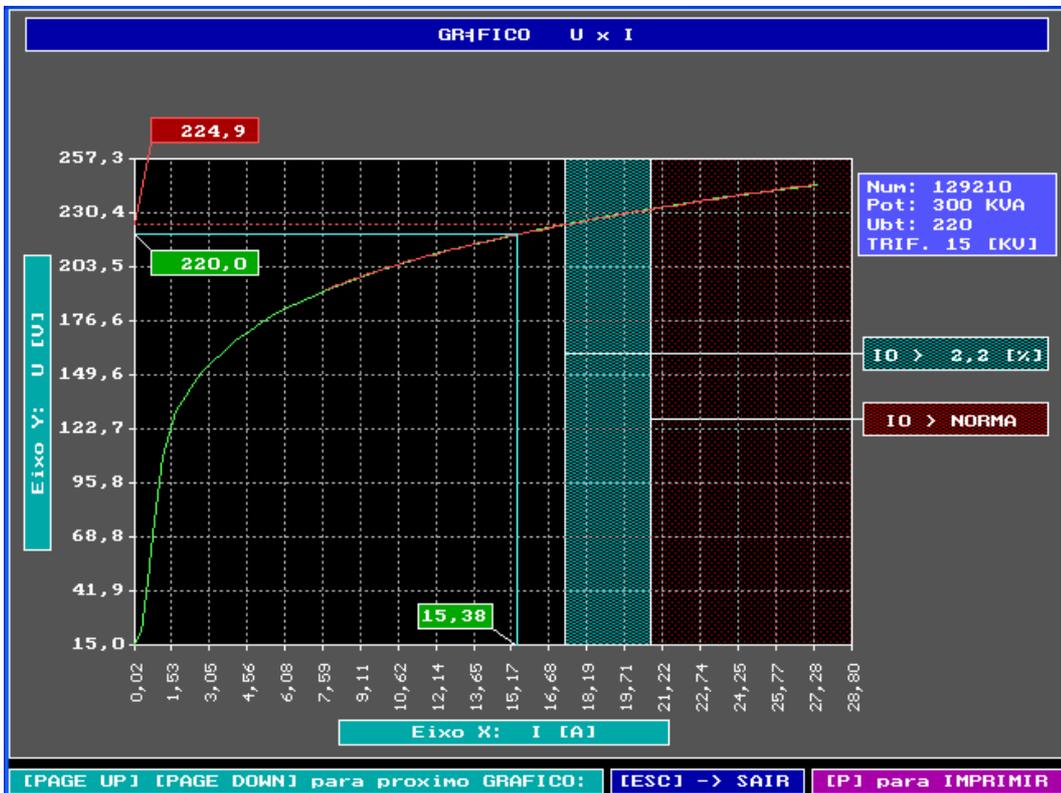


Figura 6.12: Tela do gráfico: U x I

6.3 CORREÇÃO DOS ENSAIOS FEITOS EM 60 PARA 50 [HZ]

Como no Brasil, a frequência industrial do sistema elétrico é de 60 [Hz], os fabricantes de transformadores desenvolveram os seus projetos e laboratórios para operar nesta frequência.

Com a expansão do Mercosul, onde em vários países a frequência industrial do sistema elétrico é de 50 [Hz], os fabricantes de transformadores brasileiros, que desejam participar deste mercado precisam adequar seus projetos e laboratórios de ensaios para operar também com esta frequência.

Uma vez projetado e construído, o transformador precisa ter os ensaios em vazio e em curto-circuito realizado com tensões e correntes com frequência de 50 [Hz].

Se o laboratório possuir, como fonte de energia, um gerador acionado por um motor de corrente contínua, ou um motor de indução com inversor de frequência, é relativamente simples fazer o gerador operar tanto em 60 como em 50 [Hz]. Para este caso o fabricante pode ensaiar os transformadores de 60 [Hz] com frequência de 60 [Hz] e os de 50 [Hz] com frequência de 50 [Hz], sem precisar fazer nenhuma correção.

Entretanto a maioria dos fabricantes, tem em seus laboratórios, geradores acionados com motores de indução, com a alimentação convencional e acoplamento com o gerador, feito por polia e correia, neste caso a única forma de alterar a frequência, seria alterar a relação de polias. Em outros casos é usado, com fonte de energia, um variador de tensão, geralmente motorizado, neste caso não é possível fazer com que a frequência de saída seja diferente da frequência da entrada.

Pelos motivos descritos é interessante e mais padronizado, que o laboratório opere sempre com a frequência original de 60 [Hz] e nos casos de transformadores projetados para 50 [Hz], os mesmos sejam ensaiados em 60 [Hz] aplicando-se o método de correção descrito a seguir.

6.3.1 MÉTODO DE CORREÇÃO PROPOSTO

6.3.1.1 Perdas em Vazio

Para conseguir a mesma intensidade de fluxo magnético [22] circulando no núcleo do transformador projetado para 50 [Hz] e ensaiado em 60 [Hz], é necessário aumentar a tensão em 20 [%], uma vez que o fluxo é inversamente proporcional à frequência:

$$U = K \cdot \phi \cdot f \quad (6.6)$$

Porém algumas correções precisam ser feitas porque as perdas em vazio obtidas são maiores que as que seriam obtidas em 50 [Hz]. Isto acontece devido ao fato de as perdas em vazio variarem com a frequência, de acordo com a equação de Steinmetz:

$$P_0 = K \cdot (K_h \cdot f + K_f \cdot f^2) \quad (6.7)$$

Onde:

K_h = constante de histerese;

K_f = constante de *Foucault*.

ou seja, as perdas em vazio são compostas pelas perdas de histerese e pelas perdas de *Foucault*, as perdas por histerese variam com a frequência e as de *Foucault* com o quadrado da frequência.

No método proposto, como é difícil conhecer a proporção destas perdas embutidas nas perdas em vazio, adota-se como sendo de 50 [%] para cada uma.

Desta forma a correção aplicada às perdas em vazio para o ensaio feito com frequência de 60 [Hz] e tensão 20 [%] maior é:

$$P_{0(50Hz)} = \frac{P_{0(60Hz)}}{2} \cdot \frac{50}{60} + \frac{P_{0(60Hz)}}{2} \cdot \left(\frac{50}{60}\right)^2 \quad (6.8)$$

6.3.1.2 Corrente em Vazio

Em termos práticos, a corrente em vazio obtida no ensaio em vazio com 20 [%] a mais de tensão e frequência de 60 [Hz], é praticamente a mesma que seria obtida com tensão nominal e frequência de 60 [Hz], devido ao fato de a corrente magnetizante I_q , função do fluxo, ser a mesma e muito maior que a parcela I_p , função das perdas em vazio.

Pode-se aumentar a precisão do método proposto, corrigindo-se também a corrente em vazio de acordo com o diagrama fasorial da figura 6.13:

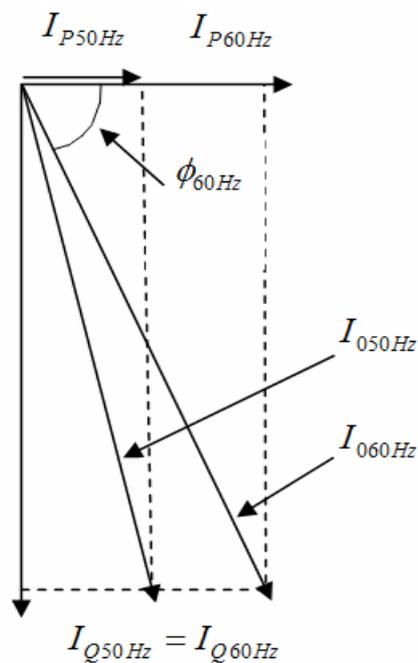


Figura 6.13: Diagrama fasorial para corrente a vazio.

Inicialmente decompõe-se a corrente a vazio I_{060Hz} nas parcelas I_{P60Hz} (parcela ativa) e I_{Q60Hz} (parcela reativa), em seguida obtém-se a corrente I_{P50Hz} da mesma forma que foi feito para a potência ativa e por último calcula-se a corrente a vazio I_{050Hz} , ou seja:

$$I_{P60Hz} = I_{060Hz} \cdot \cos \phi_{60Hz} \quad (6.9)$$

$$I_{Q60Hz} = I_{060Hz} \cdot \sin \phi_{60Hz} \quad (6.10)$$

$$I_{P50Hz} = \frac{I_{P60Hz}}{2} \cdot \frac{50}{60} + \frac{I_{P60Hz}}{2} \cdot \left(\frac{50}{60}\right)^2 \quad (6.11)$$

$$I_{Q50Hz} = I_{Q60Hz} \quad (6.12)$$

Finalmente:

$$I_{O50Hz} = \sqrt{I_{P50Hz}^2 + I_{Q50Hz}^2} \quad (6.13)$$

6.3.1.3 Potência ativa de curto-circuito

A potência ativa de curto-circuito, obtida no ensaio de curto-circuito, é composta pelas parcelas de perdas Joule e perdas adicionais. Só as perdas adicionais variam com a frequência e devem ser corrigidas pela expressão:

$$P_{AD50Hz} = P_{AD60Hz} \cdot \left(\frac{50}{60}\right)^2 \quad (6.14)$$

As perdas por efeito Joule P_J , são calculadas em função de $R \cdot I^2$ dos enrolamentos e independem da frequência. Assim temos as expressões:

$$P_{CC60Hz} = P_J + P_{AD60Hz} \quad (6.15)$$

$$P_{AD60Hz} = P_{CC60Hz} - P_J \quad (6.16)$$

$$P_{AD50Hz} = P_{AD60Hz} \cdot \left(\frac{50}{60}\right)^2 \quad (6.17)$$

$$P_{CC50Hz} = P_J + P_{AD50Hz} \quad (6.18)$$

6.3.1.4 Tensão de curto-circuito

A tensão de curto-circuito obtida no ensaio feito em 60 [Hz] é maior que a que seria obtida em 50 [Hz], porque como a reatância percentual varia com a frequência, a

tensão de curto-circuito também será diretamente proporcional à mesma. A correção aplicada à tensão de curto-circuito é:

$$U_{CC50Hz} = U_{CC60Hz} \cdot \left(\frac{50}{60}\right) \quad (6.19)$$

6.3.1.4 Cálculo de outros parâmetros

Os demais parâmetros R%, Z%, X% e Perdas totais são calculados usando-se as suas expressões originais, porém com os seus termos substituídos pelos termos corrigidos.

6.3.1.5 Exemplo de aplicação

O método de correção descrito, foi testado em 5 transformadores diferentes na empresa **Trafo Equipamentos Elétricos S/A**, unidade de Hortolândia. Estes transformadores, fornecidos para o Paraguai, foram construídos para operarem com frequência de 50 [Hz]. Foram ensaiados com a frequência original e também com 60 [Hz], aplicando-se o método de correção. A comparação dos resultados para o pior caso foi:

Dados do placa do transformador:

S = 160 [kVA] AT: 13200 [V] BT: 400 [V]
 Freq. = 50 [Hz] DA: Dy11 T. Referência: 75 [°C]

A tabela 6.1 ilustra a comparação dos ensaios.

Tabela 6.1: Resultados e comparação dos ensaios em 50 e 60 [Hz]

	50 Hz	60 Hz	Erro %
P_o [W]	405	403	-0,5 %
I_o [A]	4,18	4,18	-
P_{cc} [W]	1945	1947	+0,1 %
U_{cc} [V]	535	533	-0,4 %
$P_{TOTAL75}$ [W]	2703	2701	-0,1 %
Z_{75} %	4,12	4,10	-0,5 %

CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de instrumentos e programas computacionais visando a automação de ensaios de rotina em transformadores de distribuição e a sistematização dos procedimentos de ensaio.

De forma sucinta, os elementos que fazem parte dessa automação são:

- 1) Padronização do cadastro dos transformadores, tendo como referência as tensões, as derivações, as potências e os diagramas fasoriais de tensão de acordo com as normas técnicas [2] [3];
- 2) Assistência completa na execução dos ensaios em vazio, curto-circuito, relações de tensão e resistências ôhmicas, podendo inclusive ser feitos de forma totalmente automática;
- 3) Integração dos resultados, de todos os ensaios realizados, no programa principal TRANS4;
- 4) Comparação dos valores obtidos nos ensaios com os máximos permitidos [4];
- 5) Análise estatística de P_o , $I_o\%$, $P_{TOTALIS}$ e $Z_{REF.}\%$, para lotes de transformadores idênticos, calculando a média aritmética, valores máximos e mínimos e o desvio padrão;
- 6) Registro de não conformidades, ocorridas durante os ensaios ou outras diversas, no arquivo de ensaio, para posterior comparação com os índices de metas para defeitos;
- 7) Diversos tipos de relatórios impressos e a possibilidade de serem gerados relatórios eletrônicos no formato PDF;
- 8) Automação do ensaio de elevação de temperatura;
- 9) Automação do ensaio de curva de saturação;
- 10) Método de correção dos ensaios feitos em 60 para 50 [Hz].

Com a integração das funcionalidades descritas acima, os usuários podem realizar os ensaios com maior orientação, precisão, crítica e principalmente rapidez.

Existem atualmente no Brasil, entre fabricantes e reformadoras de transformadores, mais de 50 laboratórios de ensaios elétricos equipados com os instrumentos e programas apresentados neste trabalho. Isto faz com que a filosofia de automação e os métodos padronizados de realizar os ensaios, sejam bem conhecidos pelos fabricantes de transformadores e inspetores de várias companhias de distribuição de energia elétrica, vindo inclusive algumas como: ENERGIPE, CEMAT, CELG, ENERSUL, CELPE, CFLCL e CEMIG a automatizar seus laboratórios de inspeção de ensaios elétricos de rotina em transformadores de distribuição.

Obviamente este trabalho não considera todas as possibilidades de automação de ensaios e funções de programa, ficando sempre aberto a implementações de novas ferramentas, relatórios, análises e valores de referência de norma. São de suma importância as sugestões, por parte dos fabricantes de transformadores, pois são eles, na rotina do dia a dia, os maiores conhecedores do que precisa ser feito para melhorar este trabalho.

7.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Como consequência natural, para acompanhar a evolução tecnológica, propõem-se as seguintes atualizações:

- Compactação do *hardware* desenvolvido, utilizando componentes eletrônicos mais integrados.
- Desenvolvimento de comunicação entre computador e equipamentos, em substituição ao atual protocolo serial RS232, por um dos seguintes padrões:
 1. Comunicação por porta USB, que é o padrão atual;
 2. Comunicação por rede ethernet, com cabo trançado;
 3. Comunicação por rede ethernet, sem fio. Esta bastante interessante, por garantir total isolação galvânica entre equipamento e computador.
- Aumentar a faixa de leitura do equipamento de medição de relação de transformação.
- Aumentar a tensão e corrente da fonte do equipamento de medição de resistência ôhmica, permitindo medir, com precisão, resistências inferiores a 1 [$\mu\Omega$].

- Implementar a automação de alguns ensaios para transformadores de força, transformadores a seco e reguladores de tensão
- Conversão e adaptação dos atuais programas, escritos com a linguagem de programação TURBO PASCAL, para uma linguagem totalmente em Windows, como por exemplo o DELPHI (BORLAND USA).

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, **IEEE 57.12.90**, 1999.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5380**: Transformador de potência: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1993. 59 p.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356**: Transformador de potência: especificação. Rio de Janeiro, 1993. 59 p.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5440**: Transformadores para redes aéreas de distribuição: padronização. Rio de Janeiro, 1999. 28 p.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025**: Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2001. 20 p.
- [6] VICENTE, José Manuel E. **Desenvolvimento de um instrumento digital para medição de grandezas elétricas em sistemas trifásicos**. 1990. 112 p. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica), Escola Federal de Itajubá, Itajubá, 1990
- [7] J. HILL; W. E. ALDERSON. **Design of a Microprocessor-based Digital Wattmeter**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. IECI-28, n. 3, August 1981, pp. 180-184
- [8] A. C. CORNEY; R. PULLMAN. **T. Digital Sampling Laboratory Wattmeter**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. IM-36, n. 1, March 1987, pp 54-59
- [9] R. S. TURGEL. **Digital Wattmeter Using a Sampling Method**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. IM-23, n. 4, December 1974, pp. 337-341
- [10] G. N. STENBAKKEN. **A wideband Sampling Wattmeter**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-103, n. 10, October 1984, pp. 2919-2926

- [11] CIARCIA, S. **Construa o seu próprio computador usando o MP-Z80**. McGraw-Hill do Brasil, 1984
- [12] H. TAUB. **Circuitos Digitais e Microprocessadores**. McGraw-Hill do Brasil, 1985
- [13] MEDEIROS, S. F. **Fundamentos de Medidas Elétricas**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1981
- [14] CYPRIANO, L. B. **Microprocessador Z80 Hardware**. v. 1, 4. ed., São Paulo: Érica, 1983.
- [15] CYPRIANO, L. B. **Z80 Software**. v. 2, São Paulo: Érica, 1983.
- [16] INMETRO; ABNT. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. ed. re., São Paulo, 1998.
- [17] OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R.; ABREU, J. P. G. **Transformadores Teoria e Ensaíos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.
- [18] RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. **Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais**. 2. ed., Makron Books, 1997.
- [19] C. E. APPLGATE. **Kelvin bridge**. in www.accessscience.com, DOI 10.1036/1097-8542.362400, last modified: March 22, 2002.
- [20] C. H. DIX; R. G. JONES. **Resistance measurement**. In www.accessscience.com, DOI 10.1036/1097-8542.582400, last modified: August 26, 2005.
- [21] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. Jr; KUSKO, A. **Máquinas Elétricas**. McGraw-Hill do Brasil, 1978.
- [22] KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. São Paulo: Globo, 1987.

[23] Matos, Elaine B. et al. **Manual para elaboração e normalização de Dissertações e Teses**. 3 ed., Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004

[24] VICENTE, J. Manuel Esteves; REZEK, Angelo J. Junqueira. **Desenvolvimento de instrumento digital trifásico para medição de relação de transformação em transformadores de distribuição**. In: IEEE III INDUSCON - USP, 1998, São Paulo. ANAIS IEEE III INDUSCON. 1998. p. 253-254.

[25] VICENTE, J. Manuel Esteves; REZEK, Angelo J. Junqueira; GUIMARÃES, Carlos A. Mohallem; ALMEIDA, Antônio T. Lyrio. **Development of a digital electronic transformer turn ratio**. In: WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ENGINEERING SYSTEMS – ICOPEs 2002, 2002, Rio de Janeiro – Brasil. CD-Rom WSEAS ICOPEs 2002, 2002. v. 1, p. 2401-2403.

[26] VICENTE, J. Manuel Esteves; REZEK, Angelo J. Junqueira; ALMEIDA, Antônio T. Lyrio. **Correction method for electrical tests in transformers designed for 50 Hz of frequency tested at 60 Hz**. In: FIFTH LATIN AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE, 2003, São Pedro – SP - Brasil. CDRom Fifth Latin American Congress Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2003 Paper - B094.

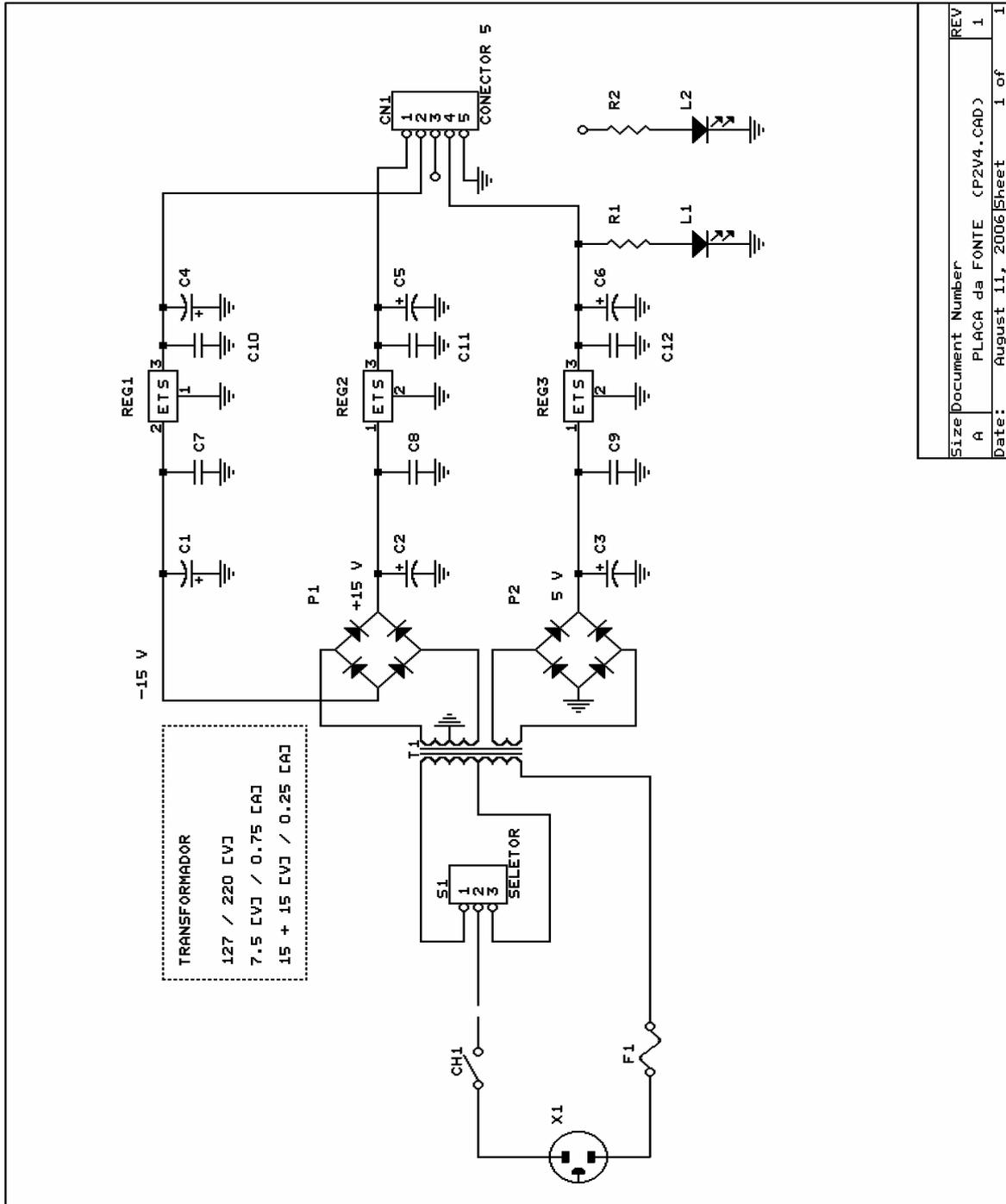
[27] VICENTE, J. Manuel Esteves; REZEK, Angelo J. Junqueira; GUIMARÃES, Carlos A. Mohallem; ALMEIDA, Antônio T. Lyrio. **Development of a digital electronic transformer turn ratio (TTR)**. Wseas Transactions On Systems, Atenas - Grécia, v. 2, n. 2, p. 345-347, 2003.

[28] VICENTE, J. Manuel Esteves; REZEK, Angelo J. Junqueira; GUIMARÃES, Carlos A. Mohallem; ALMEIDA, Antônio T. Lyrio. **Development of a digital electronic transformer turn-ratio**. Artigo aprovado para publicação no Amse Journal, Tassin la Demi Lune - France, 2006.

[29] VICENTE, J. Manuel Esteves; REZEK, Angelo J. Junqueira; ALMEIDA, Antônio T. Lyrio. **Automation of the temperature elevation test in transformers with insulating oil**. Artigo condicionalmente aceito para publicação no ISA transactions.

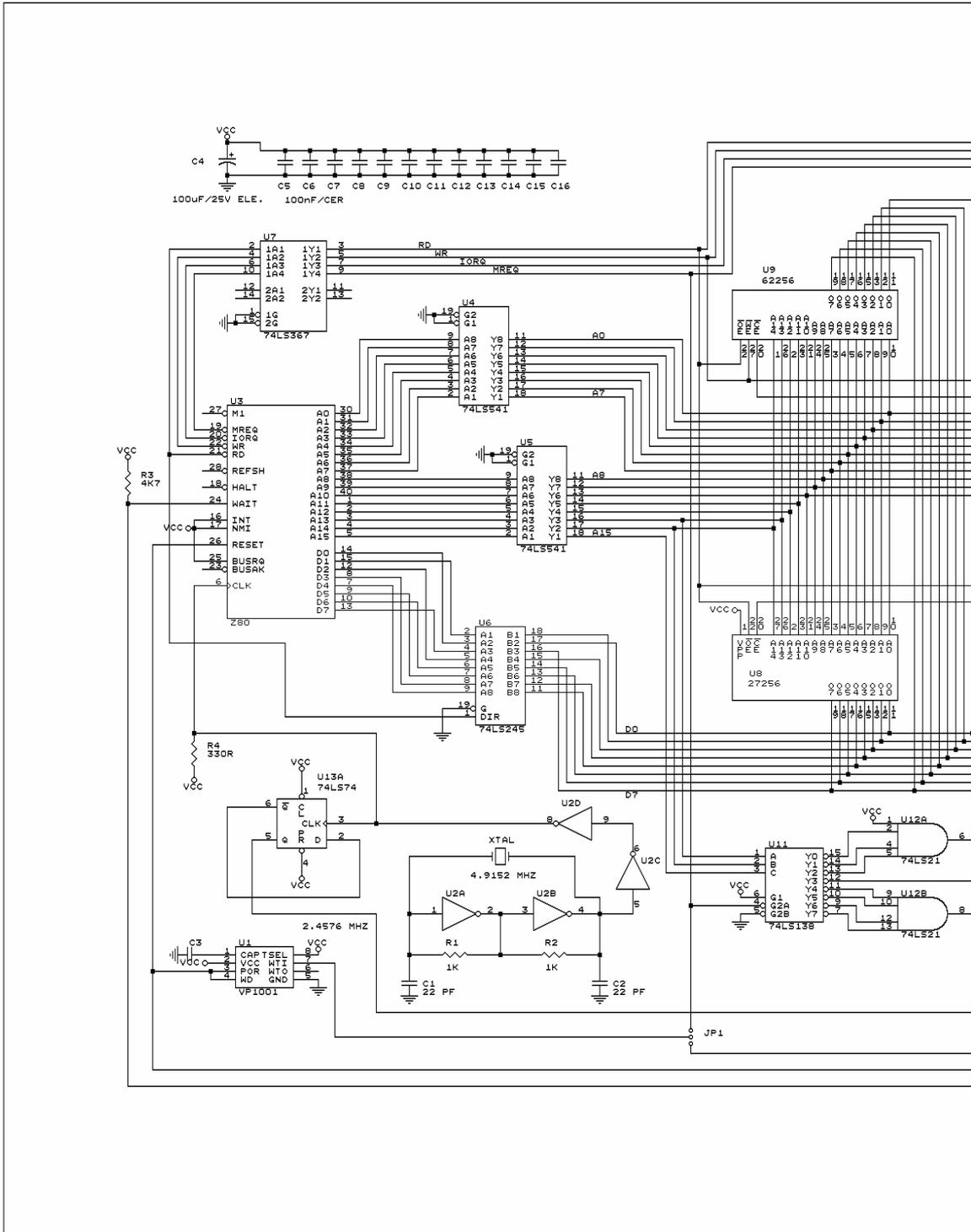
APÊNDICE A

Circuitos eletrônicos desenvolvidos

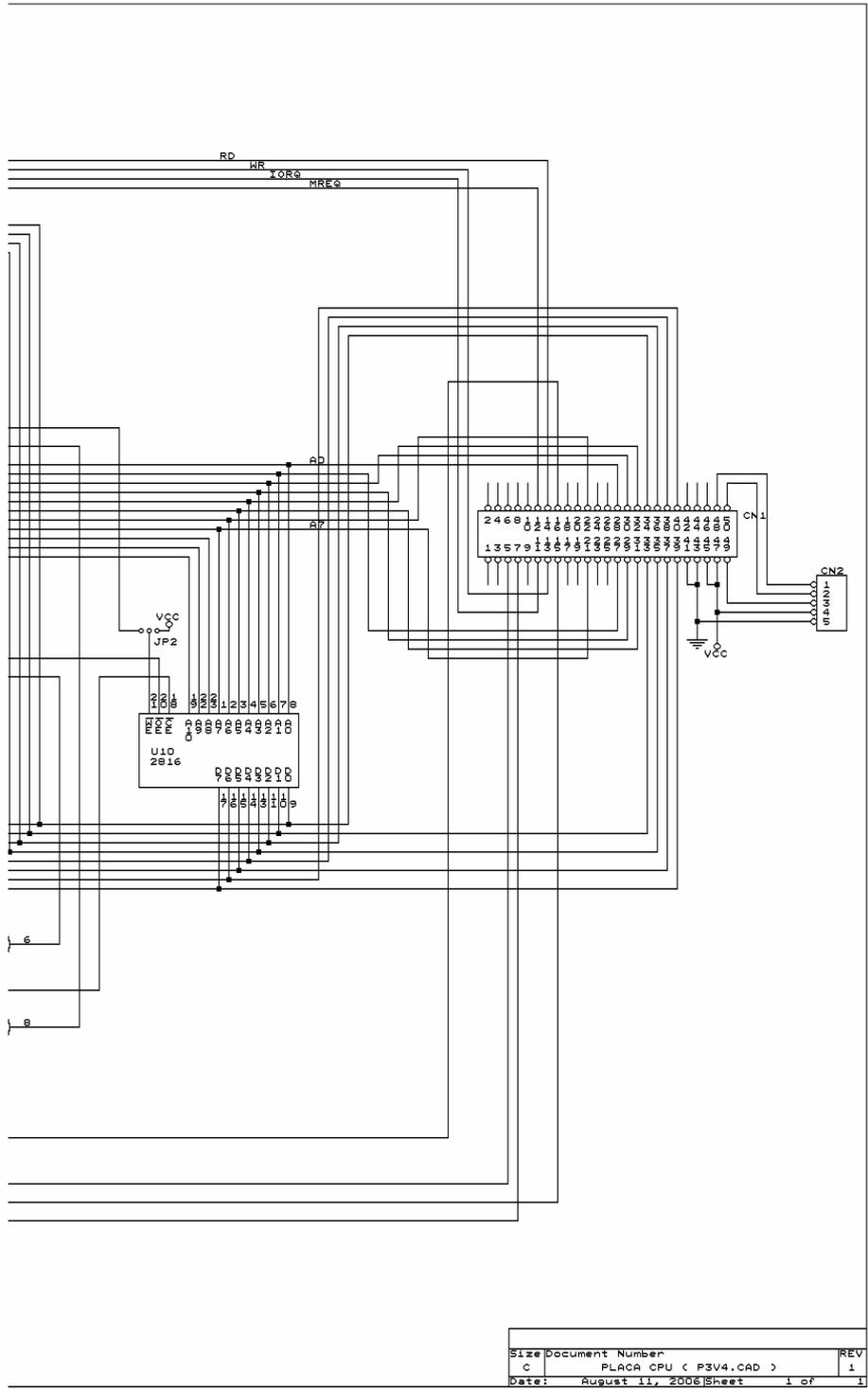


Size	Document Number	REV
A	PLACA da FONTE (P2V4.CAD)	1
Date:	August 11, 2006	Sheet 1 of 1

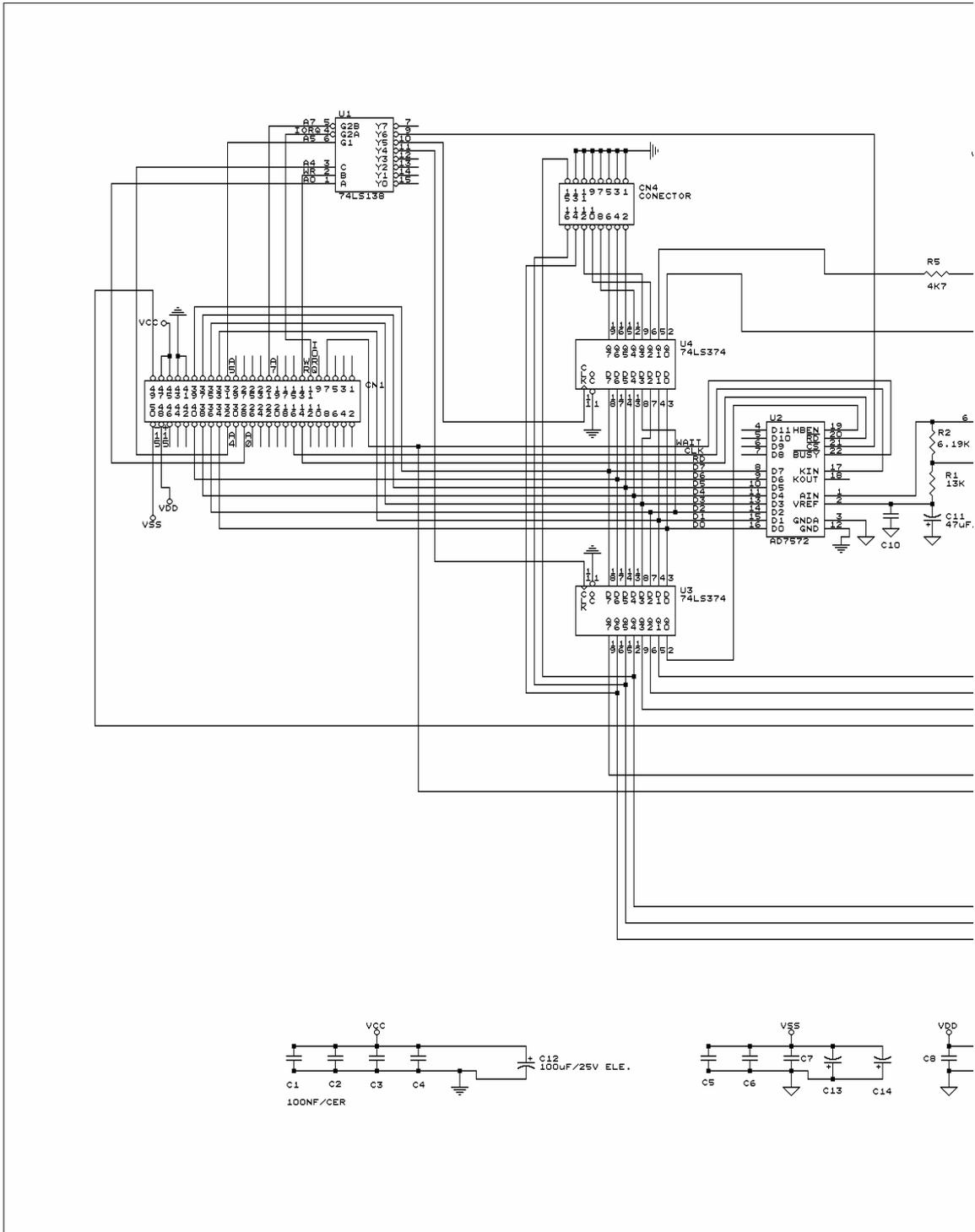
Placa 1



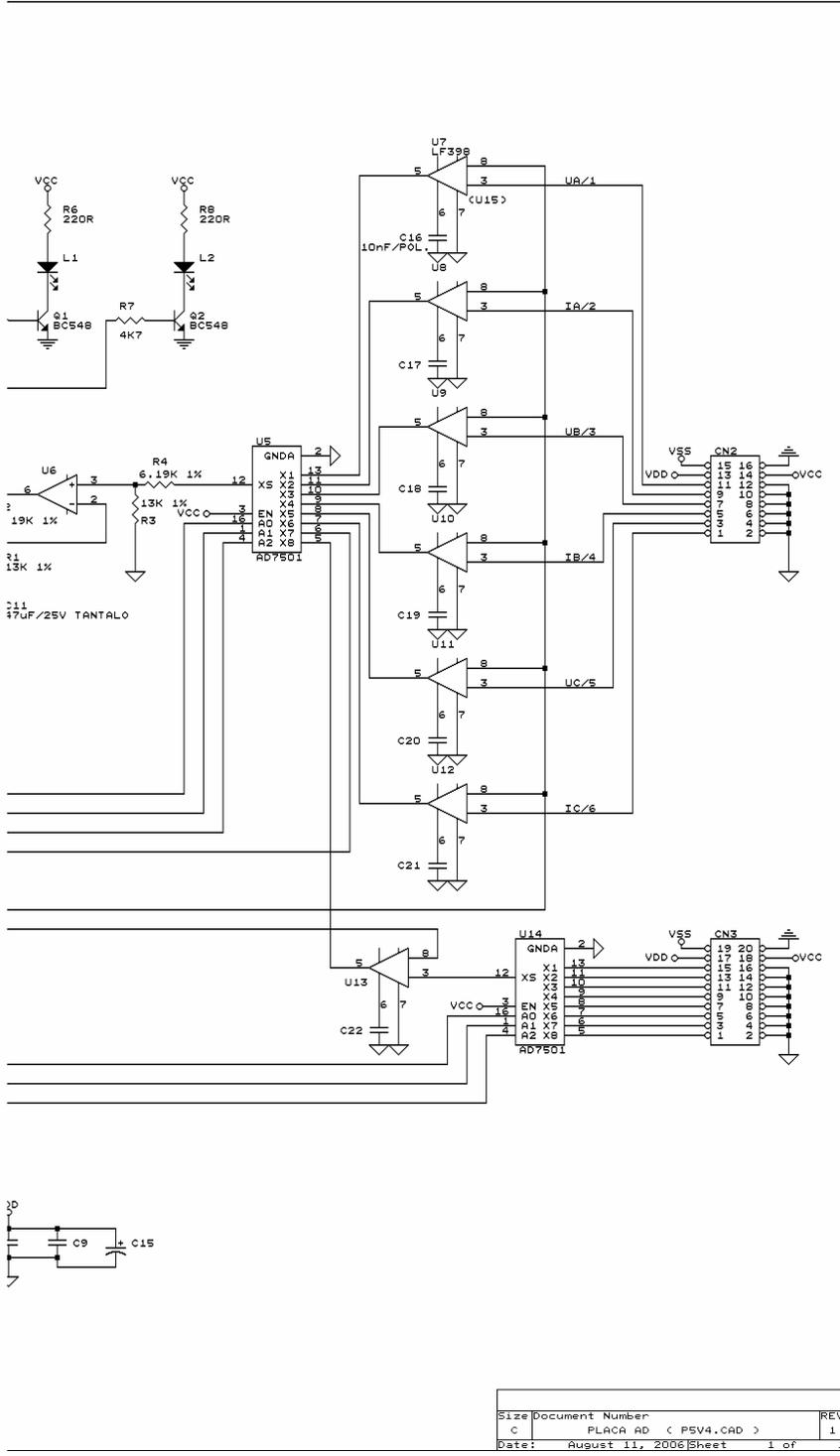
Placa 2, parte A



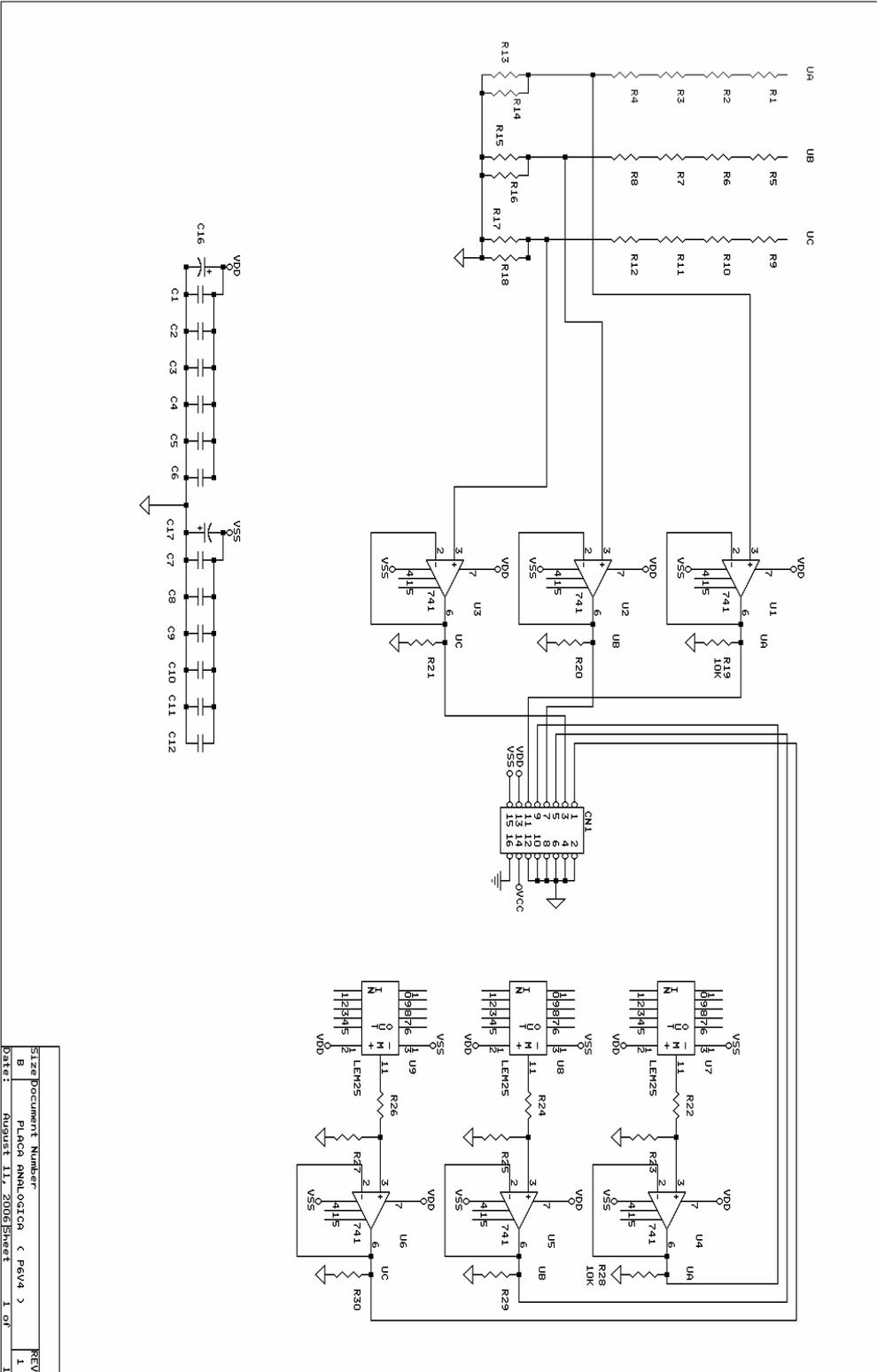
Placa 2, parte B



Placa 4, parte A

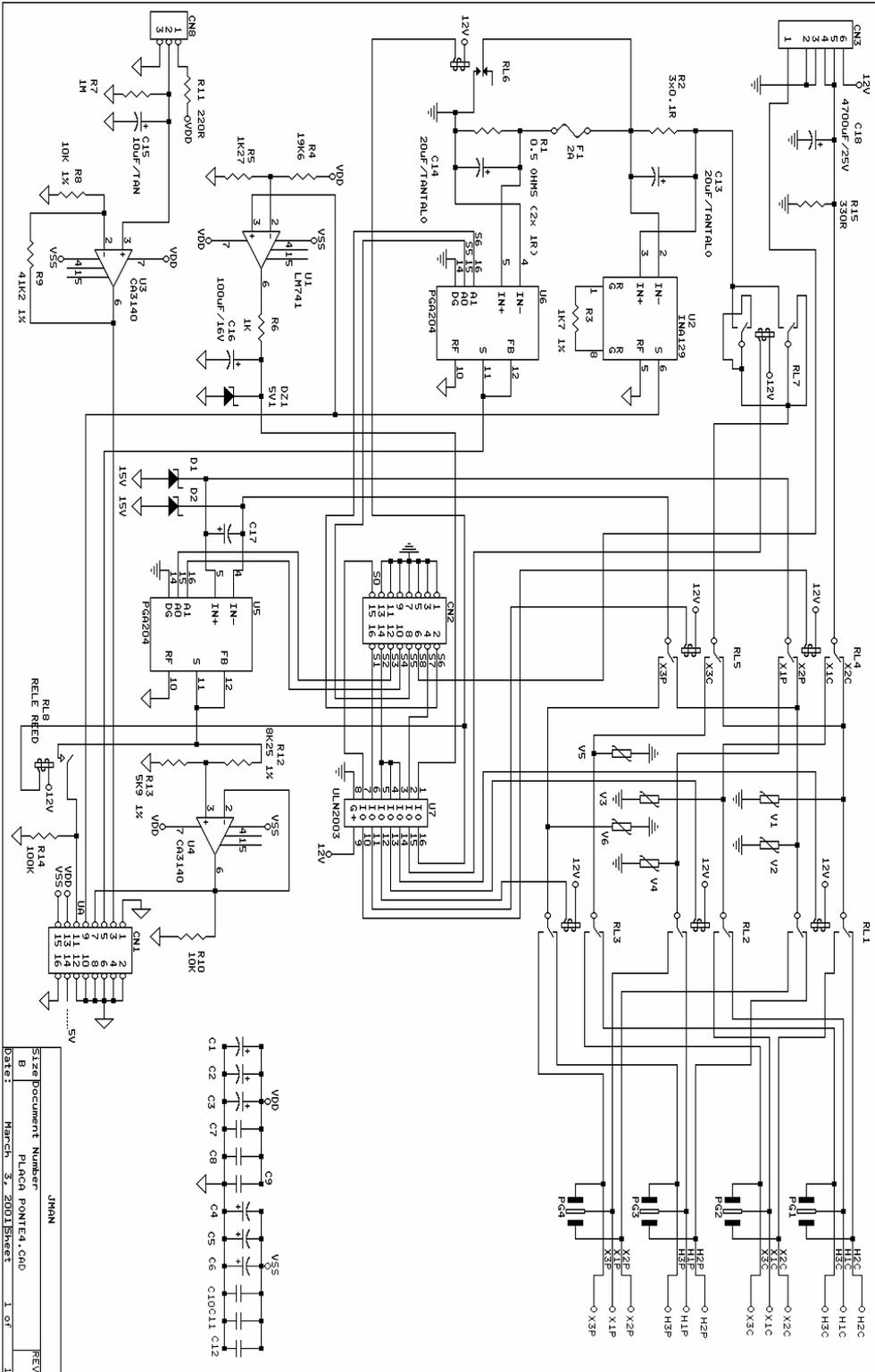


Placa 4, parte B

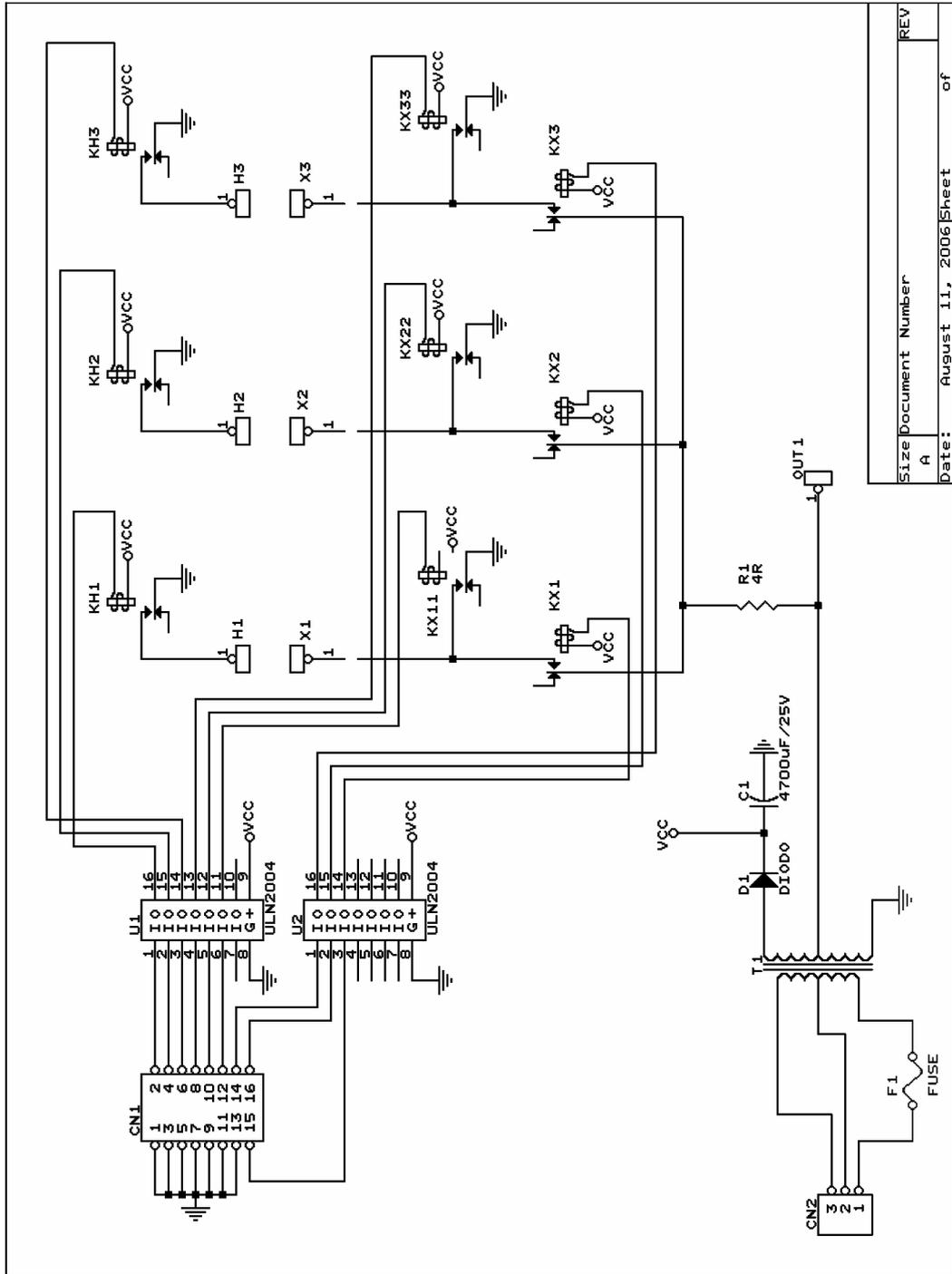


Size Document Number	REV
B	1
PLACA FOTOLÓGICA (P6V4)	
Date: August 11, 2006	Sheet 1 of 1

Placa 5



Placa 5B



Size	Document Number	REV
A		
Date:	August 11, 2006	Sheet of

Placa 5A