

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA PRODUÇÃO**

Anderson Ricardo Pacheco

**ARQUITETURA MODULAR DE PAINÉIS DE TESTES
ELÉTRICOS DE ESTADORES INDUTIVOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia da Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia da Produção.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Antônio Forcellini

Florianópolis

2012

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da
Universidade Federal de Santa Catarina

Pacheco, Anderson Ricardo

Arquitetura Modular de Painéis de Testes Elétricos de Estatores Indutivos [dissertação] / Anderson Ricardo Pacheco; orientador, Fernando Antônio Forcellini ; co-orientador, Marcelo Gitirana Gomes Ferreira. – Florianópolis, SC, 2012.

185 p. / 21 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção.

Inclui referências:

1. Engenharia de Produção. 2. Testes Elétricos de Segurança de Estatores Indutivos. 3. Arquitetura de Produtos. 4. Modularidade. 5. Procedimento de Desenvolvimento de Produtos Modulares. I. Forcellini, Fernando Antônio. II. Ferreira, Marcelo Gitirana Gomes. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. IV. Título.

Anderson Ricardo Pacheco

ARQUITETURA MODULAR DE PAINÉIS DE TESTES ELÉTRICOS DE ESTADORES INDUTIVOS

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia da Produção”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia da Produção da UFSC.

Florianópolis, Novembro de 2012.

Prof. Antonio Cezar Bornia, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof., Dr. Fernando Antônio Forcellini,
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof., Dr. Marcelo Gitirana Gomes Ferreira,
Co-Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof., Dr. Lucas Weihmann,
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof., Dr. Rodolfo Cesar Costa Flesch,
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Este trabalho é Dedicado a Deus, meu criador, que me presenteou com o amor de minha esposa Tatiane e a alegria da Letícia, fruto desse amor.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador, Professor Fernando Antônio Forcellini, que dedicou todos os seus esforços para o melhor desenvolvimento e finalização deste trabalho.

Ao Professor Marcelo Gitirana Gomes Ferreira, que de maneira amigável e sem medir esforços apoiou e incentivou a elaboração do trabalho.

Aos colegas de Mestrado do PPGEP, que de braços abertos souberam ouvir, opinar e exemplificar soluções para os diversos passos que levam à conclusão do mestrado.

Ao amigo e colega de trabalho, Orlando Starke, que me incentivou a pesquisar novas alternativas de testes elétricos de estatores.

Ao PPGEP que, sabendo das minhas dificuldades em conciliar profissão, família e curso, deu crédito às minhas idéias e demonstrou flexibilidade diante de minhas ausências por motivos profissionais.

Ao diretor de recursos humanos do departamento de pesquisa e desenvolvimento da Embraco, Marcio Luiz Schissatti, que incentivou e liberou recursos humanos e financeiros para o início do desenvolvimento desta pesquisa.

Ao líder de projetos do setor de pesquisa e desenvolvimento da Embraco, Wilfred Roetger, que permitiu a continuação da pesquisa ao incorporá-la ao desenvolvimento de uma nova plataforma de compressores herméticos.

Ao amigo e colega de trabalho, Alberto Bruno Feldmann, que destinou suas horas vagas à correção ortográfica desta pesquisa.

Aos colegas de projeto, Bruno da Silva Marció do Curso de Engenharia de Controle e Automação da UFSC e Leandro Roberto Sacht do Curso de Engenharia Elétrica da UDESC, por dedicarem seus estágios de conclusão de graduação nas diversas atividades que fazem parte do processo de desenvolvimento do produto desta pesquisa.

À minha esposa, Tatiane Cristina Rieper, que me incentivou a conclusão do Mestrado e supriu com amor a minha ausência nos primeiros meses de vida da nossa filha Letícia.

Por último e com profundo carinho e amor, a Deus, que me deu saúde para concluir esta etapa de evolução na minha existência.

"A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo"

(Albert Einstein)

RESUMO

No processo de manufatura em larga escala do principal componente do motor elétrico de indução, o estator, a exigência é a utilização de equipamentos robustos, eficientes e principalmente capazes de manter a qualidade do produto em níveis elevados de produção. A garantia do correto funcionamento do sistema de isolamento elétrico de um estator é papel fundamental dos fabricantes, das normas construtivas que seguem, dos órgãos certificadores que regulamentam tais normas e principalmente do equipamento que é utilizado para qualificá-lo depois de fabricado. Não há dúvida quanto ao emprego deste equipamento, uma vez que à ele é entregue a responsabilidade de manter a segurança do usuário final de um motor elétrico e de garantir que o estator irá funcionar de acordo com aquilo que foi proposto para o seu uso. Adequado é o número de fabricantes de equipamentos denominados painéis de testes elétricos de segurança e os tipos de métodos de testes que aplicam para classificar o sistema de isolamento de um estator. O que não necessariamente é satisfatório é a relação ao longo do tempo entre o fabricante de estatores com o fabricante do modelo de painel de testes elétricos de segurança que emprega em suas linhas de produção em massa. A predominância nesse setor é de fabricantes que desenvolvem a própria versão de painel de testes elétricos e dos equipamentos que o compõe, fato que leva a uma dependência tecnológica dos fabricantes de estatores elétricos com os de painéis. Por outro lado, uma variedade de módulos de prateleira para testes elétricos de estatores existente no mercado possibilita a avaliação do sistema de isolamento de um estator no seu campo de atuação. Para cada método de teste empregado em um painel de teste elétrico de um estator há uma variedade enorme de marcas e modelos de módulos de testes que competem em preço, interfaces, facilidade de aplicação, compatibilidade com softwares gerenciadores, etc. A lacuna existente entre essas duas tecnologias motivou a execução desta dissertação e o resultado dela é a obtenção de um equipamento que permite classificar o sistema de isolamento do estator elétrico no processo produtivo e, o mais significativo, que possui uma vantagem frente às versões existentes no mercado, ou seja, os benefícios da modularização.

Palavras-chave: Motores. Estatores. Sistema de Isolamento. Painéis de Testes Elétricos de Segurança. Arquitetura de Produto. Modularidade.

ABSTRACT

In mass production of the electric motor most important part, the stator, the request is using efficient and robust equipment to assure quality guaranty in a high capacity level. The right function of a stator insulation system is sustained by its motor design, its standards and specifically through its insulation security test, which is performed by equipment named stator electrical safety testing panel at the end of the productivity chain. Since the responsibility of keeping the motors user integrity is transferred to this equipment, there is no doubt of its use. Considered quantities of electrical safety testing panel suppliers are available at the market and the tests that they perform are satisfactory. What is not necessarily satisfying is the relationship over the time between stator manufacturer and manufacturer model test panels employing electrical safety in its mass production lines. The dominance of these sector manufacturers that develop their own version of panels and electrical testing equipments generates a strong dependence from manufacturers of electric stators to electrical safety testing panels. On the other hand, a wide range of standard test modules that compete in prices, interfaces, facility features, software management compatibility, etc, provide electrical tests of the stators insulation system at its playing fields. The gap between both technologies motivated the implementation of this dissertation and the result of it was the obtaining of a product which allows classifying the stator electrical insulation system in its mass production, and more significantly, which has an advantage over the versions available on the market, i.e., the benefits of modularization.

Keywords: Motors. Stators. Insulation System. Panels Electrical Safety Testing. Product Architecture. Modularity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Periódicos Capes sobre “Termos Técnicos” ^ “Product Architecture”	38
Figura 2 - Periódicos CAPES sobre “Termo Técnico” ^ “Modularity”	39
Figura 3 - Delimitações da Pesquisa	40
Figura 4 - Procedimentos técnicos da pesquisa	41
Figura 5 - Classificação dos motores elétricos	45
Figura 6 - Componentes elétricos básicos de um motor de indução: (a) estator e (b) rotor	46
Figura 7 - Estator elétrico.	47
Figura 8 - Etapas do processo produtivo de um estator para motor monofásico indutivo	50
Figura 9 - Formação de pacotes de estatores	51
Figura 10 - Estator elétrico após inserção dos isolantes de ranhuras	51
Figura 11 - Estator após bobinar e inserir a bobina principal	52
Figura 12 - Abertura ou conformação da cabeça de bobinas (principal somente)	53
Figura 13 - Estator antes da conformação da cabeça de bobinas	53
Figura 14 - Cabo de conexão de um estator e seu isolamento	54
Figura 15 - Estator Acabado.	55
Figura 16 - Sistemas de isolamento de Grubic et al (2008)	57
Figura 17 - Posição geográfica dos principais fornecedores de painéis integrais de testes elétricos de segurança de estatores	63
Figura 18 - Placa GLP3 versão 3a	66
Figura 19 - Testador de estator MTC3	67
Figura 20 - Placa GLP3, suas versões e conexões com os demais componentes do painel MTC3 da Schleich	67
Figura 21 - Lista dos fornecedores de módulos de testes do sistema de isolamento do estator indutivo	70
Figura 22 - Série Omnia 8106 da Associated Reserach Inc.	71
Figura 23 - Estrutura funcional de um reboque	73
Figura 24 - Conexão entre elementos funcionais e seus componentes	73
Figura 25 - Interfaces associada e desassociada	75
Figura 26 - Tipos de arquitetura modular: totalmente modular (A) e de enforque modular (B)	77
Figura 27 - Quatro arquiteturas de reboque	78
Figura 28 - Opções de criação da modularidade	81
Figura 29 - Estrutura modular simplificada	81
Figura 30 - Conceitos de sistemas modulares	87
Figura 31 - Tipos de módulos e funções em sistemas modulares e mistos	88
Figura 32 - Os cinco estágios do processo de desenvolvimento de novos produtos e processos do C2C	94

Figura 33 - Visão geral do modelo de referência do processo de desenvolvimento de produtos	94
Figura 34 - Fases de desenvolvimento do equipamento	95
Figura 35 - Lista de requisitos do produto.....	96
Figura 36 - Estrutura funcional do painel modular de testes elétricos de estatores	98
Figura 37 - Diagrama de blocos e painel frontal do LabVIEW	100
Figura 38 - Mapeamento 1:1 entre módulo LabVIEW e seu elemento funcional	101
Figura 39 - Tipos de interfaces entre LabVIEW e módulos de testes.....	103
Figura 40 - Mapeamento da interface entre módulos ocultos e visíveis do Projeto	104
Figura 41 - Fluxograma para seleção dos módulos visíveis	106
Figura 42 - Especificações gerais do equipamento OMNIA II 8204 da Associated Research	106
Figura 43 - Multímetro digital DMM4040 da TEKTRONIX.....	107
Figura 44 - HIPOT ULTRA III 7650 da Associated Research.....	108
Figura 45 - Módulo de teste de surto DWX-05 da Kokusai	109
Figura 46 - Conjunto de equipamentos que formam o módulo THG-3S de teste de rotação fabricado pela Globalmag	109
Figura 47 - Módulo bloco de contatos da NI.....	110
Figura 48 - Conversor GPIB-USB-HS e cabo GPIB X2 da NI	111
Figura 49 - Módulo ou placa RS232 com duas portas e cabo RS232.....	112
Figura 50 - Conexão entre software e entradas e saídas do painel.....	113
Figura 51 - Módulo ou placa NI PCI-6514 com 32 entradas e saídas	113
Figura 52 - Tela de manutenção desenvolvida em LabVIEW	114
Figura 53 - Parte da certificação protótipo do produto	115
Figura 54 - Modelo físico do painel modular de testes elétricos de segurança de estatores.....	117
Figura 55 - Grupo de componentes interligados por interface GPIB.....	119
Figura 56 - Grupo de componentes interligados por interface RS232.....	119
Figura 57 - Grupo de componentes interligados por interface PCI 6514.....	120
Figura 58 - Arquitetura modular de ranhura para painéis de testes elétricos de segurança de estatores	121
Figura 59 - Parte do projeto elétrico do módulo visível de controle.....	122
Figura 60 - Parte do projeto elétrico do modulo visível de alta tensão.....	122
Figura 61 - Parte dos projetos mecânicos do modulo visível da cabine de testes	123
Figura 62 - Tela principal do equipamento MTC3 do fornecedor Schleich	126
Figura 63 - Telas de adicionar métodos de testes de resistência, hipot, surto e rotação do programa “teste elétrico de estatores.exe”	128
Figura 64 - Módulo de alta tensão montado fisicamente no painel	129
Figura 65 - Módulo de controle montado fisicamente no painel	130
Figura 66 - Equipamentos do módulo de controle instalados na cabine de testes	131

Figura 67 - Contactores de alta tensão.....	132
Figura 68 - Cabine de testes elétricos de estatores do painel modular.....	133
Figura 69 - Montagem dos módulos ocultos na estrutura do painel.....	134
Figura 70 - Montagem dos módulos visíveis na estrutura do painel.....	135
Figura 71 - O painel modular de testes elétricos de segurança de estatores instalado na célula de montagem do estator do motor do micro compressor....	136
Figura 72 - Cabine de testes e equipamentos periféricos do painel modular de testes elétricos de segurança de estatores que auxiliam na sua operação.....	136
Figura 73 - Experimento de teste para avaliar desvios entre tensão configurada e medida.....	138
Figura 74 - Valor configurado no teste de Resistência de Isolação e valor medido nos contatos da cabine de teste do painel modular de testes.....	141
Figura 75 - Curva de erros de tensão aplicada no teste de RI.....	143
Figura 76 - Parte do histórico da calibração do teste de RI do painel modular.....	143
Figura 77 - Valor configurado no teste de alta tensão e valor medido nos contatos da cabine de teste do painel modular testes.....	144
Figura 78 - Curva de erros de tensão aplicada no teste de Alta Tensão AC.....	145
Figura 79 - Parte do histórico de calibração do painel modular de testes.....	145
Figura 80 - Método comparativo de área em teste de Surto de estatores.....	147
Figura 81 - Método de diferença de área entre onda padrão e bobina em teste de surto de estator.....	147
Figura 82 - Valor configurado no teste de surto e valor medido nos contatos da cabine de teste do painel modular de testes.....	148
Figura 83 - Resultado financeiro do projeto e comparativo com versão integral.....	159

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Banco de Teses da BU da UFSC para “Testes de Estatores e/ou Motores elétricos”.....	37
Quadro 2 - Mercados, institutos normativos e normas para aprovação de estatores e motores elétricos para compressores herméticos de refrigeração.....	49
Quadro 3 - Parte da análise dos modos de falhas do processo produtivo do estator em empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina.....	57
Quadro 4 - Diferentes formas de testar o sistema de isolamento do estator de motores elétricos.....	59
Quadro 5 - Métodos <i>offline</i> de testes de isolamento da pesquisa de Grubic et al. (2008) e justificativas de aplicação nos processos de fabricação em massa em empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina.....	60
Quadro 6 - Nome e País sede dos principais fornecedores de painéis integrais de testes elétricos de segurança de estatores.....	64
Quadro 7 - Principais métodos de testes do sistema de isolamento do estator e seu respectivo módulo de prateleira no mercado	69
Quadro 8 - Mapa de ligações entre elementos funcionais e componentes de um produto.....	74
Quadro 9 - Tipos de arquitetura modulares de Ulrich.....	77
Quadro 10 - Perspectivas da modularidade: sistema.....	79
Quadro 11 - Perspectiva da modularidade: processo de desenvolvimento e ciclo de vida do produto	80
Quadro 12 - Operadores da modularidade e suas definições	82
Quadro 13 - Modelo de produtos	83
Quadro 14 - Modelo funcional de produtos	84
Quadro 15 - Métodos de modularização	85
Quadro 16 - Critérios para seleção de um software para utilização em educação na engenharia.....	100
Quadro 17 - Programas e tipos de interface do LabVIEW.....	102
Quadro 18 - Seleção dos módulos ocultos	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado das medições de três operadores distintos no teste de RR	152
Tabela 2 - Tempos de testes de estatores em painéis modular e integral	153
Tabela 3 - Tempos de testes de estatores em painéis modular e integral após mudanças nos software do painel modular	154
Tabela 4 - Tempos de ciclo total de testes de estatores em painéis modular e integral.....	156
Tabela 5 - Parte da tabela de distribuição t de Student	158

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al - Alemanha
BU - Biblioteca Universitária
BUUFSC - Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina
Br - Brasil
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CAM - Método Assistido por Computador
CCC - Certificado Compulsório da China
CCNA - Administração de Certificação e Acreditação da República Popular da China
CE - Comunidade Européia
Cn - China
Co. - Corporação
CQC - Centro de Certificação de Qualidade Chinês
CSA - Associação de Padrões Canadenses
CWIEME - Conferência e Exibição Internacional de Fabricantes de Isolantes e Máquinas para Bobinamento
C++ - Programação em C++
DL - Registro de Dados
DMM - Multímetro Digital
DSM - Matriz de Estrutura de Design
DFT - Certificado VDE para Austrália
DWX - Onda Digital X
GLP3 - Sigla da Marca Schleich que representa seus Testes Elétricos
GLP3a - Série da Sigla da Marca Schleich que representa seus Testes Elétricos
GLP3 2000 - Série da Sigla da Marca Schleich que Representa Seus Testes Elétricos
GPIB - Interface de Barramento de Propósitos Gerais
H - Hipótese
HIPOT - Alto Potencial
IDEF0 - Modelagem de Função para Definição de Integração
IEEE - Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
IEC - Comissão Eletrotécnica Internacional
IECEE - Sistema Mundial de Testes de Conformidade e Certificação de Componentes e Equipamentos Elétricos

IP - Índice de Polarização
INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia
Inc. - Incorporação
Inst. - Instituição
IMQ - Instituto Italiano para Qualidade de Marca
ISO - Organização Internacional de Padronização
It - Itália
JISC - Comitê Japonês de Padronização Industrial
JIS - Padrão Industrial Japonês
Jp - Japão
LCIE - Laboratório Central de Industrias Elétricas
MIG - Gás Inerte de Metal
MTC3 - Série Schleich de Testes Elétricos de Estatores e Motores
NEMA MG - Norma para Motores e Geradores da Associação Nacional de Fabricantes Elétricos
NBR - Norma Brasileira
NI - National Instruments
Modbus - Protocolo de Comunicação de Dados criado pela Modcom
OLE - Vinculação e Incorporação de Objetos
OPC - OLE para Controle de Processos
OPM - Metodologia de Processos Objeto
PC - Computador Pessoal
PCI - Interconexão de Componentes Periféricos
PCI EXPRESS - Barramento Serial de Interconexão de Componentes Periféricos
PDP - Processo de Desenvolvimento de Produtos
P&D - Pesquisa e Desenvolvimento
PXI - Extensão da PCI para Instrumentação
PTC - Percentual da Tolerância Consumida
RS485 - Padrão Recomendado 485
RS422 - Padrão Recomendado 422
RS232 - Padrão Recomendado 232
Su - Suíça
THG 3S - 3 Ponteiras de Teste Hall
TUVB - Organizações de Inspeções Técnicas do Brasil
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
UL - Laboratórios Subscritores
UML - Linguagem de Modelagem Unificada
USA - Estados Unidos da América
USB - Barramento Universal Serial
USD - Dólar Americano

VDE - Associação de Informações para Tecnologias Elétricas e Eletrônicas

VI - Instrumento Virtual

VISA - Arquitetura de software de Instrumentação Virtual

VME - Módulo Versa Europa

VXI - Instrumentação para Instrumentação VME

XFMEA - Software de Análise e Avaliação de Modos de Falhas

WSSN - Rede Mundial de Serviços de Padronização

LISTA DE SÍMBOLOS

AC - Corrente Alternada
DC - Corrente Direta ou Contínua
I - Corrente
I/O - Entradas ou Saídas
C - Celsius
CA - Corrente Alternada
CC - Corrente Contínua
hz - Hertz
LCR - Indutor Capacitor Resistor
miliA - Mili Amper
mega Ω - Mega Ohms
Vca - Tensão de Corrente Alternada
Vac - Tensão de Corrente Alternada
Vcc - Tensão de Corrente Contínua
Vdc - Tensão de Corrente Alternada
V - Voltagem ou Tensão
Vn - Tensão Nominal
R - Resistência
RI - Resistência de Isolação
 Ω - Ohms

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	33
1.1 OBJETIVOS.....	35
1.1.1 Objetivo geral	35
1.1.2 Objetivos específicos	35
1.2 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA.....	36
1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	39
1.4 VISÃO GERAL DA METODOLOGIA DA PESQUISA.....	40
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	42
2 REFERENCIAL TEÓRICO	45
2.1 ESTADORES PARA MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO.....	45
2.1.1 O desenvolvimento do estator e suas normas	48
2.1.2 O processo produtivo em massa do estator indutivo para motores de baixa tensão de compressores herméticos	49
2.1.3 Falhas de isolamento geradas no processo de fabricação do estator	55
2.1.4 Métodos de detecção de falhas de isolamento elétrica do estator	58
2.1.5 Soluções de mercado para testes da isolamento de estadores	61
2.1.5.1 Painel integrado de testes elétricos de segurança de estadores indutivos.....	62
2.1.5.1.1 <i>Painel Schleich de testes elétricos de segurança de estadores indutivos</i>	65
2.1.5.2 Módulos de testes elétricos de prateleira.....	68
2.2 ARQUITETURA DE PRODUTO.....	71
2.2.1 O que é arquitetura do produto	72
2.2.1.1 Arranjo dos elementos funcionais do produto.....	72
2.2.1.2 Mapa dos elementos funcionais para os componentes físicos do produto.....	74
2.2.1.3 Interfaces dos componentes físicos do produto.....	75
2.2.2 Tipos de arquitetura de produtos	75
2.2.3 Produtos modulares e suas variações	76
2.2.4 Tipos de arquitetura modular	77
2.2.5 Modularidade e suas perspectivas	78
2.2.6 Modularidade, suas aplicações e operadores	79
2.2.7 Modelos de produto	82
2.2.7.1 Modelagem funcional de produtos.....	83
2.2.8 Métodos de modularização de produtos	85
2.2.9 Procedimentos para desenvolvimento de produtos modulares de Pahl e Beitz	86
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO REFERENCIAL TEÓRICO.....	89

3 PROJETO CONCEITUAL E DETALHADO	
DO EQUIPAMENTO PROTÓTIPO	93
3.1 O C2C E OS PROCEDIMENTOS DE DESENVOLVIMENTO.....	93
3.2 REQUISITOS DO PAINEL MODULAR DE TESTES ELÉTRICOS DE ESTADORES	96
3.3 DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA FUNCIONAL DO EQUIPAMENTO	97
3.4 BUSCA POR PRINCÍPIOS DE SOLUÇÕES.....	97
3.4.1 O software integrador	99
3.4.2 As regras de interface.....	101
3.5 SELEÇÃO DOS MÓDULOS DE TESTES E MÓDULOS DE INTERFACE.....	103
3.5.1 Regras para seleção dos módulos visíveis e ocultos do projeto	104
3.5.2 Resultado da seleção dos módulos visíveis.....	107
3.5.3 Resultado da seleção dos módulos ocultos	110
3.5.4 Desempenho técnico dos módulos visíveis e ocultos.....	113
3.6 DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA.....	116
3.6.1 Modelo físico do painel modular de testes elétricos de segurança.....	117
3.6.2 Grupos distintos de conexões caracterizam o tipo de arquitetura modular do painel de testes elétricos de estadores	118
3.7 PROJETO PRELIMINAR.....	121
4 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	125
4.1 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE A PARTIR DA ESTRUTURA FUNCIONAL.....	126
4.2 A MONTAGEM DOS COMPONENTES ELÉTRICOS DO EQUIPAMENTO	128
4.2.1 Módulo de alta tensão.....	129
4.2.2 Módulo de controle.....	130
4.3 A MONTAGEM DOS COMPONENTES MECÂNICOS DO EQUIPAMENTO	132
4.4 MONTAGEM DOS MÓDULOS VISÍVEIS E OCULTOS	133
5 AVALIAÇÃO DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO	137
5.1 CERTIFICAÇÃO TESTE DO PRODUTO.....	137
5.1.1 Experimento para avaliar a tensão aplicada dos testes de Alta Tensão AC, Resistência de Isolação e Surto.....	138
5.1.1.1 Avaliação do método de teste de Resistência de Isolação	140
5.1.1.2 Avaliação do método de teste de Alta Tensão AC.....	143
5.1.1.3 Avaliação do método de teste de Surto.....	145
5.1.2 Experimento e avaliação do método de teste de Resistência Ôhmica	148

5.2 DESEMPENHO TÉCNICO DA SOLUÇÃO TECNOLÓGICA CONSTRUÍDA.	153
5.3 AVALIAÇÃO FINANCEIRA DA SOLUÇÃO TECNOLÓGICA GERADA	158
5.4 A MODULARIDADE DO EQUIPAMENTO FABRICADO.....	160
5.5 CONCLUSÃO DA ETAPA DE TESTES	161
6 CONCLUSÕES	165
6.1 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....	165
6.2 CONCLUSÕES GERAIS.....	167
REFERÊNCIAS	169
APÊNDICE A - Tabela de cálculo dos erros do método de teste de R_1.....	175
APÊNDICE B - Tabela de cálculo dos erros do método de teste de Alta Tensão AC.....	176
ANEXO A - Trabalhos publicados para definição de arquitetura (A) e a construção modular (M) (JOSE e TOLLENAERE, 2005).....	177
ANEXO B - Demais requisitos do produto	178
ANEXO C - Tela principal do software.....	179
ANEXO D - Sub menus testar, retestes, zerar contadores e testes contínuos do software.....	179
ANEXO E - Sub menu das opções de banco de dados do software.....	180
ANEXO F - Telas que compõem a opção de selecionar ou criar modelo do sub menu banco de dados do software.....	180
ANEXO G - Telas que compõem os resultados de testes do sub menu de banco de dados no software.....	182
ANEXO H - Telas que compõem os resultados de testes do sub menu de programar modelo no software.....	182
ANEXO I - Tela de cadastro e alteração do método de teste de Resistência do software	183
ANEXO J - Tela de cadastro e alteração do método de teste de Alta Tensão AC ou IR que compõe os testes de hipot do software	183
ANEXO K - Tela de cadastro e alteração do método de teste de Surto do software.....	184
ANEXO L - Telas de cadastro do método de teste de	

Rotação do software.....	184
ANEXO M - Características metrológicas da placa de medição de alta tensão 701260 do DL 750 da Yokogawa	185

1 INTRODUÇÃO

A concorrência acirrada em fornecer produtos e serviços a preços competitivos com qualidade é um dos principais efeitos do processo de globalização que nos dias de hoje determina a direção das empresas que desejam sobreviver e crescer em meio a um tumultuado ambiente de mudanças.

Na indústria de motores elétricos os esforços não são diferentes e o forte crescimento dos custos da matéria prima nos últimos anos, tais como o aço e cobre, aliado a regulamentações de governos que normalizam buscando por eficiência energética exigiram uma série de revisões e mudanças de produtos e processos que antes não haviam sido experimentados. A demanda por novos projetos de motores que consumam menos matéria prima e alcancem índices de eficiência elevados exige produtos rapidamente desenvolvidos e processos produtivos que acompanhem o ritmo da mudança do mercado e da evolução tecnológica.

Garantir a confiabilidade e a robustez na fabricação dos motores elétricos é tão desafiante quanto a obtenção dos benefícios que a ele são atribuídos. As estatísticas têm mostrado que, apesar da confiabilidade e da simplicidade de construção de um motor elétrico, a taxa de falhas anuais dos motores é estimada em 3% a 5% ao ano (VENKATARAMAN, 2005). Apesar dos últimos avanços dos materiais isolantes para estatores elétricos, não existem dados que comprovem uma redução significativa desses índices nos dias de hoje e segundo Nogay (2010), pesquisas com análises investigatórias das falhas de motores elétricos demonstraram que defeitos no isolamento do estator contribuem com aproximadamente 35 a 40% do total das falhas desses equipamentos.

Além da crescente necessidade de projetar visando o menor consumo e a mais alta eficiência, os materiais isolantes também evoluíram nos últimos anos e conseqüentemente os testes que caracterizam as suas falhas. Uma vez que os sistemas de isolamento têm mudado com o passar das décadas, os métodos de testes e meios de interpretar os resultados também têm mudado (STONE, 2005). Ter autonomia e flexibilidade para eliminar, substituir ou até mesmo adicionar novos métodos de testes elétricos de isolamento no processo produtivo de estatores é fundamental para acompanhar a rapidez com que o setor evolui para se adequar às exigências do mercado.

Após a fabricação de um estator bobinado, normas como NEMA MG1 e IEC 60034 demandam a

aplicação de um grupo de métodos de testes de isolamento elétrica para assegurar que este irá funcionar perfeitamente por cerca de 20 a 40 anos (STONE, 2005).

Neste contexto, o papel do principal agente da qualidade na manufatura de estatores, o Pannel de Testes Elétricos de Isolação que se destina a aplicar os métodos de testes que certificam o processo produtivo de um estator, tem direta ligação com os resultados financeiros e econômicos que o fabricante de motores elétricos deseja atingir.

A utilização de Painéis de testes elétricos de isolamento em linhas produtivas de estatores é uma alternativa eficaz na detecção dos possíveis desvios de qualidade e para Grubic (2008, p. 1) “métodos de avaliação no processo produtivo são normalmente mais diretos e acurados”. Na prática, o conceito de unir vários métodos de testes em um único equipamento trouxe inúmeras vantagens ao processo de avaliação de estatores, sendo a mais forte delas o baixo tempo de ciclo total de teste. Porém, com o predomínio mercadológico de fabricantes de painéis de testes que desenvolveram a sua própria tecnologia de hardware e software, o elo do fabricante de estatores com o fabricante de painéis de testes elétricos de segurança de estatores se fortaleceu a ponto de gerar uma frágil e crítica dependência tecnológica entre produto e seu meio de avaliação.

O emprego de painéis integrados de testes elétricos de segurança em linhas produtivas de estatores tem demonstrado a fragilidade deste relacionamento e os recentes índices de perdas produtivas por paradas de manutenção sinalizam a necessidade de estar flexível a mudança, de acompanhar a evolução positiva que os testes elétricos aplicados no campo de trabalho dos estatores sofreram ao longo dos anos. Tal evolução gerou um mercado que disponibiliza uma variedade de módulos de prateleira para a avaliação da isolamento do sistema de isolamento de um estator no seu campo de atuação. Para cada método de teste empregado em um painel de teste elétrico de um estator há uma variedade enorme de marcas e modelos de módulos de testes que competem em preço, interfaces, facilidade de aplicação, compatibilidade com softwares gerenciadores, acesso remoto, etc.

Assegurar o funcionamento eficiente e robusto de motores elétricos, que têm como principal componente o estator indutivo, sustentando-se em equipamentos de testes elétricos de isolamento que não são passíveis de mudança é o mesmo que ficar de braços cruzados frente à concorrência, às aberturas dos mercados, ao uso de condutores

elétricos mais baratos, a crescente tendência por diminuição do consumo de matéria prima e aumento de eficiência energética e, além disso, ao evolutivo mercado mundial de equipamentos de testes elétricos de segurança, conhecidos como testes de prateleira.

Permitir mudanças nos painéis de testes elétricos de estatores indutivos significa fugir da acelerada obsolescência a qual os equipamentos eletrônicos estão suscetíveis, anteceder-se à degradação natural do equipamento no seu processo produtivo, evitar a incorreta aplicação dos métodos de testes ou ensaios e, o mais importante, garantir a segurança do usuário final do motor elétrico.

A falta de uma solução tecnológica que preencha a lacuna entre essas duas linhas de equipamentos motivou o desenvolvimento desta pesquisa. A partir dessa contextualização faz-se necessário a pesquisa em modularidade de produtos visando à aquisição e à transformação do conhecimento em uma solução tecnológica que elimine o problema apontado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é: desenvolver uma solução tecnológica modular de painel de testes elétricos de segurança de estatores indutivos.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, relacionam-se:

a) identificar na literatura quais métodos de testes elétricos são necessários para qualificar o sistema de isolamento de um estator indutivo e quais soluções modulares existem;

b) identificar e selecionar a abordagem de modularidade adequada ao problema em questão;

c) avaliar a solução obtida.

Após o detalhamento dos objetivos da pesquisa, apresentam-se na seção 1.2 os dados que determinam a originalidade deste trabalho.

1.2 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa visa duas principais contribuições: a tecnológica, que se propõe a preencher um déficit do mercado de painéis de testes elétricos de estatores e motores elétricos, e a acadêmica, que é fortalecer o conhecimento em Testes Elétricos de Isolamento de estatores e suas aplicações em processos produtivos em massa.

Apesar da importância do tema para o setor produtivo de estatores de motores indutivos e para a área de Engenharia de Produção, em pesquisa realizada no banco de dissertações e teses da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, 2011), não foram identificados, até abril de 2011, trabalhos de mestrado ou doutorado que possuíam a expressão “Testes Estatores Elétricos” e/ou “*Electric Stators Tests*” e/ou “Testes de Motores Elétricos” e/ou “*Electric Motors Tests*” relacionados com “Arquitetura de Produtos” e/ou “*Product Architecture*”.

Em pesquisa realizada no banco de dissertações e teses da Biblioteca Universitária da UFSC (BUUFSC, 2011) foi necessário desvincular a expressão “Arquitetura do Produto” de “Testes de Estatores e/ou Motores Elétricos” para que resultados fossem encontrados. Apenas uma dissertação na área de Engenharia Elétrica, dentre as quinze dissertações de mestrado e uma tese de doutorado que relacionam o tema em questão, cita o assunto descrevendo superficialmente a arquitetura do painel de testes elétricos de estatores no processo produtivo de estatores para motores indutivos trifásicos de baixa tensão em importante empresa do setor situada na cidade de Jaraguá do Sul, Santa Catarina, Brasil (em negrito no quadro 1). Em tal pesquisa de dissertação, Martinez (2008) descreve o processo de manufatura de estatores dessa importante empresa do ramo e salienta a utilização de um painel de testes elétricos de segurança de estatores fabricado por um dos principais fornecedores mundiais deste tipo de equipamento, localizado na Europa. O autor detalha que tal equipamento possui “módulos” que estão conectados a um computador responsável pela análise e arquivamento dos dados. Fica evidente nessa dissertação, pela falta de detalhamento da arquitetura de produto desse equipamento, que o termo “módulos” foi utilizado de maneira a evidenciar os diversos métodos de teste que compõem a estrutura funcional do equipamento.

Nº	Título da Dissertação /(Tese)	Ano	Autor
1	Estimação do desempenho e parâmetros do motor de indução trifásico durante a partida	2001	SANTOS, Paulo Sérgio dos
2	Motores síncronos de relutância com barreiras de fluxo e partida assíncrona	2003	MARTINS, Carlos Eduardo Guarenti
3	Automação do ensaio de saturação em transformadores de corrente utilizados em sistemas de transmissão de energia elétrica	2004	BANDEIRA, Maria Isabel da Costa
4	Dispositivo de proteção contra sobrecargas para motores trifásicos operando em regime contínuo	2005	STUART JR, Reinaldo
5	Generalização de caminhos paralelos de corrente para conformação de FMM de máquinas elétricas (Tese)	2005	CONTIN, Mario Célio
6	Redução de ruídos de contadores eletromagnéticos	2005	SALMÓRIA, Ridi Luiz
7	Projeto de experimento no planejamento e ensaio de motores elétricos para condicionadores de ar	2006	HOENISCH, Paulo Rossano
8	Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento eletrônico e de um ambiente de aferição para motores mono cilíndricos de pequeno porte	2007	PADILHA, Rafael Sangoi
9	Ensaio de elevação de temperatura em máquinas de indução utilizando o método da dupla frequência	2008	CISZ, Glauco Andre Wolff
10	Ensaio de elevação de temperatura pelo método "Forward Short Circuit" em motores de indução	2008	BAUER, Clóvis
11	Estimando confiabilidade de um motor de indução monofásico a partir dos ensaios de vida acelerados de seus componentes	2008	BENTES, Luiz Otávio Moraes Rego
12	Estudo de motores acionados por conversores de frequência e influências no sistema isolante	2008	KARAVASILIS, Renato Gualda
13	Estudo de métodos de detecção de curto-circuito entre espiras em estatores de motores de indução trifásicos de baixa tensão	2008	MARTINEZ, André Marcel Pereira
14	Otimização de uma analisador de gás dissolvido em óleo de múltiplos transformadores de potência	2008	BENEDET, Mauro Eduardo
15	Projeto e análises de motores síncronos de ímãs permanentes internos com otimização de torque	2008	SIGUIMOTO, Celia Miwa
16	Estudo e otimização de um atuador linear com ímã permanente e alta frequência de ressonância aplicado a sistemas de refrigeração	2009	POMPEMAIER, Cristóforo

Quadro 1 - Banco de Teses da BU da UFSC para “Testes de Estatores e/ou Motores elétricos”

Fonte: BUUFSC (2011).

Frente à baixa quantidade de dissertações e teses apontadas anteriormente e à escassez de detalhes que apenas uma dessas dissertações apresentou sobre o tema deste trabalho, fez-se importante a pesquisa em periódicos internacionais em “*Electric Motors Testing*” e

“*Electric Stators Testing*” com abordagem em “*Product Architecture*”. Porém, com a dificuldade em correlacionar os assuntos em um único trabalho, demonstrada na identificação de teses e dissertações no banco de dados da CAPES, e com o foco da pesquisa estar direcionada a testes elétricos de estatores, decidiu-se por pesquisar periódicos não somente ligados aos temas “*Electric Motors Testing*” e “*Electric Stators Testing*”, mas também adicionar à pesquisa cruzada outros termos técnicos relacionados à área de Engenharia Elétrica e mais conhecidos no processo produtivo de Estatores e Motores Elétricos, tais como “*Motors Fault Detection*”, “*Stator Winding Testing*”, “*Motors Insulation testing*”, “*Stator Insulation Testing*” e “*Winding Insulation Testing*”.

De acordo com a busca efetuada no Portal de Periódicos da CAPES, demonstrado na figura 1, não existem periódicos, até abril de 2011, que relacionem em conjunto os termos técnicos citados no parágrafo anterior e cruzados na pesquisa com “*Product Architecture*” (CAPES, 2011).

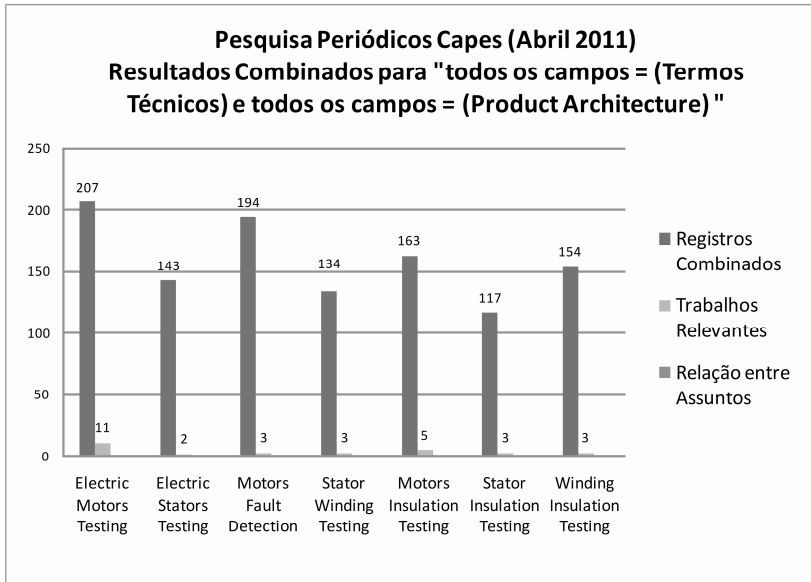


Figura 1 - Periódicos Capes sobre “Termos Técnicos” ^ “*Product Architecture*”
 Fonte: Periódicos CAPES (2011).

Para salientar a originalidade do trabalho proposto, também foi pesquisado no Portal de Periódicos da CAPES o cruzamento do assunto

“Modularity” com os mesmos Termos Técnicos utilizados na pesquisa cruzada feita com o tema “Product Architecture” (CAPES, 2011). De acordo com a busca efetuada no Portal de Periódicos da CAPES, até abril de 2011, demonstrado na figura 2, não há pesquisa que relacione em conjunto os mesmos termos técnicos citados na pesquisa cruzada com o termo “Product Architecture” com o termo “Modularity” (CAPES, 2011).

Pela contribuição da pesquisa contextualizada e justificada anteriormente, identificou-se a oportunidade de desenvolvimento do presente trabalho e seus limites estão descritos na seção 1.3.

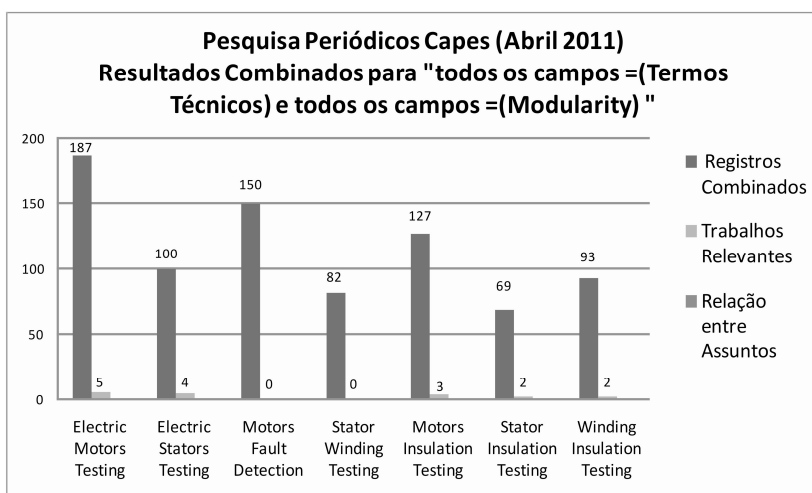


Figura 2 - Periódicos CAPES sobre “Termo Técnico” ^ “Modularity”
 Fonte: Periódicos CAPES (2011).

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Esta pesquisa foi desenvolvida sob o olhar acadêmico aos métodos de testes elétricos de isolamento agrupados em um único produto, o painel de testes elétricos, principal agente da qualidade do processo de manufatura de estatores elétricos para motores elétricos de baixa tensão, utilizados em larga escala em equipamentos domésticos e industriais. Como campo de experiências e base para os testes, a linha de estatores para motores de compressores herméticos de refrigeração fabricados por uma empresa do ramo metal mecânico situada ao Norte do Estado de Santa Catarina foi a principal geradora de informações e gatilho para

esta pesquisa. Tal empresa fabrica cerca de 30 milhões de unidades anuais de compressores e o motor elétrico alternado ou indutivo de baixa tensão representa cerca de 90% do total dos motores por ela manufaturados. A Figura 3 ilustra as limitações da aplicação desta pesquisa.

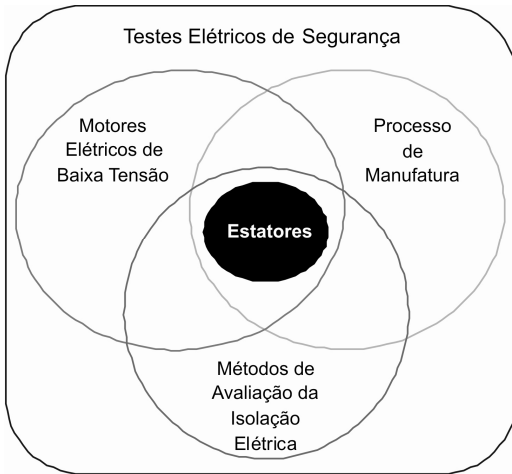


Figura 3 - Delimitações da Pesquisa

Fonte: Autor (2011).

1.4 VISÃO GERAL DA METODOLOGIA DA PESQUISA

As primeiras ideias sobre o tema de pesquisa e o que realmente poderia servir de contribuição acadêmica na área de engenharia de produção vieram de uma inquietação que surgiu no processo produtivo de estatores para motores de baixa tensão fabricados em uma empresa do setor metal mecânico do norte catarinense. A utilização de um único fornecedor de painéis integrados de testes elétricos de estatores em todas as linhas produtivas situadas no Brasil sinalizava uma dependência exagerada em termos de manutenção, aferições periódicas e principalmente direcionava a novas aquisições. Foi necessária uma varredura na literatura para identificar o que de fato se necessita em termos de testes elétricos de segurança de estatores de baixa tensão e tal consulta demonstrou que existe a necessidade de aplicar uma série de métodos de testes elétricos em um estator para garantir que este seja assegurado contra falhas de isolação geradas no processo produtivo. Não

foram identificados na literatura de que forma tais métodos de teste podem ser aplicados no processo produtivo e uma segunda varredura do mercado de fornecimento de testes elétricos de isolamento foi necessária. O problema desta pesquisa surgiu após o refinamento dessas duas varreduras e os procedimentos técnicos da pesquisa buscam coletar, tratar e analisar os dados conforme demonstra a figura 4.

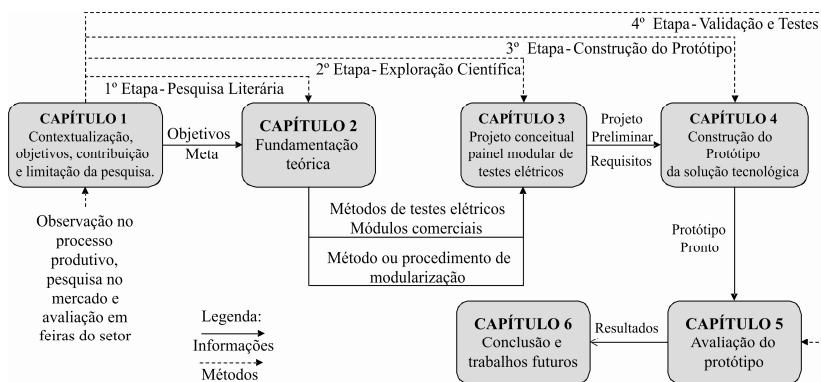


Figura 4 - Procedimentos técnicos da pesquisa

Fonte: Autor (2011).

A figura 4 mostra as quatro etapas que determinam os procedimentos técnicos ou metodológicos da pesquisa. Na primeira etapa, a pesquisa literária se divide em duas partes. A primeira delas descreve o processo de manufatura de um estator elétrico indutivo e as normativas do setor, apresenta os métodos de testes elétricos de isolamento responsáveis por identificar as principais falhas do processo produtivo de um estator e o que o mercado de testes elétricos de isolamento disponibiliza como solução de detecção de tais falhas. Na última parte da pesquisa bibliográfica a pesquisa literária em arquitetura modular é apresentada buscando identificar quais os conceitos acadêmicos de modularidade de produto que, se aplicados, podem levar à arquitetura modular a ser utilizada.

Na segunda etapa, os resultados gerados na pesquisa literária, que identificaram os métodos de testes elétricos de isolamento necessários para a avaliação de estatores indutivos de baixa tensão e o método de obtenção da arquitetura modular, são agrupados com as soluções modulares de testes elétricos selecionadas e obtidas através de pesquisa de mercado. Tal união determina os requisitos a serem utilizados no

projeto conceitual e detalhado do equipamento protótipo e na obtenção da arquitetura modular da solução proposta.

É na terceira etapa da pesquisa que a solução modular proposta vira realidade e o descritivo da construção do equipamento mostra as etapas de fabricação do protótipo.

Na quarta e última etapa da pesquisa são apresentados o planejamento dos experimentos, os testes efetuados e os resultados obtidos que foram utilizados para avaliar a solução tecnológica desenvolvida.

Depois de apresentada a visão macro da metodologia de pesquisa, descreve-se na seção 1.5 a estrutura da dissertação.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Seguindo o que foi proposto na metodologia de pesquisa escolhida, esta dissertação se organiza em seis capítulos: Introdução, Referencial Teórico, Projeto Conceitual e Detalhado do Painel Modular de Testes Elétricos, Construção do Protótipo, Certificação Teste do Protótipo e Conclusões.

Como primeiro capítulo, descreveu-se na introdução a contextualização que caracteriza a problemática e a contribuição da pesquisa, seguida dos objetivos geral e específicos, da justificativa, da delimitação do trabalho e, por fim, da metodologia da pesquisa.

O segundo capítulo traz o referencial teórico, apresenta os conceitos necessários para o entendimento do principal assunto desta pesquisa, a manufatura de um estator indutivo para motores de baixa tensão, as principais falhas geradas em seu processo produtivo, os métodos de testes elétricos de segurança de estatores indutivos que por norma garantem a vida útil do estator e o que o mercado de testes elétricos disponibiliza como solução. Por último, os conceitos de arquitetura de produtos e a pesquisa literária em alternativas de modularização e de desenvolvimento de produtos modulares são apresentados de forma a identificar o que a literatura traz como possibilidades para viabilizar a solução a ser proposta, gerando requisitos para o projeto conceitual e detalhado do produto que serão apresentados no capítulo 3.

No terceiro capítulo descreve-se o projeto conceitual e detalhado de acordo com a abordagem de obtenção da arquitetura modular definida no capítulo 2.

O quarto capítulo evidencia a fabricação do protótipo de um painel de testes elétricos de segurança de estatores indutivos de acordo com a arquitetura modular definida.

No quinto capítulo, através de testes experimentais, a flexibilidade a mudanças do equipamento desenvolvido é posta a prova e, utilizando um ferramental estatístico, a eficiência e a robustez do equipamento são avaliadas.

O sexto e último capítulo apresenta a conclusão da pesquisa e as propostas para estudos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Na primeira seção deste capítulo, serão apresentados os conceitos voltados a estatores para motores elétricos: seu desenvolvimento, seu processo produtivo, suas principais falhas, métodos de detecção de falhas inerentes ao processo produtivo de estatores e o que a prática descreve como soluções de mercado existentes para tais alternativas. A seção 2.2 apresenta os conceitos de arquitetura de produto e a revisão literária em modularidade. Juntos, tais assuntos irão auxiliar na obtenção da arquitetura modular proposta como solução ao problema desta pesquisa.

2.1 ESTADORES PARA MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO

Para Anderson e Muller (1895, p. 3, tradução nossa) “os motores elétricos são responsáveis por fornecerem força para todos os tipos de aplicações, sejam elas domésticas ou industriais”. Sua versatilidade, confiança e economia não podem ser igualladas a nenhuma outra força motora. Nas últimas décadas inúmeras variações de motores elétricos surgiram quanto à sua fabricação e campo de atuação, porém nada mudou quanto ao seu conceito de aplicabilidade que ainda persiste nos dias atuais. A figura 5 mostra os diversos tipos de motores elétricos existentes.

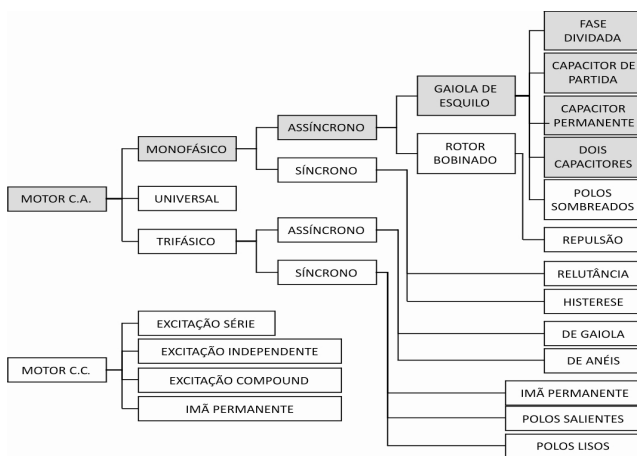


Figura 5 - Classificação dos motores elétricos

Fonte: Pacheco (2007).

Motores elétricos podem ser classificados por tamanho e torque que geram, entretanto, é mais comum classificá-los segundo sua forma de alimentação, por Corrente Direta ou Alternada, respectivamente Motores CC ou CA (DEAL, 2004). Dentre as possíveis variações de motores elétricos, o motor de indução ou motor assíncrono CA é o principal e mais fabricado motor desde os primórdios do uso da corrente elétrica alternada. Parekh (2003, p. 3) comenta que os motores de indução são classificados pelo número de bobinas dos estatores. Estes podem ser classificados como monofásicos ou trifásicos. O motivo de sua preferência é a sua robustez, facilidade de fabricação, adaptação aos ambientes mais agressivos e obviamente a utilização em larga escala da tensão alternada (V_{ca}) como forma de alimentação energética a residências e indústrias.

O motor elétrico de indução ou CA é composto de vários componentes, sendo que os principais são o estator (a) e o rotor (b). A figura 6 mostra tais partes. Seu funcionamento pode ser explicado através da interação de dois campos magnéticos. O campo magnético girante do estator, resultante da alimentação com tensão alternada é responsável por formar um campo contrário no rotor e o conjugado, ou a força resultante da interação desses campos, auxiliado por dispositivos de partida como o capacitor e bobinamento auxiliar, faz mover o rotor.

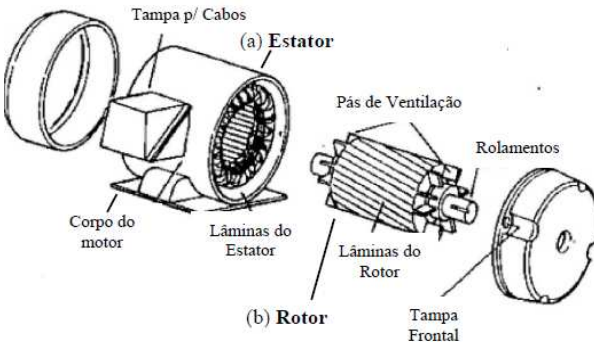


Figura 6 - Componentes elétricos básicos de um motor de indução: (a) estator e (b) rotor

Fonte: Adaptação do Autor (2011)¹.

¹ Pesquisa em “*electrical Motors*” na página do Google. Disponível em: http://www.energyefficiencyasia.org/energyequipment/ee_es_electricalmotors.html. Acesso em: 20 de outubro de 2011

O estator elétrico não é componente exclusivo de um motor de indução ou CA, ou seja, qualquer que seja o motor elétrico, este irá possuir uma parte estática, o estator, e uma parte móvel, o rotor.

O Estator Elétrico é composto de uma quantidade significativa de lâminas finas de aço ou alumínio, que são soldadas ou grampeadas de maneira a formar o núcleo do estator com pequenas aberturas chamadas de ranhuras, de bobinas de fios isolados inseridos nestas ranhuras, onde cada grupo de bobinas com seu respectivo núcleo forma um eletroímã quando aplicado V_{ca} . O Rotor é feito de uma quantidade grande de lâminas finas conectadas por barras espaçadas, que são feitas de alumínio ou cobre, ao longo da periferia. No mais popular tipo de rotor (gaiola de esquilo), estas barreiras são conectadas mecanicamente e eletricamente nas extremidades através de anéis (PAREKH, 2003, tradução nossa),

A figura 7 apresenta o estator e para melhor entender a sua funcionalidade é necessário conhecer o desenvolvimento de um estator, que atende padrões normativos nacionais e internacionais de isolamento, e principalmente o processo produtivo que é responsável por garantir o atendimento de tais normas.

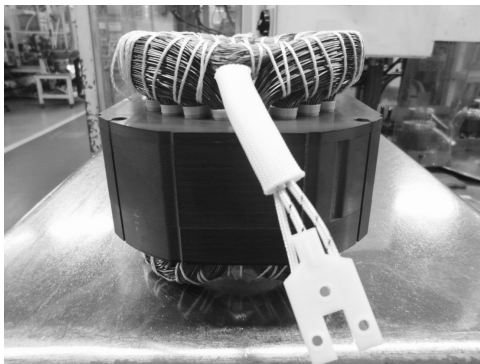


Figura 7 - Estator elétrico

Fonte: Autor - Processo produtivo de um estator para motor elétrico indutivo de empresa do ramo metal mecânico do norte do Estado de Santa Catarina (2012).

Cerca de 90% dos motores de indução e todos os motores monofásicos de indução utilizam rotores de gaiola de esquilo (PAREKH, 2003). Devido às características do funcionamento do motor

de indução com gaiola de esquilo demandar curto-circuito entre as barras que conectam as Lâminas do rotor, testes elétricos de isolamento em rotores não fazem sentido e no geral aplicam-se testes dimensionais, estruturais e de perdas elétricas para certificar as características construtivas, robustez e a eficiência desse componente do motor elétrico indutivo. Fisicamente, no motor elétrico indutivo, existe um espaçamento por ar que junto com o isolamento do estator garantem o atendimento das normas de distância de isolamento entre o estator e o rotor, ponto que eletricamente conduz ao corpo do motor elétrico. Nos próximos itens deste capítulo o rotor do motor elétrico indutivo só será mencionado se tiver relevância e interatividade com o sistema de isolamento do estator, foco desta pesquisa.

2.1.1 O desenvolvimento do estator e suas normas

Desenvolver motores para quaisquer que sejam as aplicações requer o conhecimento específico das normas e dos institutos de aprovação do mercado para o qual o produto final desse desenvolvimento é destinado. O projeto de cada motor elétrico, além de atender aos requisitos de eficiência energética e aos propósitos de sua aplicação, deve acima de tudo passar por um criterioso julgamento de segurança elétrica que assegure a sua utilização pelo usuário final, seja ele o profissional especializado da indústria ou o consumidor residencial. A importância da aprovação do projeto em institutos normativos é algo que não se questiona, ou seja, é pré-requisito do projeto de um motor elétrico.

Padrões costumam definir as características dos produtos e serviços. Eles são desenvolvidos em um processo aberto, refletindo os pontos de vista das partes interessadas, incluindo muitos especialistas técnicos, representantes do governo e dos consumidores (ISO, 2011, tradução nossa).

Empresas líderes em fornecimento de novas tecnologias têm outras visões a respeito dos institutos e para Takahashi (IEC, 2011), vice-presidente executivo da Hitachi Ltda, não é somente necessário ativar empresas globais a utilizar padrões internacionais, mas ativá-las a participar do processo de padronização que criará novas oportunidades e empreendimentos.

Para Floyd et al. (2003, p. 128) “existe uma enorme quantidade de padrões e regulamentações disponíveis relacionadas a segurança

elétrica nos Estados Unidos”. Nos demais países essa situação não muda e no que se diz respeito a estatores elétricos para aplicação em motores indutivos de compressores para sistemas de refrigeração, o conjunto de normas que determinam as distâncias elétricas, os materiais destinados ao isolamento do estator elétrico e os testes destinados a sua avaliação tem como objetivo:

- proteção do usuário em caso de curtos circuitos e;
- proteção contra fogo em caso de superaquecimento.

O quadro 2 mostra a distribuição mundial dos principais mercados consumidores de motores elétricos para a aplicação em compressores herméticos de sistemas de refrigeração, seus órgãos certificadores e respectivos certificados e suas normas de segurança elétrica.

Padrão Mundial	Comissão Internacional	PADRÃO	Mercado	Órgão Certificador	Certificado	SELO	Norma
UL	UL	UL 984 - Baseada na IEC 60335	USA	UL	UL		UL984 baseada na IEC 60335-2-34
			Canadá	CSA	UL / CSA		
WSSN - Rede de Serviços de Padrões Mundiais	IEC - Comissão Eletrotécnica Internacional Através da IECCEE - Sistema Mundial de Testes de Conformidade e Certificados de Componentes e Equipamentos Eletrotécnicos	IEC 60335	Austrália	VDE	DFT		IEC 60335-2-34
			China	CCNA / CQC	CCC		IEC 60335-2-34
			Japão	JISC	JIS		JIS C (ISO/IEC)
			Brasil	INMETRO	TUVB		NBR - 60335-2-34
			Itália	IMQ / VDE	CE / VDE		IEC 60335-2-34
			França	LCIE	CE / VDE		IEC 60335-2-34
			Alemanhã	VDE	CE / VDE		IEC 60335-2-34

Quadro 2 - Mercados, institutos normativos e normas para aprovação de estatores e motores elétricos para compressores herméticos de refrigeração
Fonte: Autor (2012).

Considerando que o motor elétrico deve atender a normas do mercado consumidor a que se destina, a fabricação do seu principal componente é a base para o atendimento do requisito principal para a sua utilização, ou seja, o isolamento elétrico.

2.1.2 O processo produtivo em massa do estator indutivo para motores de baixa tensão de compressores herméticos

Para Safonov (2007, p. 167, tradução nossa) “problemas que ocorrem no processo produtivo da fabricação do isolamento de um

estator geram danificações mecânicas de alta importância”. Considerando os aspectos construtivos de isolamento do estator, o processo produtivo em massa de estatores, analisado em empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina, segue os mais criteriosos níveis de exigência de maneira a garantir que a elevada capacidade do meio produtivo não afete a qualidade do produto fabricado. A figura 8 representa as etapas do processo de fabricação de um estator elétrico para motor monofásico indutivo e, com exceção do processo de identificação do estator, que na maioria das vezes é feito por impressão a jato de tinta, todas as etapas podem influenciar positiva ou negativamente no sistema de isolamento do estator.

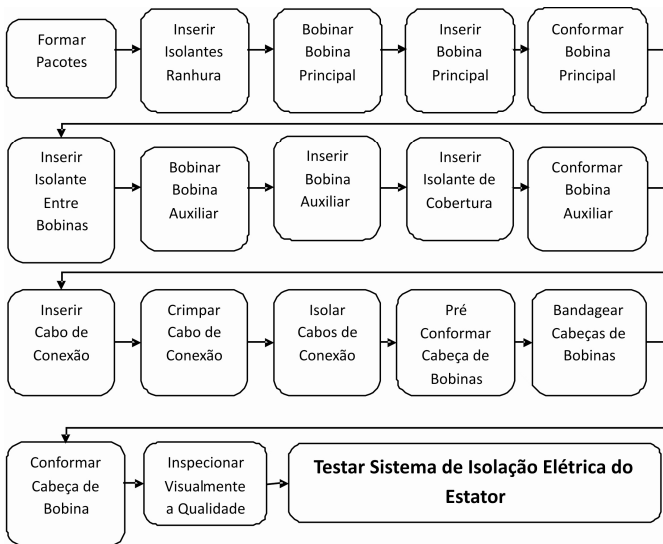


Figura 8 - Etapas do processo produtivo de um estator para motor monofásico indutivo

Fonte: Autor (2012).

O primeiro processo de fabricação de um estator para motor monofásico indutivo requer a formação de pacotes de lâminas de aço elétrico e atualmente existem inúmeras alternativas para que o agrupamento de lâminas tenha robustez necessária para que se insiram mecanicamente os isolantes de ranhura, etapa subsequente. A empresa campo para esta pesquisa utiliza três métodos para formação de pacotes: união por solda MIG, o próprio isolante de ranhura ou o “*Interlock*”, nome utilizado no ramo para definir sistema automático de travamento

do pacote. A seleção por um ou por outro método depende do impacto do processo no custo de transformação do estator e no tempo para implantação do processo.



Figura 9 - Formação de pacotes de estatores

Fonte: Autor - Processo produtivo de um estator para motor elétrico indutivo de empresa do ramo metal mecânico do norte do Estado de Santa Catarina (2012).

A segunda etapa do processo de fabricação de estatores é a inserção dos isolantes de ranhura, que na grande maioria dos motores são feitos de poliéster, que, além de características de isolamento dielétrico, possuem resistência mecânica para resistir às forças de inserção das bobinas de cobre. Depositá-los perfeitamente na ranhura de um estator requer medição da altura do pacote, corte do isolante, dobra no formato da ranhura e, por fim, sua inserção. Tal processo é feito automaticamente por equipamento denominado isoladora de ranhuras.

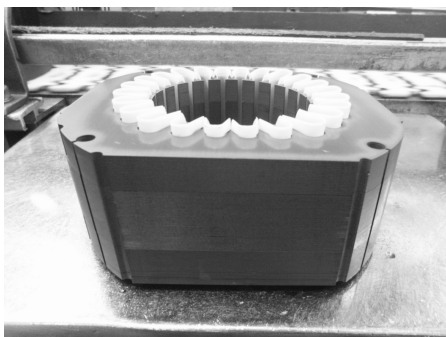


Figura 10 - Estator elétrico após inserção dos isolantes de ranhuras

Fonte: Autor - Processo produtivo de um estator para motor elétrico indutivo de empresa do ramo metal mecânico do norte do Estado de Santa Catarina (2012).

O bobinamento da bobina auxiliar, etapa seguinte do processo, deve atender exclusivamente às características construtivas de produto, como a resistência elétrica da bobina auxiliar. Formar o conjunto de bobinas que irá compor o pacote da bobina auxiliar requer previamente bobinar em um formador de bobinas, ou como é conhecido no ramo de bobinamento, “chaplona”, retirar do formador e posteriormente inserir no pacote de estatores, etapa subsequente ao bobinamento. Ambos os processos, bobinagem e inserção são essenciais no resultado final de isolamento do estator, visto que, manipular o fio através do bobinamento ou de sua inserção no pacote requer movimentos mecânicos que podem danificá-los se não forem corretamente especificados e controlados.



Figura 11 - Estator após bobinar e inserir a bobina principal

Fonte: Autor - Processo produtivo de um estator para motor elétrico indutivo de empresa do ramo metal mecânico do norte do Estado de Santa Catarina (2012).

Depois de inserida a bobina principal no conjunto de ranhuras projetado para recebê-la, é necessário abrir espaço na cabeça de bobina do estator para que seja também depositada a bobina auxiliar do estator monofásico. Tal processo requer a inserção de um alargador na cabeça de bobina, denominado “foguetete”, pela similaridade de seu formato com o dos foguetes espaciais. Novamente, mais esforço mecânico que o uso de uma prensa neste processo gera sobre os fios da bobina principal do estator e o descontrole dessa operação pode gerar inúmeros modos de falha.

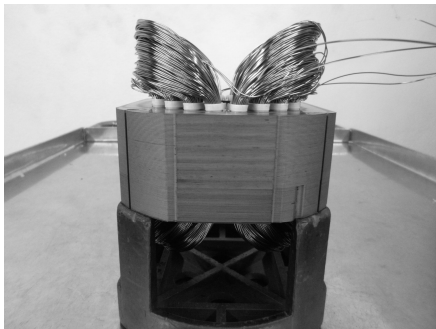


Figura 12 - Abertura ou conformação da cabeça de bobinas (principal somente)
Fonte: Autor - Processo produtivo de um estator para motor elétrico indutivo de empresa do ramo metal mecânico do norte do Estado de Santa Catarina (2012).

Antes de repetir os processos de bobinar, inserir e conformar e alojar adequadamente o segundo conjunto de bobinas denominado bobina auxiliar do estator monofásico indutivo e seus respectivos isolantes de cobertura, a empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina de estatores, detentora do processo aqui descrito, emprega a utilização de um isolante de poliéster entre bobinas (fases) principal e auxiliar do estator monofásico. Sua inserção é feita de duas formas, manual ou automática e depende da forma de aplicação, seja pelas mãos de operadores ou por equipamentos dedicados. A ocorrência de falha nesse processo afeta diretamente o isolamento do estator.



Figura 13 - Estator antes da conformação da cabeça de bobinas
Fonte: Autor - Processo produtivo de um estator para motor elétrico indutivo de empresa do ramo metal mecânico do norte do Estado de Santa Catarina (2012).

Inseridos os elementos que serão responsáveis por fornecer o campo girante ao estator, ou seja, o pacote de lâminas, seus isolantes e bobinas (principal e auxiliar), é necessário conectar o conjunto de cabeamento que fará o elo de ligação entre a alimentação dos terminais do motor e as bobinas do estator. Para isso, os próximos passos do processo de fabricação de um estator, denominados como inserção do cabo de conexão e isolamento da união cabo versus bobinas, são essenciais e podem ser feitos de inúmeras formas. A crimpagem e a solda dos cabos de conexão são os meios mais utilizados no processo de união entre o cabo de conexão do estator e suas bobinas devido ao baixo custo e à alta robustez da junção desejada. No processo de isolamento desta união, a utilização de isolantes retráteis de poliéster é o mais empregado devido aos mesmos motivos do processo anterior: robustez e baixo custo.



Figura 14 - Cabo de conexão de um estator e seu isolamento

Fonte: Autor - Processo produtivo de um estator para motor elétrico indutivo de empresa do ramo metal mecânico do norte do Estado de Santa Catarina (2012).

A próxima etapa da fabricação do estator monofásico requer novamente o emprego de um “fogueto” para conformar a cabeça de bobina do estator, agora com as fases principal e auxiliar posicionadas e conectada, antes do processo de travamento dos fios que se denomina bandageamento. Por último, a etapa que finaliza a sequência de movimentos mecânicos, sejam eles manuais ou automáticos é a formação final da cabeça de bobina, que coloca os fios que a compõem na altura correta que se deseja ao pacote do estator. Uma inspeção visual do estator ainda se faz necessária antes do teste elétrico de segurança que sela a qualidade do produto gerado.

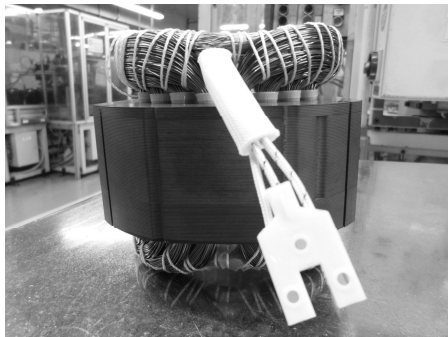


Figura 15 - Estator Acabado

Fonte: Autor - Processo produtivo de um estator para motor elétrico indutivo de empresa do ramo metal mecânico do norte do Estado de Santa Catarina (2012).

Conforme previamente mencionado, os inúmeros movimentos mecânicos que são necessários para isolar, bobinar, inserir, formar, bandagear e conectar os componentes de um estator que determinam as suas características construtivas são as principais causas para a geração de falhas no seu isolamento. O que ainda potencializa tais falhas é o forte ritmo produtivo das linhas de produção em massa, necessário para reduzir os custos de fabricação e suprir a alta demanda de estatores para motores elétricos.

Antes de elencar os métodos de testes elétricos que filtram as possíveis falhas do processo produtivo de um estator elétrico que danificam ou degradam a sua isolamento, é necessário descrever que falhas são essas. O item 2.1.3 desta pesquisa irá explorar esse assunto.

2.1.3 Falhas de isolamento geradas no processo de fabricação do estator

Segundo Zhang et al. (2009) falhas internas do estator representam uma das quatro mais prevalentes falhas do motor no campo de atuação. Para Grubic et al. (2008), o sistema de isolamento do estator bobinado representa uma das principais fontes de falhas de um motor elétrico.

Duas são as possibilidades de geração de falhas no sistema de isolamento de um estator. A primeira delas é oriunda do próprio processo produtivo do estator e a literatura classifica como falha *offline*, ou seja, falhas que levam a total perda ou a deterioração do sistema de

isolamento de um estator antes deste entrar em funcionamento no motor a que se destina. A segunda é gerada no campo de aplicação do estator e é denominada como falha *online*, no qual são classificadas quatro possíveis fontes de desgaste: mecânico, elétrico, térmico ou ambiental (Grubic et al., 2008). Falhas *offline* de um estator são detectadas através de testes no estator quando este não está em funcionamento, ou seja, no processo produtivo e no motor elétrico que não está em utilização, e falhas *online* através do monitoramento do seu uso no motor elétrico e da aplicação a que se destina.

Marcon e Junior (2008) relacionam uma série de defeitos que devem ser identificados no processo produtivo de um estator: choque (mau isolamento entre bobina e lâmina do pacote do estator); variação na resistência ôhmica; solda ruim nas conexões das bobinas do estator; ligações elétricas erradas ou invertidas; sentido incorreto de rotação; curto circuito entre espiras das bobinas do estator; fio fora de ranhura do estator; curto circuito entre fases do estator; isolamento danificado; isolante dobrado; protetor térmico danificado e fuga do protetor térmico para o enrolamento.

Grubic et al. (2008) classifica o conjunto de isolamento de estatores em dois sistemas: o primário define o isolamento fase para massa ou fase para fase de um estator e o secundário como o Isolamento espira para espira das bobinas de um estator.

Considerando que os meios produtivos em massa de um estator devem ser capazes de detectar e segregar os estatores cujos sistemas de isolamento estejam incorretos ou danificados, a figura 16 exemplifica os tipos de isolação de um estator que compõem cada sistema denominado por Grubic et al. (2008).

Na empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina, base e referencial prático para este trabalho, a classificação dos possíveis defeitos ou falhas do processo produtivo é feita através de métodos investigativos que auxiliam os especialistas de processos a prever os índices de ocorrências, as formas de detecção, a severidade, a identificação das causas e, principalmente as ações que irão eliminá-los ou reduzi-los .

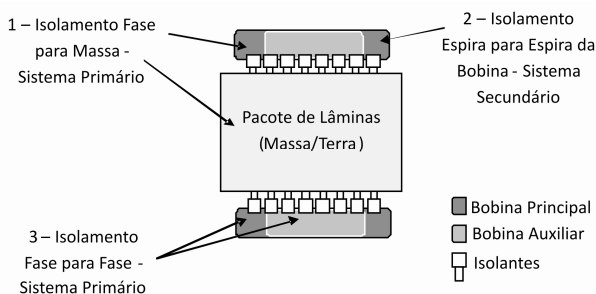


Figura 16 - Sistemas de isolamento de Grubic et al. (2008)
Fonte: Autor (2011).

O quadro 3, que é parte da análise do modo de falha de um processo produtivo de um estator indutivo, classifica algumas das possíveis falhas no seu isolamento que podem estar ligadas as etapas de sua fabricação em massa.

Função	Falha	Efeito Final	Si	Classificação	Causa	Oi	Controle	Tipo de Controle	Di	RPNi
Inserir Cabo de Conexão	Fio Quebrado	Não Parte	7		Retorno Elástico do Fio Al menor que Fio Cu	3	Teste de Resistência		2	42
	Danificação na Crimpagem e Capa de Isolamento	Curto Circuito	10		Ferramental Danificado da Máquina de Crimpagem	2	Teste de Surto		4	80
	Crimpagem Incorreta	Não Parte	7		Erro Operacional (Finalização incorreta dos fios)	2	Teste de Rotação e Resistência		1	14
	Perda do Isolante de Conexão	Curto Circuito	10		Erro Operacional	2	Certificação de Trabalho e Procedimento Operacional Padrão		2	40
	Posicionamento Incorreto do Isolante de Conexão	Curto Circuito	10			2			2	40
	Fio Danificado	Curto Circuito entre Espiras	8		Ferramenta Danificada, operador danifica o fio quando os posiciona	2	Teste de Alta Tensão		4	64
	Fio Quebrado	Não Parte	7		Força excessiva durante operação de posicionamento dos fios e cabos	2	Teste de Resistência		2	28

Quadro 3 - Parte da análise dos modos de falhas do processo produtivo do estator em empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina

Fonte: Autor - XFMEA do processo produtivo de estatores em empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina (2012).

As causas para as quatro possíveis fontes de desgastes de um sistema de isolamento de estator no seu campo de atuação, ou seja, *online*, não são relevantes ao processo produtivo e eventualmente só serão citados neste trabalho para explicar os métodos de detecção de falhas de isolação.

Considerando a diferenciação dos tipos de isolamento de um estator e também os tipos de falhas geradas no seu processo produtivo, os possíveis métodos de detecção de falhas e as categorias de testes existentes na literatura serão expostos no item 2.1.4 desta pesquisa.

2.1.4 Métodos de detecção de falhas de isolação elétrica do estator

Dois métodos de detecção de falhas de isolação são possíveis de aplicar em estatores elétricos e estes estão diretamente ligadas à maneira com que são empregados, ou seja, testes no estator que não está em funcionamento e monitoramento do seu uso no motor elétrico a que se destina. Zhang et al. (2009) descreve que é crucial empregar detecções confiáveis de falhas e monitorar as condições de isolação do estator. A detecção de falhas no processo produtivo em massa de um estator segue as mesmas condições dos métodos *offline* de testes e o quadro 4 representa o que na teoria se emprega para qualificar os três tipos de isolação dos dois sistemas descritos por Grubic et al. (2008).

A pesquisa de Grubic et al. (2008) relaciona os diferentes tipos de teste dos sistemas de isolamento de um estator e muitos deles se sobrepõem em funções, permitindo dessa forma que a indústria de fabricação em massa de estatores indutivos possa se valer da avaliação das vantagens e desvantagens na aplicação de cada teste e selecionar o que de fato pode se adequar ao processo que possui. O objetivo dessa escolha não seria outro senão o emprego da melhor relação custo benefício do teste aplicado no âmbito de atender aos requisitos mínimos de isolação exigidos pelos diferentes institutos normativos de cada setor de utilização do estator (ex.: eletrodomésticos) e o que foi relacionado na análise dos possíveis modos de falha inerentes à fabricação em massa de um estator. Em empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina, esta relação segue os mesmos propósitos e o quadro 5 justifica o uso e o não uso dos diversos testes elétricos indicados na pesquisa de Grubic et al. (2008) no processo produtivo em massa de estatores indutivos, ou seja, o que na prática ela aplica para qualificar a isolação de um estator após fabricado.

	Referências	Isolação Testada	Valor do Diagnóstico	Vantagens e Desvantagens
Resistência de Bobinamento Teste de Condutividade CC	Stone et al. (1985), Schump (1990), Baker Users Manual (2005).	fase-para-fase	detecta espiras curto circuitadas	(+) fácil de aplicar, (-) somente detecta falha, (-) valor não preventivo.
Resistência de Isolação (RI)/ Megohm	Stone et al. (1985), Baker Users Manual (2005), Lanham - Baker Inst. Co.	fase-para-terra	encontra contaminações e defeitos em geral	(+) fácil de aplicar, (-) resultado é altamente dependente da temperatura.
Índice de Polarização (IP)	Stone et al. (1985), Baker Users Manual (2005), Lanham - Baker Inst. Co.	fase-para-terra	encontra contaminações e defeitos em geral	(+) fácil de aplicar, (-) resultado menos evidente da temperatura que RI Teste.
Teste de Alto Potencial CC (DC HighPot)	Stone et al. (1985), Baker Users Manual (2005), Lanham - Baker Inst. Co.	fase-para-terra	encontra contaminações e defeitos em maioria	(+) fácil de aplicar, (+) se o teste não falhar, a isolação pode trabalhar sem defeito até a próximo período de manutenção - mais caracter preditivo do que RI e IP, (-) em caso de falha requer reparo (destrutivo).
Teste de Alto Potencial CA (AC HighPot)	Stone et al. (1985), Stone et al. (2005), Lanham - Baker Inst. Co.	fase-para-terra	encontra contaminações e defeitos em geral	(+) mais efetivo do que DC HighPot, (-) não tão fácil de aplicar como DC HighPot.
Teste de Surto	Stone et al. (1985), Schump (1990), Geiman - Baker Inst. Co., Baker Users Manual (2005), Wiedenbrug et al (2003), Melfi et al. (1998).	espiras-para-espiras	detecta deterioração na isolação da espira	(+) único teste que mede a integridade da isolação da espira.
Descargas Parciais <i>Offline</i>	Stone et al. (1985), Kim et al. (2002).	fase-para-terra espiras-para-espiras	detecta deterioração no sistema de isolação	(+) bons resultados práticos, (-) não aplicável a estatores de baixa tensão, (-) dificuldade de interpretar dados.
Fator de Dissipação	Stone et al. (1985), Ma et al. (2003).	fase-para-terra fase-para-fase	detecta deterioração na isolação da fase e parede de terra	(-) medições regulares tem que ser feitas de maneira a direcionar os dados no tempo, (+) capaz de determinar a causa da deterioração.
Impedancia Indutiva	Stone et al. (1985),	espiras-para-espiras	detecta espiras em curto	(-) não tão fácil de aplicar como o teste de Resistência de Bobinamento, (-) valor não determinável, (-) influencia externa indesejável nos resultados.

Quadro 4 - Diferentes formas de testar o sistema de isolação do estator de motores elétricos

Fonte: Traduzido e adaptado de Grubic et al. (2008).

Como resultado da análise de falhas de um processo produtivo de estator, o teste de rotação de um estator indutivo foi adicionado aos testes de segurança elétrica de estatores descritos no quadro 5. A sequência de testes aplicados pela empresa do ramo metal mecânico do norte do Estado de Santa Catarina caracteriza a avaliação completa de um estator indutivo no seu processo produtivo. Sendo eles:

- resistência ôhmica de bobinamento;

	Institutos Normativos e/ou Requisitos de Fabricação	Isolação Testada	Valor do Diagnóstico	Justificativa para Aplicação no Processo Produtivo em Massa	Exigência por Normas para estatores de Baixa Tensão
Resistência de Isolação (RI)/ Megohm	UL 984 / IEC 60335-1 / ABNT 60335-2-34	fase-para-terra	encontra contaminações e defeitos em maioria	Método Aplicado por: (+) facilidade de aplicar, (+) produção em Ambiente Com Controle de temperatura e humidade, (+) detecta contaminações nos terminais de contato do estator/motor.	$\geq 10M\Omega$ 1 segundo de Teste 500 Vdc
Índice de Polarização (IP)	-	fase-para-terra	encontra contaminações e defeitos em maioria	Método NÃO Aplicado por: (-) tempo ciclo Alto de Teste (>1 minuto), (-) substituído por RI.	-
Teste de Alto Potencial CC (DC HighPot)	-	fase-para-terra	encontra contaminações e defeitos em maioria	Método NÃO Aplicado por: (-) em caso de falha requer reparo (destrutivo).	-
Teste de Alto Potencial CA (AC HighPot)	UL 984 / IEC 60335-1 / ABNT 60335-2-34	fase-para-terra	encontra contaminações e defeitos em maioria	Método Aplicado por: (+) mais efetivo do que DC HighPot, (+) permite tempo de teste de 1 s conforme normativa UL.	$V_{ac} = ((V_n \text{ Motor} \cdot 2) + 1000V)^{1,2}$ 1 segundo de Teste
Teste de Surto	Exigência Interna (FMEA Processos)	espiras-para-espiras	detecta deterioração na isolação da espira	Método Aplicado por: (+) único teste que mede a integridade da isolação da espira.	$V_{c} = 2300 V$ 1 segundo de Teste
Descargas Parciais <i>Offline</i>	-	fase-para-terra espiras-para-espiras	detecta deterioração no sistema de isolação	Método NÃO Aplicado por: (-) não aplicável a estatores de baixa tensão, (-) dificuldade de interpretar dados.	-
Fator de Dissipação	-	fase-para-terra fase-para-fase	detecta deterioração na isolação da fase e parede de terra	Método NÃO Aplicado por: (-) processo de fabricação permite somente 1 medição por estator e tipo de teste exige frequentes medições.	-
Impedância Indutiva	-	espiras-para-espiras	detecta espiras em curto	Método NÃO Aplicado por: (-) não tão fácil de aplicar como o teste de Resistência de Bobinamento, (-) valor não determinável, (-) influencia externa indesejável nos resultados.	-
Sentido de Rotação	Exigência Interna (FMEA Processos)	Conexões fase-neutro	detecta ligações incorretas	Método Aplicado por: (+) único teste que mede o sentido do campo gerado pelo estator.	-

Quadro 5 - Métodos *offline* de testes de isolação da pesquisa de Grubic et al. (2008) e justificativas de aplicação nos processos de fabricação em massa em empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina
Fonte: Traduzido e adaptado de Grubic et al. (2008).

- resistência de isolação;
- alta Tensão CA;
- teste de surto e;
- sentido de rotação do campo indutivo gerado pelo estator.

O teste de resistência ôhmica é o primeiro método de teste aplicado no estator e esse tem a finalidade de verificar a continuidade de suas bobinas, principal e auxiliar, a eficiência de suas conexões e a variabilidade do processo de bobinamento. Na empresa do ramo metal mecânico no norte do estado de Santa Catarina, uma variação de +/- 5%

da resistência das bobinas principal e auxiliar é aceitável para o processo produtivo.

Segundo Stone (2005, p. 92), o teste de resistência de isolamento segue a determinação da IEEE 43, norma IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional), e esse teste é eficiente na detecção de contaminação e poluição nos enrolamentos das bobinas do estator.

O Teste de alta tensão CA em estatores é normalizado pela IEEE 56 e é capaz de detectar danificações na isolamento após o bobinamento. As normas IEC 60034 e NEMA MG1 determinam que toda nova bobina seja submetida a testes de alta tensão para serem aceitas pelo consumidor (STONE, 2005, p. 94).

O teste de surto é o único capaz de detectar falhas no isolamento dentro da própria bobina, ou seja, de espira para espira e a IEEE 522-2004 descreve tal teste como a aplicação de um surto de alta tensão entre as espiras do estator (STONE, 2005, p. 97).

O teste de rotação tem o objetivo de determinar o sentido do campo magnético gerado pela alimentação das bobinas principal e auxiliar e qualquer desvio nessa parte do produto através da variação no sentido, seja ele horário ou anti-horário, deste campo.

Conhecendo o que a literatura relaciona de testes elétricos de isolamento de um estator indutivo e o que a indústria aplica para qualificar os milhares de estatores que disponibiliza ao mercado consumidor, é necessário entender o que a indústria de fabricação de testes elétricos disponibiliza como soluções de mercado para tais testes. O item 2.1.5 pesquisa descreve tais possibilidades.

2.1.5 Soluções de mercado para testes da isolamento de estatores

Nos itens 2.1.3 e 2.1.4 descreveram-se o que a literatura classifica como sistema de isolamento de um estator e o que a indústria utiliza como métodos de testes de isolamento no processo produtivo de um estator. As soluções que o mercado disponibiliza para atender tais ramificações seguem a mesma diferenciação e duas linhas distintas de equipamentos para teste e monitoramento da isolamento elétrica de estatores indutivos que se desenvolveram ao longo do tempo. A primeira delas diz respeito aos “painéis integrados de testes elétricos” e aos “módulos de testes elétricos de segurança”. Ambos atendem aos

requisitos de testes exigidos por institutos normativos, porém diferem quanto a características de utilização. A segunda linha de equipamentos, que diz respeito à aplicação dos métodos de monitoramento da isolação do estator em operação, não será citada nesta pesquisa.

Os itens 2.1.5.1 e 2.1.5.2 desse capítulo exploram as diferenças básicas, as vantagens e a desvantagens das duas alternativas de testes elétricos de isolação de um estator indutivo quando este não está em funcionamento no motor.

2.1.5.1 Painel integrado de testes elétricos de segurança de estatores indutivos

Como o próprio nome sugere, o Painel Integrado de Testes Elétricos se caracteriza por integrar em um só equipamento os diversos métodos de testes elétricos de isolação que qualificam no processo produtivo um estator elétrico, ou seja, a união de todos os cinco testes descritos anteriormente.

Com a proposta de robustez para a utilização em linhas de fabricação em massa, o Painel Integrado de Testes Elétricos de Segurança de Estatores Indutivos surgiu como resposta à elevada demanda pela fabricação e aplicação de motores elétricos no mundo. Segundo Almeida et al. (2008, p. 1) “motores elétricos em aplicações industriais consomem cerca de 30 a 40% da energia elétrica mundial”. Não existem mudanças significativas nesse quadro de consumo elétrico nos dias atuais e o uso do motor elétrico em aplicações domésticas, que representa uma segunda fatia do montante de consumo de energia elétrica no mundo, cresce significativamente. Atender às elevadas capacidades produtivas e obviamente o baixo tempo ciclo das linhas de fabricação em massa de estatores para esse mercado consumidor em expansão tornou-se o requisito técnico global dos Painéis de Testes Elétricos de Isolação de Estatores.

Fato interessante nesse setor do mercado é que os fabricantes de Painéis de Testes Elétricos de Estatores optaram por desenvolver sua própria plataforma de produto, cada qual com sua forma de conectar sua placa gerenciadora de testes e versão do software de gerenciamento do equipamento. A figura 17 representa geograficamente treze dos principais fornecedores mundiais de Painéis Integrais de Testes Elétricos de Segurança de Estatores. Tais fornecedores foram selecionados de

uma lista de setenta e oito fornecedores de equipamentos para testes elétricos.

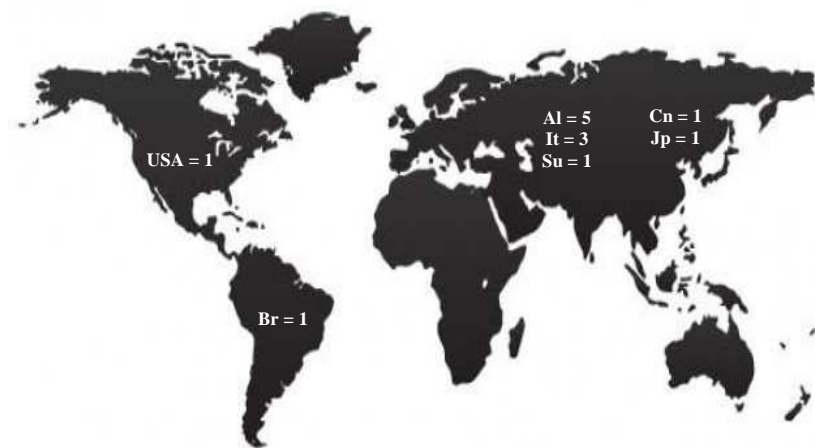


Figura 17 - Posição geográfica dos principais fornecedores de painéis integrados de testes elétricos de segurança de estatores
Fonte: Autor (2012).

Dos setenta e oito fornecedores de equipamentos para testes elétricos, dezesseis fornecedores são expositores da maior feira e conferência de manufatura elétrica, isolamento e bobinamento de estatores, a *Coil Winding Insulations & electrical Manufacturing Exhibition - CWIEME*, cinquenta e quatro são fabricantes de equipamentos de testes elétricos cadastrados no Sistema Mundial de Testes de Conformidade e Certificação de Componentes e Equipamentos Elétricos (IECEE) e oito deles são fornecedores cadastrados no sistema “E-Sourcing” de fornecedores da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina, que serve de ambiente de estudo para este trabalho. O quadro 6 exibe por país de origem e nome do fornecedor o que a figura 17 exibiu por quantidade e localização no globo terrestre.

Os problemas na utilização dos painéis integrados de testes elétricos de segurança de estatores são comuns a todas as marcas. Com o passar dos anos, o desgaste dos equipamentos aumenta em função da exigência imposta pelo ritmo acelerado de produção e inúmeras

situações indesejadas ao setor de fabricação em massa de estatores indutivos surgem. São elas:

- incompatibilidade de versões do mesmo fabricante que utilizam placas eletrônicas específicas para cada modelo e série de fabricação do painel de teste;

País	Empresa
Alemanha	RM Prueftechnik GMBH
Alemanha	Schleich GMBH
Alemanha	Sourcetriconic GMBH
Alemanha	SPS Electronic GMBH
Alemanha	Vogelsang & Benning GMBH
Itália	EDC Electrical Dynamic CO SRL
Itália	Risatti Instruments SRL
Itália	Cronomaster
Suíça	Friborg Test Technology AB
USA	SKF USA (Baker)
Brasil	LHF
China	Chroma Ate Inc.
Japão	Kokusai

Quadro 6 - Nome e País sede dos principais fornecedores de painéis integrais de testes elétricos de segurança de estatores

Fonte: Autor (2012)².

- falhas na placa responsável pela medição inviabilizam a execução de todos os testes, levando a parada total de todos os testes realizados do processo produtivo;

- o convívio com a falta de peças de reposição é constante e os fabricantes descontinuam a fabricação das versões com 5 ou mais anos de utilização;

- a necessidade de manter um estoque elevado de componentes eletrônicos diante da possibilidade do não fornecimento do fabricante e até mesmo a aquisição de equipamentos reserva para uso apenas como peça de reposição aos demais instalados no processo fabril;

- a empresa fabricante de estator precisa manter e investir em profissionais altamente qualificados para efetuar a manutenção elétrica

² Resultado da pesquisa em <http:// www.iecee.org/ctl/equipment-suppliers.html, www.coilwindingexpo.com/BERLIN/exhibitorslist.html e www4.whirlpool.com.br/whirlpool/content/logon.jsp> Acesso em: 19 de junho de 2012

ou eletrônica dos equipamentos. Do contrário, deve conviver com uma dependência tecnológica com o fabricante dos equipamentos;

- o envio de dados de testes baseados em transmissão analógica demanda uma constante intervenção para cheque de desvios de medição, ou seja, não existe um controle eficiente que garanta uma fidelidade dos valores de testes aplicados se comparados aos pré-ajustados no equipamento. Para alguns testes de isolamento, tal distorção só é percebida pelo monitoramento periódico da equipe de manutenção preventiva da empresa e pelo setor de calibração de instrumentos.

As principais desvantagens no uso dos painéis integrados de testes elétricos de segurança de estatores relacionadas anteriormente representam uma síntese do histórico de quatorze anos de uso de equipamentos de dois dos principais fornecedores descritos no quadro 6 em todas as linhas de produção em massa de estatores da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina. Tais desvantagens atualmente demandam um enorme esforço do time de manutenção elétrica e eletrônica dos setores produtivos em massa de estatores e os índices de parada destes equipamentos cresceu significativamente nos últimos quatro anos.

Para melhor entender o funcionamento do painel integral de testes elétricos de segurança de estatores, o item 2.1.5.1.1 desta pesquisa irá detalhar as características de hardware e software do campeão de vendas do setor, principal fornecedor desse equipamento para a empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina e provavelmente o modelo mais conhecido do ramo.

2.1.5.1.1 Painel Schleich de testes elétricos de segurança de estatores indutivos

O fornecedor “Schleich” é líder no seguimento de equipamentos de testes elétricos de segurança para Estatores e Motores elétricos e atua a mais de 50 anos no ramo. Está situado na Alemanha, fornece equipamentos para os seguimentos de testes elétricos de estatores e tem como característica principal, conforme descrito no item 2.1.5.1 desta pesquisa, desenvolver suas próprias plataformas de testes.

Para Martinez (2008, p. 39) “o equipamento de testes da Schleich MTC3 DSP1000 possui módulos que estão conectados a um computador responsável pela análise dos dados”. Tal descrição “módulos que estão conectados a um computador”, feita pelo autor, não

necessariamente descreve a arquitetura de produto adotada pelo fabricante. Para Marció (2011) a Schleich desenvolve todo o hardware e software do painel, incluindo a interface de interação com o operador do equipamento.

Na série MTC3 de Painéis de Testes Elétricos de Segurança de Estatores do fornecedor Schleich, a placa de medição GLP3 se destaca dentre as demais. Ela é responsável por realizar as medições de tensão e corrente dos testes de resistência ôhmica, resistência de isolamento, alta tensão e surto. Tal função de integração faz com que esse componente seja responsável pela transformação dos dados dos quatro testes que avaliam a isolamento do estator no painel do fornecedor Schleich, ou seja, se por qualquer motivo a placa GLP3 não funcionar, nenhum dos tipos de teste de isolamento de um estator pode ser efetuado. Três são as versões que o fabricante desenvolveu para a placa GLP3 ao longo de sua existência e elas não são intercambiáveis entre si, ou seja, um painel que possui a placa GLP3a não pode utilizar a GLP3-2000 ou a série 5302 com CAM, última versão do fabricante. A figura 18 exemplifica uma das versões existentes da placa GLP3 do painel MTC3 da Schleich. A figura 19 representa o painel MTC3 da Schleich e a Figura 20 a interligação das três diferentes versões da placa GLP3 com os principais componentes do painel de testes elétricos de segurança de estatores do mesmo fornecedor.

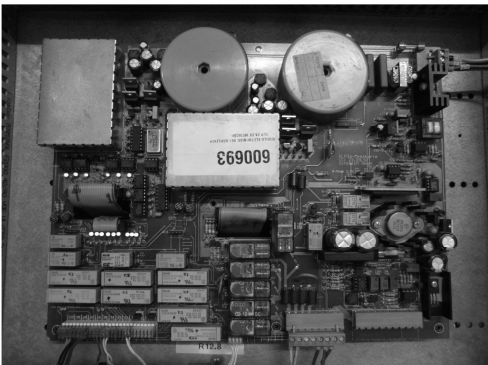


Figura 18 - Placa GLP3 versão 3a
Fonte: Autor (2012).

Conhecendo o que caracteriza o painel de testes elétricos de isolamento de estator para defini-lo como Integral, no item 2.1.5.2 desta pesquisa descrevesse os equipamentos de mercado que em módulos servem para monitorar e testar a isolamento de um estator.



Figura 19 - Testador de estator MTC3
Fonte: Schleich (2011)³.

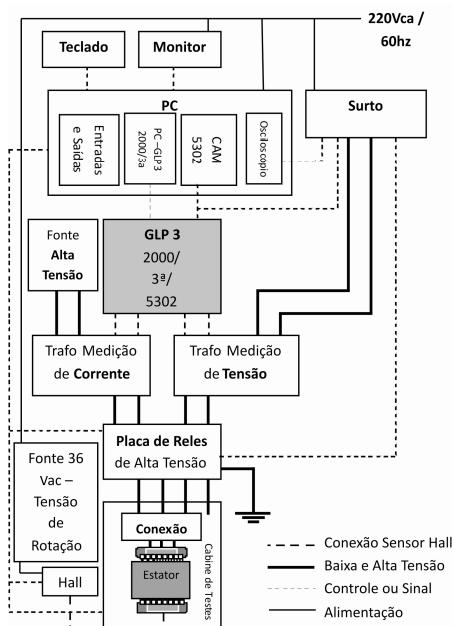


Figura 20 - Placa GLP3, suas versões e conexões com os demais componentes do painel MTC3 da Schleich
Fonte: Autor (2012).

³ A Schleich disponibiliza em sua página na web fotos dos equipamentos que fornece. Disponível em: <<http://www.schleich.com/em/produtoDetail.php?ProduktID=17>>. Acesso em: 20 de Outubro de 2011.

2.1.5.2 Módulos de testes elétricos de prateleira

Para Grubic et al. (2008) vários métodos de testes têm sido desenvolvidos para avaliar o sistema de isolamento de um estator no seu campo de atuação. Diversos são os fabricantes que seguem no desenvolvimento de equipamentos de prateleira que têm o propósito de testar o sistema de isolamento de um estator e atender aos requisitos de mobilidade para o uso no campo de atuação do estator, ou seja, instalado no motor para o qual foi projetado. Por se tratarem de equipamentos que são constantemente expostos a diferentes possibilidades de danos físicos, os testes modulares foram desenvolvidos para serem robustos, compactos e resistentes a ações do tempo e do homem.

Dos treze fornecedores de Painéis Integrais de Testes Elétricos de Isolação de Estatores, descritos no quadro 6 desta pesquisa, dez deles são também fornecedores de módulos que aplicam os mais variados métodos de teste do sistema de isolação do estator. Além desses, com a evolução da tecnologia digital de transmissão de dados, é possível identificar uma série de fornecedores com soluções modulares de prateleira para todos os métodos de teste que compõem o painel integral de testes elétricos de isolação de estatores. O quadro 7 mostra os principais módulos existentes de prateleira para os métodos de testes elétricos *offline* do sistema de isolamento de um estator. A figura 21 representa as marcas de cento e treze fabricantes de módulos de prateleira para teste do sistema de isolamento de estatores e motores existentes no mercado. Os módulos de teste de isolação de estatores foram projetados para aplicações nos quais a mobilidade no uso é o seu diferencial. Como os métodos de teste que empregam são abertamente difundidos no meio, a concorrência acirrada dos fabricantes trouxe inúmeros benefícios aos usuários destes equipamentos. Em sua grande maioria, possuem avançadas interfaces de armazenamento e transmissão de dados, o que facilita o seu uso no campo e o tratamento dos dados posteriormente. Com o avanço da tecnologia digital na geração, tratamento e processamento de dados, a rapidez na aplicação, controle e finalização dos testes não representam desvantagem na escolha por esses equipamentos.

No geral, a indústria fabricante de módulos de teste de estatores tem crescido exponencialmente e basta uma breve pesquisa na Internet para facilmente identificar inúmeros fornecedores para o mesmo método de teste elétrico de segurança de isolação de estatores e motores. O que especificamente representa uma desvantagem destes equipamentos é que a maioria deles não emprega com baixa incerteza de

precisão mais de um método, ou seja, um módulo que testa Alta Tensão (CA e ou CC) e possua um teste adicional de Resistência Ôhmica, não necessariamente aplica com precisão o teste adicional. Pode até mesmo aplicar, mas não com a profundidade de um módulo específico para medição de Resistência Ôhmica.

Método <i>Offline</i> de Teste	Isolação Testada	Versão Modular no Mercado
Resistência de Bobinamento Teste de Condutividade CC	Espira para espira	Ôhmímetro e Multímetro Digital
Resistência de Isolação (RI)/ Megohm	Fase para terra	Hipot and Megôhmetro
Índice de Polarização (IP)	Fase para terra	Megôhmetro e Teste de Isolação Multi Camadas
Teste de Alta Tensão CC (HighPot CC)	Fase para terra	Hipot Teste
Teste de Alta Tensão CA (HighPot CA)	Fase para terra	Hipot Teste e Teste de Rigidez Dielétrica
Teste de Surto	Espira para espira	Teste de Surto
Descargas Parciais <i>Offline</i>	Fase para terra Espira para espira	Teste de Surto com Descargas Parciais
Impedância Indutiva	Espira para espira	Medidor LCR e Teste de Impedância
Fator de Dissipação	Fase para terra Fase para fase	Teste de Fator de Dissipação e Capacitivo

Quadro 7 - Principais métodos de testes do sistema de isolamento do estator e seu respectivo módulo de prateleira no mercado

Fonte: adaptado de Grubic et al. (2008).

Para exemplificar um dos módulos de teste de prateleira, a figura 22 apresenta o módulo de testes de Alta Tensão do fabricante Associated Research Inc., principal fabricante e fornecedor desses equipamentos para a empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina, base de estudo para esta pesquisa. O fabricante especifica que a Serie Omnia 8106 tem como interfaces cartões de comunicação padrões Ethernet, USB e RS232.



Figura 21 - Lista dos fornecedores de módulos de testes do sistema de isolamento do estator indutivo

Fonte: Autor (2012)⁴.

⁴ Adaptado de <<http://pdf.directindustry.com/cat/electrical-measurement/impedance-measuring-devices-resistance-measuring-devices-insulation-measuring-devices-AL-502.html>>. Acesso em: 20 de Outubro de 2011

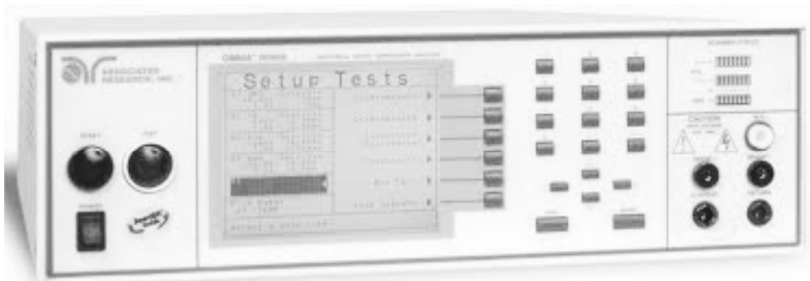


Figura 22 - Série Omnia 8106 da Associated Research Inc.
Fonte: Nota ao final⁵.

Sabendo o que o mercado disponibiliza como soluções para teste de estatores no processo produtivo e também no seu campo de aplicação, bem como suas vantagens e desvantagens, se faz necessário explorar o que a literatura apresenta sobre arquitetura de produtos visando buscar a solução tecnológica que vai unir o melhor desses dois cenários.

2.2 ARQUITETURA DE PRODUTO

No item anterior desta pesquisa identificou-se que duas linhas distintas de aplicações de métodos *offline* de teste dos sistemas de isolamento de um estator estão disponíveis no mercado. Concluiu-se que tais aplicações são divididas ao uso no processo produtivo do estator, onde as versões integrais de painéis de testes são aplicadas, e ao uso no campo de trabalho do estator quando este não está em funcionamento, onde as versões modulares são empregadas. Nesta etapa do trabalho, faz-se necessário conhecer os principais conceitos relacionados ao tema arquitetura de produtos, o que é, como se divide e quais são os tipos e por último revisar a literatura sobre o tema modularidade, suas perspectivas, aplicações e métodos e procedimentos de modularização que irão auxiliar no desenvolvimento da solução para a problemática desta pesquisa. É o que se descreve neste capítulo da pesquisa.

⁵ A Associated Research, AR, disponibiliza em seu web site informações dos equipamentos que fabrica. Disponível em: <<http://www.asresearch.com/products/omnia/8106.aspx>>. Acesso em: 20 de Junho de 2012.

2.2.1 O que é arquitetura do produto

Para Ulrich (1995, p. 419) o esquema com que cada função de um produto é alocada ao seu componente determina o que é arquitetura do produto.

Yin (2007, p. 1, tradução nossa) relata que Ulrich (1995) descreve a arquitetura de produto em algumas definições, sendo a primeira o arranjo funcional dos elementos do produto, a segunda como o mapa dos elementos funcionais para os componentes físicos do produto e por último a especificação das interfaces diante as interações dos componentes físicos de um produto.

Erens e Verhulst (1997, p. 6) descrevem que a composição de um produto a partir de um número de componentes é uma arquitetura de produtos e esta engloba os seus componentes juntamente com suas interfaces e operações.

Conhecer tais definições é relevante para essa pesquisa e vai contribuir para a escolha da arquitetura de produtos proposta para a problemática deste trabalho. Os próximos subitens desta pesquisa irão mais a fundo nos principais conceitos da arquitetura de produtos.

2.2.1.1 Arranjo dos elementos funcionais do produto

De acordo com Ulrich (1995, p. 420) enormes são as tentativas de descrever a função de um produto na comunidade de teoria de design (FINGER; DIXON, 1989) e segundo o mesmo autor, a função de um produto é o que ele faz de acordo com as suas características físicas.

Para Ulrich (1995, p. 421) “o arranjo dos elementos funcionais e suas conexões são a estrutura funcional de um produto”. A figura 23 exemplifica a estrutura funcional de um reboque e nela o arranjo funcional com suas conexões. Segundo Ulrich (1995, p. 420) o elemento funcional de um componente de produto é a função do componente de um produto, seus requisitos funcionais (SUH, 1990) ou suas funções (FOWLER, 1990).

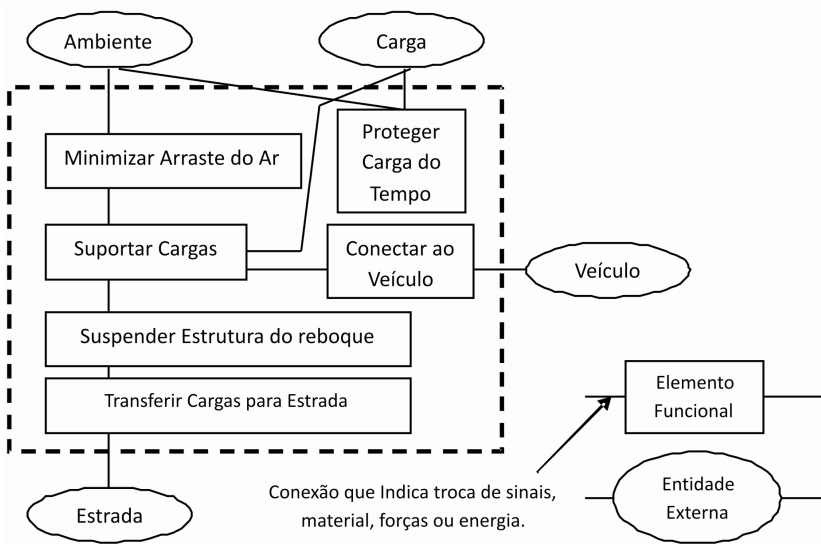


Figura 23 - Estrutura funcional de um reboque

Fonte: Ulrich (1995, tradução nossa).

A figura 24 representa alguns exemplos de elementos funcionais e seus componentes, sem caracterizar o componente com o produto a que pertence.

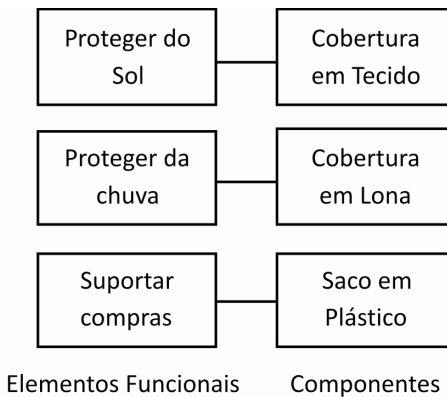


Figura 24 - Conexão entre elementos funcionais e seus componentes

Fonte: Adaptado de Ulrich (1995).

Considerando que um produto é formado por um ou mais componentes, cada componente pode ser dotado de um ou mais elementos funcionais, ou seja, uma ou mais funções, e cada elemento funcional pode ser executado por um ou mais componentes do produto, é necessário conhecer o que a arquitetura de produtos descreve sobre tais possibilidades de ligações. O item 2.2.1.2 desta pesquisa aborda esse tema.

2.2.1.2 Mapa dos elementos funcionais para os componentes físicos do produto

Ulrich (1995, p. 421) descreve que um produto consiste de um ou mais componentes, um componente como uma parte separada ou uma sub montagem do produto, que o componente é responsável em implementar o elemento funcional do produto e que suas ligações são um para um, muitos para um e um para muitos.

Erens e Verhulst (1997, p. 4) descrevem o produto como sistema, seus componentes como modelo de tecnologia, os elementos funcionais como funções e que quatro são as alternativas de ligações entre funções e os modelos de tecnologias para um sistema, ou seja, alternativas para o modelo funcional do sistema.

O quadro 8 apresenta as alocações ou mapa de ligações entre funções e componentes descritas por Ulrich (1995) e Erens e Verhulst (1997).

Ulrich (1995)	Mapas ou Alocações	ERENS e VERHULST (1997)
Um Elemento Funcional para Um Componente;	1:1	Uma função é alocada a um componente físico;
Um Elemento Funcional para Vários Componentes;	1:N	Uma função é alocada a vários componentes físicos;
Vários Elementos Funcionais para Um Componente;	N:1	Várias funções são alocadas a um componente físico;
Autor Não relata.	N:M	Várias funções são alocadas a vários componentes físicos.

Quadro 8 - Mapa de ligações entre elementos funcionais e componentes de um produto

Fonte: Adaptado de Ulrich (1995) e Erenz e Verhulst (1997).

2.2.1.3 Interfaces dos componentes físicos do produto

Para Ulrich (1995, p. 421) “componentes que interagem são conectados por alguma interface física”. Componentes podem não estar geometricamente conectados e mesmo assim interagirem entre si. Nos dias de hoje, inúmeras são as tecnologias de interface disponíveis que permitem a troca de sinais e dados sem a necessidade de uma conexão geométrica propriamente dita.

Especificar a interface dos componentes de um produto equivale a definir o protocolo de interação das interfaces e principalmente o casamento destas interações. Para Ulrich (1995), componentes podem estar conectados de forma associada ou desassociados. A associação de componentes representa uma forma dependente em situações de mudanças, ou seja, diante de uma mudança em um componente do produto, o seu componente associado precisa ser mudado para que o produto funcione corretamente. O contrário acontece em componentes desassociados de produtos. A figura 25 demonstra as duas formas de interfaces entre componentes de um produto descritas por Ulrich (1995).

A escolha das interfaces e interações entre os componentes do produto pode levar ao tipo de arquitetura do produto, o que descreve o item 2.2.2 desta pesquisa.

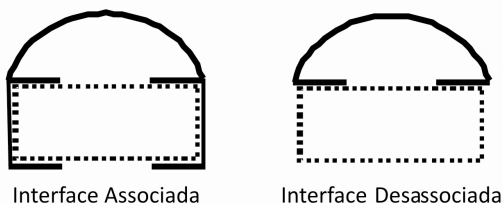


Figura 25 - Interfaces associada e desassociada

Fonte: Adaptado de Ulrich (1995).

2.2.2 Tipos de arquitetura de produtos

Nesta pesquisa os conceitos e os tipos de arquitetura seguidos serão o de Ulrich (1995) e o tipo de arquitetura definida com a solução proposta para a problemática desta pesquisa será uma alternativa próxima ao extremo da arquitetura totalmente modular descrita pelo mesmo autor.

Ulrich (1995, p. 422, tradução nossa) define que a primeira distinção em tipos de arquiteturas é entre uma arquitetura modular e uma arquitetura integral (...) que uma arquitetura modular inclui uma conexão um para um de elementos funcionais para componentes do produto em sua estrutura funcional e especifica interfaces desassociadas entre componentes (...) e que uma arquitetura integral inclui um complexo mapeamento de elementos funcionais para os componentes físicos com interfaces associadas entre componentes.

Erens e Verhulst (1997, p. 4) relatam que cada nível na hierarquia de um produto tem sua arquitetura de acordo com os tipos de componentes que possui, funcional, tecnológica ou física e que modularidade e integração são requisitos dessas arquiteturas.

Para Martini (2008) a definição da arquitetura dos produtos pode, entre outros benefícios, reduzir os custos de desenvolvimento, permitir a atualização, racionalizar a produção, facilitar a reciclagem, e desenvolver produtos variados de maneira econômica.

2.2.3 Produtos modulares e suas variações

No item 2.2.2 desta pesquisa descreveu-se que nos extremos da arquitetura de produtos se encontram os produtos totalmente modulares ou integrais, que tal distinção diz respeito à forma com que os componentes do produto se relacionam com suas funções e também pela forma de conexão entre si. Um produto totalmente modular possui a relação um para um entre componentes físicos e seus elementos funcionais e a interface de conexão entre seus componentes é desassociada. Martini (2008, p. 53) relata que entre os extremos de Integral e Modular existem diversas formas de relacionar funções e componentes de um produto. Essas formas são denominadas de arquiteturas de enfoque modular e baseiam-se em componentes que executam completamente uma ou mais funções de um produto (MARTINI, 2008). A figura 26 representa a arquitetura modular (ULRICH, 1995) e a de enfoque modular (MARTINI, 2008).

Para Brusoni e Prencipe (2001, p. 179) modularidade é uma estratégia de projeto do

produto que visa definir um modelo padrão de interfaces entre os componentes de um produto e empresas que visam variedade e mudanças nos produtos, flexibilidade e atualização podem melhor optar por uma arquitetura modular.

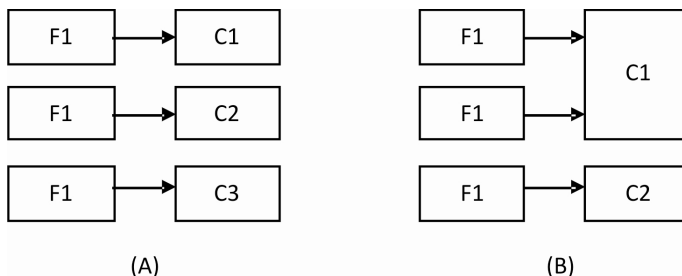


Figura 26 - Tipos de arquitetura modular: totalmente modular (A) e de enforcamento modular (B)

Fonte: Adaptado de Martini (2008).

2.2.4 Tipos de arquitetura modular

Ulrich (1995, p. 424) divide arquiteturas modulares em três subtipos: ranhura, barramento e seccional e as três diferem entre si na forma com que as interfaces entre os componentes de um produto variam. Todas são modulares, possuem ligação um para um entre elementos funcionais e componentes e as interfaces entre componentes são dissociadas. O quadro 9 representa tais variações e seus efeitos no produto.

Tipo de Arquitetura Modular	Interface entre Componentes	Consequência no Produto
Ranhura	Diferente tipos de Interfaces	Componentes não podem ser intercambiados
Barramento	Uma interface comum para a conexão dos componentes	Componentes podem ser conectados a uma interface comum do Produto
Seccional	Mesmo tipo de interface para cada componente e sem elemento comum de conexão	Componentes podem ser conectados entre si através de uma mesma interface

Quadro 9 - Tipos de arquitetura modulares de Ulrich

Fonte: Adaptado de Ulrich (1995).

Para melhor entendimento das diferenças entre os tipos de arquitetura modular descritos na literatura, a figura 27 representa a arquitetura de produto em quatro diferentes tipos de arquitetura descritos por Ulrich (1995). Nela é possível observar a diferença entre os possíveis tipos de interfaces da arquitetura modular descritos no quadro 9 e comparar com a arquitetura integral descritas pelo mesmo autor.

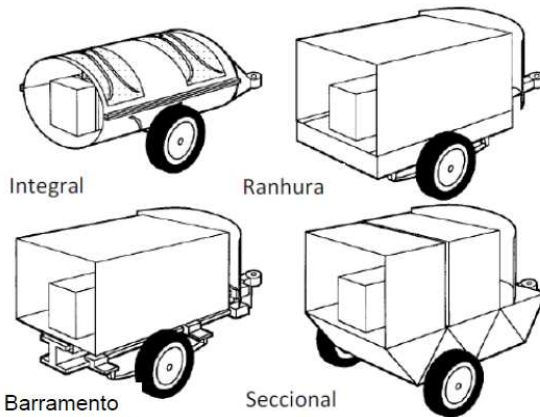


Figura 27 - Quatro arquiteturas de reboque

Fonte: Tradução de Ulrich (1995).

2.2.5 Modularidade e suas perspectivas

A partir deste item da pesquisa a revisão literária em modularidade é exposta e assim como descreveu Martini (2008, p. 49) “ao longo dos anos, muitos trabalhos foram publicados sobre modularidade de acordo com diversas interpretações sobre o tema”. Fixson (2003) identificou no período de 1963 a 2003 na literatura 107 trabalhos que utilizaram o termo modularidade de produtos de alguma forma.

O relatório de Fixson (2003, tradução nossa) separou os trabalhos relacionados aos campos da Engenharia e Gerenciamento e se propôs a responder por que modularidade é tão difícil de operacionalizar, se a modularidade é um pacote de características de um produto ou uma condição única, se esta ocorre em diferentes pontos ao longo do processo de criação do produto, se pode

ser direcionada ao mercado ou à tecnologia e se é usada para chegar a diferentes objetivos em diferentes estágios do ciclo de vida do produto.

Três foram às perspectivas indicadas por Fixon (2003) para responder tais questionamentos, sendo elas: de Sistema, do Processo de Desenvolvimento de Produtos e do Ciclo de Vida do Produto. Os quadros 10 e 11 relacionam as perspectivas de Fixon (2003).

Questionamento	Resposta / Perspectiva	Características / Ênfase / Ocorrem	Abordagem / Detalhamento / Objetivo / Fase	Efeitos no Produto
Módulos ou Interfaces definem Modularidade?	Sistema	Elementos dos Sistema Módulos ou componentes do produto	Paramétrica;	Características Individuais dos Elementos podem ser alteradas
			Configuracional;	Elementos não se alteram, apenas arranjados em agrupamentos
			Fundamental.	Forma de alocação das funcionalidades aos elementos pode ser alteradas, resultando em novos produtos
		Relações entre os elementos do Sistema Interfaces dos módulos ou componentes do produto	Baixo detalhamento das Interfaces;	Interface não impactada pela escolha dos módulos e componentes
			Médio detalhamento das Interfaces;	Padronização da Interface e Intercambialidade dos componentes (Flexibilidade)
				Uso da Interface conta para a especificação da modularidade
Alto detalhamento das Interfaces.	Mede a Força da Interface Individual para medir a dependência entre componentes Requer a descrição da natureza física da interface relevante determinar está transmitindo forças mecânicas, correntes elétricas, material ou informação			

Quadro 10 - Perspectivas da modularidade: sistema

Fonte: Adaptado de Fixon (2003).

Sob a perspectiva de Sistemas, os trabalhos classificados por Fixon (2003) descrevem os elementos e as relações entre os elementos do sistema. Na perspectiva do Processo de Desenvolvimento de Produtos, os trabalhos relacionados pelo autor relatam que em dois momentos no processo de criação a modularidade pode ocorrer, sendo o primeiro momento durante pesquisa e direcionamento para o mercado e o segundo durante a fase de desenvolvimento do produto de acordo com a escolha da tecnologia disponível no mercado. Na última perspectiva, os trabalhos foram relacionados com os objetivos presentes nas quatro fases do ciclo de vida dos produtos, sendo eles desenvolvimento, fabricação, uso e descarte.

Questionamento	Resposta / Perspectiva	Características / Ênfase / Ocorrem	Abordagem / Detalhamento / Objetivo / Fase	Efeitos no Produto
Quando e Onde Modularidade Ocorre?	Processo de Desenvolvimento de Produtos Mercado x Tecnologia	Análise e direcionamento ao Mercado	Ofertar produtos que satisfaçam a variedade de necessidades dos clientes	Necessidades de variedade são convertidos em requisitos de produtos
		Escolha da Tecnologia disponível	Busca oportunidades de Modularização	Soluções com funções similares são convertidas em um único módulo no produto
Modularidade para quê ou quem?	Ciclo de Vida do Produto Desenvolvimento, Fabricação, Uso e Descarte	Segue os interesses de cada fase do ciclo de vida do produto	Desenvolvimento	Produtos mais rapidamente disponíveis ao mercado e tendendo a custos menores
			Fabricação	Produtos mais rapidamente disponíveis ao mercado e tendendo a custos menores
			Uso	Permite Variedade: Permite Atualizações, Adições e Adaptações
			Descarte	Permite a utilização como peça reserva ou pode ser transformado para outro uso

Quadro 11 - Perspectiva da modularidade: processo de desenvolvimento e ciclo de vida do produto

Fonte: Adaptado de Fixon (2003).

2.2.6 Modularidade, suas aplicações e operadores

Gamba e Fusari (2009, p. 1878, tradução nossa) descrevem que um módulo é um agrupamento de parâmetros interconectados que são quase independentes de outros parâmetros de outros módulos. Quando um projeto de um equipamento é modularizado, seus elementos ou componentes são divididos em módulos de acordo com seu plano ou arquitetura (BALDWIN e CLARK, 2001). De acordo com os autores, duas são as possibilidades dos projetos desses módulos: Módulos Ocultos e/ou Módulos Visíveis, estes últimos também chamados de módulos hierárquicos por Gamba e Fusari (2009, p. 1878). Módulos ocultos englobam todos os módulos onde as alterações não afetam ou interagem com outros módulos e módulos visíveis definem os módulos que seguem uma regra de projeto para o uso de módulos ocultos. A Figura 28 representa o sistema de Baldwin e Clark (2000) antes e depois da modularização, demonstrando como a estrutura de um sistema varia quando este sai de uma interdependente para uma estrutura de projeto modular.

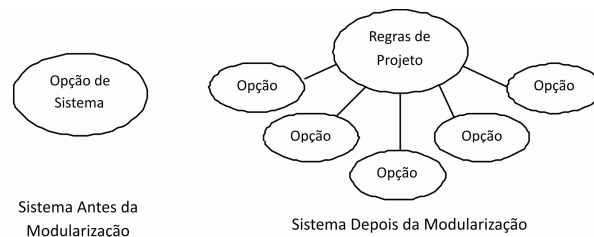


Figura 28 - Opções de criação da modularidade
Fonte: Baldwin e Clark (2000).

Para os módulos visíveis, seus elementos podem sofrer alterações desde que as regras de projeto sejam seguidas. Baldwin e Clark (2001, p. 13, tradução nossa) relatam que “produtos com módulos ocultos, especialmente com pequenos módulos ocultos com grande potencial técnico, estão mais sujeitos a diferentes dinâmicas de competitividade do que produtos que possuem módulos visíveis”.

A figura 29 representa o posicionamento dos módulos hierárquicos e visíveis dentro de uma estrutura modular simplificada.

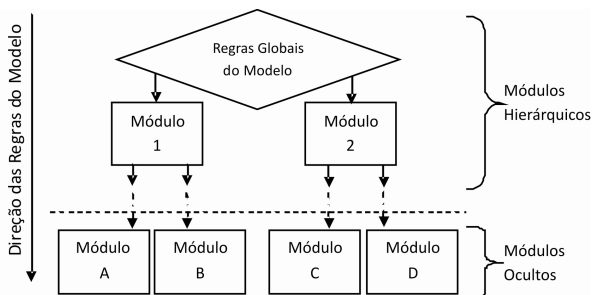


Figura 29 - Estrutura modular simplificada

Fonte: Gamba e Fusari (2009).

Os autores propõem ainda o estudo dos operadores da modularidade para associar valores que possam ser relevantes para cada um dos produtos e afirma que são nos operadores da modularidade que residem as oportunidades e as fraquezas dos produtos. Para Baldwin e Clark (2001, p. 13, tradução nossa) “os operadores da modularidade formam o repertório de ações que podem ser realizadas em sistemas

modulares e mudanças complexas em tais sistemas são representadas pela combinação dos operadores”. O quadro 12 representa os operadores da modularidade e suas definições e os autores ampliam a lista em três alternativas: replicação de um módulo, combinação de dois ou mais módulos e extensão de um módulo.

Operador	Definição
Divisão	Divide um sistema interdependente em dois módulos
Substituição	Substitui um módulo por outro
Incrementação	Adiciona um novo módulo ao sistema
Exclusão	Exclui um módulo do sistema
Inverção	Cria novas regras de projeto e módulos de arquiteturas
Portabilidade	Faz um módulo ficar compatível com dois ou mais sistemas

Quadro 12 - Operadores da modularidade e suas definições

Fonte: Adaptado de Fixon (2003).

Martini (2008, p. 56) comenta que Pahl et al. (2005) descreve uma lista variada de vantagens que os consumidores percebem nos produtos modulares em relação aos produtos integrados. Dentre elas destacam-se prazos menores na entrega, alternativas melhores de reparos e substituição, variedade maior em peças de reposição, possibilidades de modificações e aumento das funções dentro das capacidades do produto e principalmente uma chance menor de acontecimento de falhas.

No desenvolvimento de arquiteturas de enfoque modular o fundamental é definir as relações entre componentes e as funções do produto, e que tal etapa acontece nos estágios iniciais do desenvolvimento do produto (MARTINI, 2008). Para Martini (2008, p. 56) frequentemente utiliza-se a modelagem funcional do produto no auxílio à seleção da arquitetura de enfoque modular do produto, seus componentes e suas funções. Considerando a importância do assunto para o objetivo desta pesquisa, devido ao fato da possibilidade da solução da problemática desta pesquisa ser uma variante de uma arquitetura totalmente modular, o próximo assunto irá explorar modelos de sistema.

2.2.7 Modelos de produto

“O uso de descrições e modelos de produtos podem auxiliar no processo de definição da arquitetura dos produtos” (MARTINI, p. 57).

Segundo Erens e Verhulst (1997, p. 2), no processo de desenvolvimento muitas descrições de produtos podem ser encontradas. A maioria delas pode ser classificada em três categorias e tais categorias são representadas por modelos de produtos que atuam como a raiz para a combinação das informações do produto (ERENS e VERHULST, 1997). O quadro 13 demonstra os modelos de produto dos autores, suas descrições, atuações, responsabilidades e objetivos.

Modelo	O que é	Atuação	Responsáveis pelo Modelo	Objetivo do Modelo
Funcional	Descritivo da Funcionalidade do Produto	Diretamente Relacionado com o objetivo do Produto	No Gerenciamento do Produto	Atender aos requisitos do produto
Tecnológico	Descritivo da Aplicação das Tecnologias	Assegurar a Operação do Produto e não a sua fabricação	Desenvolvimento do Produto	Assegurar o funcionamento do produto
Físico	Descritivo Físico do sistema	Relacionado com a construção do produto	Manufatura Determina as condições	Garantir montagem fácil sem comprometer qualidade e custos

Quadro 13 - Modelo de produtos

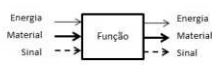
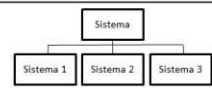
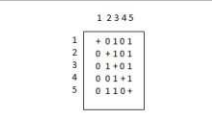
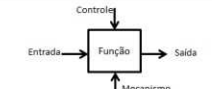
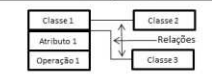
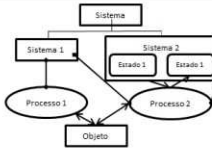
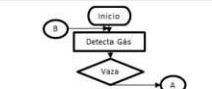
Fonte: Adaptado de Erens e Verhulst (1997).

Considerando que a escolha da arquitetura de um produto ocorre nas primeiras fases de seu desenvolvimento (ULRICH, 1995) e o modelo funcional do produto tem o objetivo de mapear as especificações que irão atender as exigências do mercado (ERENS e VERHULST, 1997), o próximo item desta pesquisa irá explorar quais tipos de modelos funcionais a literatura referencia.

2.2.7.1 Modelagem funcional de produtos

Martini (2008) sintetizou os tipos de modelos funcionais de acordo com a pesquisa literária que efetuou em sua tese de doutorado. O autor descreveu que nos estágios iniciais do processo de desenvolvimento os modelos funcionais dos produtos são derivados dos modelos de sistemas. Sete são as alternativas de modelos relatadas por Martini (2008) e o quadro 14 representa tais alternativas. Todas podem ser utilizadas nos estágios iniciais de desenvolvimento do produto. Pela simplicidade do uso e pela quantidade de informações que fornecem, duas são as que se destacam entre as sete, sendo elas a Estrutura de Funções e o DSM (*Design Structure Matrix*). Para Martini (2008, p. 65) “a definição dos módulos de um produto geralmente se dá pelo agrupamento funcional, ou seja, a escolha de um conjunto de funções que serão desenvolvidas em conjunto e que interagirão com o restante

do produto através de interfaces padronizadas”. Considerando a proposta desta pesquisa, que é desenvolver uma arquitetura modular de painéis de testes elétricos de isolamento de estatores, o modelo integrado de painel atualmente oferecido pelo mercado serve como base para o estudo do conjunto de funções que farão parte do agrupamento funcional que irá compor a versão modular. O item 2.2.8 desta pesquisa explora o que a literatura dispõe de métodos de modularização de produtos que irão auxiliar no desenvolvimento dos agrupamentos funcionais da versão modular de arquitetura para painéis de testes elétricos de segurança de estatores.

Modelo Funcional de Produto	Referência	O que é	Como se Caracteriza	Aplicabilidade	Representação
Estrutura de Funções	Pahl et Al (2005)	Representação funcional do Produto	Caixas de Ações com os respectivos Fluxos de Entradas e Saídas de Energia, Sinal e Material.	Bastante difundido na Engenharia	
Estrutura Hierárquica	Hölttä-Otto (2005)	Forma de Modelar os Produtos	Sistemas decompostos em Sub-Sistemas e assim por diante até o nível desejado	Bastante comum e simples de aplicar	
DSM		Matrix de Estrutura de Projeto	Elementos do Sistema (funções ou componentes) são as linhas e as relações entre este definem o corpo da Matriz	Garantir montagem fácil sem comprometer qualidade e custos.	
IDEFO		Técnica de Análise funcional Estruturada	Caixas de Ações com os respectivos Fluxos de Entradas e Saídas com duas entradas adicionais (Controle e Mecanismo)	Interessante para a Manufatura do Produto	
UML		Linguagem de Modelagem Unificada	O conceito de Classe é utilizado para representar o sistema	Desenvolvida para Projeto de Software	
OPM		Metodologia de Processos Objeto	Descreve no Modelo funções e suas interrelações e Componentes e suas interrelações	Unificação de Função, estrutura e comportamento e um único modelo	
Diagrama de Atividades do produto	Asan et al. (2004)	Modelo	Relaciona ações do produto com eventos internos ou externos	Adequado para produtos que operam em ciclos e que interagem com ambiente	

Quadro 14 - Modelo funcional de produtos
 Fonte: Adaptado de Martini (2008).

2.2.8 Métodos de modularização de produtos

Considerando que um dos motivadores desta pesquisa é a crescente disponibilidade tecnológica de módulos de aplicação de métodos de teste elétrico de estatores, é importante conhecer quais funções da versão integral de painéis de testes elétricos de segurança de estatores podem ser agrupadas de maneira a gerar os módulos do equipamento e quais alternativas de interfaces podem ser padronizadas. Com essa perspectiva, os métodos de modularização descritos na pesquisa de Martini (2008, p. 73-76) representam as formas agrupamento das funções do produto painel de testes elétricos de segurança de estatores que irão resultar nos diversos módulos, sejam eles visíveis ou ocultos, desse equipamento.

Segundo Martini (2008, p. 66), Yang et al. (2005) e Hölttä-Otto (2005) classificaram três métodos de modularização que se destacam nas publicações acadêmicas, descritos no quadro 15.

Método de Modularização	Autor (es)	Utilização	Requisito	Regras para obtenção dos módulos	Descrição da Regra
Heurísticas	Stone et AL. (1998)	No Modelo Funcional do Produto	Estrutura funcional do Produto	Fluxo Dominante	As sub-funções que um fluxo percorre definem um módulo
				Ramificação do Fluxo	Cadeias paralelas de funções ligadas a um fluxo definem um módulo
				Conversão - Transmissão	Uma sub-função de conversão de um fluxo ou par de conversão transmissão definem um módulo
Design Structure Matrix (DSM) - Matrix de Estrutura do Modelo	Browning (2001)	Na definição do Modelo Funcional	Conhecer as interações entre elementos funcionais	Conhecer interações entre os elementos do produto e representar em matriz	Uso de Algoritmos Genéticos e de Penalizações de Distância para obter alternativas de Módulos
	Huang e Kusiak (1998)				Aplicação de um Algoritmo de Modularização
Modular Function Deployment (DFM) Desdobramento da Função Modular	Erixon (1996)	No Modelo Funcional do Produto	Utilização de uma ferramenta denominada MIM, Matriz de Indicação Modular (Rozenfeld et al., 2005), que se assemelha a uma matriz QFD, para identificar possíveis módulos	Preencher a MIM através do relacionamento dos Direcionadores de Módulos, ou os motivos para modularização, com as funções do Produto	A Escolha das funções baseada na pontuação obtida na MIM

Quadro 15 - Métodos de modularização

Fonte: Adaptado de Yang et al. (2005), Hölttä-Otto (2005) e Martini (2008).

Martini (2008, p. 75) comenta que a literatura ainda disponibiliza outros métodos de modularização além dos mais citados e descritos no quadro 14 e cita os trabalhos acadêmicos relacionados por Jose e Tollenare (2005) que listam ferramentas para auxiliar na definição de arquitetura, modularização e plataforma de produtos. O anexo A desta pesquisa demonstra os trabalhos acadêmicos relacionados com o tema.

Para Martini (2008, p. 79) “apesar de uma relativa facilidade na aplicação dos métodos tradicionais de modularização, em nenhuma das abordagens é possível saber, mesmo relativamente, quão boa é a alternativa de arquitetura sugerida”.

Além dos métodos de modularização descritos anteriormente, a literatura descreve procedimentos para a obtenção de produtos modulares. Considerando o que conclui Martini (2008) em sua revisão literária sobre os resultados da utilização dos métodos de modularização, o item 2.2.9 desta pesquisa irá explorar tais conceitos.

2.2.9 Procedimentos para desenvolvimento de produtos modulares de Pahl e Beitz

Pahl et al. (2005, p. 340) definem produtos modulares como máquinas, montagens e componentes específicos que satisfazem diferentes funções gerais através da combinação de blocos ou módulos distintos.

Produtos modulares fornecem racionalização em diferentes possibilidades e, se este deve exercer diferentes funções, conseqüentemente muitas variações devem ser disponíveis, considerando aumento nos custos de projeto e produção (PAHL et al., 2005, p. 349).

Os autores elencam uma série de conceitos a respeito da concepção de produtos modulares e os sumarizam em uma tabela. A figura 30 demonstra tais conceitos. Alguns deles merecem melhores explicações. São eles: produtos modulares geralmente envolvem diferentes tamanhos; os módulos de um produto deveriam ser produzidos em métodos similares sempre que possível; em um sistema modular a função geral resulta da combinação discreta de seus componentes e o seu desenvolvimento requer a elaboração da estrutura funcional; a elaboração da estrutura funcional acontece durante a fase conceitual de desenvolvimento do produto e englobam atividades que especificam a variação de tamanho do produto; produtos modulares são

constituídos de unidades inseparáveis e separáveis, por exemplo, módulos; existe uma diferença entre módulos de função e módulos de produção; módulos de função ajudam a implementar funções técnicas independentemente ou em conjunto com outros módulos; módulos de produção são projetos independente de suas funções e são baseados em separadas considerações de produção.

Critério de Classificação	Características de Distinção
Tipos de módulos:	<ul style="list-style-type: none"> - Módulos funcionais * Módulos básicos * Módulos auxiliares * Módulos especiais * Módulos adaptativos * Não módulos - Módulos de Produção
Importância dos módulos	<ul style="list-style-type: none"> - Módulos Essenciais - Módulos Possíveis
Complexidade dos módulos	<ul style="list-style-type: none"> - Módulos grandes - Módulos Pequenos
Combinação dos módulos	<ul style="list-style-type: none"> - Somente módulos similares - Somente módulos diferentes - Módulos similares e diferentes - Módulos e não módulos
Resolução dos módulos	<ul style="list-style-type: none"> - Numero de componentes por módulos - Numero de unidades e suas possibilidades
Concretização dos módulos	<ul style="list-style-type: none"> - Somente módulos de Software - Misto de módulos de Software e Hardware - Somente módulos de hardware
Aplicação dos módulos	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema fechado com plano combinatório - Sistema aberto com plano em espécie

Figura 30 - Conceitos de sistemas modulares

Fonte: Traduzido de Pahl et al. (2005, p. 343).

Para Pahl et al. (2005, p. 434) módulos de função são divididos em equipamentos, acessórios, conexões e outros módulos. Para os autores é vantajoso dividir os módulos de função de acordo com os vários tipos de função que existem em sistemas modulares e estas podem ser combinadas em sub-funções que atendem a requisitos das funções gerais. A figura 31 representa os tipos de funções e módulos descritos e para os autores a relação entre módulo e função é direta, por exemplo, módulos básicos são representados por exercerem funções básicas.

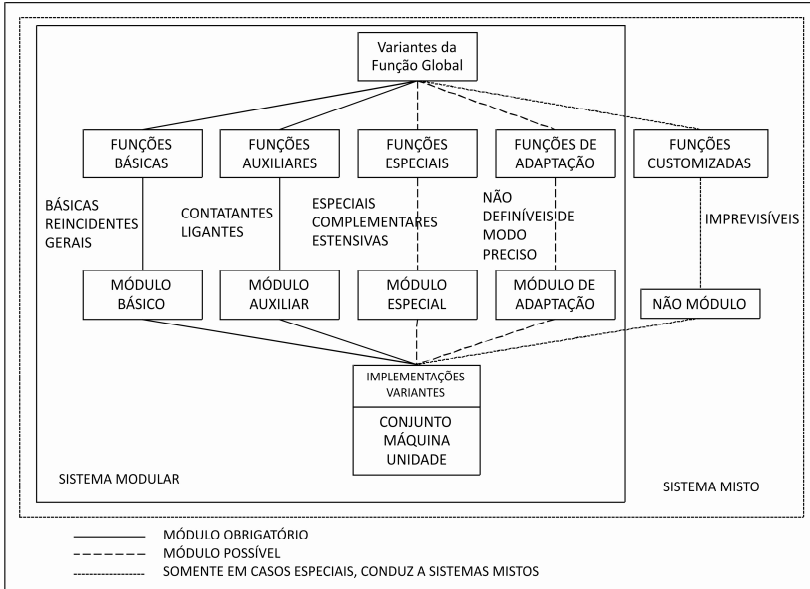


Figura 31 - Tipos de módulos e funções em sistemas modulares e mistos
 Fonte: Traduzido de Pahl et al. (2005, p. 341).

Seis etapas fazem parte procedimento de desenvolvimento de produtos modulares proposto por Pahl et al. (2005) que segue a sequência de atividades da fase de concepção de projeto. São elas:

- 1) *aclaramento da tarefa* - visa elencar todas as funções do produto, está diretamente ligada as expectativas de mercado para o produto e objetiva atender a relação custo e eficiência da solução;
- 2) *estabelecimento da estrutura funcional do produto* - objetiva a implementação das funções gerais do produto pela combinação do número mínimo de funções básicas possíveis, visa à tentativa de subdividir as variações da função global do equipamento em um número mínimo de sub-funções similares e recorrentes (básicas, auxiliares, especiais e adaptativas) e tenta combinar várias sub-funções em um módulo único se isto representar um aumento da relação custo e eficiência;
- 3) *procura por princípios de soluções e variações do conceito* – visa encontrar os princípios de soluções para a implementação das várias sub-funções do produto. Uma

produção satisfatória de soluções é também assegurada pela implementação de muitas funções por um único módulo inacabado que dependendo dos requisitos pode ser finalizado de diversas maneiras;

- 4) *seleção e avaliação* – visa selecionar os princípios de conceitos encontrados com assistência de critérios econômicos e técnicos. Em caso de não existir esclarecimento técnico e financeiro suficiente nesta etapa, algumas seleções são muito difíceis de serem feitas.
- 5) *preparação do projeto global* – objetiva o projeto individual dos módulos de acordo com suas funções e com os requisitos de produção. Uma boa saída desta etapa é fornecer módulos básicos, auxiliares, especiais e adaptativos como o máximo de partes similares e recorrentes e o mínimo de partes inacabadas e processos produtivos;
- 6) *preparação dos documentos para a produção* – objetiva a geração dos documentos que organizam as ordens de produção e facilitam o processo, tais como: desenhos, lista de componentes, etc. Métodos de organização destes documentos são bem vindos nessa etapa.

A proposta de Pahl et al. (2005) de desenvolvimento de produtos modulares não é um método de modularização e sim um procedimento, o que não inviabiliza a sua utilização. Martini (2008, p. 65) a descreve como uma tentativa de classificação dos tipos de funções e módulos de um produto. A escolha por um método de modularização da arquitetura ou pelo procedimento de desenvolvimento de produtos modulares que irá determinar o projeto conceitual do equipamento a ser desenvolvido e testado será justificado nas considerações finais deste capítulo, item 2.3 desta pesquisa.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO REFERENCIAL TEÓRICO

Na primeira parte deste capítulo viu-se à importância do motor para aplicações industriais e comerciais, a preferência pelo motor de indução e o motivo para tal. A literatura descreve os componentes de um motor elétrico de indução e também relata o percentual de falhas de motores que são atribuídas ao sistema de isolamento de um estator de um motor elétrico. Elencaram-se alguns exemplos de normas construtivas de estatores elétricos para o uso em motores de compressores de refrigeração doméstica e, através da descrição

minuciosa do processo produtivo de um estator em empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina, foi possível entender como se constrói um estator e quais falhas do isolamento do estator são oriundas deste processo produtivo. A literatura também descreve os tipos de isolamento de um estator e quais são métodos de detecção de falhas destes tipos de isolamento. Viu-se que a detecção da falha do isolamento de um estator pode ocorrer em dois momentos, sendo o primeiro do seu processo produtivo e o último na sua aplicação no motor e no campo de trabalho do motor elétrico. Cinco métodos de teste de aceitação da isolamento elétrica de um estator foram apontados como necessários para qualificar um estator no processo produtivo. A pesquisa do mercado de equipamentos para testes de isolamento de um estator elétrico apresentou duas linhas distintas de equipamentos disponíveis. A primeira delas é caracterizada como os painéis integrados de testes elétricos de segurança de estatores empregados no processo produtivo de um estator, na qual se avaliou a versão utilizada em empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina para caracterizar suas vantagens e desvantagens. Como final da primeira parte deste capítulo, a pesquisa da segunda linha de equipamentos, classificada por módulos de prateleira utilizados para testes no campo de atuação do estator elétrico, demonstrou uma variedade enorme e crescente de fabricantes e suas versões de módulos de teste da isolamento de estatores. Caracterizaram-se os efeitos benéficos da concorrência entre marcas e modelos que resulta em uma tecnologia que acompanha a evolução crescente e incessante da era digital de geração, tratamento e transmissão de dados.

Na segunda e última parte deste capítulo, com o objetivo de selecionar a método de modularização da arquitetura que irá definir a arquitetura modular da solução tecnológica proposta, o conceito de arquitetura de produto e seus tipos foram explorados. Conceituaram-se produtos modulares e suas variações e mais a fundo se foi em arquiteturas modulares e os seus tipos através de renomados autores. Na pesquisa literária, a classificação dos trabalhos acadêmicos que abordam a modularidade de produtos relaciona três perspectivas da modularidade. Dentro de uma dessas perspectivas, a de sistemas, conheceu-se o que são módulos ocultos e visíveis dentro do conceito de modularidade. Através do conceito de operadores da modularidade buscou-se entender quais ações podem ser realizadas e quais as vantagens que estas agregam ao um produto de arquitetura modular. Buscaram-se os tipos de modelagem funcional de produtos, os métodos de modularização de produtos e um procedimento de desenvolvimento de produtos modulares

visando definir qual método ou procedimento será utilizado para conceber a arquitetura modular que será utilizada na solução tecnológica a ser produzida e avaliada nesta pesquisa.

Considerando a descrição efetuada por Martini (2008) em sua revisão literária dos métodos de modularização de produtos, conclui-se que, assim como o autor relata, não existe uma assertividade garantida no uso dos métodos tradicionais da modularização da arquitetura. Apesar de aparentemente fácil de aplicar, o método descrito nas heurísticas de Stone et al. (1998) parte do pressuposto que a estrutura funcional do produto esteja disponível e, considerando a complexidade de funcionamento da versão integral de painéis elétricos existente no mercado, este método não se aplica ao propósito desta pesquisa. A utilização do DSM como método de modularização poderia ser utilizada para definir os agrupamentos funcionais do equipamento que resultariam em módulos, porém, este papel já foi feito e para cada método de teste *offline* aplicado no painel modular de testes elétricos existe um módulo correspondente disponível no mercado. Tal variabilidade de oferta no mercado de módulos de prateleira leva a não utilização do método de modularização MFD, apesar dos facilitadores para o desenvolvimento da solução tecnológica modular proposta nesta pesquisa estar diretamente relacionada aos conceitos de direcionadores de módulos (compra de produtos prontos, manutenção e mantabilidade e atualização) descritos por Erizon (1996).

A pesquisa do mercado de módulos de teste elétricos de prateleira trouxe subsídios necessários para concluir que para desenvolver a solução modular tecnológica de painéis de testes elétricos não será necessário utilizar métodos de modularização de arquitetura, ferramenta matemática ou algoritmo. O que se precisa para chegar à arquitetura modular desta solução é a aplicação de um procedimento de desenvolvimento de produtos modulares que clareie os objetivos, organize a seleção dos módulos existentes no mercado através de requisitos e também os passos para a fabricação do protótipo. Desse modo, justifica-se a utilização do procedimento de desenvolvimento de produtos modulares de Pahl e Beitz (PAHL et al., 2005) para a obtenção da arquitetura modular para a solução tecnológica proposta no objetivo geral desta pesquisa.

3 PROJETO CONCEITUAL E DETALHADO DO EQUIPAMENTO PROTÓTIPO

O projeto conceitual e detalhado tem por objetivo definir a arquitetura modular da solução tecnologia proposta. Com esse objetivo, os itens iniciais deste capítulo irão adentrar no processo de desenvolvimento do “Painel Modular de Testes Elétricos de Segurança de Estatores” e mais especificamente na fase de conceitualização ou concepção da macro fase de desenvolvimento do produto. Antes será necessário entender o que a empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina utiliza como modelo de desenvolvimento de produtos para que o resultado deste capítulo, o projeto preliminar do produto, a ser elaborado e testado nas próximas fases desta pesquisa, seja compreendido com maior facilidade. Na sequência, descrevem-se os capítulos que detalham as etapas do procedimento de desenvolvimento de painel modular, escolhido e justificado anteriormente nesta pesquisa. Por último, apresentam-se o projeto preliminar do produto e os resultados alcançados que indicaram a escolha por uma das arquiteturas modulares de Ulrich (1995).

3.1 O C2C E OS PROCEDIMENTOS DE DESENVOLVIMENTO

A sigla C2C vem do significado de cliente para cliente ou “Customer to Customer” utilizado pela empresa do ramo metal mecânico do norte do Estado de Santa Catarina para descrever o modelo de desenvolvimento de produtos que utiliza.

O C2C tem como objetivo definir o gerenciamento de projetos grandes e de tecnologia dentro das perspectivas de negócio da empresa e de um simultâneo esforço para atender a satisfação de seus clientes (P&D, 1999, p. 2).

O C2C é dividido em processos e as suas principais características são: estruturar as atividades do projeto em cinco fases, garantir quatro pontos de checagem do projeto que se caracterizam por decisões de continuar ou não o projeto, especificar eventos de avaliação e revisão técnica do projeto, especificar atividades a serem efetuadas pelos envolvidos no projeto e determinar os principais resultados que cada fase do projeto deve apresentar. As quatro fases do C2C estão demonstradas na figura 30.

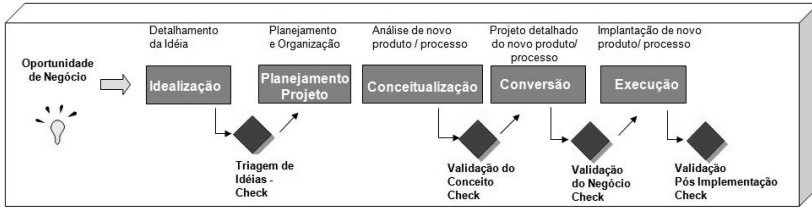


Figura 32 - Os cinco estágios do processo de desenvolvimento de novos produtos e processos do C2C

Fonte: Traduzido do manual de treinamento de empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina (P&D, 1999).

Para conhecermos quais são as atividades, pontos de checagem e as entregas de cada fase do C2C é necessário comparar o C2C com um modelo de referência de processo de desenvolvimento disponível na literatura. A figura 33 apresenta a visão geral do modelo de referência do PDP, Processo de Desenvolvimento de Produtos, descrito por Rozenfeld et al. (2005), modelo similar ao proposto pelo C2C. No C2C a macro fase de pré desenvolvimento descrita no PDP é caracterizada pelas fases de idealização e planejamento. As fases de conceitualização, conversão e execução são comparadas às fases de projeto informacional e conceitual, projeto detalhado e lançamento do produto da macro fase de desenvolvimento do PDP. Por último, a macro fase de pós desenvolvimento descrita no PDP não aparece no C2C. Esta é de responsabilidade dos setores de manufatura de cada uma das diversas plantas que a empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina tem distribuídas no mundo e não do setor corporativo de pesquisa e desenvolvimento, o P&D, responsável pela execução do C2C.



Figura 33 - Visão geral do modelo de referência do processo de desenvolvimento de produtos

Fonte: Rozenfeld et al. (2005).

Considerando que o projeto do painel modular de testes elétricos de segurança de estatores surgiu dentro do projeto de estator para uma plataforma nova de motor para compressor hermético e este passou pelos pontos de checagem da macro fase de pré desenvolvimento do C2C, a partir desta etapa da pesquisa, a fase de conceitualização do C2C será considerada como o marco inicial deste projeto tecnológico. A figura 34 descreve o processo macro de desenvolvimento da solução modular de painel e evidencia as etapas da fase de conceitualização que seguiu os procedimentos de desenvolvimento de produtos modulares descritos por Pahl e Beitz (2005).

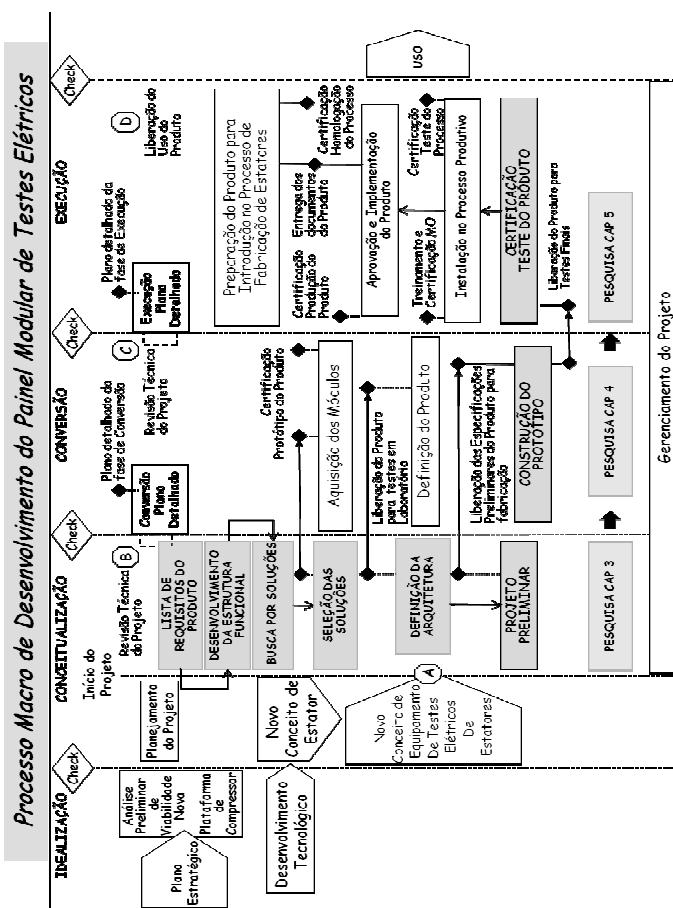


Figura 34 - Fases de desenvolvimento do equipamento
Fonte: Adaptado do P&D (1999).

De acordo com as entregas de cada fase da entrega do produto e a necessidade de definir o projeto preliminar do produto, os próximos itens da pesquisa relatam as etapas do processo do procedimento de desenvolvimento do painel modular de testes elétricos de estatores.

3.2 REQUISITOS DO PAINEL MODULAR DE TESTES ELÉTRICOS DE ESTADORES

Os resultados da pesquisa literária em testes elétricos do sistema de isolamento de um estator, a definição pelo uso dos conceitos de arquitetura de produtos de Ulrich (1995) e a pesquisa de mercado em módulos de testes elétricos de prateleira foram adicionados a algumas determinações do projeto de desenvolvimento da solução tecnológica modular. A lista de requisitos demonstrada na figura 35 representa a primeira parte dos requisitos necessários do equipamento. O anexo B desta pesquisa exhibe a segunda parte dos requisitos do painel.

Requisito	Definição
Métodos de testes a aplicar	Resistência ôhmica Resistência de Isolação (RI) Alta Tensão AC - Hipot AC Alta Tensão DC - Hipot DC Surto Rotação
Software Integrador	Selecionado pela pesquisa no mercado Prioridade por software já conhecido nos processo fabril e laboratórios da empresa base para a pesquisa Prioridade por software que seja modular Prioridade por software que permita portabilidade Prioridade por software que gere arquivo executável Prioridade por software com interface gráfica amigável Prioridade por software com ferramentas de eliminação de erros Prioridade por software que possua uma linha definida de padrões de barramentos de comunicações ou interfaces
Diferenciação dos módulos	Módulos Ocultos = interfaces e conexões entre software e componentes do painel Módulos Visíveis = software, métodos de Teste, componentes de controle do equipamento e componentes de força ou alta tensão
Seleção dos módulos visíveis de testes	Módulo de prateleira de fornecimento mundial Método não pode ser uma função secundária do módulo Módulo que possua interfaces de comunicações padrão do Software Integrador selecionado Permita programação de parâmetros de testes pelo software integrador Permita programação dos parâmetros de tempos de aplicação dos testes Permita acionamento remotor pelo software integrador Prioridade de escolha por módulos já utilizados em laboratórios da empresa base para a pesquisa em casos de mais de uma alternativa de seleção para um mesmo método de teste Prioridade de escolha por módulos com custos menores de aquisição em casos de mais de uma alternativa de seleção para um mesmo método de teste Que atendam o requisito de energia

Figura 35 - Lista de requisitos do produto
Fonte: Autor (2011).

3.3 DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA FUNCIONAL DO EQUIPAMENTO

Apesar de os conceitos de Pahl e Beitz (2005) descreverem que é vantajoso dividir os módulos de função de acordo com os vários tipos de funções que existem em sistemas modulares e combiná-las em sub-funções, não se optou pela mesma diferenciação. Os módulos de testes a serem selecionados no mercado representam os componentes que possuem uma única função no produto, a de aplicar o método de teste a que se destina. Por esse motivo, para desenvolver a estrutura funcional do equipamento, optou-se pelo conceito de Ulrich (1995). Portanto, não há necessidade de referenciar com detalhes a troca de sinais, materiais, forças ou energia em um nível tão aprofundado que exija o detalhamento das sub-funções de cada módulo a ser selecionado. A figura 36 representa a estrutura funcional do equipamento a ser desenvolvido.

3.4 BUSCA POR PRINCÍPIOS DE SOLUÇÕES

Com base na avaliação do funcionamento do equipamento integral de testes elétricos, dos conceitos de arquitetura de produtos e na experiência no time de produtos e processos envolvidos no projeto foi descrita a sequência de raciocínios técnicos para determinar os princípios de soluções que levarão à obtenção da arquitetura modular do equipamento. São eles:

- 1) o equipamento precisa de um software que gerencie as informações que levam à programação dos modelos de estatores a ser testado, à configuração dos parâmetros de cada método de teste a ser aplicado, ao sequenciamento da ordem de aplicação e por último ao gerenciamento dos resultados dos testes;
- 2) é o software que irá determinar o fluxo de informações entre usuário, software e módulos de teste. Desse modo, a escolha do software vai determinar o modelo físico desta interação;
- 3) os tipos de conexões entre software e módulos de teste determinaram as regras para a escolha dos módulos de teste;
- 4) cada módulo de teste escolhido possui uma ou mais possibilidade de interface com o software. A melhor combinação das interfaces dos módulos de teste com o

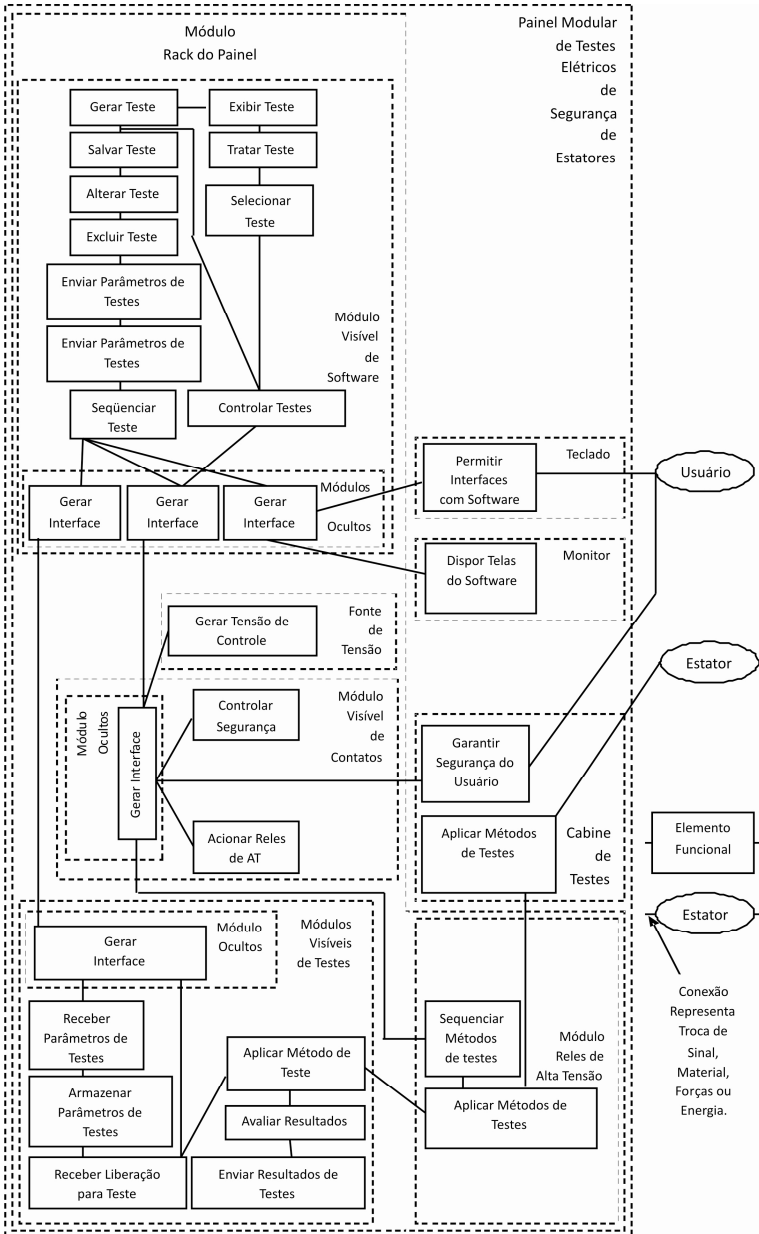


Figura 36 - Estrutura funcional do painel modular de testes elétricos de estatores
 Fonte: Adaptado de Ulrich (1995).

software irá caracterizar o tipo de arquitetura modular a ser utilizada.

Os itens 3.4.1 e 3.4.2 da pesquisa relatam a busca dos princípios de soluções para o projeto conceitual da solução tecnológica modular desta pesquisa.

3.4.1 O software integrador

A tarefa de determinar as regras de interface que permitam a escolha dos módulos de testes do equipamento e viabilizem as ações dos operadores da modularidade foi passada à seleção do software a ser utilizado na solução tecnológica proposta. Tal seleção de software aconteceu seguindo o que o mercado disponibiliza de softwares que permitam a interface desassociada entre componentes físicos do produto e principalmente não fugindo do que a empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina utiliza em laboratórios para viabilizar os diversos testes de avaliação do funcionamento e da eficiência de seu produto.

Ertugrul (1999, p. 2, tradução nossa) relata que “um número considerável de softwares de simulação, controle e visualização científica estão disponíveis no mercado e muitas foram reportadas na literatura”. Os softwares “Hypertext”, “Authoware”, “Director”, “Labtech”, “Visual C++”, “Visual Basic”, “Matlab/Simulink” e “LabVIEW” estão disponíveis no mercado e, por causa de sua versatilidade como uma ferramenta de Engenharia, o software “LabVIEW” é o mais escolhido na maioria dos problemas de engenharia (ERTUGRUL, 1999, tradução nossa). Whitley et al. (2006, p. 281, tradução nossa) descrevem o significado de “LabVIEW” como bancada de engenharia de instrumentação virtual de laboratório e comentam que é a mais utilizada linguagem de programação virtual. O autor comenta que especialistas no uso do “LabVIEW” o comparam à programação em linguagem “C” e relata que sua aplicação é mais generalizada do que a linguagem de programação em contatos utilizadas em alguns controladores lógicos programáveis, os CLP’s (WHITLEY et al., 2006).

O quadro16 representa o que Ertugrul (1999, p. 2-3) descreve como critérios de avaliação de um software de instrumentação virtual em estudos na área de Engenharia.

Critério	Descrição/Características
Modularidade	Permite o teste fácil de módulos individuais e desenvolvimento rápido de suas aplicações
Portabilidade	Permite Projetistas a trabalhar separadamente e compilar os resultados em uma única plataforma
Compatibilidade com Códigos Existentes	Permite incorporar soluções de versões prévias de software
Compatibilidade com hardware	Permite gerenciar dados de diferentes tipos de interfaces
Bibliotecas Existentes	Permite a criação de bibliotecas de baixo nível para serem utilizadas em níveis superiores
Interface avançada de eliminação de erros	Otimiza o projeto do produto e a determina erros no código do software gerado
Possibilidade de Criação de Executáveis	Evita alterações, oculta o software e cria módulos de aplicação
Execução	Assegura que o produto final atende os requisitos de execução
Interface Gráfica Intuitiva	Permite usuários olhar para o software e perceber o que precisa ser feito

Quadro 16 - Critérios para seleção de um software para utilização em educação na engenharia

Fonte: Tradução e adaptação de Ertugrul (1999).

A escolha do aplicativo em software para o gerenciamento, controle e tratamento das informações dos diversos módulos que irão compor a solução tecnológica modular de testes elétricos de segurança de estatores seguiu muito dos critérios descritos no quadro 16, foi também baseada nas facilidades que o software apresenta em comparativo com os demais disponíveis, nos comentários positivos que a pesquisa na literatura resultou e na utilização do software nos laboratórios e no processo produtivo de montagem dos produtos fabricados pela empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina. A figura 37 exemplifica a tela frontal de uma aplicação em LabVIEW e o diagrama de blocos que executa as funções descritas nesta tela.

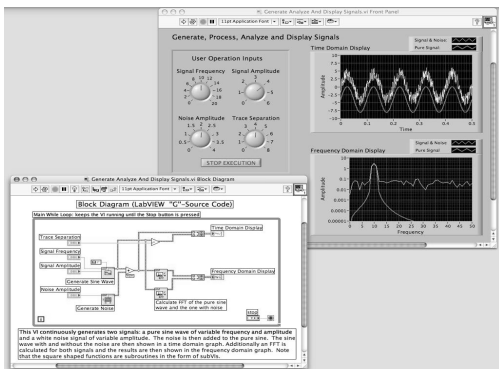


Figura 37 - Diagrama de blocos e painel frontal do LabVIEW
 Fonte: Marcíó (2011).

Apesar da Modularidade ser uma das características marcantes do software LabVIEW, sua utilização na solução tecnológica proposta nesta pesquisa caracteriza-o como um módulo e este terá a função de integrar os demais módulos do produto. Tal mapeamento entre o módulo LabVIEW e seu elemento funcional é demonstrado na figura 38. Ulrich (1995, p. 421) relata que um componente do produto pode ser caracterizado como qualquer região distinta do produto, permitindo a inclusão de software e até suas sub rotinas como definição de componentes.

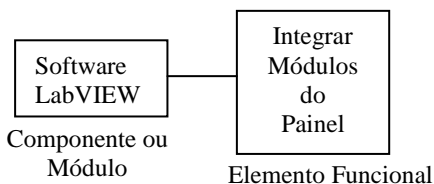


Figura 38 - Mapeamento 1:1 entre módulo LabVIEW e seu elemento funcional
Fonte: Adaptado de Ulrich (1995).

O item 3.4.2 desta pesquisa relata como a seleção do software de gerenciamento a ser utilizado no painel modular de testes elétricos de segurança de estatores levou a determinar as regras de interface entre os elementos físicos da solução tecnológica proposta.

3.4.2 As regras de interface

Considerando que o LabVIEW é um produto da National Instruments, NI, empresa cuja matriz é sediada na Cidade do Austin, Texas, Estados Unidos, determinar as interfaces entre os diversos componentes ou módulos que farão parte não será tarefa difícil, a julgar pela diversidade de interfaces que o fabricante disponibiliza em uma linha variada de equipamentos para instrumentação e controle de dados, sinais e equipamentos.

“A NI é uma empresa líder no mercado de aquisição de dados baseada em computadores pessoais, com uma completa família de produtos para aquisição de dados para desktop, portáteis,

industriais e aplicações corporativas”. (Nota ao final⁶)

Através do LabVIEW é possível utilizar o equipamento da NI com um simples desenvolvimento de ambiente e a conectividade é feita através de um programa de interface, que serve como gerenciador do equipamento no LabVIEW. Utilizando o programa de Interface NI-DAQmx pode-se integrar mais de duzentos tipos de equipamentos de aquisição de dados da National Instruments em uma variedade de tipos de barramento que incluem USB, PCI, PCI EXPRESS, PXI, PXI Express e Ethernet e se o equipamento for de um outro fabricante de módulos de testes, pode-se desenvolver o código fonte da interface no LabVIEW e conectá-lo através do uso de uma interface com barramento padrão.

O quadro 17 demonstra quais tipos de barramento de Interfaces podem ser utilizados para conexão com o software LabVIEW através do seu programa de interface NI-DAQmx e também de códigos para interface gerados pelo LabVIEW. A figura 39 exemplifica as duas formas de conexões entre equipamentos que utilizam o software LabVIEW.

Tipo de Conexão	Programa de Interface	Tipo de Interface	Equipamentos Conectáveis	Requisito
Conexão LabVIEW com módulos fabricados pela National Instruments	NI-DAQmx	Barramento padrões: USB, PCI, PCI Express, PXI, PXI Express e Ethernet.	Módulos Desenvolvidos pela NI. Exemplos: Multímetros Digitais; Osciloscópios; Analisadores de Sinais de Rádio Frequência; Geradores de Sinais de Rádio Frequência; Geradores de Sinais; Entradas e Saídas Digitais de Alta Velocidade; Chaveadores; Fontes de Tensão Programáveis; Sistemas de Visão; Controles de Movimentos; Reconfiguradores de Entradas e Saídas.	Utilização de equipamentos/Módulos da National Instruments
Conexão LabVIEW com módulos de outros fabricantes	Código de Interface Gerado pelo LabVIEW	Barramento padrões: GPIO, Serial (RS232, RS485, and RS422), USB, VXI, PXI, Ethernet, IEEE 1394, VISA, Modbus, e Servidores OPC .	Módulos de Testes e Controle de Outros fabricantes com Interfaces compatíveis com padrão SECCIONAL de Controle de Equipamentos	Utilização de Módulos que possuam a Interface compatível com Padrão Barramento de Controle de equipamentos Utilização do código de interface para software LabVIEW

Quadro 17 - Programas e tipos de interface do LabVIEW

Fonte: Autor (2012)⁷.

⁶ A National Instruments, NI, disponibiliza em seu site, na página de descrição de seus produtos, quais equipamentos fornece. Disponível em <<http://sine.ni.com/np/app/flex/p/docid/nav-104/lang/pt/fmid/2049/>>. Acesso em: 10 de Julho de 2012.

⁷ A National Instruments, NI, disponibiliza em seu site como conectar o LabVIEW com qualquer equipamento. Disponível em <<http://sine.ni.com/np/app/flex/p/docid/nav-104/lang/pt/fmid/2049/>>. Acesso em: 10 de Julho de 2012.

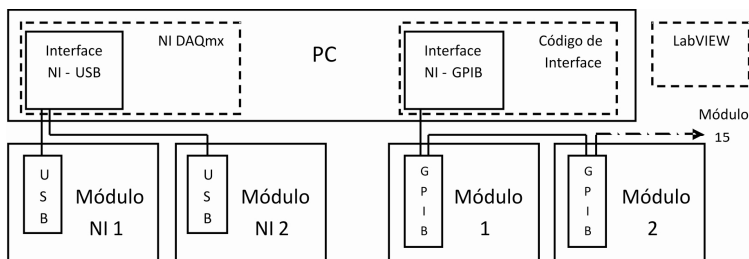


Figura 39 - Tipos de interfaces entre LabVIEW e módulos de testes

Fonte: Autor (2012).

Considerando que existem duas maneiras de conectar os módulos de testes ao software LabVIEW e tais regras de conexão ou interface devem ser seguidas, duas linhas de seleção de módulos para compor o produto serão definidas. No próximo capítulo iremos detalhar a escolha dos módulos que farão parte da solução tecnológica proposta e como tal seleção agregou na escolha da arquitetura modular desta solução.

3.5 SELEÇÃO DOS MÓDULOS DE TESTES E MÓDULOS DE INTERFACE

Os módulos que irão compor a arquitetura modular de painel de testes elétricos de segurança de estatores foram diferenciados pelos conceitos de Módulos Visíveis e Ocultos de Baldwin e Clark (2001). Tais diferenciações determinaram o mapeamento das interfaces entre software e módulos de testes. São elas:

- 1) todo equipamento ou módulo que se destinar a fazer a interface entre software e outros módulos de teste será considerado como Módulo Oculto no projeto, ou seja, sendo eles um padrão de barramento, mudanças em seu funcionamento não irão resultar em alterações no software e no módulo de teste a ele conectado. Serão aceitas como padrões de Barramento as interfaces GPIB, Serial (RS232, RS485 e RS422), USB, VXI, Ethernet, IEEE 1394 e Servidores OPC.
- 2) os módulos de teste que devem seguir uma regra de interface de conexão com o software Integrador do equipamento, o LabVIEW, especificada pelo módulo oculto, serão considerados como Módulos Visíveis.

A figura 40 representa os módulos ocultos e visíveis do projeto.

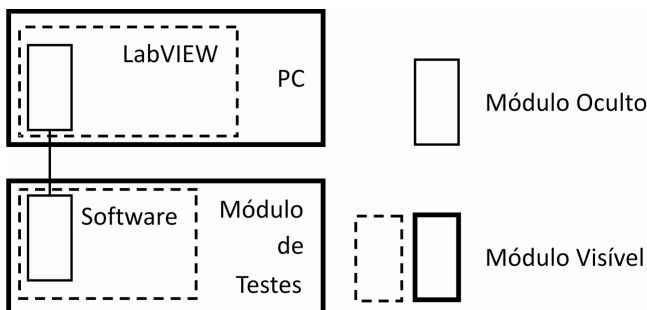


Figura 40 - Mapeamento da interface entre módulos ocultos e visíveis do Projeto

Fonte: Autor (2012).

3.5.1 Regras para seleção dos módulos visíveis e ocultos do projeto

A seleção dos módulos visíveis foi realizada de acordo com a lista de requisitos do produto. Cabe aqui descrever detalhadamente cada uma delas:

- a) cada Método de Teste descrito em lista no item 2.1.4, que foi selecionado para compor a sequência de testes elétricos de segurança de estatores em empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina, deve caracterizar um Módulo Visível da arquitetura do produto;
- b) pela frequente característica da existência no mercado de módulos de teste que aplicam variantes do método de teste principal, ou seja, módulos de teste como os de Resistência de Isolação que geralmente disponibilizam testes de resistência, o método de teste procurado não deverá ser uma função secundária do módulo de teste selecionado;
- c) por se tratar de uma empresa que possui linhas produtivas em inúmeros países, o fabricante do módulo oculto deverá ter fornecimento mundial;
- d) o módulo Visível selecionado não poderá ser uma customização ou série especial do fabricante. Este deve ser caracterizado como módulo de Prateleira. Sua fabricação em massa deve representar um custo inferior ao de módulos customizados;

- e) o Módulo Visível selecionado deverá possuir interface de comunicação padrão para comunicação com módulos ocultos descritos pela NI como opções de interface com o software LabVIEW;
- f) o tempo do método de teste aplicado pelo módulo selecionado deve ser compatível com o método de teste efetuado na versão integral de painel de testes elétricos de segurança de estatores da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina;
- g) se a seleção por um módulo de teste resultar em uma ou mais opções de fornecedor e modelo, a decisão de escolha seguirá os filtros de padronização e por último custo de aquisição.

A figura 41 representa o fluxograma de questionamento que caracteriza a escolha de um módulo visível que irá compor o equipamento de testes elétricos de segurança de estatores de arquitetura modular.

Para a seleção dos módulos ocultos, etapa subsequente à seleção dos módulos visíveis, considerando que os módulos visíveis selecionados vêm do fabricante com seus respectivos módulos ocultos pré-definidos, seja pelo próprio fabricante ou por opção de escolha do comprador, a seleção foi direcionada aos tipos de módulo que a NI disponibiliza no mercado. Algumas variantes de tipos de interface que a NI disponibiliza no mercado foram levadas em consideração. Por exemplo, na falta ou pelo custo elevado de um módulo GPIB de interface com o LabVIEW pode-se utilizar uma interface USB com conversão para GPIB, se esta representar uma vantagem em um de dois aspectos, disponibilidade ou custos. A Figura 42 exemplifica a descrição dos tipos de interface disponíveis em um módulo de teste elétrico disponível no mercado, ou seja, os módulos ocultos de interface que são disponibilizados nos módulos visíveis de teste.

Além dos módulos ocultos para interface entre módulos visíveis de teste e suas interfaces, também foi necessário selecionar o módulo oculto para interface com o módulo visível de entrada e saída de sinais que tem a função de controlar os componentes elétricos que fazem o chaveamento das tensões de teste até o estator e também gerenciar o disparo seguro dessas tensões. Tal seleção seguiu o mesmo requisito para escolha dos módulos ocultos de interface entre software e módulos visíveis de testes, ou seja, optou-se por módulos da NI.

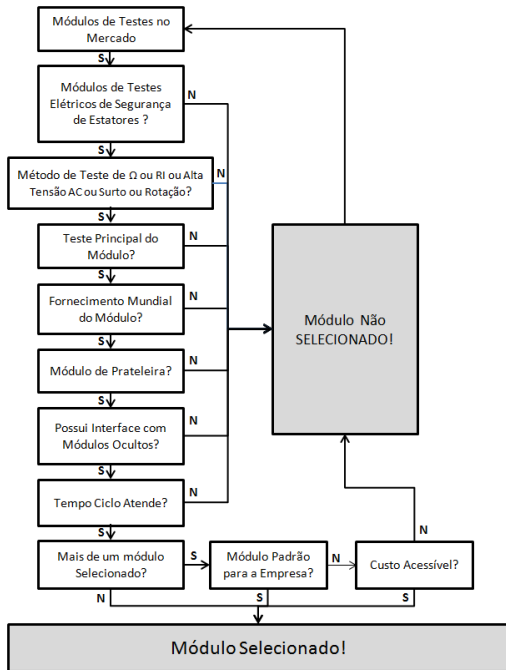


Figura 41 - Fluxograma para seleção dos módulos visíveis
 Fonte: Autor (2011).

General Specifications	
Mechanical	Bench or rack mount with tilt up front feet
Dimensions	3U (WxHxD) 16.93 x 5,24 x 19,69 in. (430 x 133 x 500 mm)
Interface	USB/RS-232 Standard, GPIB, Ethernet, Data Storage (RS-485), Printer Port Optional
Memory	Up-to 10.000 Steps can be linked
Multilingual	Choose from English (Default) and Chinese
Display	Color TFT LCD. 800 x 480 Resolution. Choose from 4 different color settings

Figura 42 - Especificações gerais do equipamento OMNIA II 8204 da Associated Research
 Fonte: Nota ao final⁸.

Os itens 3.5.2 e 3.5.3 desta pesquisa expõem respectivamente os módulos visíveis e ocultos selecionados.

⁸ A Associated Research disponibiliza em seu site, na página de descrição de seus produtos, os manuais e fotos dos equipamentos que disponibiliza. Disponível em <<http://www.asresearch.com/products/omnia2/Default.aspx>>. Acesso em: 12 de Julho de 2012.

3.5.2 Resultado da seleção dos módulos visíveis

Quatro módulos visíveis de teste foram selecionados para executar os cinco métodos de teste listados como necessários para compor a arquitetura modular do painel de testes elétricos de segurança de estatores. Um dos módulos selecionados assumiu dois elementos funcionais e será responsável por aplicar os métodos de teste de Resistência de Isolação e Alta Tensão AC, devido ao fato que ambos os métodos de teste são variações do método de teste de Fuga de Corrente. Com exceção dos módulos visíveis de teste de surto e sentido de rotação, os demais módulos selecionados passaram positivamente pelos questionamentos do fluxograma para seleção de módulos visíveis e atenderam simultaneamente aos últimos dois questionamentos, isto é, são módulos já utilizados nos laboratórios da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina e possuem custo acessível para a solução tecnológica.

Para aplicar o método de teste de resistência ôhmica foi selecionado o Multímetro Digital modelo DMM4040 do fornecedor TEKTRONIX. A figura 43 exibe o equipamento selecionado.



Figura 43 - Multímetro digital DMM4040 da TEKTRONIX

Fonte: Nota ao final⁹.

Segundo Marció (2011, p. 18) esse modelo possui mostrador de seis dígitos após a vírgula, pode ser operado remotamente via GPIB, RS-232 ou Ethernet. Além disso, o código de interface para a sua comunicação com o software LabVIEW é disponibilizado pelo fabricante em seu site na Internet. Outro destaque é a medição de Resistência ôhmica tanto a dois quanto a quatro fios, que evita a influência da impedância dos

⁹ A TEKTRONIX disponibiliza em seu site, na página de descrição de seus produtos, os manuais e fotos dos equipamentos que disponibiliza. Disponível em <1http://www.tek.com/digital-multimeter/dmm4050-4040 >. Acesso em: 10 de Julho de 2012.

cabos que ligam o instrumento à cabine de testes de estatores (MARCÍÓ, 2011).

Para aplicar os métodos de teste de Resistência de Isolação e Alta Tensão AC o equipamento escolhido foi o HYPOT ULTRAIII 7650 da Associated Research. Esse módulo é capaz de realizar três métodos de teste de fuga de corrente e um teste de continuidade. Como somente dois destes quatro possíveis métodos de teste serão aplicados para avaliar o estator no processo fabril, os demais não serão utilizadas no equipamento proposto. Com esse módulo de teste assumindo dois elementos funcionais, as funções de testar Resistência de Isolamento e Alta Tensão serão consideradas como módulos visíveis do equipamento, ou seja, o equipamento selecionado permite que, através do software de integração, o “LabVIEW”, e seus módulos ocultos, as interfaces, os métodos de teste sejam executados em momentos diferentes no processo de testes e independentes um do outro, caracterizando a sua modularidade. A figura 44 exibe o equipamento selecionado.



Figura 44 - HIPOT ULTRA III 7650 da Associated Research

Fonte: Nota ao final¹⁰.

Como módulo responsável por aplicar o método de testes de Surto foi selecionado o modelo DWX-05 da Kokusai. Esse modelo é utilizado em laboratório piloto de testes de estatores da empresa do ramo metal mecânico do Norte do Estado de Santa Catarina, não atendeu aos requisitos de custo do projeto e mesmo assim foi selecionado por dispor de uma função de testes que permite aplicar o método de testes denominado descargas parciais. Era uma expectativa do time responsável pelo projeto em aplicar o método de descargas parciais dentro do método de teste de Surto com o objetivo de segregar estatores com fios das bobinas principal e auxiliar fora de ranhura e próximos ao

¹⁰ A Associated Research disponibiliza em seu site, na página de descrição de seus produtos, os manuais e fotos dos equipamentos que disponibiliza. Disponível em <<http://www.asresearch.com/products/hypotultra3/7650.aspx>>. Acesso em: 12 de Julho de 2012.

pacote do estator. Mais adiante serão expostos os resultados dessa avaliação, que culminou com a visita à fábrica da Kokusai em Tóquio, Japão. A figura mostra o DWX-05 da Kokusai.



Figura 45 - Módulo de teste de surto DWX-05 da Kokusai
Fonte: Nota ao final¹¹.

Para o módulo visível que irá aplicar o método de teste elétrico de sentido de rotação, o equipamento escolhido foi o THG-3S da GlobalMag. A figura 46 mostra o equipamento escolhido. Esse equipamento não foi selecionado por ser de fornecimento global, nem

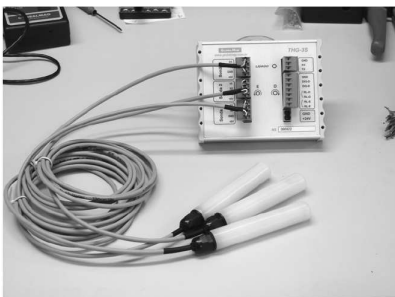


Figura 46 - Conjunto de equipamentos que formam o módulo THG-3S de teste de rotação fabricado pela Globalmag
Fonte: Marció (2011).

pela utilização padrão na empresa do ramo metal mecânico do norte do Estado de Santa Catarina. Mas sim por ter baixo custo e por empregar sensores Hall para detecção do sentido do campo magnético induzido pelo estator.

¹¹ A Kosusai Co. Ltd. disponibiliza em seu web site, na página de descrição de seus produtos. Disponível em http://www.kokusaikk.co.jp/english/product/product_08.html>. Acesso em: 10 de Julho de 2012.

Por último, o equipamento Bloco de Contatos da NI foi selecionado para interligar as diversas entradas e saídas ao software integrador LabVIEW e esses farão parte do pacote de troca de sinais entre usuário, equipamento e software. A figura 47 exemplifica um dos dois módulos visíveis de controle que farão parte do equipamento e serão fornecidos pela NI.

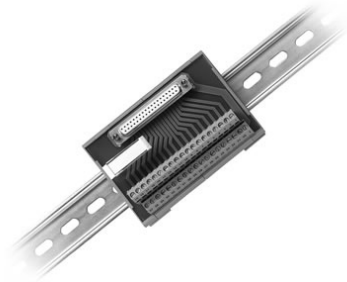


Figura 47 - Módulo bloco de contatos da NI
Fonte: Nota ao final.¹²

3.5.3 Resultado da seleção dos módulos ocultos

A partir do tipo de padrão de interface, ou módulos ocultos de comunicação que os módulos visíveis selecionados possuem, foi possível montar o quadro de módulos ocultos necessários para atender a necessidade de conectar os módulos visíveis ao software Integrador, o “LabVIEW”. Para a escolha dos módulos ocultos de integração com o módulo visível software “LabVIEW” foi necessário escolher o que de comum em termos de módulos ocultos os módulos visíveis de testes selecionados dispõem que possa reduzir o número de módulos ocultos necessários para conectá-los ao LabVIEW. O quadro 18 relaciona o resultado desta seleção e os motivos que levaram a definir o módulo oculto selecionado.

¹² A National Instruments, NI, disponibiliza na página de descrição de seus produtos fotos e tipos dos blocos de contatos. Disponível em <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/11619>. Acesso em: 12 de Julho de 2012.

Módulo Visível	Equipamento Selecionado	Módulo Oculto Disponibilizado					Módulo Oculto Selecionado	Motivo da Escolha
Resistência ôhmica	DMM4040	RS 232	GPIB	Ethernet	-	-	GPIB	Opção USB > GPIB permite a conexão em série de até 15 equipamentos. RS 232 fica disponível para demais módulos sem outras opções de conexões
Resistência de Isolação								
Alta Tensão AC	HIPOT ULTRA III 7650	RS 232	GPIB	Ethernet	RS485	-		
Surto	DWX-05	RS 232	-	Ethernet	-	-	RS 232	Ethernet requer investimento extra
Sentido de Rotação	THG-3S	RS 232	-	-	-	-		Única Opção de Interface
Comando e Segurança do Painel	Placa NI I/O PCI 6514	-	-	-	-	PCI	PCI	Módulo Padrão NI para conexão do LabVIEW com entradas e saídas físicas dos equipamentos a serem conectados

Quadro 18 - Seleção dos módulos ocultos
Fonte: Autor (2012).

O primeiro dos módulos ocultos selecionado beneficia o projeto em termos de custos de aquisição de equipamentos. Considerando que a NI disponibiliza no mercado um equipamento conversor USB para GPIB é possível utilizar as inúmeras portas de saída USB disponíveis em computadores pessoais ou industriais e, através da conversão do módulo GPIB-USB-HS e da utilização de um ou mais cabos GPIB X2, ambos da NI, conectar de um a quinze módulos visíveis, que possuam módulos ocultos padrão GPIB, a uma única porta USB. A figura 46 ilustra os dois componentes selecionados para transformar uma porta padrão USB para padrão GPIB e conectar os módulos visíveis DMM4040 e Hipot Ultra III ao software integrador LabVIEW.



Figura 48 - Conversor GPIB-USB-HS e cabo GPIB X2 da NI
Fonte: Nota ao final¹³.

¹³ A National Instruments, NI, disponibiliza em seu site, na página de descrição de seus produtos. Disponível em < <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/1281>>. Acesso em: 10 de Julho de 2012.

O segundo dos módulos ocultos selecionado atenderá a necessidade de conectar ao LabVIEW os módulos visíveis de testes de sentido de rotação e de surto. Sua escolha partiu de dois preceitos: o primeiro sendo como a única forma de conexão padrão disponível no módulo visível de teste de sentido de rotação e o último por ser a opção padrão de interface fornecida no módulo visível de teste de surto, sendo que para este módulo uma segunda escolha oneraria os investimentos em equipamentos do projeto. Para essa necessidade de conexão via módulo oculto padrão RS232 se faz necessário adquirir um módulo que tenha no mínimo duas portas RS232 ou um cabo de conexão que no mínimo duplique a porta de um módulo RS232 com uma única porta. A figura 49 demonstra os equipamentos selecionados para conexão dos módulos visíveis de Sentido de Rotação e Surto ao LabVIEW via padrão de interface RS232.

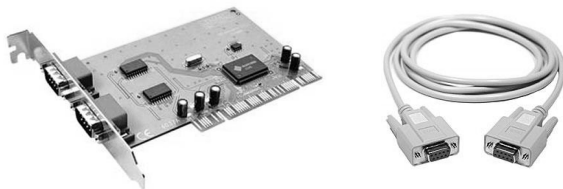


Figura 49 - Módulo ou placa RS232 com duas portas e cabo RS232
Fonte: Nota ao final¹⁴.

O último dos módulos ocultos selecionado tem o objetivo de interligar o módulo visível LabVIEW, o software integrador, ao módulo visível bloco de contatos, que é responsável por controlar o funcionamento do painel modular e também interagir de forma segura e visível com o usuário final do equipamento. Tal necessidade foi suprida com a seleção de um módulo oculto que permite a interface entre sinais virtuais de entrada e saída digitais do software com sinais físicos de trinta e duas entradas e saídas do módulo denominado bloco de contatos.

¹⁴ Pesquisa por “Placas RS232 com 2 portas” e “Cabos RS232” no Google. Disponível em < [https:// https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=ii](https://www.google.com.br/imghp?hl=pt-BR&tab=ii)>. Acesso em: 12 de Julho de 2012.

Tal interface é representada na figura 50 e a figura 51 exemplifica o módulo oculo NI PCI 6514 da NI.

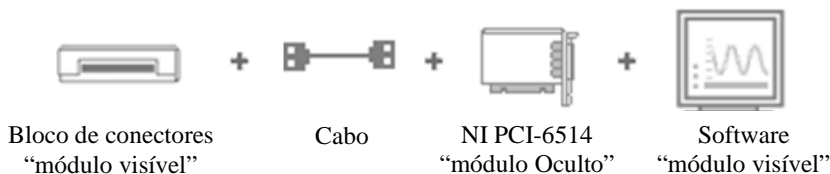


Figura 50 - Conexão entre software e entradas e saídas do painel

Fonte: Nota ao final¹⁵.

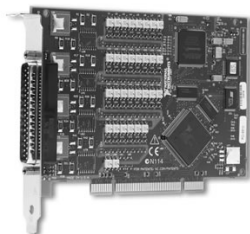


Figura 51 - Módulo ou placa NI PCI-6514 com 32 entradas e saídas

Fonte: Nota ao final¹⁶.

Depois de selecionados os módulos visíveis e ocultos da arquitetura modular do projeto, uma resposta ou entrega ao projeto macro de desenvolvimento do equipamento a ser desenvolvida foi sugerida para avaliar a sua continuidade. Seria possível atingir os mesmos resultados de tempo ciclo de execução dos métodos de testes de segurança elétrica de um estator da versão integrada?

3.5.4 Desempenho técnico dos módulos visíveis e ocultos

Para responder ao questionamento descrito no item 3.5.3 desta pesquisa, a liderança do projeto decidiu por:

¹⁵ A National Instruments, NI, disponibiliza as formas de conexão da Placa NI PCI-6514. Disponível em < <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/13575>>. Acesso em: 12 de Julho de 2012.

¹⁶ A National Instruments, NI, disponibiliza imagens da Placa NI PCI-6514. Disponível em < <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/13575>>. Acesso em: 12 de Julho de 2012.

- 1) alocar Mão de Obra especializada em Programação LabVIEW e iniciar o desenvolvimento do software baseando-se no software da versão integrada de equipamento de testes utilizada nas linhas de produção em massa de estatores da empresa do ramo metal mecânico do norte do Estado de Santa Catarina;
- 2) adquirir o software e o Hardware necessário para testar as interfaces com módulos visíveis disponíveis em laboratórios. Fato marcado pela aquisição do módulo visível de software e sua licença de utilização do LabVIEW e dos módulos ocultos de interface e;
- 3) gerar a primeira certificação do processo de desenvolvimento do produto para testar o desempenho técnico da solução tecnológica proposta.

Com a aquisição de um computador para utilização em ambiente fabril, do software LabVIEW e sua licença, dos equipamentos de comunicação com os módulos de testes, com o empréstimo de equipamentos utilizados nos diversos laboratórios da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina e a geração da primeira tela do software do painel modular de testes elétricos de segurança de estatores, demonstrada na figura 52, foi possível testar individualmente a eficiência de cada equipamento selecionado para aplicar os métodos de testes de avaliação de segurança elétrica do estator descritos anteriormente nesta pesquisa.

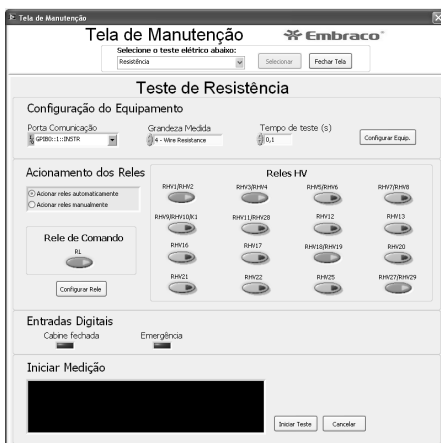


Figura 52 - Tela de manutenção desenvolvida em LabVIEW
Fonte: Marcíó (2011).

A certificação protótipo do produto foi realizada e sendo o resultado considerado satisfatório, o projeto foi liberado para seguir as próximas etapas de seu desenvolvimento. A Figura 53 demonstra os resultados da certificação protótipo que garantiu a continuação do desenvolvimento da solução tecnológica modular de testes elétricos de segurança de estatores. Vale salientar que os resultados obtidos na certificação protótipo do produto foram considerados também como resultados para a certificação protótipo dos equipamentos, fornecedores e processos, ou seja, da maneira com que são empregados esses equipamentos.

RESULTADO DA CERTIFICAÇÃO PROTÓTIPO DO PRODUTO						
Descrição do Equipamento / Produto						
Produto	ESTATOR INDUTIVO					
Equipamento	MÓDULOS VISÍVEIS E OCULTOS DO EQUIPAMENTO					
Operação	TESTES ELÉTRICOS DE SEGURANÇA DO ESTATOR					
Fabricação	EMPRESA DO RAMO METAL MECÂNICO DO NORTE DO ESTADO DE SANTA CATARINA					
Projeto (idealização e coordenação)	Anderson Ricardo Pacheco					
Participante (Estagiário)	Leandro Sacht – Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Udesc - Joinville					
Responsável pela Avaliação Final	Anderson Ricardo Pacheco					
Avaliar Características de Desempenho do Equipamento						
Ensaio	Descrição do ensaio		Responsável	Setor	Prazo	
A	1	Teste de Resistência Ôhmica	Leandro	P&D	-	
	2	Teste de Alta Tensão CA	Leandro	P&D	-	
	3	Teste de Resistência de Isolação	Leandro	P&D	-	
	4	Teste de Surto	Leandro	P&D	-	
	5	Teste de Rotação	Leandro	P&D	-	
Resultados Esperados						
Ensaio	Descrição	Especificação	Índice	Meio de Medição	Medições	
A	1	Tempo Ciclo de teste para avaliação da Resistência Ôhmica das bobinas principal e auxiliar	1 seg. para testar $15\Omega \pm 5\%$	OK	Aplicativo do Software LabVIEW	10
	2	Tempo Ciclo de teste para avaliação de Alta Tensão CA	1 seg. para testar Limite máximo de fuga de Corrente de 0,250 mA	OK	Aplicativo do Software LabVIEW	10
	3	Tempo Ciclo de teste para avaliação da Resistência de Isolação	1 seg. para testar Limite Mínimo de 10 M	OK	Aplicativo do Software LabVIEW	10
	4	Tempo Ciclo de teste para avaliação do Surto das bobinas principal e auxiliar	1 seg. para testar cada bobina com limites máximos de Área=20% e Dif. de Área=20%	OK	Aplicativo do Software LabVIEW	10
	5	Tempo Ciclo de teste para avaliação de Rotação do Campo Magnético do Estator	1 seg. para testar sentido horário de direção do campo magnético gerado pelo Estator Indutivo	OK	Aplicativo do Software LabVIEW	10

Figura 53 - Parte da certificação protótipo do produto
Fonte: Autor (2011).

Considerando os resultados obtidos na certificação protótipo do produto e o aval da liderança do projeto para continuar com o desenvolvimento, a partir da seleção no mercado de módulos de testes

elétricos e suas interfaces, os módulos visíveis e módulos ocultos, foi possível determinar qual arquitetura modular de produto será empregada na fabricação do protótipo do painel modular de testes.

3.6 DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA

A definição da arquitetura modular representa a etapa de preparação do projeto global descrito por Pahl e Beitz (2005) como a quinta etapa do procedimento de desenvolvimento de produtos modulares. Essa etapa aconteceu no final da fase de conceitualização ou concepção do projeto, conforme descrito em Ulrich (1995, p. 434) e, simultaneamente atendeu a dois requisitos descritos em Fixon (2003), uma demanda gerada pela sua ausência no mercado e de acordo com a tecnologia de módulos de testes disponível neste mesmo mercado.

Para definir a arquitetura modular algumas etapas foram essenciais nesta pesquisa, sendo elas:

- 1) definir quais métodos de teste são necessários para avaliar o sistema de isolamento de um estator;
- 2) pesquisar quais métodos de teste estão disponíveis no mercado em forma de módulo de teste;
- 3) escolher o procedimento de desenvolvimento de produtos modulares;
- 4) determinar os requisitos do produto modular a ser desenvolvido;
- 5) desenvolver a estrutura funcional do painel modular;
- 6) selecionar o software Integrador dos módulos de testes e conhecer como interligá-los;
- 7) definir uma regra para a seleção dos módulos de teste que foram classificados como módulos visíveis do projeto;
- 8) selecionar os elementos comuns entre módulos de teste e software integrador através de uma regra de padronização de interfaces, ou seja, dos módulos ocultos;
- 9) testar o desempenho técnico dos módulos visíveis e ocultos através da interligação entre software e módulos de testes;
- 10) gerar o modelo físico do produto.

Os itens 3.6.1 e 3.6.2 desta pesquisa irão relatar a última das etapas que levou a definição da arquitetura modular do produto.

3.6.1 Modelo físico do painel modular de testes elétricos de segurança

Após a seleção de três módulos ocultos, sendo eles as placas RS232, GPIB e PCI-6514, e da análise do formato físico de suas conexões, foi possível elaborar o modelo físico final do produto. Fixon (2003, p. 5, tradução nossa) descreve “o modelo físico como uma descrição consistente da montagem e das partes de um sistema”. A figura 54 mostra o modelo físico final da arquitetura modular do painel de testes elétricos de segurança de estatores.

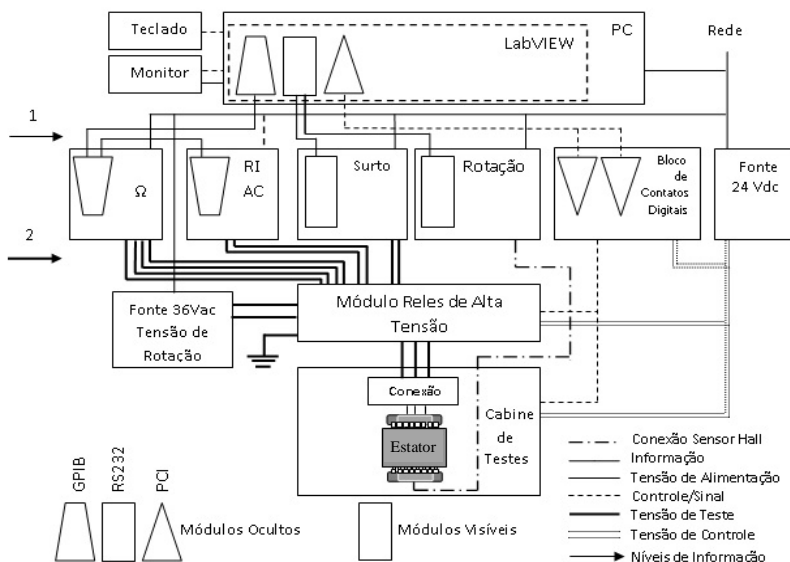


Figura 54 - Modelo físico do painel modular de testes elétricos de segurança de estatores

Fonte: Autor (2012).

Em princípio, olhando pelo número de componentes, o resultado do modelo físico da arquitetura proposta resulta em um número maior do que o descrito no equipamento utilizado como comparativo de arquitetura integral de painel de testes elétricos de segurança. Isso ocorre devido à não existência de um componente comum capaz de interpretar os dados de tensão e corrente para todos os métodos de testes elétricos, característica comum de desempenho global de uma arquitetura integrada de produtos.

No item 3.6.2 deste capítulo o modelo físico resultante da escolha dos módulos visíveis e ocultos do produto finalmente descreve de que forma as variadas conexões entre os elementos físicos levaram a determinar o tipo de arquitetura modular do produto.

3.6.2 Grupos distintos de conexões caracterizam o tipo de arquitetura modular do painel de testes elétricos de estatores

No produto painel modular de testes elétricos de segurança de estatores, cada módulo visível de teste terá que, a partir de um pacote de informações recebidas do software, tais como tensão de teste, tempo de teste, limites mínimos e máximos de aprovação de teste e liberação do teste, execução das funções iniciar, aplicar os parâmetros, julgar o resultado e enviar o resultado do teste ao software integrador. Esse pacote de informações entre software e módulo visível descreve o nível 1 de informações do equipamento, no qual três grupos distintos de conexões são visíveis no modelo físico do produto. O primeiro desses grupos foi formado pelos componentes físicos do produto que tem em comum a interface de GPIB.

O GPIB, barramento de interface de uso geral, também conhecido como HP-IB, Hewlett-Packard interface de barramento, foi desenvolvido para permitir a comunicação entre vários instrumentos e equipamentos na direção de um ou mais controles mestres. Este é capaz de conectar 15 equipamentos através de um barramento comum e de três operações distintas, controlar, ouvir ou falar. Cada equipamento interligado é capaz de operar apenas uma das funções e o controle mestre, o software integrador, determina qual aparelho irá efetuar a função de fala ou escuta em um determinado espaço de tempo (Nota ao final¹⁷).

A figura 55 representa o conjunto de componentes que formam o primeiro grupo de interface de conexão do produto.

¹⁷ O Google, através de uma pesquisa pelo termo GPIB trás como resposta uma série de informações a respeito. Disponível em <http://www.tscm.com/ieec-488.pdf>. Acesso em: 15 de Julho de 2012.

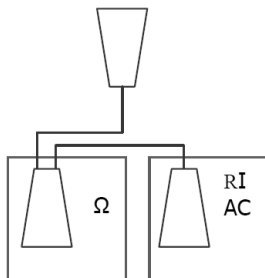


Figura 55 - Grupo de componentes interligados por interface “GPIB”
Fonte: Autor (2012).

O segundo grupo físico de conexões é formado pelos componentes físicos do produto que tem em comum a interface RS232.

O RS232, padrão recomendado 232, criado pela EIA, Associação de Indústrias Eletrônicas, e descrito na norma EIA 232, foi criado nos anos 60 e representa um protocolo de comunicação serial entre equipamentos onde o nível de tensão, temporizações, função de cada sinal e conexões físicas determinam um padrão (Nota ao final¹⁸).

A figura 56 representa o conjunto de componentes que formam o segundo grupo de interface de conexão do produto.

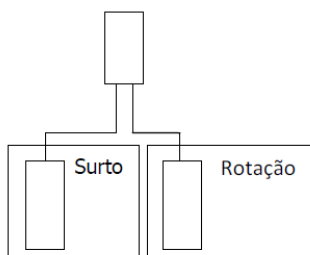


Figura 56 - Grupo de componentes interligados por interface RS232
Fonte: Autor (2012).

¹⁸ O Google, através de uma pesquisa pelo termo RS232 trás como resposta uma série de informações a respeito. Disponível em < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAMYcAI/protocolos-rs232-rs485#>>. Acesso em 15 de Julho de 2012.

O terceiro e último grupo se caracteriza pelos componentes físicos do produto que têm em comum a interface PCI 6514 ou Interconexão de Componentes Periféricos 6514 para conexão digital de entradas e saídas. Apesar das interfaces anteriormente escolhidas estarem interligadas a uma placa também padrão PCI, ou seja, interface RS232 conectadas ao barramento PCI e interface GPIB conectada via conversor USB para GPIB em interface USB também ligada ao barramento PCI do computador, existe uma diferenciação clara entre elas no que diz respeito a regras de conexões e tipo de sinal que flui nestas interfaces. A interface PCI 6514 serve para interligar digitalmente, ponto a ponto, os sinais lógicos de entradas e saídas físicas do equipamento ao software integrador, enquanto as demais interfaces, RS232 e GPIB, servem para transmitir os sinais de informação entre o software e módulos visíveis de testes. A figura 57 representa o conjunto de componentes que formam o segundo grupo de interface de conexão do produto.

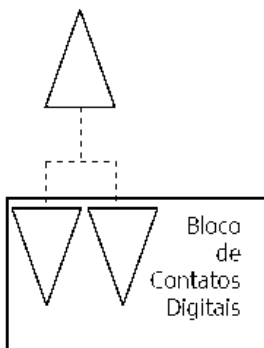


Figura 57 - Grupo de componentes interligados por interface PCI 6514

Fonte: Autor (2012).

Considerando que a seleção dos módulos ocultos responsáveis por interligar os módulos visíveis de teste e de controle do equipamento ter resultado em três diferentes grupos de interface, onde cada componente de um grupo não pode migrar para outro grupo, a não ser que assuma outro módulo de interface, por questões físicas de conexão, o resultado deste modelo físico de produto se enquadra nos conceitos de Arquitetura Modular do tipo Ranhura descrito por Ulrich (1995). A Figura 58 representa a arquitetura modular do tipo ranhura de Ulrich (1995) alterada para representar a arquitetura modular de painel de testes

elétricos de segurança para estatores a ser utilizada na construção do protótipo.

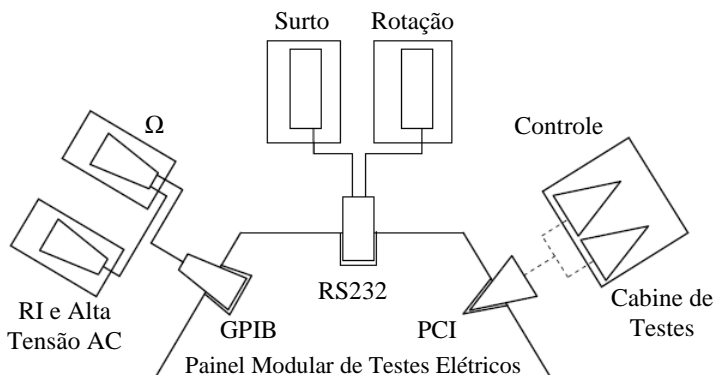


Figura 58 - Arquitetura modular de ranhura para painéis de testes elétricos de segurança de estatores

Fonte: Adaptado de Ulrich (1999).

3.7 PROJETO PRELIMINAR

A última etapa do procedimento de desenvolvimento do painel modular de testes elétricos foi marcada pela entrega de dois documentos que irão auxiliar na fabricação do equipamento. São eles:

- 1) Projeto elétrico do equipamento, que gerou a lista de componentes elétricos que farão parte dos módulos visíveis de controle e alta tensão, e;
- 2) Projeto mecânico do equipamento, que disparou as atividades de fabricação dos componentes do módulo visível da cabine de teste de estatores.

O manual de funcionamento do software não foi disponibilizado devido o fato do software não estar em sua versão final e depender da finalização da construção do equipamento para que os testes e as correções necessárias viabilizem a conversão do aplicativo em código fonte para a versão em executável. Tal falta não impediu a construção do equipamento.

As figuras 59, 60 e 61 representam respectivamente as entregas dos documentos que marcaram o início do processo de montagem do painel modular de testes, descrito no capítulo 4 dessa pesquisa.

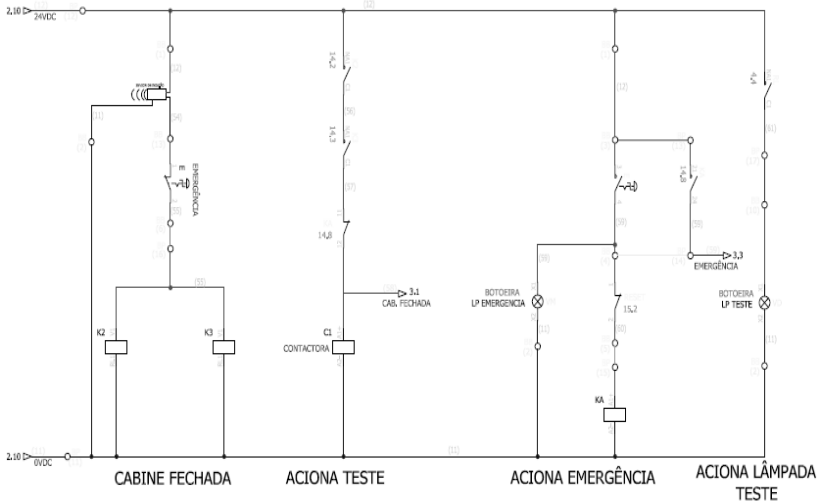


Figura 59 - Parte do projeto elétrico do módulo visível de controle
 Fonte: Marció (2011).

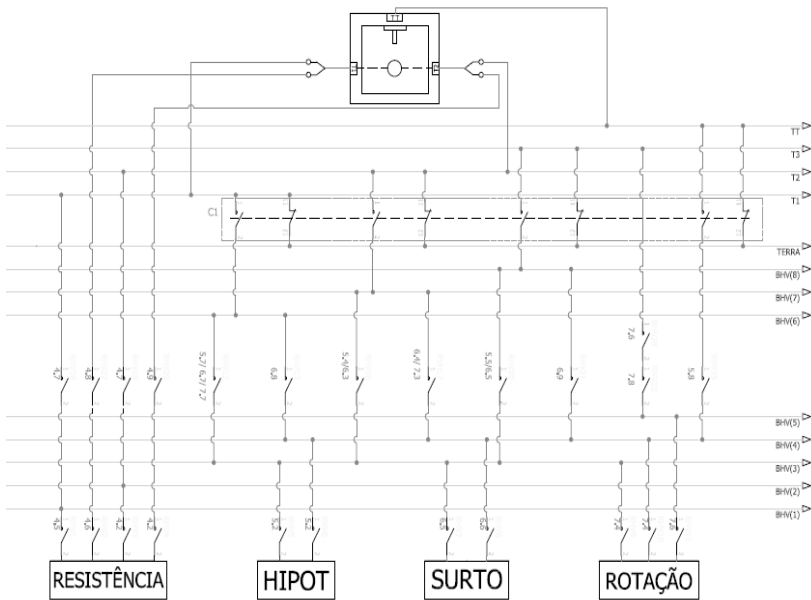
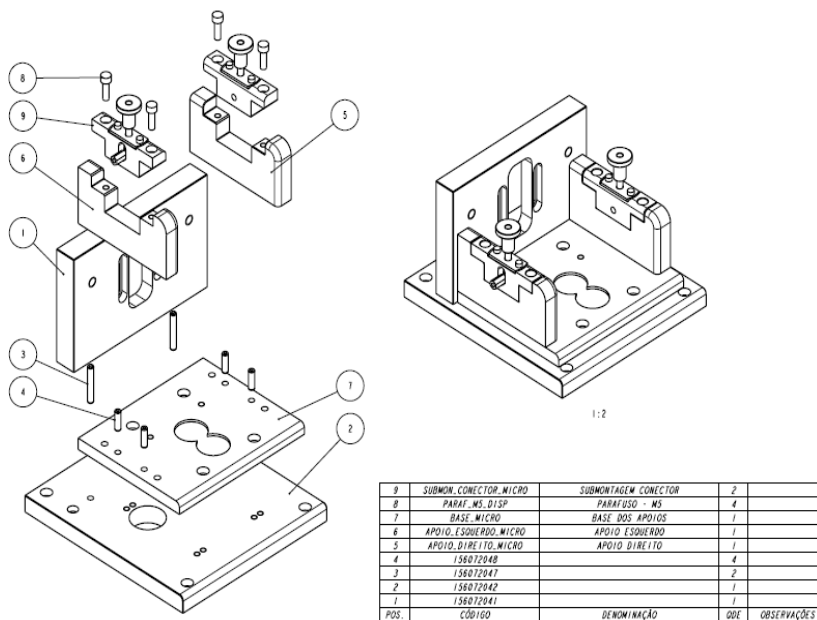


Figura 60 - Parte do projeto elétrico do módulo visível de alta tensão
 Fonte: Marció (2011).



9	SUBMOM. CONECTOR MICRO	SUBMONTAGEM CONECTOR	2	
8	PARAF. MS. DISP	PARAFUSO - MS	4	
7	BASE MICRO	BASE DOS APOIOS	1	
6	APOIO ESQUERDO MICRO	APOIO ESQUERDO	1	
5	APOIO DIREITO MICRO	APOIO DIREITO	1	
4	158072048		4	
3	158072047		2	
2	158072042		1	
1	158072041		1	
POS.	CODIGO	DEMONINAÇÃO	QDE	OBSERVAÇÕES

Figura 61 - Parte dos projetos mecânicos do módulo visível da cabine de testes
Fonte: Marció (2011).

4 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

A fase de conversão do processo de desenvolvimento do painel modular de testes elétricos de segurança de estatores foi caracterizada por alguns eventos importantes. O primeiro e mais marcante foi a decisão da diretoria do departamento de pesquisa e desenvolvimento pela interrupção do projeto de uma nova plataforma de motor para compressor hermético e conseqüentemente de seu estator e demais projetos envolvidos. Porém, após comprovada a importância em manter o desenvolvimento do novo conceito de painéis de testes elétricos de segurança de estatores, decidiu-se por incorporá-lo ao desenvolvimento do projeto denominado micro compressor hermético. Com essa mudança, a partir da fase de conversão do projeto de desenvolvimento do equipamento, todos os recursos financeiros destinados ao seu desenvolvimento vieram diretamente do projeto do micro compressor. O segundo e não menos importante dos eventos foi a liberação de recursos financeiros e a aquisição de todos os equipamentos necessários para a construção do painel modular de testes elétricos de segurança de estatores do motor do micro compressor. O terceiro e último evento foi a decisão da empresa em implantar a linha piloto de micro compressores e conseqüentemente utilizar o painel modular de testes elétricos proposto nesta pesquisa no processo produtivo de estator para o motor do micro compressor. Tal evento deu ritmo aos desenvolvimentos e inseriu as atividades das fases do processo de desenvolvimento do painel modular dentro do controle diário de atividades do projeto do micro compressor.

Diante da necessidade de atender aos prazos das atividades que culminariam com a implantação do equipamento no processo fabril de estatores, algumas atividades do projeto correram em paralelo e foi necessária a inclusão de dois novos profissionais ao time de desenvolvimento do equipamento. O time do projeto, composto por um líder de desenvolvimento, autor desta pesquisa, e de um estagiário estudante do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina, responsável por desenvolver o software integrador do equipamento, incorporou a participação parcial de um profissional de desenho de projetos, responsável por projetar a parte mecânica do módulo denominado cabine de testes, e de um profissional de montagem de equipamentos elétricos, responsável em montar os módulos visíveis e ocultos na estrutura mecânica escolhida para o equipamento.

Neste capítulo da pesquisa relata-se o resultado do trabalho das principais atividades da fase de conversão do processo de

desenvolvimento do produto, ou seja, o desenvolvimento da versão final software executável, a montagem física do equipamento e posteriormente a liberação para os testes iniciais.

4.1 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE A PARTIR DA ESTRUTURA FUNCIONAL

Com o intuito de diminuir o impacto no uso das telas de interface entre usuário e o novo equipamento, ou seja, as telas do programa, o padrão visual de interface adotado seria similar ao da versão de telas do software utilizado na versão integral de painel empregada nas linhas de produção em massa de estatores da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina. A figura 62 demonstra uma das telas de interface entre usuário e equipamento da versão integral, do fornecedor Schleich, cujo painel de testes elétricos de segurança de estatores é o mais utilizado em empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina.

The screenshot shows the 'Hauptmenu DSP2000' window with a menu bar (Prüfen, Datenbank, Sollwerte, Setup) and a toolbar. Below is a table with 5 columns: Prüfschritt, Sollwert, Istwert, n.i.O., and Ergebnis. The table contains 11 rows of test data. At the bottom, there are status fields: Typ (Flygt 1), S-Nr. (0), n.i.O. (0), i.O. (1), and Zeit (00:06:40).

Prüfschritt	Sollwert	Istwert	n.i.O.	Ergebnis
Widerstand 1U-2U	3,25 Ohm	3,310 Ohm	0	
Widerstand 1V-2V	3,25 Ohm	3,320 Ohm	0	
Widerstand 1W-2W	3,25 Ohm	3,315 Ohm	0	
Widerstand 5U-6U	3,25 Ohm	3,318 Ohm	0	
Widerstand 5V-6V	3,25 Ohm	3,318 Ohm	0	
Widerstand 5W-6W	3,25 Ohm	3,325 Ohm	0	
Stoßspannungsprüfung Prüfschritt 1	1000 V	1,793 kV	0	
Stoßspannungsprüfung Prüfschritt 1	1000 V	0,823 kV	0	
Stoßspannungsprüfung Prüfschritt 3	1000 V	4,329 kV	0	
Stoßspannungsprüfung Prüfschritt 4	1000 V	3,404 kV	0	
Stoßspannungsprüfung Prüfschritt 5	1000 V	3,262 kV	0	
Stoßspannungsprüfung Prüfschritt 6	1000 V	0,566 kV	0	

Typ: Flygt 1 S-Nr.: 0 n.i.O.: 0 i.O.: 1 Zeit: 00:06:40

Figura 62 - Tela principal do equipamento MTC3 do fornecedor Schleich
Fonte: Marció (2011).

Através do ambiente de programação do LabVIEW e da premissa de similaridade de padrão visual com o software do equipamento MTC3 da Schleich deu-se início à construção dos diagramas de bloco e das telas do software do equipamento.

Segundo Marció (2011, p. 24) “o ambiente de programação do LabVIEW é composto por dois ambientes: o diagrama de blocos e o painel

frontal. O painel frontal é o ambiente onde se cria a interface com o usuário, com a possibilidade de simular instrumentos tradicionais. É no painel frontal que o conceito de similaridade com a versão integral foi adotado e é nesse ambiente que se localizam todos os controladores, indicadores, botões, campos de preenchimento, gráficos e tudo o que conecta o software ao usuário. No segundo ambiente, o diagrama de blocos, está a programação em termos de algoritmo. Esses dois ambientes, o painel frontal e o diagrama de blocos, formam aquilo que a National Instruments chamou de Instrumento Virtual (VI)".

A figura 37 do item 3.4.1 desta pesquisa exemplifica os dois ambientes do software LabVIEW que caracteriza um instrumento virtual do LabVIEW.

Através desses ambientes de programação e da estrutura funcional da arquitetura modular do painel de testes elétricos foi possível transformar os elementos funcionais do equipamento nas diversas telas e ações que iriam compor o pacote de instrumentos virtuais que juntos seriam transformados no programa "Testes Elétricos de Estatores.exe", arquivo executável que se instalado no computador do equipamento funciona sem a necessidade do código fonte do programa LabVIEW.

Com o intuito de permitir a modularidade da aplicação dos métodos de testes elétricos no equipamento, o software foi desenvolvido de maneira a permitir ao usuário do equipamento o total controle de inserção, repetição e sequenciamento dos métodos de testes a serem aplicados no estator a ser avaliado. A figura 63 demonstra tal liberdade de escolha e os anexos de C a L desta pesquisa exibem as demais telas do software elaborado.

Marció (2011, p.27) comenta que "uma interface gráfica foi criada para interagir com o operador, na qual funções de cadastro, seleção, exclusão e alteração de modelos de testes elétricos, armazenados em um banco de dados, foram implementadas. Outra funcionalidade desenvolvida foi a possibilidade de configurar, controlar e realizar a aquisição, análise e apresentação de dados, pelo software com o mínimo de interferência do operador".

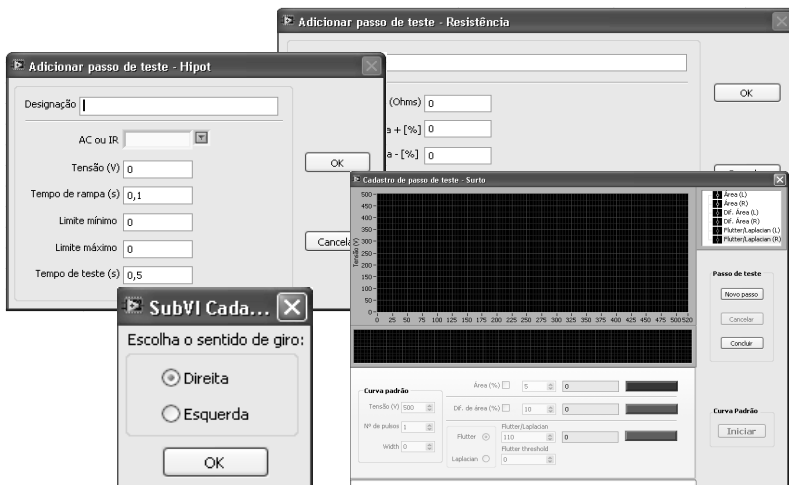


Figura 63 - Telas de adicionar métodos de testes de resistência, hipot, surto e rotação do programa “teste elétrico de estatores.exe”
Fonte: Marció (2011).

Conhecer a sequência de acionamentos dos componentes elétricos que seriam necessários para transmitir os sinais de testes dos módulos visíveis até o estator e também o dos componentes elétricos e mecânicos que compõem o sistema de segurança foi vital para finalizar o programa do equipamento e prioritário para a montagem do mesmo. O projeto desses componentes e as etapas de montagem e fabricação serão detalhados nos itens 4.2 a 4.4 desta pesquisa.

4.2 A MONTAGEM DOS COMPONENTES ELÉTRICOS DO EQUIPAMENTO

A partir do projeto elétrico e da aquisição dos itens que fazem parte da listagem de seus componentes foi possível viabilizar a montagem física dos componentes elétricos dos dois módulos que fazem parte dos componentes elétricos do equipamento. O primeiro deles é o módulo visível de alta tensão, responsável por sequenciar os diversos níveis de tensão que serão aplicados ao estator e medidos de forma a determinar os resultados dos testes aplicados. O segundo é o módulo visível de controle, responsável por gerenciar o acionamento dos componentes do módulo de alta tensão sob o ponto de vista de

segurança de acionamento. A montagem física desses dois módulos será detalhada nos itens 4.2.1 e 4.2.2 desta pesquisa.

4.2.1 Módulo de alta tensão

O módulo visível de alta tensão do equipamento proposto é formado por um número expressivo de relês de alta tensão que são ativados pelo módulo de controle do equipamento. Cada relé adquirido pelo projeto para compor o painel segue os preceitos de não estar acoplado a uma placa eletrônica e permitir a troca rápida em caso de danificação. Essa característica simples permite que em casos de danificação de um relé, a fácil e rápida substituição coloque o equipamento em funcionamento sem maiores danos à capacidade produtiva do painel. A sequência de acionamento dos contatos de cada relé do módulo visível de alta tensão determina uma série de eventos que são disparados pelo programa desenvolvido em labVIEW. Em caso de falha de medição em qualquer um dos métodos de teste aplicados no teste elétrico de segurança do estator, seguir esta sequência de acionamento facilita a identificação do problema e a localização do defeito que leva a manutenção do relé, do seu controle ou do módulo visível de teste que ele interliga ao estator. A figura 65 demonstra a montagem física dos relês que compõe tal módulo.

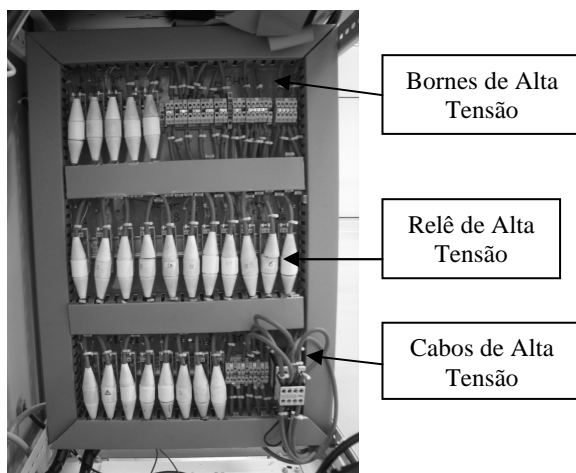


Figura 64 - Módulo de alta tensão montado fisicamente no painel
Fonte: Marció (2011).

Interligar os contatos dos relês de alta tensão às saídas dos módulos visíveis e aos contatos da cabine de testes foi possível através do emprego de cabos de alta tensão e bornes elétricos específicos para essa função. Durante a montagem tomou-se o cuidado de não forçar a estrutura física de cada relê ao ponto de danificá-lo ou influenciar em sua vida útil.

4.2.2 Módulo de controle

O módulo visível de controle da arquitetura modular de painel de testes elétricos de segurança de estatores é formado por todos os elementos que são responsáveis por gerenciar o acionamento do módulo de alta tensão e assegurar a utilização da cabine de testes de estatores dentro das normas técnicas de segurança da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina.

Durante a montagem física dos componentes desse módulo optou-se por posicionar o módulo de controle no verso da placa que posiciona o módulo de alta tensão. Com a opção de aterramento de tal placa de componentes, é possível eliminar uma suposta interferência dos sinais de alta tensão no acionamento dos componentes elétricos do módulo de controle. A figura 65 exibe o módulo de controle montado no verso do módulo de alta tensão do equipamento.

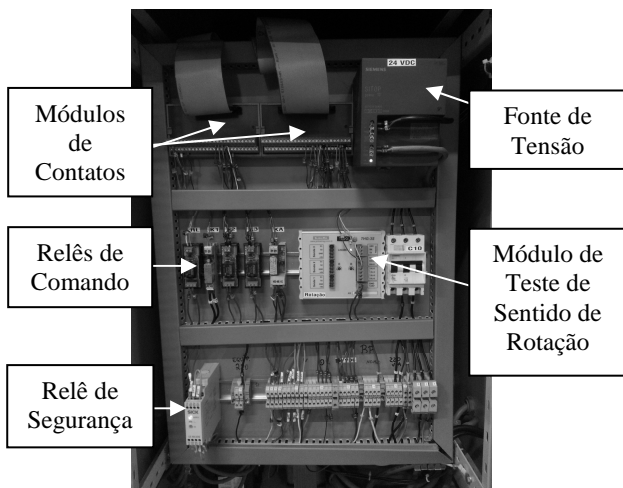


Figura 65 - Módulo de controle montado fisicamente no painel
Fonte: Autor (2012).

Durante a montagem do módulo de controle, decidiu-se por posicionar o módulo visível de teste de sentido de rotação na placa que contém os componentes que fazem parte do módulo visível de controle do equipamento, devido ao formato de sua base que vem própria para instalações em régua de fixação de componentes elétricos.

Parte dos elementos que compõem o módulo de controle foram posicionados no módulo cabine de testes e na caixa de botões posicionada ao seu lado, caracterizando o atendimento de alguns dos requisitos das normas técnicas de segurança da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina. A figura 64 demonstra tal montagem.



Figura 66 - Equipamentos do módulo de controle instalados na cabine de testes
Fonte: Autor (2012).

Um dos itens importantes do módulo de controle que foi instalado na cabine de testes é o sistema de chave codificada de segurança que foi diretamente ligado ao relê de segurança localizado no módulo de controle. Esse possui a função de controlar o acionamento do conjunto de contactores de alta tensão.

Os contactores de alta tensão, demonstrados na figura 67, são especialmente fabricados para suportar níveis de tensão inferiores a cinco mil volts e foram instalados para interligar a cabine de testes com o módulo de relês de alta tensão. Sua função principal função é evitar que o equipamento entre em funcionamento com a tampa de proteção da cabine de testes em situação aberta, detalhes técnicos do projeto e da montagem que serão descritos no item 4.3 desta pesquisa.

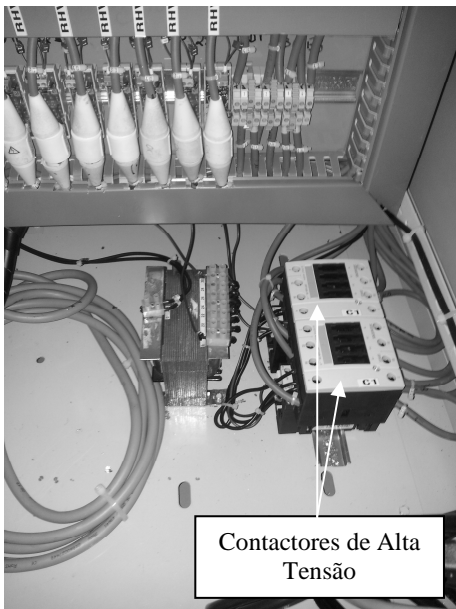


Figura 67 - Contactores de alta tensão

Fonte: Autor (2011).

4.3 A MONTAGEM DOS COMPONENTES MECÂNICOS DO EQUIPAMENTO

Para permitir que a cabine de testes fosse alocada em uma bancada de testes foi necessário desenvolver um sistema de conexão eletricamente isolado dos demais componentes da cabine de testes.

Apesar da bobina do motor do micro compressor ser uma bobina única, ou seja, não possuir enrolamento secundário, a base de testes fabricada para a cabine suporta necessidades futuras de estatores com enrolamento principal e secundário. Outro detalhe importante a mencionar é que o projeto inicial previa a instalação de um sensor do tipo Hall para ser conectado no módulo visível de sentido de rotação. Porém, sendo o motor do micro compressor um motor linear, não há sentido rotacional e sim linear do campo magnético a ser gerado pelo estator.

A caixa de proteção desenvolvida para a cabine de teste foi o último componente da cabine a ser instalada e recebeu a importante missão de alojar o sistema de chave de segurança. Ela engloba a tampa

de proteção, a base de aterramento e a base de sustentação da cabine de testes.

O resultado da união de todos os três projetos mecânicos que fazem parte da cabine de testes pode ser avaliado na figura 68, ou seja, na montagem final de todos os componentes da cabine de testes elétricos de segurança desenvolvida para o painel modular.

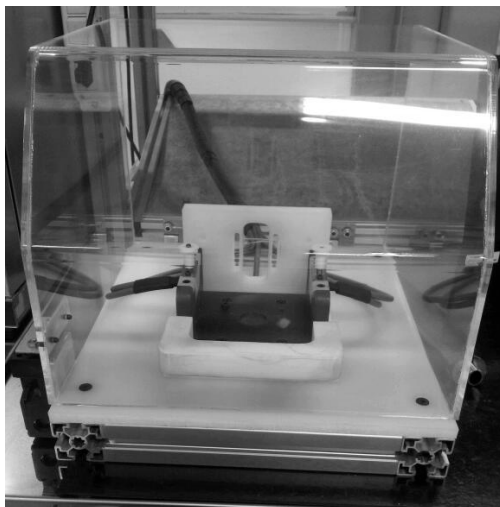


Figura 68 - Cabine de testes elétricos de estatores do painel modular
Fonte: Autor (2011).

Com a montagem física dos módulos visíveis de controle, alta tensão e cabine de testes, foi possível iniciar o processo de inserção de todos os módulos visíveis e ocultos do painel que foram alocados em uma estrutura denominada painel de dezenove polegadas de padrão comercial e de fabricação nacional. Detalhes serão descritos no item 4.4 deste capítulo da pesquisa.

4.4 MONTAGEM DOS MÓDULOS VISÍVEIS E OCULTOS

A montagem física dos módulos visíveis e ocultos da arquitetura modular na estrutura do painel de testes elétricos de segurança e o teste inicial das interfaces marcaram a principal entrega da fase de conversão do projeto. Todos os módulos foram alocados, todas as interfaces foram

testadas e os ajustes finais foram feitos para que, ainda em laboratório, os possíveis erros de projeto ou de montagem fossem corrigidos de acordo com a perfeita combinação entre modelo físico e a estrutura funcional do equipamento. As figuras 69 e 70 representam respectivamente o resultado da montagem de ambos os módulos ocultos e visíveis na estrutura do painel modular de testes elétricos de segurança de estatores.

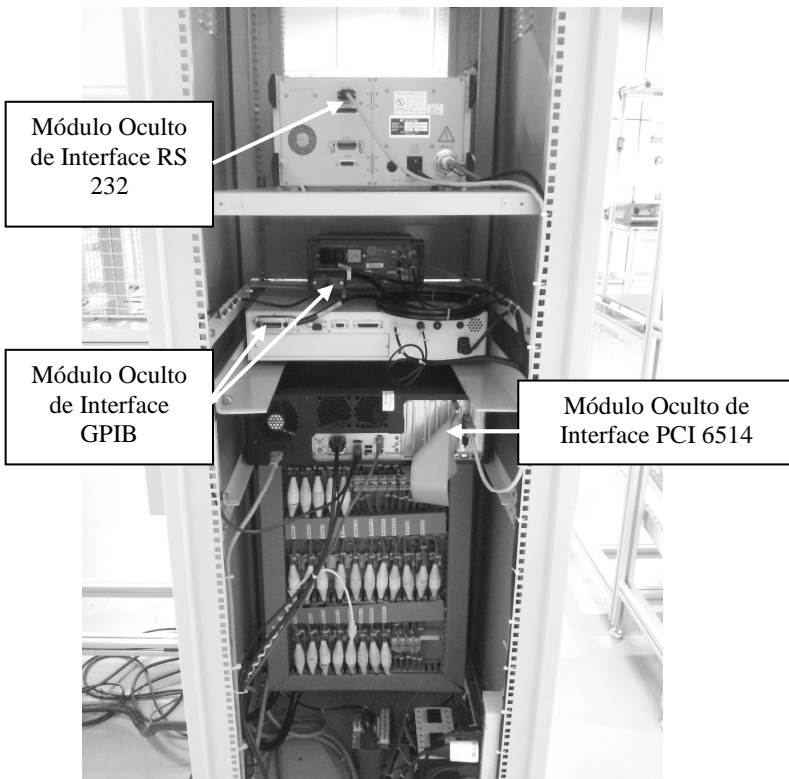


Figura 69 - Montagem dos módulos ocultos na estrutura do painel
Fonte: Autor (2011).

A equipe de desenvolvimento do equipamento, através da utilização da tela de manutenção do software em LabVIEW, disparou individualmente cada método de testes, através do seu respectivo módulo visível, e corrigiu pequenos erros da montagem dos equipamentos. A maioria dos erros encontrados era oriunda de conexão equivocadas nos módulos visíveis de controle dos relés de alta tensão.

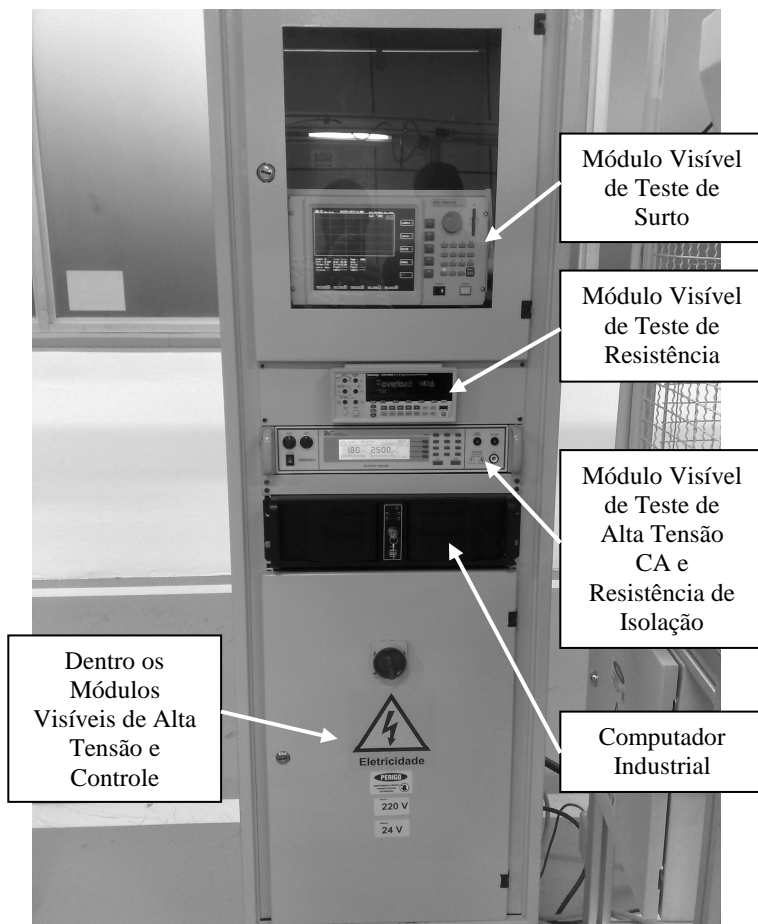


Figura 70 - Montagem dos módulos visíveis na estrutura do painel
Fonte: Autor (2011).

Depois de encerrada essa etapa, o equipamento foi instalado na célula de montagem do estator do motor do micro compressor e foi considerado apto a iniciar os testes de validação que irão liberar seu uso no processo produtivo, próxima etapa desta pesquisa. A figura 71 mostra o equipamento instalado na célula de fabricação do estator do motor do micro compressor e a figura 72 evidencia a cabine de testes e demais equipamentos periféricos que auxiliam na operação do painel de testes.

O item 5 desta pesquisa relata os testes que validaram a construção do equipamento fabricado.

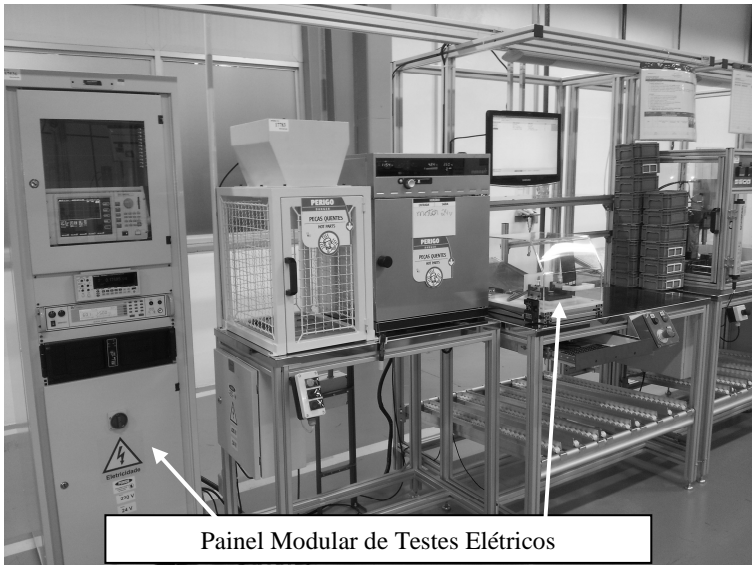


Figura 71 - O painel modular de testes elétricos de segurança de estatores instalado na célula de montagem do estator do motor do micro compressor
Fonte: Autor (2011).

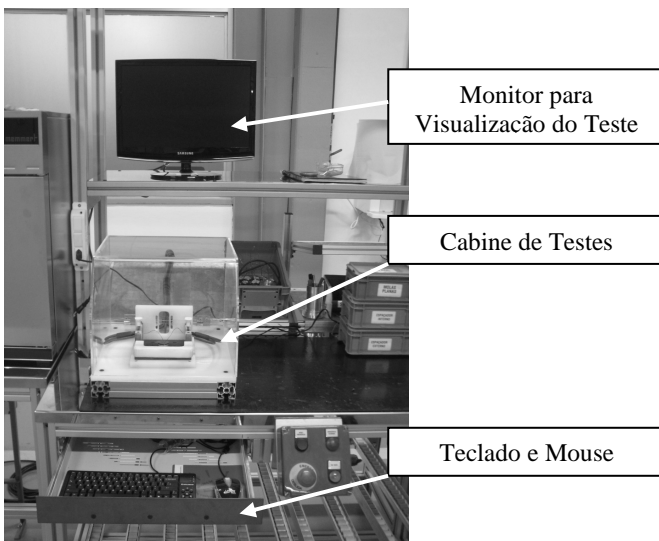


Figura 72 - Cabine de testes e equipamentos periféricos do painel modular de testes elétricos de segurança de estatores que auxiliam na sua operação
Fonte: Autor (2011).

5 AVALIAÇÃO DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

Nesta etapa da pesquisa serão descritos os testes e exibidos os resultados que irão validar o desempenho da solução tecnológica gerada. Tal avaliação foi dividida em quatro etapas. A primeira delas caracteriza-se pela realização de testes elétricos que avaliam a aplicação do equipamento no seu processo produtivo, necessários para garantir que o equipamento é capaz de aplicar com eficiência e robustez os métodos de testes elétricos de segurança definidos para validar o estator indutivo. A segunda etapa caracteriza-se pela avaliação do desempenho técnico do equipamento sob o aspecto de capacidade produtiva, na qual a hipótese do equipamento gerado ser mais lento que a sua versão integral é validada sob a análise estatística dos resultados comparativos de testes de tempo ciclo entre as duas versões. Na terceira etapa, a análise financeira do custo de fabricação do equipamento foi efetuada para efeito comparativo com um dos principais fornecedores da versão integrada de testes. Como última etapa, estimou-se o quanto o equipamento modular desenvolvido é capaz de reduzir, eliminar ou amenizar as desvantagens descritas no histórico do uso da versão integral do painel de testes elétricos em empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina.

Os testes e as análises descritas acima representam o que será exposto nos próximos itens desta pesquisa.

5.1 CERTIFICAÇÃO TESTE DO PRODUTO

Dentro dos resultados esperados para a fase de execução do processo macro de desenvolvimento do produto painel modular de testes elétricos de segurança de estatores para o motor do micro compressor, o mais significativo deles é o da certificação teste do equipamento. O planejamento desta certificação foi elaborado em conjunto com especialistas da área de motores (produtos e processos), manufatura, segurança e ergonomia, manutenção e liderança do projeto para o setor de pesquisa e desenvolvimento da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina. Nesta etapa, os requisitos definidos na fase concepção devem ser atendidos para que o equipamento instalado no processo fabril possa ser liberado para utilização e o produto por ele testado possa ser vendável.

Considerando que os aspectos de software, hardware, ergonomia e segurança do equipamento atenderam as necessidades dos ensaios descritos no planejamento da certificação do equipamento, no próximo item desta pesquisa relata-se somente os resultados dos testes de qualidade e reprodutibilidade do mesmo, no que dizem respeito à validação dos métodos de teste aplicados para validar a qualidade do sistema de isolamento do estator.

5.1.1 Experimento para avaliar a tensão aplicada dos testes de Alta Tensão AC, Resistência de Isolação e Surto

Os métodos de teste de Alta Tensão AC, Resistência de Isolação e Surto baseiam-se na aplicação de tensão e na medição dos efeitos desta tensão sobre o estator. Avaliar a diferença entre o valor da tensão configurada no software do equipamento para estes módulos de teste e o valor real medido nos terminais do estator é significativo para definir se o equipamento é capaz de operar dentro de um limite aceitável de erros. A figura 73 demonstra o experimento realizado.

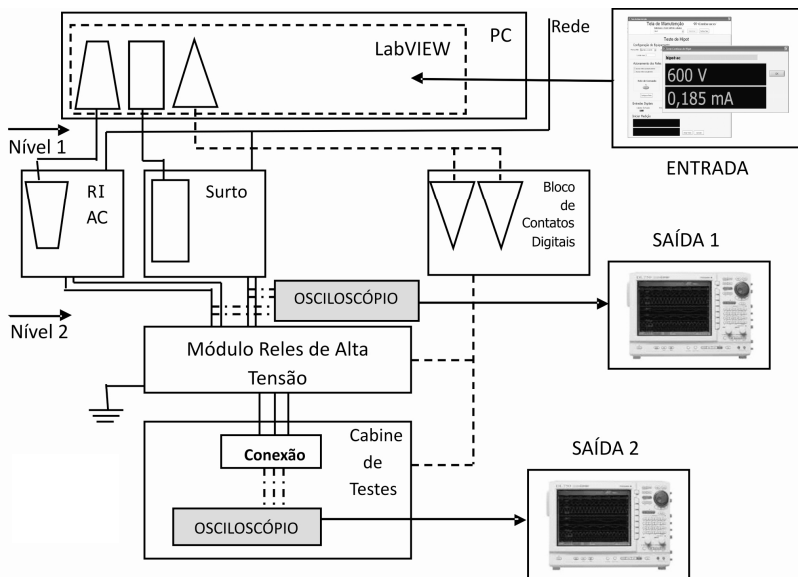


Figura 73 - Experimento de teste para avaliar desvios entre tensão configurada e medida

Fonte: Autor (2012).

Através do uso de um osciloscópio, cujos dados metrológicos da placa de medição de alta tensão utilizada estão descritos no anexo M desta pesquisa, e do uso da tela de manutenção do software do painel modular foi definido o experimento que visa avaliar os desvios e calcular os erros das tensões dos métodos de teste de Alta Tensão AC, Resistência de Isolação e Surto.

Segundo Marció (2011) “O objetivo, nessa etapa do processo, é certificar que a tensão configurada nos equipamentos, que realizam o teste de surto e hipot, será a mesma da medida na cabine de testes. Assim, diferentes valores de tensão foram configurados nos equipamentos e, através do osciloscópio Yokogawa DL 750, a tensão na cabine de testes foi avaliada”.

Durante o planejamento do experimento, que seguiu as estratégias descritas por Barbeta et al. (2010, p. 34), considerando que o teste seria realizado em ambiente com temperatura e umidade controlada, dois fatores foram identificados como geradores de problemas, ou seja, que podem influenciar diretamente em uma diferença nos valores de tensão configurada no software e medida nas conexões da cabine de testes. O primeiro dos fatores é a informação dos valores de testes que flui no nível 1 de interfaces, ou seja, entre módulo de software e módulo visível de testes. O segundo fator é a somatória dos erros dos módulos de testes com as perdas elétricas no nível 2 de interface, isto é, desvios de medição nos módulos visíveis de testes e perdas elétricas nas conexões elétricas entre saídas de tensões dos módulos de testes e cabine de testes.

Um teste inicial foi realizado para avaliar se existe influência do fator informação dos valores de testes e não foi detectada interferência alguma, tornando desnecessária a sua inclusão nos estudos experimentais. Deste modo, a saída 1 do experimento descrito na figura 58, resultado do teste inicial, não faz parte dos resultados que serão apresentados nesta pesquisa.

Para o fator somatória dos erros dos módulos de testes com as perdas elétricas no nível 2 de interface, considerando que o estator do micro compressor será testado a 600 V, limite especificado por Instituto e norma IEC 60335-2-34 dado as características de funcionamento do micro compressor, os intervalos de tensão propostos para avaliar a confiabilidade dos métodos de testes elétricos foram definidos nos níveis de 100 V, 200 V, 600 V e 1000 V.

Considerando que se deseja avaliar a capacidade do equipamento fabricado em aplicar nos terminais do estator o valor de tensão de cada

método de teste determinado por norma e configurado no software do equipamento, considera-se que o resultado deste experimento deverá ser representado pela equação (1).

$$y = A * V_c + B \quad (1)$$

Onde:

y = Nível de tensão medido no osciloscópio

A = Somatórias dos erros do módulo de teste testado

V_c = Valor de tensão configurada para o método de teste

B = Perdas elétricas entre saída do teste e conexão do estator

Desta forma, alterando o fator controlado, ou seja, o nível da tensão a ser configurada em cada um dos métodos de teste e conhecendo o valor da perda elétrica resistiva, obtêm-se o valor de tensão no osciloscópio e calculasse os erros dos módulos visíveis de testes de Resistência de Isolação, Alta Tensão CA e Surto. Os itens 5.1.1.1 a 5.1.1.3 desta pesquisa apresentam os resultados obtidos.

5.1.1.1 Avaliação do método de teste de Resistência de Isolação

“O teste de Resistência de Isolação (R_I) consiste na aplicação de uma tensão DC, geralmente 1,7 vez o valor da tensão de linha do equipamento, e medição da corrente de fuga do equipamento” (SKF, 2012, pg. 5). O valor de Resistência é obtido através da Lei de Ohm “R_I = Tensão Aplicada / Corrente de Fuga Medida”.

Considerando o experimento proposto no item 5.1.1, a figura 74 demonstra a equação linear da reta que representa a tendência (Td) na diferença entre os valores configurados e medidos de tensão do método de teste de resistência de isolação do painel modular, ou seja, a parcela do erro sistemático do equipamento para esse método de teste.

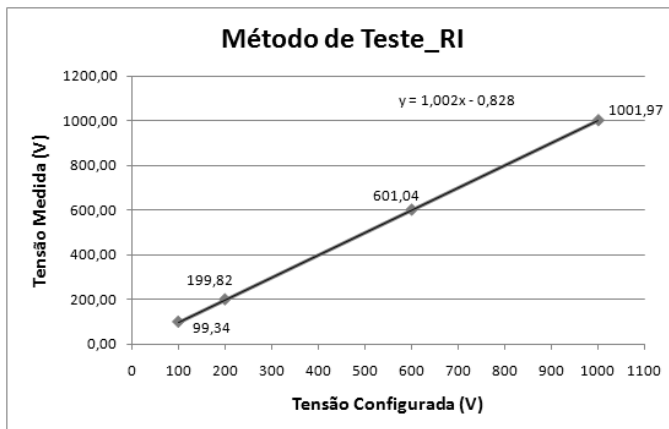


Figura 74 - Valor configurado no teste de Resistência de Isolação e valor medido nos contatos da cabine de teste do painel modular de testes
Fonte: Autor (2011).

Os testes demonstraram que o erro do equipamento é um vício e não uma variabilidade, ou seja, para cada nível de tensão configurado no software existe a tendência do módulo de resistência de isolação de responder conforme a equação da reta que representa esse erro. Para determinar se esse erro está dentro de uma margem aceitável para um nível de confiança de 95% avaliou-se a Repetibilidade (Re) do equipamento em reproduzir os resultados através do cálculo estatístico do Teste t para duas amostras pareadas, que segundo Barbetta et al. (2010, p. 235) “é apropriado para comparar dois conjuntos de dados quantitativos em termos de seus valores médios”, e do cálculo do desvio padrão de cada faixa de tensão medida .

Para o Teste t de Student utilizou-se a equação (2).

$$t = \frac{\bar{d} * \sqrt{n}}{S_d} \quad (2)$$

Onde:

t = t de Student;

n = tamanho da amostra (número de tensões medidas);

\bar{d} = Valor médio das diferenças das tensões;

S_d = Desvio padrão das diferenças observadas.

Para o cálculo do desvio padrão de cada faixa de tensão medida utilizou-se a equação (3).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

Onde:

S = desvio padrão, neste caso, da variável tensão medida;

I_i = i -ésima indicação;

\bar{I} = valor médio das indicações;

n = número de medições repetitivas efetuadas.

Com o resultado dos valores do Teste t para cada diferença de tensão aplicada e dos desvios padrões de cada faixa de tensão medida pode-se calcular a Repetibilidade (R_e) do equipamento através da equação (4).

$$R_e = t * S \quad (4)$$

Onde:

R_e = Repetibilidade;

t = coeficiente t de Student;

S = desvio-padrão de cada faixa da tensão medida.

De acordo com os valores calculados da Tendência e da Repetibilidade e considerando os erros máximo e mínimo em respectivamente mais ou menos duas vezes o valor do Desvio Padrão das diferenças observadas ($2 * Sd$), pôde-se concluir que a diferença entre os valores da tensão configurada e medida no método de teste de Resistência de Isolação do Painel Modular estará dentro de uma margem aceitável de erros, conforme demonstra o gráfico da figura 75. Os cálculos que geraram os valores representados pelo gráfico estão demonstrados no apêndice A desta pesquisa.

Com a utilização da tela de calibração do software do equipamento e conhecendo os erros do equipamento para o valor de tensão que se deseja aplicar no teste é possível eliminar o erro sistemático do equipamento através de sua calibração. A figura 76 representa parte do histórico das calibrações para alguns valores

diferenciados de tensão que o software mantém no banco de dados do equipamento.

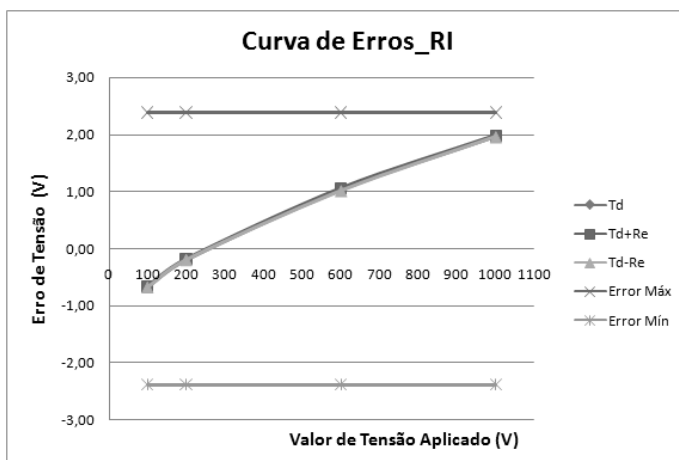


Figura 75 - Curva de erros de tensão aplicada no teste de RI
Fonte: Autor (2011).

Registro das medições

Unidade	Ponto Calibrado	Valor do instrumento	Valor do padrão	Resultado da medição	Incerteza expandida
V	300	300	299,7612	0,2388	0,592905
V	500	500	499,0000	1,0000	0,814697
V	700	500	699,0000	1,0000	0,814697

Figura 76 - Parte do histórico da calibração do teste de RI do painel modular
Fonte: Autor (2011).

5.1.1.2 Avaliação do método de teste de Alta Tensão AC

O método de teste de alta tensão consiste na aplicação de Tensão Alternada nos terminais da bobina do estator, da mesma forma que o teste de resistência de Isolação, porém em um nível mais elevado de tensão.

“O valor da resistência de isolamento para a tensão elevada aplicada não é o interesse do teste de alta tensão. Entretanto, o valor da corrente de fuga é e, mais especificamente, se este valor está dentro do

especificado para os limites aceitáveis de corrente de fuga” (SKF, 2012, p. 7).

Para avaliar os resultados dos testes de tensão efetuados foram utilizados os mesmos cálculos estatísticos do item 5.1.1.1 desta pesquisa. A figura 77 mostra a equação linear da reta que representa a tendência na diferença entre os valores configurados e medidos da tensão do teste de alta tensão do painel modular. A figura 78 demonstra os erros do equipamento, cujo cálculo está no apêndice B desta pesquisa, que foram classificados aceitáveis para o limite de mais ou menos duas vezes o valor do desvio padrão das diferenças de tensões observadas no teste.

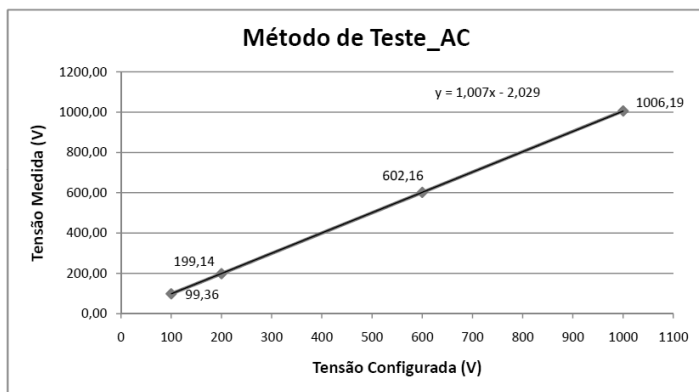


Figura 77 - Valor configurado no teste de alta tensão e valor medido nos contatos da cabine de teste do painel modular testes

Fonte: Autor (2011).

A mesma conclusão obtida na avaliação dos resultados do teste de tensão para o método de teste de resistência de isolamento serve para descrever os resultados obtidos no teste efetuado para o método de teste de Alta Tensão AC, onde a diferença entre os valores da tensão configurada e medida está dentro de uma margem aceitável de erros.

Do mesmo modo, através da utilização da tela de calibração do software do equipamento é possível eliminar o vício ou erro sistemático do equipamento através de sua calibração e nesse caso o valor aferido é especificado em corrente de fuga (mA). A figura 79 demonstra parte do histórico das calibrações para alguns valores diferenciados de corrente de fuga que o software mantém no banco de dados do equipamento.

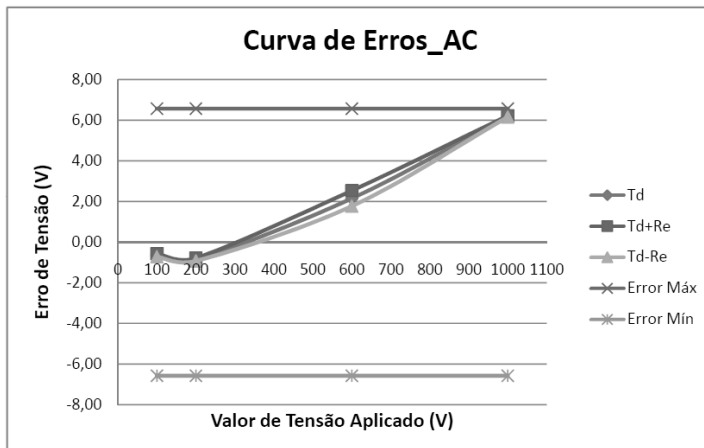


Figura 78 - Curva de erros de tensão aplicada no teste de Alta Tensão AC
Fonte: Autor (2011).

Registro das medições

Unidade	Ponto Calibrado	Valor do instrumento	Valor do padrão	Resultado da medição	Incerteza expandida
mA	0,785	0,78925	0,7798	0,0095	0,002736
mA	2,356	2,37475	2,3395	0,0353	0,00226

Figura 79 - Parte do histórico de calibração do painel modular de testes
Fonte: Autor (2011).

5.1.1.3 Avaliação do método de teste de Surto

O teste de surto consiste na aplicação de corrente elevada em um curto espaço de tempo sobre a bobina de maneira a criar um potencial de tensão ao longo do comprimento do fio da bobina do estator (SKF, 2012). Cada bobina responde ao potencial de tensão com uma onda senoidal que é comparada a uma onda padrão previamente gravada no equipamento de teste. Essa onda é resultante direta da Indutância da bobina e da Capacitância do equipamento, conforme demonstra a equação (5).

$$f = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}} \quad (5)$$

Onde:

f = frequência;

L = indutância;

C = capacitância.

A indutância da bobina varia em função das características do fio, das danificações do isolante do fio, das características do aço do estator e do número de espiras da bobina, além da capacitância interna do equipamento de teste. A amplitude da tensão gerada pela corrente aplicada na bobina reduz em função de uma redução da indutância e esta é representada pela equação (6).

$$U = L * \frac{d_i}{d_t} \quad (6)$$

Onde:

U = tensão;

L = indutância;

d_i = variação da corrente;

d_t = variação do tempo.

Para comparar a onda de uma bobina de estator com a onda de uma bobina padrão previamente configurada no equipamento de teste de surto, o equipamento utilizado e selecionado se vale de duas formas comparativas, sendo elas denominadas de Diferença de Área e Comparativo de Área. A figura 80 representa o método comparativo de áreas e a figura 81 o método comparativo de diferença de áreas entre uma onda de padrão e uma onda de uma bobina fabricada. Os limites de aprovação para as diferenças são expressos em percentuais e são determinados pelos fabricantes da bobina do estator.

O equipamento adquirido possui também o método de avaliação do surto por descargas parciais que, durante experimento realizado no fabricante do equipamento, não se mostrou eficiente para o propósito de detectar fio da bobina próximo ou em contato com o pacote de aço elétrico do estator. Em resumo, o teste de surto avalia qualquer danificação ou alteração direta no fio que influenciem na bobina gerada. O teste efetuado para avaliar a aplicação do método de teste de surto, aplicado pela solução tecnológica desenvolvida, seguiu as mesmas características dos testes anteriores, nos quais os erros entre tensão medida no osciloscópio e tensão configurada no teste foram calculados

utilizando as fórmulas descritas no item 5.1.1.1 desta pesquisa. A figura 82 mostra o gráfico que contém a equação da reta que representa a diferença entre os valores configurados e os valores medidos de tensão para o método de teste de surto do equipamento elaborado.

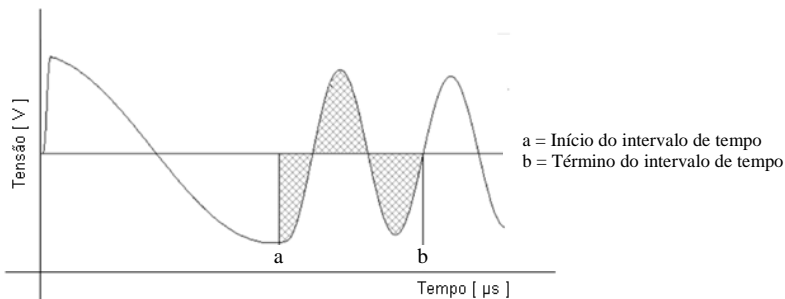


Figura 80 - Método comparativo de área em teste de surto de estatores
Fonte: Kokusai (2012).

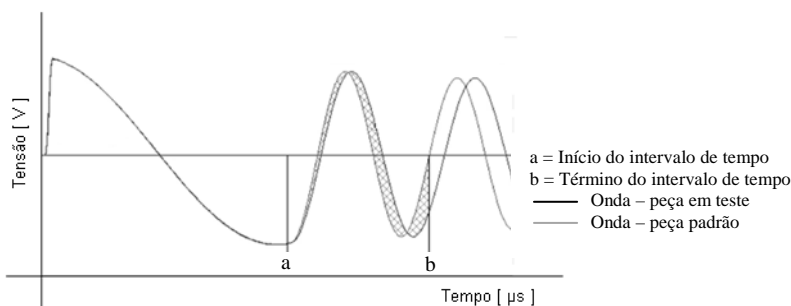


Figura 81 - Método de diferença de área entre onda padrão e bobina em teste de Surto de estator
Fonte: Kokusai (2012).

Considerando que cada resultado de teste de surto é comparado com um valor de um resultado de teste de surto de uma bobina padrão, a diferença entre o valor configurado e o valor medido é desprezada em função de esta existir tanto para a bobina de um estator padrão como para a bobina de estator em teste. Existe uma prática para avaliar se a diferença entre os valores configurados e medidos de tensão de surto se mantém ao longo da utilização do equipamento. É realizado um teste periódico da bobina que gerou a curva de surto padrão gravada no software, principalmente durante trocas de tipo de estator e como a

primeira peça a ser testada no equipamento no momento do início da produção de um dado modelo de estator.

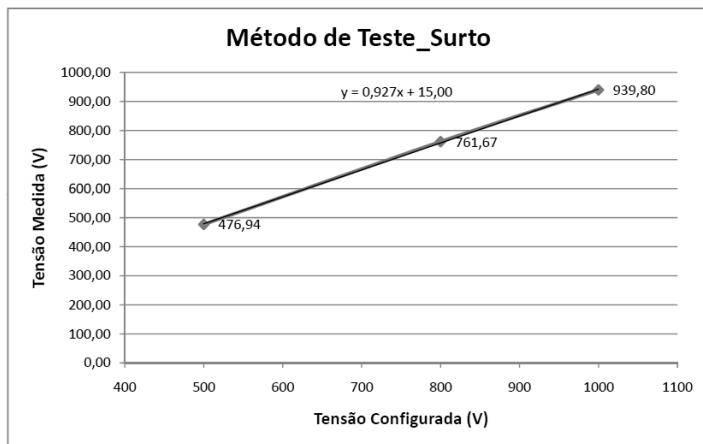


Figura 82 - Valor configurado no teste de surto e valor medido nos contatos da cabine de teste do painel modular de testes

Fonte: Autor (2011).

O método de teste de surto foi aprovado para utilização e a etapa seguinte desta pesquisa descreve o experimento de teste e a avaliação do último método de teste a ser avaliado na solução modular proposta.

5.1.2 Experimento e avaliação do método de teste de Resistência Ôhmica

“O teste de resistência ôhmica é simples e imediatamente indica a situação do condutor em uma bobina. Consiste na injeção de uma corrente conhecida através do bobinamento, medição da queda de tensão através do bobinamento e cálculo da resistência ôhmica através da Lei de Ohm” (SKF, 2012, p. 4).

Algumas variáveis impactam no processo de medição do valor de tensão a ser medido e conseqüentemente no valor de resistência a ser calculado através da Lei de Ohm “ $V=R*I$ ”, onde V é a queda de tensão medida nos terminais da bobina do estator, R a resistência ôhmica a ser calculada pelo módulo de teste e I é a corrente elétrica aplicada e conhecida.

Para o planejamento do experimento de avaliação do método de teste de resistência aplicado pelo equipamento fabricado utilizaram-se os conceitos de estratégia definidos por Barbetta et al. (2010, p. 34). Conhecendo o processo de medição, o modelo físico e tecnológico do equipamento fabricado e o módulo de testes elétricos de resistência ôhmica utilizado, pôde-se determinar quais variáveis interferem no processo de medição da resistência ôhmica do estator. São elas:

- a) condição do teste, tais como temperatura e umidade;
- b) operador do teste, cuja interferência maior é a forma de conexão da bobina;
- c) estator testado;
- d) erros de medições no equipamento utilizado

Considerando que o painel modular de testes elétricos de segurança de estatores foi instalado em uma área que possui controle de temperatura e umidade em respectivamente 25°C e 60%, a variável condição do teste não foi inserida na avaliação do teste de resistência ôhmica da bobina do estator.

“Uma das dificuldades de se medir a queda de tensão na bobina do estator é a interferência das conexões elétricas no contato entre os equipamentos de testes e a bobina a ser medida” (SKF, 2012, p. 4). A maioria dos estatores possui uma resistência ôhmica baixa e uma conexão ruim do módulo de teste com a bobina a ser testada pode elevar significativamente a resistência ôhmica, mascarando o valor real da bobina a ser medida. O painel modular de testes elétricos construído utiliza a medição a “4 fios” como maneira de redução desse efeito. Porém, mesmo assim, a variável Operador do Testes foi inserida no processo de avaliação.

Para avaliar a incerteza de medição no método de teste de resistência ôhmica do equipamento modular fabricado diante da variabilidade dos estatores testados e da influência do operador dos testes foi utilizado o experimento estatístico de Repetibilidade (r) e Reprodutibilidade (R), teste de R&R por análise de variância.

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística clássica que pode ser utilizada para avaliar o erro de medição e outras fontes de

variabilidade dos dados pertinentes ao sistema de medição (Nota ao final¹⁹).

O experimento proposto consistiu em:

- 1) medição de 10 bobinas por Série de Testes;
- 2) 2 séries de testes por operador;
- 3) 3 operadores diferentes;
- 4) intervalos de critérios de avaliação para os resultados:

$PTC \leq 10\%$ (Bom);

$10\% < PTC \leq 20\%$ (Aceitável);

$PTC > 20\%$ (Ruim).

O modelo estatístico seguido foi o de dois fatores balanceados e com efeitos cruzados sem interação, dado pela equação (7).

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \gamma_j + \varepsilon_{ijk} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, \dots, p \\ j = 1, \dots, o \\ k = 1, \dots, r \end{array} \right. \quad (7)$$

Neste modelo μ é um parâmetro comum a todos os tratamentos e representa a média geral dos dados, α_i e α_j é o efeito devido ao i -ésimo e ao j -ésimo nível do fator P (peça) e O (operador) e são variáveis aleatórias independentes com distribuições normais com média zero e variâncias σ_o^2 e σ_p^2 respectivamente. A variável aleatória ε_{ijk} corresponde ao erro aleatório experimental, isto é, a variabilidade não explicada pelo modelo devido a variações presentes em diversas fontes não consideradas no estudo. Este também tem distribuição normal com média zero, porém a variância é σ^2 (Nota ao final²⁰).

¹⁹ A Estatcamp Consultoria Estatística em Qualidade disponibiliza em seu site as teorias estatísticas referentes ao cálculo de RR por análise de variância (ANOVA). Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/1399-242-modelo-da-anova-sem-intera%C3%A7%C3%A3o-entre-pe%C3%A7a-e-operador>>. Acesso em 09 de Setembro de 2012.

²⁰ A Estatcamp Consultoria Estatística em Qualidade disponibiliza em seu site as teorias estatísticas referentes ao cálculo de RR por análise de variância (ANOVA). Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/1399-242-modelo-da-anova-sem-intera%C3%A7%C3%A3o-entre-pe%C3%A7a-e-operador>>. Acesso em 09 de Setembro de 2012.

O cálculo da incerteza de medição do equipamento foi efetuado através da equação (8) e para os cálculos de Desvio Padrão, S_d , utilizou-se a equação (3) descrita nesta pesquisa.

$$I = \sqrt{R_{repet}^2 + R_{repro}^2} \quad (8)$$

Onde:

I = incerteza de medição;

R_{repet} = Erros de Repetibilidade (fator peça);

R_{repro} = Erros de Reprodutibilidade (fator operador);

O cálculo da Repetibilidade foi efetuado através da equação (9).

$$R_{repet} = 2 * S_d(repet) \quad (9)$$

Onde:

R_{repet} = Erros de Repetibilidade;

S_d = Desvio Padrão;

$repet$ = série de efeitos no nível i do fator peça (diferença entre valores médio das medições de cada peça por operador e valores de medição de cada peça por operador).

O cálculo da Reprodutibilidade foi efetuado através da equação (10).

$$R_{repro} = 2 * S_d(repro) \quad (10)$$

Onde:

R_{repro} = Erros de Reprodutibilidade;

S_d = Desvio Padrão;

$repro$ = série de efeitos no nível j do fator operador (valor médio dos resultados das medições de cada peça por operador subtraído do valor da média geral de todas as medições de cada peça).

O cálculo do PTC foi efetuado através da equação (11).

$$PTC = 2 * \frac{I}{T} * 100 \quad (11)$$

Onde:

PTC = Percentual da Tolerância Consumido;

I = Incerteza de medição do equipamento;

T = Tolerância da resistência ôhmica do estator testado.

A tabela 1 representa o resultado do teste de PTC para os valores de resistência ôhmica da bobina do estator cuja especificação é $0,160 \pm 0,025 \Omega$.

Tabela 1 - Resultado das medições de três operadores distintos no teste de R&R

Resistência	(Ω)									
	Painel Modular de Testes Elétricos									
	Peça.1	Peça.2	Peça.3	Peça.4	Peça.5	Peça.6	Peça.7	Peça.8	Peça.9	Peça.10
Operador 1 Serie 1	0,159	0,158	0,158	0,155	0,155	0,158	0,158	0,158	0,150	0,155
Operador 1 Serie 2	0,159	0,158	0,158	0,155	0,154	0,157	0,158	0,157	0,150	0,155
Operador 2 Serie 1	0,159	0,158	0,158	0,156	0,155	0,157	0,158	0,158	0,150	0,155
Operador 2 Serie 2	0,159	0,158	0,158	0,155	0,155	0,157	0,158	0,158	0,150	0,155
Operador 3 Serie 1	0,158	0,158	0,158	0,156	0,155	0,158	0,158	0,158	0,149	0,155
Operador 3 Serie 2	0,159	0,158	0,158	0,155	0,154	0,157	0,158	0,158	0,150	0,155
Operador 1_Média	0,159	0,158	0,158	0,155	0,155	0,158	0,158	0,158	0,150	0,155
Operador 2_Média	0,159	0,158	0,158	0,156	0,155	0,157	0,158	0,158	0,150	0,155
Operador 3_Média	0,159	0,158	0,158	0,156	0,155	0,158	0,158	0,158	0,150	0,155
Geral_Média	0,159	0,158	0,158	0,155	0,155	0,157	0,158	0,158	0,150	0,155
Repet	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	-0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	-0,001	0,000
	0,001	0,000	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,001	0,000
Repro	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Erro.1 (Repetibilidade)	0,001		Incerteza	0,001		(Ω)	(+/-)			
Erro.2 (Reprodutibilidade)	0,000		Tolerância	0,025		(Ω)				
			PTC	5,30%						

Fonte: Autor (2011).

Considera-se que o sistema é apto para o teste, pois o percentual de tolerância consumida com os erros de R&R do equipamento representa apenas 5,3% da tolerância do estator testado para um intervalo de confiança de 95%, ou seja, mais ou menos dois desvios

padrão. Sendo assim, o método de teste de resistência ôhmica, seu módulo de teste e a interface responsável em interligá-lo à cabine de teste, foi liberado para utilização no equipamento modular de testes elétricos de segurança em estatores.

Resta saber se sua utilização em conjunto, ou seja, a união de todos os métodos de teste em um único teste de avaliação de um estator atenderá o requisito técnico necessário para capacidade produtiva de uma linha de produção em massa. O item 5.2 desta pesquisa irá avaliar tal necessidade.

5.2 DESEMPENHO TÉCNICO DA SOLUÇÃO TECNOLÓGICA CONSTRUÍDA.

Um teste inicial realizado para comparar o desempenho técnico da variável tempo ciclo do equipamento modular gerado com a versão integral utilizada no processo fabril de estatores identificou diferenças entre a somatória dos tempos dos testes configurados no software e o tempo de ciclo total de teste medido. Tal atraso no tempo foi classificado como variável tempo de comunicação. Observou-se que esta variável consome uma parcela significativa do tempo ciclo total de teste na versão modular do equipamento. A tabela 2 representa tais resultados comparativos entre versão integral e modular do equipamento do painel de testes elétricos de estatores.

Tabela 2 - Tempos de testes de estatores em painéis modular e integral

Método de Teste	Tempo Configurado		Tempo de comunicação		Tempo Ciclo Total de Teste	
	Painel Integral	Painel Modular	Painel Integral	Painel Modular	Painel Integral	Painel Modular
Resistência Principal 1-2	0,1	0,1	0,15	0,75	0,25	0,85
Resistência Auxiliar 3-2	0,1	0,1	0,15	0,75	0,25	0,85
Hipot CA	1	1	0,12	0,8	1,12	1,8
RI	1	1	0,13	0,7	1,13	1,7
Surto Principal 1-2	0,2	0,1	0,2	0,9	0,4	1
Surto Principal 2-1	0,2	0,1	0,2	0,9	0,4	1
Surto Auxiliar 3-2	0,2	0,1	0,2	0,9	0,4	1
Surto Auxiliar 2-3	0,2	0,1	0,2	0,9	0,4	1
Tempo Total	3	2,6	1,35	6,6	4,35	9,2

Fonte: Autor (2012).

A análise da forma com que os parâmetros de teste são enviados pelo software em LabVIEW a cada módulo de teste demonstrou que a cada novo ciclo de testes o aplicativo envia os parâmetros, tais como, dados para configuração do método de teste e a liberação para início de teste, liberação do disparo do teste e recebimento do resultado do processamento do teste, ou seja, aprovação ou rejeição do método de teste aplicado no estator. A operação de envio dos dados de configuração do método de teste representa um tempo significativo na variável tempo de comunicação e decidiu-se realizá-la apenas uma única vez no software e a cada seleção do modelo de estator a ser testado. Após a alteração do software, em cada novo ciclo de teste de um estator, a variável tempo de comunicação fica resumida ao sequenciamento da liberação dos métodos de testes e ao recebimento dos seus resultados. Outra forma de reduzir o tempo total de teste encontrada foi a de não exibir a forma de onda da tensão de surto gerada no software LabVIEW após cada teste de surto efetuado. A tabela 3 representa o resultado destas duas mudanças, cuja redução do tempo ciclo total de teste na versão modular de painel representou cerca de trinta e oito por cento do tempo total do teste registrado antes das alterações.

Tabela 3 - Tempos de testes de estatores em painéis modular e integral após mudanças nos software do painel modular

Método de Teste	Tempo Configurado		Tempo de comunicação		Tempo Ciclo Total de Teste	
	Painel Integral	Painel Modular	Painel Integral	Painel Modular	Painel Integral	Painel Modular
	Resistência Principal 1-2	0,1	0,1	0,15	0,32	0,25	0,42
Resistência Auxiliar 3-2	0,1	0,1	0,15	0,32	0,25	0,42
Hipot CA	1	1	0,12	0,25	1,12	1,25
RI	1	1	0,13	0,25	1,13	1,25
Surto Principal 1-2	0,2	0,1	0,2	0,48	0,4	0,58
Surto Principal 2-1	0,2	0,1	0,2	0,48	0,4	0,58
Surto Auxiliar 3-2	0,2	0,1	0,2	0,48	0,4	0,58
Surto Auxiliar 2-3	0,2	0,1	0,2	0,48	0,4	0,58
Tempo Total	3	2,6	1,35	3,06	4,35	5,66

Fonte: Autor (2012).

Depois de esgotadas as possibilidades de reduzir a variável tempo de comunicação na versão modular de testes, definiu-se o experimento para avaliar a variável tempo ciclo total médio de teste em ambas as versões de equipamentos para que os resultados coletados fossem

analisados estatisticamente. O experimento seguiu os passos descritos por Barbetta et al. (2010, p. 235). São eles:

- a) desprezo do tempo de carga e descarga dos estatores nos equipamentos;
- b) desprezo do método de teste de rotação em ambos os testes;
- c) sequência de aplicação de métodos de testes idênticos para ambos os equipamentos;
- d) uso do mesmo parâmetro de tempo de teste para cada método aplicado em ambos os equipamentos;
- e) tratamento dos dados quantitativos através do teste t para duas amostras pareadas;
- f) formulação das hipóteses com abordagem unilateral considerando H_0 : em média, os dois tempos de testes são iguais e H_1 : em média, o tempo total de teste da versão modular é maior do que o tempo total de teste da versão integral ou $H_0: \mu_1 = \mu_2$ e $H_1: \mu_1 > \mu_2$, onde μ_1 é o valor esperado da resposta para o tratamento do tempo de ciclo total de teste na versão modular do painel e μ_2 é o valor esperado da resposta para o tratamento do tempo ciclo total da versão integral de painel de testes elétricos de estatores.
- g) dez amostras aleatórias de tempo total médio de ciclo de cada versão de equipamento;
- h) em cada amostra dispara-se o teste do estator já posicionado e registra-se o tempo de ciclo consumido para aprovação do estator;
- i) amostras de testes com utilização de um 10 estatores padrão para ambos os equipamentos, caracterizando as mesmas condições de testes para ambos as versões e representando amostras pareadas de observações;
- j) temperatura e umidade controlada do ambiente dos ensaios em respectivamente 23° C e 60%.

A tabela 4 demonstra o resultado da coleta dos dados dos ensaios efetuados em ambas as versões de equipamento.

Através da diferença entre os resultados de testes, representada na tabela anterior pela variável D , pode-se observar quanto o tempo total de teste de versão integral foi melhor que a versão modular através da equação (12).

$$D = X_2 - X_1 \quad (12)$$

Tabela 4 - Tempos de ciclo total de testes de estatores em painéis modular e integral

Ensaio	Tempo Ciclo Total de Teste		
	Modular X_1	Integral X_2	Diferença $D = X_2 - X_1$
1	5,66	4,36	-1,3
2	5,54	4,37	-1,17
3	5,55	4,35	-1,2
4	5,62	4,36	-1,26
5	5,68	4,34	-1,34
6	5,69	4,33	-1,36
7	5,62	4,36	-1,26
8	5,63	4,38	-1,25
9	5,65	4,37	-1,28
10	5,67	4,38	-1,29

Fonte: Autor (2012).

Onde:

D = Diferença entre resultados de tempo;

X_2 = Tempo total de teste na versão integral;

X_1 = Tempo total de teste na versão modular.

Através da variável D , definiram-se as hipóteses como $H_0: \mu_D = 0$ e $H_1: \mu_D < 0$, onde segundo Barbetta et al. (2010, p. 236) μ_D é o valor esperado de D e a análise do problema se assemelha ao teste de uma média. Diante dos resultados da amostragem pareada em dez ensaios, calculou-se a estatística do teste realizado através da equação (13).

$$t = \frac{\bar{d} * \sqrt{n}}{S_d} \quad (13)$$

Onde n é o tamanho da amostra (numero de pares), \bar{d} é a média das diferenças observadas e S_d é o desvio das diferenças observadas. Assim como Barbetta et al. (2010, p. 236), considerou-se que os valores da variável diferença são oriundos de uma distribuição normal e o teste estatístico foi realizado através da distribuição t de Student com $gl = n -$

1 grau de liberdade. A equação (14) abaixo representa os resultados obtidos para o cálculo do S_d , onde $n = 10$ e $\bar{d} = 1,271$.

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot (\sum d_i^2 - n \cdot \bar{d}^2)} = \frac{\sqrt{16,2 - (10)(1,271)^2}}{9} = 0,0576 \quad (14)$$

Portanto, para o cálculo de t de Student os resultados estão descritos na equação (15).

$$t = \frac{\bar{d} * \sqrt{n}}{S_d} = \frac{1,271 * \sqrt{10}}{0,0576} = 69,74 \quad (15)$$

Para a abordagem do valor \mathbf{p} , considerando $n=10$, teste unilateral, 9 graus de liberdade e a tabela da distribuição t de Student, representada na tabela 5, o valor que corresponde à área associada a um valor maior ou igual a $t = 69,74$ não foi identificado, indicando que para um nível de significância de 5%, onde $\alpha = 0,05$, o teste conclui que H_0 é falsa, pois $\mathbf{p} < \alpha = 0,05$, ou seja, o tempo total de teste de estatores na versão modular de painel de testes elétricos de segurança é, em média, mais alto que o tempo total de testes na versão integral do equipamento. Porém, dependendo do que se propõe de capacidade produtiva em massa, o valor de tempo ciclo total do teste de um estator testado no painel de testes elétricos de segurança com arquitetura modular pode não representar uma ameaça ao desempenho da linha produtiva, visto que o valor médio da diferença não ultrapassa 1,3 segundo à versão integral de testes.

Essa diferença não invalida a utilização do equipamento em linhas de produção em massa de estatores e o tempo ciclo total de aplicação dos métodos de teste da isolação do estator não ultrapassou o estipulado no requisito de que não poderia ultrapassar sete segundos. Outros fatores a se considerar são os benefícios da modularidade do equipamento e a sua atratividade financeira, próximos assuntos a serem relatados nesta pesquisa.

Tabela 5 - Parte da tabela de distribuição *t* de Student

gl	Área na cauda superior										
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,001	0,005	0,0025	0,001	0,0005	....	p<0,0005
1	1,000	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6	....	....
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,1	22,33	31,60	....	....
3	0,765	1,638	1,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92	....	....
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610	....	....
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869	....	....
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959	....	....
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408	....	....
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041	....	....
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,25	3,690	4,297	4,781	....	69,74

Fonte: Barbetta (2010)

Nota: Alterada pelo autor.

5.3 AVALIAÇÃO FINANCEIRA DA SOLUÇÃO TECNOLÓGICA GERADA

O projeto do painel modular de testes elétricos de segurança de estator do motor micro compressor seguiu a premissa de não ultrapassar o valor de cinquenta mil dólares de custo de desenvolvimento e implantação do equipamento, valor referente próximo a cinquenta por cento do valor da versão integral mais utilizada nas linhas produtivas de estatores em massa da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina e neste caso. A escolha pelo módulo de testes de surto que possui o teste de descargas parciais levou o projeto a superar em três mil e quinhentos dólares este limite, totalizando o valor de cinquenta e três mil e quinhentos dólares, sem considerar os custos de importação dos módulos importados diretamente pela empresa.

Considerando que durante testes dos equipamentos adquiridos o método de teste de descargas parciais não se mostrou eficiente frente à necessidade de detectar fio da bobina do estator fora de ranhura e próximo ao pacote. O módulo de teste de surto DWX-05 da Kokusai pode ser substituído por um módulo de surto sem descargas parciais e que seja financeiramente mais atrativo. Como exemplo, o modelo 7703 da Microtest, empresa Taiwanesa que atua no seguimento de fornecimento de módulos de testes elétricos de segurança de estatores e motores, pode ser uma escolha com este propósito e, desta forma, será

considerado no momento em que o equipamento for replicado para atender a novas necessidades de projetos de desenvolvimento.

O gráfico representado na figura 83 demonstra o resultado financeiro do projeto e inclui um comparativo de custos de uma versão modular de painel com o modelo do exemplo citado. Este não considera valores de importação e também compara o valor limite estipulado para o projeto com a versão integral mais utilizada nas linhas produtivas em massa de estatores da empresa que serviu de base para esta pesquisa.

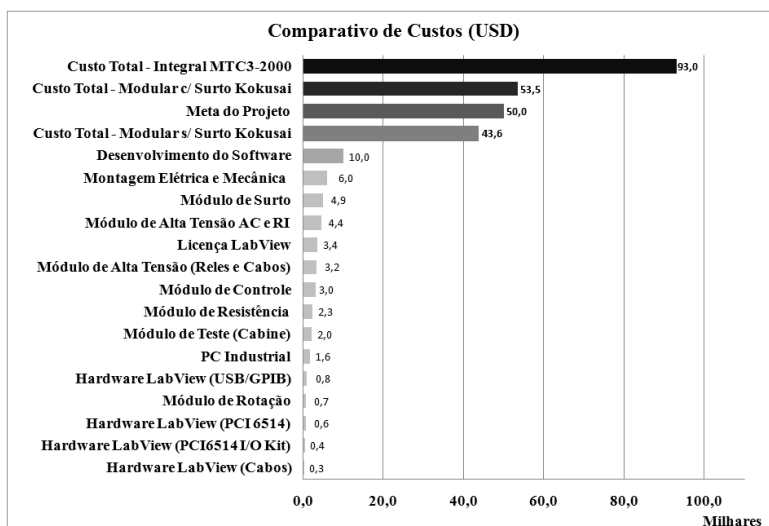


Figura 83 - Resultado financeiro do projeto e comparativo com versão integral
Fonte: Autor (2012).

Para a obtenção do valor do desenvolvimento de software da versão modular desenvolvido foram contabilizadas duzentas horas de trabalho do profissional de engenharia de automação e sistemas a uma base de cinquenta dólares por hora. Considerando que o software gerado pode ser instalado em novos painéis modulares de testes elétricos, os próximos desenvolvimentos podem ser reduzidos em cerca de vinte e cinco por cento do total gasto na primeira versão do equipamento.

Não foi considerada a necessidade de peças de reposição no custo do equipamento devido ao fato de que para todos os módulos de teste selecionados para compor a versão modular gerada existe um reserva ou um exemplar em funcionamento no parque fabril brasileiro da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina. Neste aspecto, se o equipamento for instalado em plantas no exterior, além do

custo de importação dos equipamentos, uma lista de módulos sobressalentes deve ser considerada ou, por se tratarem de módulos de prateleira, um plano de ação para reposição rápida dos módulos deverá ser levado em consideração no processo de implantação e negociado com os fornecedores.

Em resumo, a solução tecnológica modular do painel de testes elétricos gerada é financeiramente atrativa, pelo menos para a empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina e se comparada a sua última aquisição realizada no ano de 2010, na qual a versão integral citada anteriormente nesta pesquisa foi novamente selecionada entre outras existentes no mercado.

5.4 A MODULARIDADE DO EQUIPAMENTO FABRICADO

Obter em termos qualitativos as vantagens e desvantagens na utilização da versão modular de painéis de testes elétricos de estatores requer a análise do histórico de sua utilização e o comparativo com os dados obtidos com o uso da versão integral do equipamento, obviamente ambos em mesmas condições de ritmo produtivo e ambiente de operação. É importante salientar que o equipamento modular fabricado foi instalado em uma linha produtiva da empresa base do desenvolvimento desta pesquisa onde o ritmo produtivo é piloto, ou seja, atende a uma capacidade produtiva menor que uma linha de produção em massa, ambiente onde estão instaladas as versões integrais do equipamento.

Este item da pesquisa se propõe a utilizar os operadores da modularidade de Baldwin e Clark (2001, p. 13) e as deficiências obtidas no histórico de utilização da versão integral, salientadas no item 2.1.5.1 desta pesquisa, para mensurar as suas possíveis vantagens e desvantagens. A versão modular gerada, através do seu software, que também é de base modular, permite:

- a) dividir um sistema interdependente em dois módulos, a exemplo da divisão feita no módulo de teste Hipot Ultra III da Associated Research, cujo dois dos seus métodos de testes, sendo eles Alta Tensão AC e Resistência de Isolação, são utilizados de forma independente no equipamento modular fabricado;
- b) substituir qualquer módulo por outro modelo e/ou fabricante desde que o módulo a ser instalado possua um dos três tipos de módulos ocultos determinados pela arquitetura de ranhura

- do equipamento ou novas regras de projeto com a adição de novos módulos ocultos sejam introduzidos no equipamento para que exista a sua interface com o software LabVIEW;
- c) incrementar ou adicionar um novo módulo seguindo as mesmas regras descritas no item anterior;
 - d) excluir um módulo do equipamento através do software gerado em LabVIEW e assim evitar que por um motivo de falha de um método de medição e/ou seu módulo, o processo produtivo seja interrompido;
 - e) criar novas regras de projeto e módulos de arquitetura através da inserção de um novo módulo oculto no computador e respectivamente de seu software de conexão com o aplicativo em LabVIEW;
 - f) e por último, a portabilidade de módulos com outros painéis se ambos tiverem a mesma arquitetura e regras de conexão, ou seja, os módulos de teste selecionados para o equipamento podem ser empregados em outros equipamentos do parque fabril.

Todos os operadores descritos acima evidenciam que em casos de manutenção no equipamento que eventualmente demande a necessidade de uma das ações acima, haverá uma alternativa viável que permitirá colocar o equipamento em funcionamento e atender as exigências do processo produtivo. Porém, do mesmo modo, e com mesma intensidade que ocorre na versão integral do equipamento, existe a necessidade do treinamento dos profissionais de manutenção que serão responsáveis em manter o equipamento em funcionamento. Necessidade esta que vai desde a correta detecção da fonte do problema do equipamento, possivelmente através do uso da tela de manutenção do equipamento, até a maneira com que esta será erradicada através dos operadores da modularidade acima descritos.

Com o uso do descritivo técnico de utilização do equipamento e de seus manuais elétrico e mecânico, gerenciar as mudanças necessárias para manter o funcionamento da solução modular de painel de testes de segurança de estatores não será tarefa difícil para uma equipe de manutenção treinada.

5.5 CONCLUSÃO DA ETAPA DE TESTES

Nesta parte da pesquisa exibiram-se os resultados dos testes que comprovaram que a solução modular desenvolvida para o painel de

testes elétricos de segurança de estatores é capaz de reproduzir e repetir dentro de uma margem de erros aceitável os valores de tensão de testes necessários para a utilização dos métodos de teste de Alta Tensão AC e Resistência de Isolação. Os resultados da avaliação de tensão do método de teste de Surto demonstraram que existe uma diferença significativa entre o valor configurado de tensão e o valor medido na saída dos terminais da cabine de teste, e que esse valor é oriundo do equipamento selecionado. Tal efeito é eliminado devido ao fato de que o método de teste compara a forma de onda de tensão do estator avaliado com a forma de onda de tensão de uma bobina padrão mantida em estoque, que é testada sempre que o modelo de estator entrar em produção. Demonstrou-se que o equipamento modular está apto para testar a resistência de bobina dos estatores, considerando os limites de especificação apresentados e a incerteza de medição representar apenas 8,8% de sua tolerância de medição. Através de testes estatísticos, avaliou-se que a solução modular de testes é mais lenta na aplicação dos métodos de testes de segurança elétrica de um estator se comparada a uma versão integral do equipamento devido a um tempo maior de comunicação necessário para disparar os módulos de testes e receber os resultados das avaliações de cada método de teste empregado. Salientou-se que esse tempo pode não ser significativo para o processo produtivo se este atender as necessidades de demanda da linha de manufatura em massa de estatores. Em um comparativo com a última aquisição da versão integral de equipamento feita pela empresa base de testes desta pesquisa, demonstramos que a solução modular para painéis de testes elétricos de estatores tornou-se atrativa financeiramente e representa uma economia que pode ser superior a cinquenta por cento. E, por último, através do comparativo com o histórico de manutenção da utilização da versão integral do equipamento em linhas produtivas em massa de estatores da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina e dos operadores da modularidade, demonstrou-se que gerenciar a complexidade das mudanças do equipamento torna-se tarefa viável e possivelmente fácil se a equipe responsável pela manutenção do equipamento conhecer o software gerenciador do equipamento, suas formas de interface com os módulos de teste e, também, as soluções elétricas e mecânicas que viabilizaram a solução modular proposta.

No item 6 a conclusão final desta pesquisa será exposta de maneira a relatar o conhecimento adquirido e gerado para as áreas de testes elétricos de estatores e Engenharia de Produção com ênfase em produtos e processos que este trabalho se propôs a contribuir através de

seu objetivo de desenvolver uma solução tecnológica modular de painéis de testes elétricos de segurança de estatores indutivos.

6 CONCLUSÕES

No decorrer desta pesquisa, quando necessário, as conclusões de cada capítulo foram apresentadas. Este capítulo se destina a resumir tais conclusões e posicioná-las de acordo os objetivos específicos e gerais da dissertação.

6.1 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

Para o atendimento dos dois primeiro objetivos específicos da dissertação dividiu-se a pesquisa em literária e de mercado. A pesquisa literária demonstrou que o isolamento do estator é dividido em dois sistemas, que duas são as suas formas de avaliação e que muitos são os métodos de ensaios ou testes elétricos de segurança para avaliar tais sistemas. A seleção dos métodos de teste no processo produtivo de um estator segue a necessidade de prevenção de seus modos de falha e o que determinam os institutos normativos do setor. A pesquisa do mercado por fornecedores de equipamentos de testes do sistema de isolamento do estator demonstrou que existe uma distinção clara. Identificou-se a linha de equipamentos denominados painéis de testes elétricos de segurança de estatores que se destinam ao emprego no processo de fabricação do estator, no qual a necessidade de altas capacidades produtivas demanda a aplicação única e em série dos métodos de testes elétricos identificados na pesquisa literária. Encontrou-se um número expressivo de modelos e marcas de equipamentos que possibilitam o teste do isolamento do estator no local em que o motor elétrico está instalado. Tais equipamentos são módulos de prateleira e estes aplicam de forma independente um único método de teste elétrico e por vezes algumas variações deste tal método. A pesquisa no mercado também identificou que para cada método de teste aplicado pelo painel de testes elétricos de segurança de estatores existe um módulo específico de prateleira que é capaz de reproduzir o mesmo teste.

A pesquisa literária diferenciou o resultado da pesquisa de mercado através da arquitetura de produtos, do arranjo dos elementos de um produto, das definições de mapa dos seus elementos funcionais e das suas interfaces. Tal pesquisa evidenciou os tipos de arquitetura existente, ressaltou as diferenças entre arquitetura integral e modular. Ficou evidente que, assim como descreveu Martini (2008), muitos são os benefícios alcançados quando se define corretamente a arquitetura de um produto, sendo o principal deles, principalmente para os produtos

que possuem a arquitetura modular, o de permitir e flexibilizar a atualização. Os conceitos de modularidade e seus operadores se evidenciaram ainda mais no pacote de ações que flexibilizam as mudanças em sistemas modulares.

A seleção por um procedimento de desenvolvimento de produtos modulares e não por um método de modularização foi justificada diante da existência de uma variedade enorme de módulos de testes de prateleira existentes para cada método de testes elétricos. O uso do procedimento selecionado listou os requisitos da solução tecnológica, gerou a estrutura funcional a partir das definições de módulos visíveis e ocultos e buscou os princípios de solução que levaram a determinar a arquitetura modular do equipamento. A partir da seleção do software integrador e da determinação das regras de interface entre software e módulos visíveis e ocultos do equipamento selecionaram-se os módulos de testes e de interface. A partir do resultado da seleção dos módulos ocultos, isto é, das diferentes interfaces entre software e os módulos visíveis de testes, obteve-se o tipo de arquitetura modular da solução tecnológica proposta.

Construir o equipamento proposto após definida a arquitetura modular e gerados os documentos necessários para esta etapa foi o próximo passo da pesquisa que visou a avaliação da solução tecnológica proposta. A montagem do equipamento seguiu a necessidade de atender os prazos estabelecidos pelo projeto e seu cronograma macro foi estabelecido pelo modelo de processo de desenvolvimento de produtos da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina.

Para atender o último objetivo específico da dissertação a avaliação da solução tecnológica modular de painéis de testes elétricos de segurança foi baseada em quatro etapas. Nos resultados dos ensaios dos métodos de testes, na comprovação do desempenho técnico da variação tempo ciclo total dos testes, na avaliação financeira do projeto e na determinação do quanto o equipamento é flexível e modular para mitigar as desvantagens que são experimentadas pelo uso da versão integral do mesmo equipamento.

A avaliação do equipamento demonstrou que a solução tecnológica desenvolvida é capaz de reproduzir e repetir dentro de uma margem aceitável de erros os resultados de testes necessários para avaliar resistência de isolamento, a fuga de corrente em alta tensão AC, o surto de tensão e a resistência de um estator elétrico indutivo de baixa tensão.

Os testes de desempenho técnico demonstraram que a variável tempo de comunicação consome mais do tempo total de teste de um estator na solução tecnológica modular do que na versão integral do painel. A versão modular de painéis de testes elétricos desenvolvida é mais lenta que a versão integral e estas confirmações não necessariamente invalidam a sua aplicação em linhas de manufatura em massa de estatores.

Frente ao comparativo com o histórico da utilização da versão integral do painel de testes elétricos, a solução tecnológica modular gerada apresenta uma série de possibilidades que certamente irão facilitar a manutenção do equipamento em uso e reduzir os impactos que as paradas produtivas por manutenção representam no setor de manufatura em massa de estatores. Porém, para isso, somente o histórico de sua utilização irá comprovar tal afirmação.

E por último, a atratividade financeira do equipamento modular desenvolvido é significativa se comparada à aquisição do modelo integral da mesma versão que segue à frente nas últimas aquisições da empresa do ramo metal mecânico do norte do estado de Santa Catarina.

6.2 CONCLUSÕES GERAIS

A pesquisa literária desta dissertação condensou uma série de conceitos que são importantes para o entendimento do projeto, funcionamento, fabricação e teste do sistema de isolamento do principal componente de um motor, o estator.

A solução tecnológica modular de painéis de testes elétricos de segurança desse componente irá flexibilizar o uso e fortalecer a importância de garantir a eficiência do sistema de isolamento de um estator. Criará alternativas de resposta a problemas de manutenção e inserirá no mercado de testes elétricos de estatores e em suas linhas de produção em massa a possibilidade de usufruir dos avanços tecnológicos que os usuários de módulos de teste de prateleira experimentam. Não há dúvida da necessidade de treinamento da equipe responsável em manter o equipamento modular em utilização. Para usufruir das inúmeras alternativas de solução de problemas não é requisito ser um especialista em programação do software do equipamento e sim um usuário treinado em operá-lo.

Novas propostas de pesquisa podem explorar mais o assunto testes elétricos de segurança de estatores e a sua aplicação em linhas de produção em massa, como por exemplo: a) avaliar o histórico de paradas

por manutenção ao longo da utilização da versão modular de painéis de testes e propor melhorias que agreguem valor ao setor de produção em massa de estatores, e b) pesquisar por alternativas para eliminar a interferência da variável tempo de comunicação no tempo ciclo total de aplicação dos métodos de testes elétricos do painel modular.

Para finalizar, pode-se concluir que o objetivo geral desta pesquisa de dissertação foi alcançado. A solução modular foi desenvolvida, construída, instalada, testada e liberada para o uso. Conclui-se ainda que unir a pesquisa literária com a de mercado foi importante para entender a lógica do setor de testes elétricos de segurança de estatores.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA et al. **Electric motors standards, ecodesign e global market transformation.** IEEE/IAS 2008 – Industrial and Commercial Power System Conference, p. 1 – 9. 2008.

ANDERSON, Edwin P.; MILLER, Rex. **Electric Motors.** New York: Macmillan Publishing Company, 1985. 4. ed.

ASAN, U. et al. **An integrated method for designing modular products:** Journal of manufacturing technology management, v.15, p. 29-49, 2004.

BALDWIN, Carliss Y.; CLARK, Kim B. Design Rules: **The power of modularity.** Mit press, Cambridge MA, v.1, 2000.

BALDWIN, Carliss Y.; CLARK, Kim B. **Modularity after the crash. Managing the modular age:** Architectures, networks and organizations. Blackwell, Maio, 2001.

BARBETTA, P. A. et al. **Estatística:** para cursos de engenharia e informática. 3 ed. São Paulo, Atlas, 2010.

BRUSONI, Stefano; PRENCIPE, Andrea. **Unpacking the black box of modularity:** Technologies, Products and Organizations. Oxford University Press, p. 179-205, 2001.

DEAL, Walter F., **Electric motors everywhere: most forms of energy go through some conversion process to do useful work for us."** The Technology Teacher. p. 20-24. Sept. 2004. Disponível em: <<http://go.galegroup.com.ez46.periodicos.capes.gov.br/ps/dispatch.do?prodId=AONE&userGroupName=capex58OneFile>> Acesso em: 29 Outubro de 2012.

Energy Efficiency guide for industry in ásia: electric motors. Disponível em <http://www.energyefficiencyasia.org/energyequipment/ee_es_electricalmotors.html>. Acesso em: 20 de Outubro de 2011.

ERENS, Freek; VERHULST, Karek. **Architectures for product Families**: Computers in Industry. v. 33, p. 165-178, 1997.

ERTUGRUL, Nesimi. **Towards virtual laboratories**: a survey of LabVIEW-based teaching/learning tools and future trends. University of Adelaide - Austrália, 1999.

FINGER, Suzan; DIXON, John R. **A Review of Research in Mechanical Engineering Design**: Research an Engineering Design. v.1. 1989.

FIXSON, Sebastian K. **The Multiple Face of Modularity**: A Literature Analysis of a Product Concept for Assembled Hardware Products. Technical Report. University of Michigan, v.3, p. 1-87, 2003.

FLOYD, et al. **An overview of the state-of-the-art in electrical safety technology**: work practices and management systems. IEEE pulp and paper industry technical conference, Conference Record of the 2003 annual, p. 123-140; June, 2003.

FOWLER, Theodore. **Value Analysis in Design**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.

GAMBA, Andrea; FUSARI, Nicola. **Valuing modularity as a real option**: Management Science, v. 55, p. 1877-1896, Novembro, 2009.

GEIMAN, J. **DC Step-voltage and surge testing of motors**. Baker Instrument Company.

GRUBIC, Stefan et al. **A survey of testing and monitoring methods for insulation systems in induction machines**. Condition Monitoring and Diagnosis, 2008 – International Conference – p196-203.

GRUBIC, Stefan. **A survey of testing and monitoring methods for stator insulation systems in induction machines**. Atlanta: IEEE Press, 2008. p. 4127-4136.

HOLTTÄ-OTTO, K.; **Modular product platform design**: doctoral dissertation. Helsinki University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Machine Design, 65 p., 2005.

IEC. **Globally concerted efforts: Developing enterprise.** Global visions interview with Dr Naoya Takahashi. Disponível em <<http://www.iec.ch/globalvisions/hitachi/>> Acesso em: 20 de Novembro de 2011.

ISO/TS 21748. **Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation.** 2010.

ISO. **ISO and the consumer.** Disponível em <<http://www.iso.org/iso/home/about/iso-and-the-consumer.htm>>. Acesso em: 20 de Outubro de 2011.

JOSE, A.; TOLLENAERE, M., **Modular and Platform Methods for Product Family Design:** Literature Analysis, Journal of Intelligent Manufacturing, v.16, p. 371-390, 2005.

KIM, H.D.; JU, Y.H. **Comparison of off-line and on-line partial discharge of Large Motors:** Electrical Insulation, 2002. Conference Record of the 2002 IEEE Internatium Symposium on, p. 27-30, April, 2002.

KOKUSAI, ECG Co. Ltd. **The Cutting Edge Winding Test:** Impulse Winding Tester DWX Series. Disponível em: <<http://www.tminstruments.com.br/imagens/tm2/89.pdf> >. Acesso em: 06 Julho 2012.

LANHAM, C. **Understanding the tests that are recommended for electric motor predictive maintenance.** Baker Instrument Company.

MARCIÓ, Bruno Silva. **Painel modular para ensaios elétricos em estatores.** Orientado por Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng. Florianópolis, 2011. 84 f. – Projeto de Fim de Curso, Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Automação e Sistemas, Centro Tecnológico. Florianópolis, 2011.

MARCON, Vitor; JUNIOR, Salésio Zimmermann. **Sistema de teste em estatores bobinados.** Disponível em <<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-estatores-bobinados-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: Outubro de 2011.

MARTINEZ, André Marcel Pereira. **Estudo de métodos de detecção de curto-circuito entre espiras em estatores de motores de indução trifásicos de baixa tensão.** Orientado por Nelson Jhoe Batistela, Dr.. Florianópolis, 2008. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Florianópolis, 2008.

MARTINI, José Nilton. **Método para auxiliar as escolhas de Configurações e de arquitetura de enfoque modular para famílias de produtos.** Orientado por Fernando A Forcellini, Dr. Eng.. Florianópolis, 2008. 240 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 2008.

MA, X. **Study of changing characteristics of generator stator insulation based on temperature spectrum of dielectric dissipation factor:** Properties and applications of dielectric materials. Proceedings of the 7th international conference on, v. 1, p. 294-297, June, 2003.

MELFI, M. et al. **Effect of surge voltage risetime on the insulation of low-voltage Machines by PWM Converters:** Industrial Applications: Industry Applications. IEEE Transactions on, v. 34, ed. 4, p. 766-775, July-Aug. 1998.

NOGAY, H. Selcuk. **Prediction of internal temperature in stator winding of three-phase induction motors with ann.** European Transactions on Electrical Power, p. 120-128. 2010.

PACHECO, Antonio Luiz Schalata. **Desenvolvimento de um sistema para medir a resistência de enrolamento em motores de compressores energizados.** Orientado por Carlos Alberto Flesch, Dr. Florianópolis, 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis, 2007.

PAHL, G. et al. **Projeto na Engenharia.** Editora Edgard Blucher, São Paulo, ed.1, 2005.

PAREKH, R. **AC Induction Motors Fundamentals:** Application Note (AN887). Microchip Technology Inc., 2003.

P&D, embraco - unidade de negócios Whirlpool S.A.. **The development of major and technology projects**: Training manual. Setembro, 1999.

ROZENFELD et al.; Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo. Saraiva, ed. 1, 2005.

SAFANOV, G. P. **The optimization of the production process for electrical insulation systems**. P.V. Vorob`ev, 2007, Elektroteknika, p. 61-64, 2007.

SCHUMP, D. E. **Testing to assure reliable operation of electric motors, Petroleum and Chemical Industry Conference, 1990**. Record of Conference Papers., Industry Applications Society 37th annual, p. 179-184, Sep, 1990.

SKF, Baker Instruments Company. **Testing Theories and Recommendations**.

Disponível em:

<http://www.skf.com/files/690979.pdf>. Acesso em 08 de Agosto de 2012.

STONE, Greg C. **Recent important changes in IEEE motor and generator winding insulation diagnostic testing standards: Industry Applications**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 41, p. 91-100, Jan/Fev. 2005.

SUH, Nam P. **The principles of design**. Oxford University, 1990.

ULRICH, Karl. **The role of product architecture in the manufacturing firm**. Elsevier Science B.V. Research Policy. p. 419-440. 1995.

ULRICH, Karl; EPPINGER, Steven D. **Product design and development**. McGraw-Hill Education, ed. 2, 1999.

USERS MANUAL – **Digital surge/DC hipot/resistance tester models D3R/D6R/D12R**. Baker Instrument Company, 2005.

VENKATARAMAN, Booma et al. **Fundamentals of a motor thermal model of its applications in motor protection**, 2005 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, p. 127–144, 2005.

WHITLEY, Kirsten N. Evidence **in favor of visual representation for the dataflow paradigm**: an experiment testing LabVIEW's comprehensibility. *Int. J. Human-Computers Studies*, v. 64, p. 281-303, 2006.

WIEDENBRUG, E.; FREY, G. Impulse **testing and turn insulation deterioration in electric motors**: IEEE pulp and paper industry technical conference, Conference Record of the 2003 annual, p. 50-55, June, 2003.

YANG, T. G. et al.; **Product platform development: considering product maturity and morphology**: Proceedings of IMECE2005. Orlando, 2005.

YIN, Yong. **Product Architecture Design for Global Performance**. Yamagata University. 2007.

ZHANG, Pinjia et al. **A survey of condition monitoring and protection methods for medium voltage induction motors**. IEEE Press, 2009. p. 3165-3174.

APÊNDICE A - Tabela de cálculo dos erros do método de teste de R_t

Tensão Aplicada (V)	Valor Medido 1 (V)	Valor Medido 2 (V)	Valor Medido 3 (V)	Média	Td	S	Re	Td+Re	Td-Re	Erro Máx	Erro Min
100	99,327	99,344	99,345	99,34	-0,66	0,010	0,008	-0,653	-0,669	2,383	-2,383
200	199,822	199,817	199,81	199,82	-0,18	0,006	0,005	-0,179	-0,188	2,383	-2,383
600	601,024	601,021	601,064	601,04	1,04	0,024	0,019	1,055	1,017	2,383	-2,383
1000	1001,98	1001,96	1001,97	1001,97	1,97	0,010	0,008	1,978	1,962	2,383	-2,383
				\bar{d}	0,54						
				S_d	1,191						
				t (Student)	0,786						
				ZS_d	2,383						

Fonte: Autor (2012).

APÊNDICE B - Tabela de cálculo dos erros do método de teste de Alta Tensão AC

Tensão Aplicada (V)	Valor Medido 1 (V)	Valor Medido 2 (V)	Valor Medido 3 (V)	Média	Td	S	Re	Td+Re	Td-Re	Erro Máx	Erro Min
100	99,400	99,410	99,260	99,36	-0,64	0,084	0,076	-0,568	-0,719	6,575	-6,575
200	199,23	199,08	199,12	199,14	-0,86	0,078	0,070	-0,787	-0,927	6,575	-6,575
600	602,55	601,71	602,21	602,16	2,16	0,423	0,381	2,538	1,775	6,575	-6,575
1000	1006,15	1006,22	1006,21	1006,19	6,19	0,038	0,034	6,227	6,159	6,575	-6,575
				\bar{d}	1,71						
				S_d	3,288						
				t (Student)	0,902						
				$2S_d$	6,575						

Fonte: Autor (2012).

ANEXO A - Trabalhos publicados para definir arquitetura (A) e construção modular (M) (JOSE e TOLLENAERE, 2005)

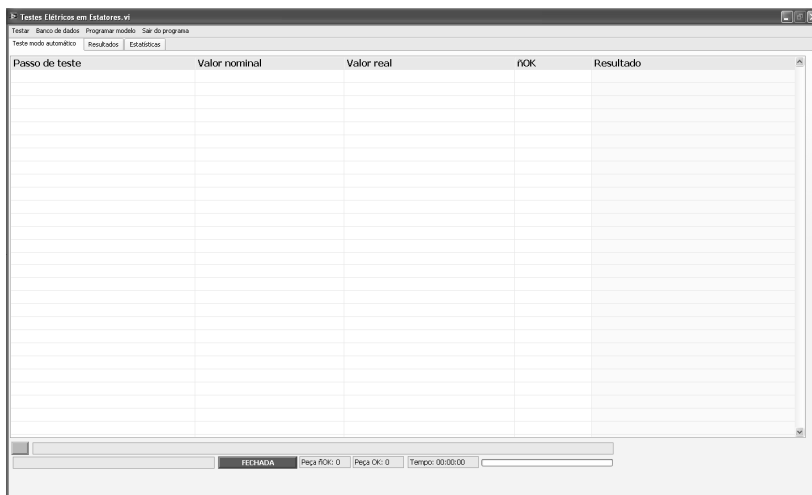
Referências	Método	Ferramenta Matemática	Algoritmo
Agard (2002)			M
Bongulielmi et al. (2001)	A		
Burbidge (1982)			M
Carrie (1973)			M
Chakrabarti (2001)		M	
Chambolle (1999)	A		
Chandrasekharan e Rajagopalan (1986)			M
Dahmus e Kusiak (1998)	A, M		
Davi e Kusiak (1998)			M
Evans (1963)		M	
Hadj-Hamou (2002)	A, M		
Hata e Kimura (20010)		M	
Huang e Kusiak (1998)	M		M
Jianxin e Tseng (1999)	M		
King e Nakornchai (1982)			M
Kusiak (1987)			M
Kusiak (1999)	A, M		A, M
Kusiak e Larson (1995)	A		
Kusiak e Wang (1995)			M
Martin e Ishii (1997)		A	
McCormick et al. (1972)			M
Mickkola e Gassmann (2001)		M	
Otto (2001)	M		
Otto et al. (2001)	M		
Thomas (1991)			M
Viriththamulla (1991)		M	M

Fonte: Martini (2008).

ANEXO B - Demais requisitos do produto

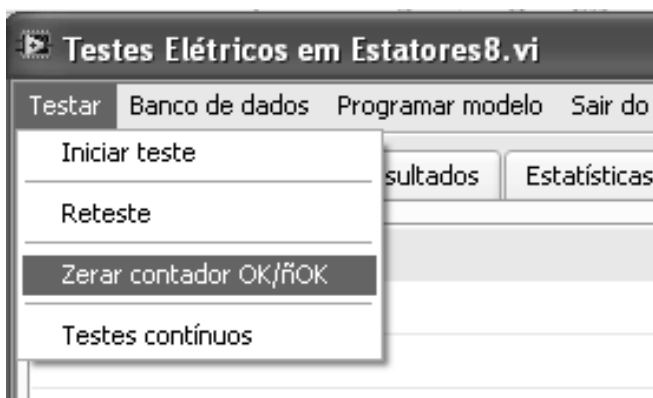
Requisito	Definição
Seleção dos Módulos visíveis de controle e alta tensão (força)	Compatíveis com os equipamentos descritos no PGE00525 que referencia a lista de equipamentos elétricos e eletrônicos que são homologados para uso nas diversas unidades da empresa base para a pesquisa
Seleção dos módulos ocultos de interface	Conectar Software Integrador selecionado com Módulos Visíveis de teste, controle e alta tensão Selecionados pelo resultado do agrupamento de módulos comuns disponíveis nos módulos visíveis de testes e de controle
Instalação dos módulos	Padrão de encaixe com racks 19" ou similares
Geometria do Painel	Rack modular de 19" - Mesmo da versão integral
Transporte	Rack 19" com Mobilidade para transporte (rodas)
Manutenção	Tela de software que permita manutenção intuitiva e assistida
Calibração	Tela de software que permita calibração da curva de erros de tensões aplicadas dos testes
Energia	Suplimento de energia disponibilizado pelo processo fabril (220 Volts +/- 10 hz/60 Hz.
Operação	Implementação e uso em célula de fabricação de micro estatores
Ergonomia	Atender aos requisitos de ergonomia determinados pela norma EHS da empresa base para a pesquisa
Segurança	Atender aos requisitos de ergonomia determinados pela norma EHS da empresa base para a pesquisa
Montagem	Montagem do equipamento com separação clara de módulos envolvidos Separação física dos módulos visíveis de testes com módulos de controle e força (reduzir possibilidade de ruídos) Módulo Cabine de Testes separado do rack principal do equipamento Monitor instalado próximo a cabine de testes e visível ao operador Teclado e mouse instalado abaixo da bancada que sustenta o módulo cabine de testes Aterramento Elétrico nos componentes da cabine de teste
Aceitação dos Testes	Resistência - rR Aceitável IR, Alta Tensão AC - Td + Re <= +/- 2Sd Surto Comparativo com bobina padrão Tempo Ciclo Total <= 7 Segundos
Custo do equipamento	Considera 200 horas de engenharia de automação para desenvolvimento do software Considera orçamento de montagem elétrica e mecânica feito através do sistema e-sourcing da empresa base para a pesquisa para efeitos de cálculo Custo total de desenvolvimento inferior a 50KUSD
Cronograma	Conforme estabelecido pelo cronograma de entrega das fases do projeto no C2C

ANEXO C - Tela principal do software



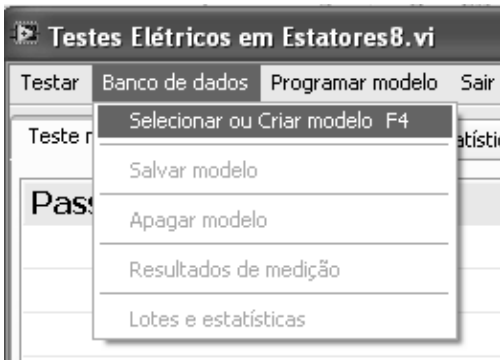
Fonte: Marció (2011).

ANEXO D - Sub menus testar, retestes, zerar contadores e testes contínuos do software



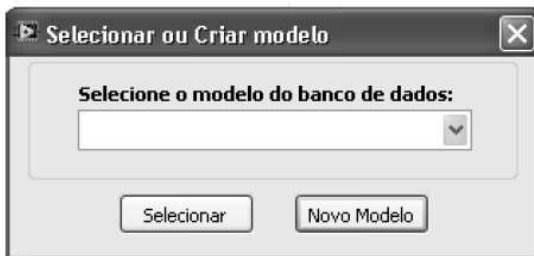
Fonte: Autor (2011).

ANEXO E - Sub menu das opções de banco de dados do software



Fonte: Marció (2011).

ANEXO F - Telas que compõem a opção de selecionar ou criar modelo do sub menu banco de dados do software



Fonte: Marció (2011).



Fonte: Marció (2011).

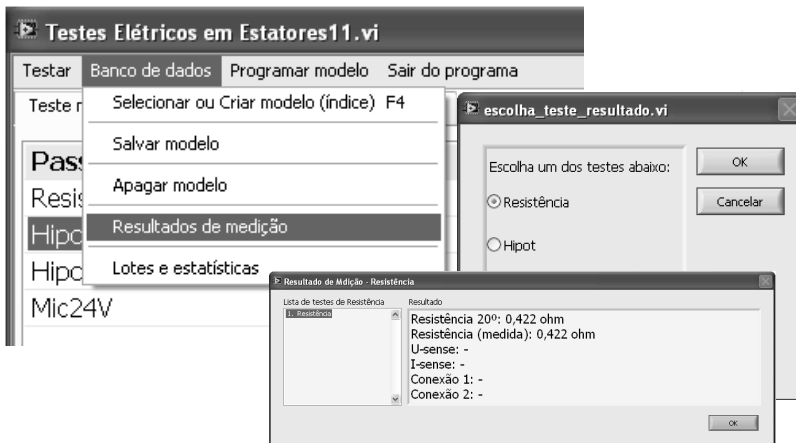


Fonte: Marció (2011).



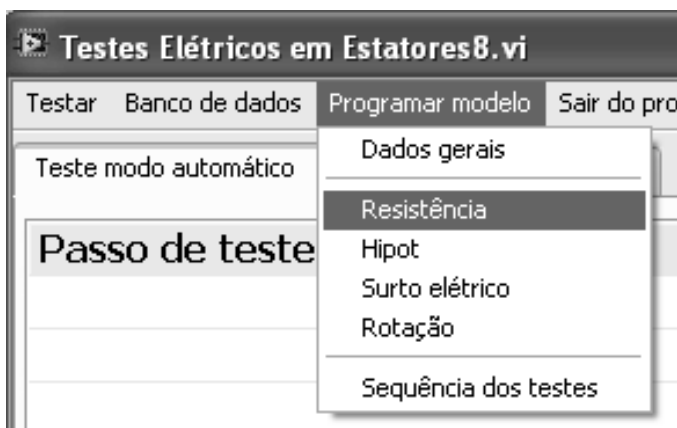
Fonte: Marció (2011).

ANEXO G - Telas que compõem os resultados de testes do sub menu de banco de dados do software



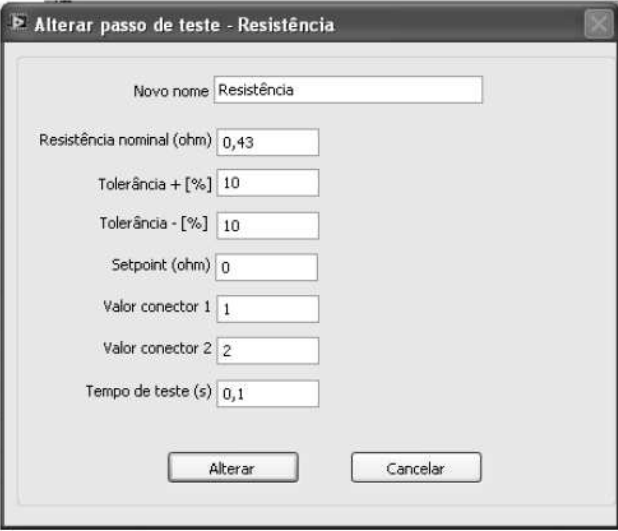
Fonte: Marció (2011).

ANEXO H - Tela que compõem os resultados de testes do sub menu de programar modelo do software



Fonte: Marció (2011).

ANEXO I - Tela de cadastro e alteração do método de teste de Resistência do software



The screenshot shows a dialog box titled "Alterar passo de teste - Resistência". It contains several input fields for configuring a resistance test step. The fields are: "Novo nome" (Novo nome) with the value "Resistência"; "Resistência nominal (ohm)" (Resistência nominal (ohm)) with the value "0,43"; "Tolerância + [%]" (Tolerância + [%]) with the value "10"; "Tolerância - [%]" (Tolerância - [%]) with the value "10"; "Setpoint (ohm)" (Setpoint (ohm)) with the value "0"; "Valor conector 1" (Valor conector 1) with the value "1"; "Valor conector 2" (Valor conector 2) with the value "2"; and "Tempo de teste (s)" (Tempo de teste (s)) with the value "0,1". At the bottom, there are two buttons: "Alterar" and "Cancelar".

Fonte: Marció (2011).

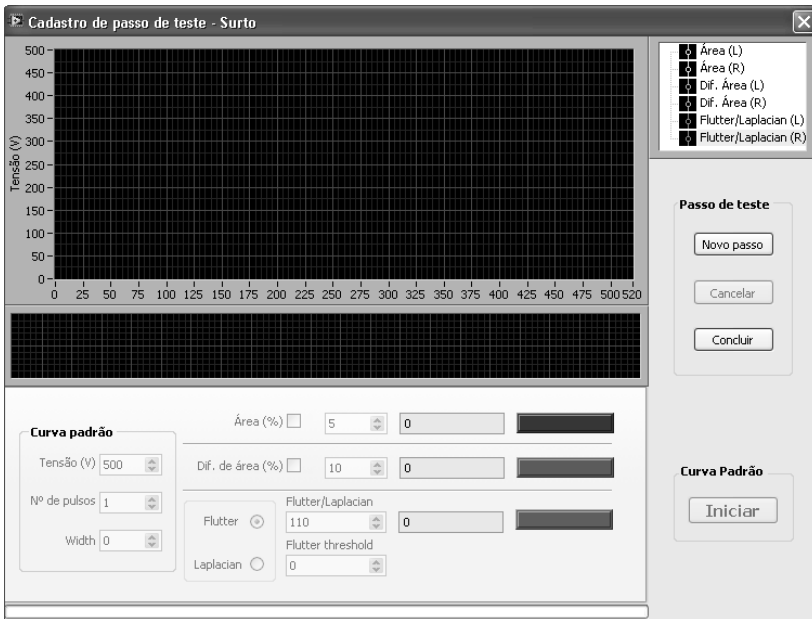
ANEXO J - Tela de cadastro e alteração do método de teste de Alta Tensão AC ou IR que compõe os testes de hipot do software



The screenshot shows a dialog box titled "Adicionar passo de teste - Hipot". It contains several input fields for configuring a high voltage AC or IR test step. The fields are: "Designação" (Designação) with an empty text box; "AC ou IR" (AC ou IR) with a dropdown menu; "Tensão (V)" (Tensão (V)) with the value "0"; "Tempo de rampa (s)" (Tempo de rampa (s)) with the value "0,1"; "Limite mínimo" (Limite mínimo) with the value "0"; "Limite máximo" (Limite máximo) with the value "0"; and "Tempo de teste (s)" (Tempo de teste (s)) with the value "0,5". At the bottom right, there are two buttons: "OK" and "Cancelar".

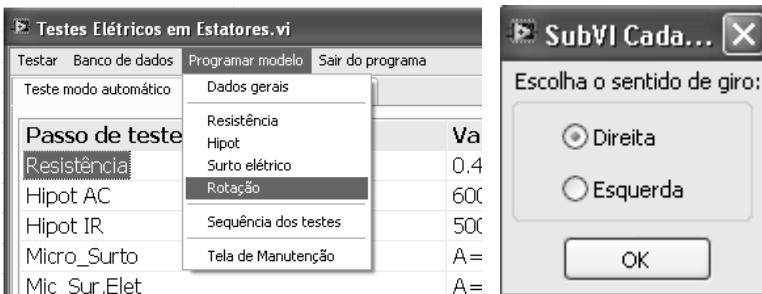
Fonte: Marció (2011).

ANEXO K - Tela de cadastro e alteração do método de teste de Surto do software



Fonte: Marció (2011).

ANEXO L - Telas de cadastro do método de teste de Rotação do software



Fonte: Marció (2011).

ANEXO M - Características metrológicas da placa de medição de alta tensão 701260 do DL 750 da Yokogawa

High-Voltage 100 kS/s 16-Bit Isolation Module (with RMS) (701260)	
Input channels	2
Input couplings	AC, DC, GND, AC-RMS, DC-RMS
Maximum sampling rate	100 kS/s
A/D conversion resolution	16 bits (2400 LSB/div)
Input type	Isolated unbalanced
Frequency range (-3 dB) ¹	
Waveform measurement mode	DC, up to 40 kHz
RMS measurement mode	DC, 40 Hz to 10 kHz
Input range	(10:1) 200 mV/div to 2000 V/div (in steps of 1, 2, or 5)
	(1:1) 20 mV/div to 200 V/div (in steps of 1, 2, or 5)
Effective measurement range	20 div (display range 10 div)
DC offset	±5 div
Maximum input voltage (1 kHz or less)	
In combination with 700929 (10:1) ²	1000 V (DC + ACpeak)
In combination with 701901+701954 (1:1) ⁶	850 V (DC + ACpeak)
Maximum allowable in-phase voltage	
In combination with 700929 (10:1)	H side: 1000 Vrms (CAT II) ⁴ , L side: 400 Vrms (CAT II) ⁵
In combination with 701901+701954 (1:1)	H side: 700 Vrms (CAT II) ⁷ , L side: 400 Vrms (CAT II) ⁸
Direct input (when using a cable which doesn't comply with the safety standard)	H/L sides: 30 Vrms (42 V DC + ACpeak) ¹¹
DC accuracy (waveform measurement mode) ¹	±(0.25% of 10 div)
DC accuracy (RMS measurement mode) ¹	±(1.0% of 10 div)
AC accuracy (RMS measurement mode) ¹	
Sine wave input	±(1.5% of 10 div)
Crest factor of 2 or less	±(2.0% of 10 div)
Crest factor of 3 or less	±(3.0% of 10 div)
Input impedance	1 MΩ ± 1%, approx. 35 pF
Connector type	Isolated type BNC connector
Input filter	OFF, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz
Temperature coefficient (waveform measurement mode)	
Zero point	±(0.02% of 10 div)/°C (typical value)
Gain	±(0.02% of 10 div)/°C (typical value)
Response time (RMS mode)	
Rise (0 to 90% of 10 div)	100 ms (typical)
Fall (100 to 10% of 10 div)	250 ms (typical)
Crest factor (only at RMS measurement)	3 or less

* Please use 701901 (1:1 safety adaptor lead) or 700929 (10:1 safety probe), which complies with the safety standard, for high-voltage input.

* It is very dangerous to use cables that do not comply with the safety standard.

Fonte: Nota ao final²¹.

²¹ A Yokogawa, fabricante do osciloscópio DL750, disponibiliza em seu web site, na página de download, informações dos equipamentos que fabrica. Disponível em: <<http://www.asres.yokogawa.com>>. Acesso em: 20 de Junho de 2012.