

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	IV
LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS.....	V
RESUMO	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1.....	3
1.1 GENERALIDADES	3
1.2 MOTIVAÇÃO	3
1.2.1 <i>Panorama mundial de competitividade extrema.....</i>	<i>3</i>
1.2.2 <i>Sistema de projeto customizado</i>	<i>4</i>
1.2.3 <i>Escassez e severas oscilações nos preços internacionais do cobre e</i> <i>alumínio</i>	<i>5</i>
1.2.4 <i>Dinâmica da matriz de materiais elétricos.....</i>	<i>7</i>
1.2.5 <i>Variedade de alternativas construtivas</i>	<i>7</i>
1.3 OBJETIVOS.....	8
1.3.1 <i>Abrangência</i>	<i>8</i>
1.3.2 <i>Rapidez.....</i>	<i>8</i>
1.3.3 <i>Precisão</i>	<i>8</i>
1.3.4 <i>Flexibilidade e atualidade</i>	<i>9</i>
CAPÍTULO 2.....	10
2.1 CÁLCULOS DE INDUTÂNCIA	10
2.1.1 <i>Introdução.....</i>	<i>10</i>
2.1.2 <i>Cálculos Básicos</i>	<i>11</i>
2.1.3 <i>Indutância própria de bobinas circulares de camada singular.....</i>	<i>12</i>
2.1.4 <i>Indutância mútua de bobinas circulares</i>	<i>19</i>
2.2 CÁLCULOS TÉRMICOS	20
2.2.1 <i>Considerações sobre transmissão de calor</i>	<i>20</i>
2.2.2 <i>Referências práticas de cálculo em regime permanente</i>	<i>21</i>
2.2.3 <i>Referências práticas de cálculo em regime transitório.....</i>	<i>24</i>
CAPÍTULO 3.....	28
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	28
3.2 VARIÁVEIS DE PROJETO	30
3.2.1 <i>Dados do Indutor.....</i>	<i>31</i>

3.2.2	<i>Restrições Sistêmicas</i>	32
3.3	VARIÁVEIS DE FAMÍLIA.....	32
3.3.1	<i>Dados Estruturais</i>	33
3.3.2	<i>Parâmetros de Regime Permanente</i>	35
3.3.3	<i>Parâmetros de Regime Transitório</i>	35
3.4	VARIÁVEIS MEMBRO.....	36
3.5	VARIÁVEIS SOLUÇÃO.....	38
3.6	DEFINIÇÕES E VARIÁVEIS COMPLEMENTARES.....	39
CAPÍTULO 4.....		42
4.1	MODELAGEM DO CÁLCULO DE INDUTÂNCIA PRÓPRIA.....	42
4.1.1	<i>Análise das formulações de cálculo de indutância própria</i>	42
4.1.2	<i>Desenvolvimento da formulação simplificada de Wheeler</i>	45
4.1.3	<i>Refinamento da formulação simplificada de Wheeler</i>	46
4.2	MODELAGEM DO CÁLCULO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NO CURTO- CIRCUITO.....	50
CAPÍTULO 5.....		55
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS E FLUXOGRAMA DA SOLUÇÃO.....	55
5.2	ELIMINAÇÃO PRELIMINAR.....	58
5.2.1	<i>Escoamento</i>	58
5.2.2	<i>Indutância mínima</i>	59
5.2.3	<i>Indutância máxima</i>	59
5.2.4	<i>Diâmetro mínimo dielétrico</i>	60
5.2.5	<i>Densidade de corrente de curto-circuito</i>	63
5.2.6	<i>Densidade de corrente em regime permanente</i>	64
5.2.7	<i>Dimensionamento mínimo</i>	68
5.3	PROJETO DA SOLUÇÃO BÁSICA.....	69
5.3.1	<i>Cálculo do fator geométrico ótimo</i>	69
5.3.2	<i>Cálculo do número de espiras para diâmetro otimizado</i>	73
5.3.3	<i>Cálculo do número de espiras para requisitos dielétricos</i>	74
5.3.4	<i>Adequação dos valores de diâmetro e número de espiras</i>	75
5.4	ELIMINAÇÃO PELO REGIME OPERATIVO DE TEMPERATURA.....	75
5.5	CÁLCULO DO CUSTO DA SOLUÇÃO, AVALIAÇÃO E SELEÇÃO.....	77
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DE CUSTO.....	78
CAPÍTULO 6.....		79
6.1	COMPARAÇÃO COM O SOFTWARE DE PROJETO VALIDADO.....	79
6.2	AVALIAÇÃO FINAL DO SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO.....	90
CAPÍTULO 7.....		92
CAPÍTULO 8.....		94

LISTA DE FIGURAS

- FIG. 1.1 – GAMA TÍPICA DE VALORES DE INDUTÂNCIA E CORRENTE POR APLICAÇÃO
- FIG. 1.2 – EVOLUÇÃO DAS COTAÇÕES INTERNACIONAIS DO COBRE E ALUMÍNIO
- FIG. 2.1 – BOBINA CIRCULAR COM TRÊS CAMADAS
- FIG. 2.2 – FATOR DE NAGAOKA EM FUNÇÃO DO FATOR GEOMÉTRICO DA BOBINA
- FIG. 2.3 – PRINCIPAIS DIMENSÕES DA BOBINA PARA CÁLCULO DE FOELSCH
- FIG. 3.1 – ENROLAMENTO DE UM REATOR DE NÚCLEO DE AR TÍPICO (3 CAMADAS)
- FIG. 3.2 – LARGURA SOBREPOSTA DE CONDUTOR
- FIG. 3.3 – ALTURA DA ESPIRA EFETIVA DE ENROLAMENTO $P/4$ CONDUTORES PARALELOS
- FIG. 3.4 – LARGURA DE UM ENROLAMENTO DE 3 CAMADAS
- FIG. 4.1 – VARIAÇÃO DO ERRO DE CÁLCULO PELO FATOR GEOMÉTRICO
- FIG. 4.2 – VARIAÇÃO DO ERRO DE CÁLCULO ($0 < \alpha < 1$)
- FIG. 4.3 – VARIAÇÃO DO ERRO DE CÁLCULO PELO FATOR GEOMÉTRICO POR FOELSCH
- FIG. 4.4 – VARIAÇÃO DO ERRO DE CÁLCULO POR FOELSCH ($0 < \alpha < 5$)
- FIG. 4.5 – VARIAÇÃO DO ERRO DE CÁLCULO COM FATOR DE CORREÇÃO DIRETO
- FIG. 4.6 – VARIAÇÃO DAS PERDAS GERADAS DURANTE O CURTO-CIRCUITO
- FIG. 5.1 – ESPAÇOS DE SOLUÇÃO FORMADOS
- FIG. 5.2 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO
- FIG. 5.3 – ÁREA DE DISSIPACÃO DE CALOR DE UM TRECHO DE ENROLAMENTO
- FIG. 5.4 – DIMENSÕES GERAIS DA BOBINA
- FIG. 5.5 – VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ENROLAMENTO PELO FATOR GEOMÉTRICO
- FIG. 5.6 – VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ENROLAMENTO (REGIÃO ÓTIMA)

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – PROPRIEDADES FÍSICAS DO COBRE E ALUMÍNIO

TABELA 6.1 – SAÍDA DE DADOS DE PROJETO PARA O CASO 01

TABELA 6.2 – SAÍDA DE DADOS DE PROJETO PARA O CASO 02

TABELA 6.3 – SAÍDA DE DADOS DE PROJETO PARA O CASO 03

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

μ_0	Constante de permeabilidade do vácuo
n	Densidade de enrolamento, em espiras por centímetro
a	Raio médio da bobina
b	Comprimento axial da bobina
K	Fator de Nagaoka, para correção do efeito das extremidades
α	Fator geométrico (altura / diâmetro) da bobina
σ	Fator de espessura (espessura / diâmetro) da bobina
l	Fator de indutância (formulação de Foelsch)
N	Número de espiras total da bobina
D	Diâmetro médio da bobina
L_n	Indutância nominal
L	Indutância de projeto
I_n	Corrente nominal
I	Corrente de projeto
I_{th}	Corrente de curto-circuito térmica
Dur	Duração da corrente de curto-circuito
I_{dyn}	Corrente de curto-circuito dinâmica
f	Frequência nominal do sistema
n_{bi}	Nível básico de impulso atmosférico
n_{bs}	Nível básico de surtos de manobra e outros transitórios dielétricos
T_a	Temperatura ambiente máxima de operação
H_o	Altitude de operação
PT_{max}	Perdas totais máximas
DT_{max}	Elevação máxima de temperatura média
$NomFam$	Nome de referência da família (tecnologia)
$NumCmp$	Número de membros (componentes) da família
$MinAxi$	Número mínimo de condutores em paralelo (para cada espira)
$MaxAxi$	Número máximo de condutores em paralelo (para cada espira)
$MinCam$	Número mínimo de camadas de enrolamento
$MaxCam$	Número máximo de camadas de enrolamento

<i>DinMin</i>	Diâmetro interno mínimo
<i>DinMax</i>	Diâmetro externo máximo
<i>FabSis</i>	Sistema de fabricação
<i>CnjMnd</i>	Conjunto de mandris
<i>PssMnd</i>	Passo de mandril
<i>HenMin</i>	Altura de enrolamento mínima
<i>HenMax</i>	Altura de enrolamento máxima
<i>HwMax</i>	Distância de escoamento máxima
<i>HaMax</i>	Distância de arco máxima
<i>EspIso</i>	Espessura de isolamento dos condutores
<i>EspCam</i>	Espessura de isolamento entre camadas de condutores
<i>KtmRes</i>	Coefficiente de variação da resistividade com a temperatura
<i>Classe</i>	Classe de temperatura
<i>Tmin</i>	Temperatura média inferior
<i>Tmax</i>	Temperatura média superior
<i>VmmMax</i>	Limite de escoamento
<i>TccMax</i>	Temperatura máxima de curto-circuito
<i>Kcc</i>	Coefficiente adiabático de aquecimento
<i>DccMax</i>	Densidade máxima de curto-circuito para duração de 1s
<i>KvEspMax</i>	Limite de impulso atmosférico (kV/espira)
<i>KvImmMax</i>	Limite de impulso atmosférico (kV/mm)
<i>KvSmmMax</i>	Limite de surto de manobra
<i>NbiMax</i>	Limite máximo permitido de NBI entre terminais
<i>Índice</i>	Índice de referência e controle do condutor
<i>Bitola</i>	Referência fabril do condutor
<i>Cs</i>	Seção condutiva do condutor
<i>Hd</i>	Altura do condutor
<i>Wd</i>	Largura direta do condutor
<i>Ws</i>	Largura sobreposta do condutor
<i>My</i>	Massa linear do condutor
<i>Ry</i>	Resistência linear do condutor
<i>DrI</i>	Limite típico de densidade de corrente do condutor
<i>Cy</i>	Custo linear do condutor
<i>Fam</i>	Família da solução.

<i>Cond</i>	Tipo de condutor utilizado na solução
<i>Ncam</i>	Número de camadas do enrolamento na solução
<i>Npar</i>	Número de condutores em paralelo do enrolamento na solução
<i>Di</i>	Diâmetro interno do enrolamento na solução
<i>Dm</i>	Diâmetro médio do enrolamento na solução
<i>Ds</i>	Diâmetro externo do enrolamento na solução
<i>He</i>	Altura do enrolamento na solução
<i>Nesp</i>	Número de espiras do enrolamento na solução
<i>Hw</i>	Distância de escoamento na solução
<i>Ha</i>	Distância de arco na solução
<i>.Tm</i>	Temperatura média em regime permanente do enrolamento na solução
<i>Tcc</i>	Temperatura média após curto-circuito do enrolamento na solução
<i>Hesp</i>	Altura da espira efetiva do enrolamento
<i>We</i>	Largura do enrolamento
<i>Scon</i>	Seção condutora do enrolamento
<i>Kc</i>	Fator de correção do erro de cálculo de indutância
<i>WA</i>	Potência dissipada por metro quadrado de superfície
<i>Ht</i>	Coefficiente de transferência de calor
<i>P</i>	Pressão do ar em atmosferas
θ	Elevação de temperatura da superfície em relação ao ar circundante
<i>Ir</i>	Corrente nominal
<i>It</i>	Corrente de ensaio
$\Delta\theta_r$	Elevação média de temperatura sob corrente nominal
$\Delta\theta_t$	Elevação média de temperatura sob corrente de ensaio
<i>q</i>	Expoente da fórmula de correção da temperatura medida
θ_0	Temperatura média inicial do enrolamento (antes do curto-circuito)
θ_t	Temperatura média final do enrolamento (após o curto-circuito)
<i>J</i>	Densidade de corrente de curto-circuito
<i>Q</i>	Calor gerado pelas perdas
<i>QA</i>	Calor absorvido pela massa do equipamento
<i>QD</i>	Calor dissipado para o ambiente
<i>P</i>	Perdas geradas

C_t	Capacidade calorífica do enrolamento
$d\theta$	Elevação de temperatura do enrolamento no período dt
P_d	Potência dissipada pelo enrolamento para o ambiente
E	Energia total absorvida pelo material
m	Massa do material (enrolamento)
C_E	Calor específico do material
SVC	Compensador estático (Static Var Compensation)
HVDC	Sistema de transmissão alta tensão em corrente contínua
LME	London Metal Exchange

RESUMO

A utilização de ferramentas de otimização pode significar um considerável ganho de competitividade nas empresas modernas. A aplicação destas ferramentas encontra espaço em praticamente qualquer área da atividade produtiva. Nas empresas fabricantes de equipamentos elétricos de alta potência, a necessidade de realização de projetos específicos leva a um esforço de projeto significativo, repetido diariamente. O desenvolvimento de ferramentas apropriadas para a tarefa de otimização de projeto de enrolamentos elétricos resulta em um ganho significativo de produtividade do setor de projeto, simultaneamente com a correta exploração das alternativas de projeto e fabricação disponíveis ao fabricante. Esta dissertação apresenta uma metodologia de otimização com características analíticas e enumerativas, que utiliza os próprios requisitos técnicos do enrolamento desejado para eliminar as alternativas de solução inviáveis. O desenvolvimento de equações de cálculo simplificadas permite uma análise veloz e abrangente do espaço de solução, descartando grandes blocos e reduzindo o espaço de solução a uma dimensão facilmente examinável. Modelos de cálculo precisos porém complexos e computacionalmente pesados são substituídos por equações simples, com precisão suficiente para permitir a análise comparativa de busca. O sistema foi aplicado ao projeto de bobinas circulares sem núcleo magnético.

ABSTRACT

The utilization of optimization tools may provide a significant increase in competitiveness at modern companies. The application of such tools may be suitable for almost every production activity. For the manufacturers of power system equipment, the need for customized design for each project demands considerable efforts from the project team on a day-to-day basis. The development of appropriate tools for the design optimization of electrical windings yields significant improvements in productivity of the project team, with the proper exploration of the construction and design alternatives available to the manufacturer. This thesis outlines an optimization method with analytical and enumerative characteristics, which take into consideration the technical requirements of the desired winding to discard the inadequate solution alternatives. The development of simplified calculation procedures allows the fast and comprehensive analysis of the solution space, dispensing with large blocks and reducing the solution space to a reasonable dimension for enumerative purposes. Accurate but complex and computationally heavy models for calculation are replaced by simple equations, with sufficient accuracy to provide a good comparative analysis. The procedure was implemented for the design optimization of air core circular coils.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 GENERALIDADES

A otimização é uma ferramenta de grande importância dentro das empresas, permitindo explorar as suas potencialidades e incrementando a competitividade. A busca por processos de otimização deve ser um processo constante dentro das empresas modernas.

Na área de equipamentos elétricos de alta potência, o desenvolvimento de projetos específicos para cada fornecimento exige um considerável esforço de projeto no sentido de buscar com rapidez a melhor solução para cada caso específico, utilizando as alternativas disponíveis e mantendo a eficiência exigida no panorama atual de mercado.

1.2 MOTIVAÇÃO

Um sistema de otimização específico para o projeto de enrolamentos torna-se um importante recurso para as empresas de equipamentos elétricos, considerados os pontos a seguir.

1.2.1 Panorama mundial de competitividade extrema

Muito embora a história nos mostre períodos de estagnação e até mesmo retrocesso, não se pode negar que a trajetória da humanidade tem como base um comportamento de evolução constante. A ciência tem neste processo papel fundamental, como agente modificador do homem e da sociedade. Se fosse possível traçar uma curva contínua indicando o conhecimento acumulado pela humanidade, poderia-se observar nas últimas décadas uma curva acentuadamente íngreme de desenvolvimento científico.

Esta aceleração no desenvolvimento do conhecimento pode ser considerada natural, e as conseqüências deste fenômeno são de difícil avaliação pelo ser humano.

Fenômenos como a globalização e a revolução das comunicações, principalmente através da Internet, são resultados sociais destes avanços tecnológicos. A disseminação do conhecimento atinge patamares nunca vistos, criando uma tendência de equalização, ou ao menos de aproximação, do conhecimento e da competitividade tecnológica entre países desenvolvidos e países antes considerados atrasados. Na indústria de equipamentos elétricos, o domínio de empresas clássicas com qualidade e confiabilidade indiscutível tende a ser substituído por um panorama de alta concorrência e competitividade.

Neste panorama, a utilização de ferramentas de otimização torna-se extremamente importante para garantir a competitividade de uma empresa, influenciando diversos fatores que podem impactar na chamada excelência operacional.

1.2.2 Sistema de projeto customizado

Do ponto de vista de projeto, a maior parte das indústrias de equipamentos elétricos de potência funciona no sistema de projeto customizado, ou seja, o projeto do equipamento deve ser todo desenvolvido para cada fornecimento. As características do equipamento desejado são geralmente definidas em uma especificação técnica, que deve funcionar como entrada de dados de todo o processo de projeto.

A figura 1.1 mostra a gama típica de valores de indutância e corrente para reatores nas aplicações de filtros de harmônicas, amortecimento da descarga em sistemas de compensação série, compensadores estáticos (SVC) e alisamento em sistemas de transmissão de alta tensão em corrente contínua (HVDC). Por se tratar de uma impedância reativa simples, o reator torna-se um elemento básico de ajuste do sistema elétrico, utilizado com as mais diversas finalidades. Entre outras aplicações, destacam-se as funções de limitação de corrente, seja entre barramentos ou para energização de bancos de capacitores derivação, fornos a arco, partida de motores, aterramento de neutro, etc. Na prática, o projeto de reatores customizados pode resultar

na combinação de quaisquer valores de indutância e corrente, exigindo alta flexibilidade de projeto.

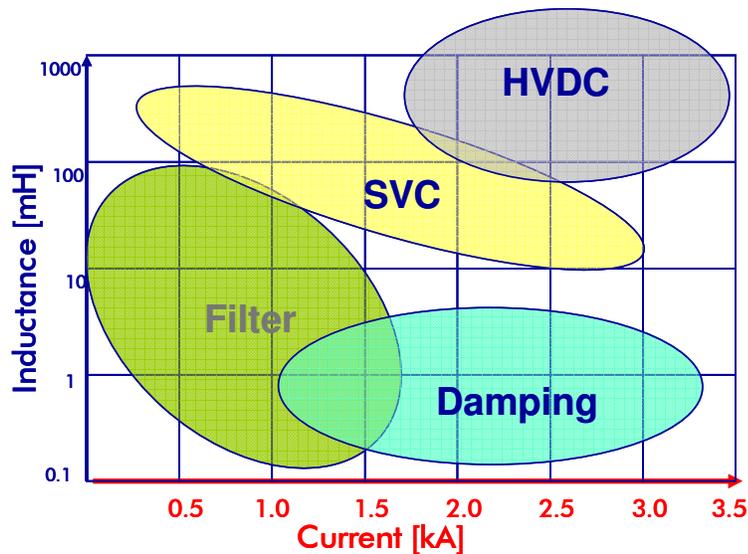


Figura 1.1 – Gama típica de valores de indutância e corrente por aplicação

Na prática, este tipo de empresa tem uma carga de trabalho bastante significativa no seu setor de projeto. Não raro torna-se impossível analisar todas as alternativas de projeto para um caso específico, seja pelo grande número de possibilidades envolvidas, seja pela necessidade de rapidez no projeto e preparação de ofertas. Um sistema de otimização apropriado pode incrementar a competitividade de uma empresa, ao fornecer o projeto ótimo e reduzir o tempo de projeto para cada equipamento ofertado.

1.2.3 Escassez e severas oscilações nos preços internacionais do cobre e alumínio

A utilização histórica do cobre como material condutor tem sido análise de diversos estudos recentes, indicando uma tendência de escassez deste metal. Embora muitas previsões pessimistas tenham se mostrado exageradas, torna-se claro que as reservas deste metal são limitadas e que a sua escassez deve se tornar um problema no futuro.

As severas oscilações nos preços internacionais do cobre são resultado desta limitação das reservas em conjunto com um aumento recente no consumo capitaneado

pelo desenvolvimento mundial acentuado. Apesar das fartas reservas, os preços do alumínio também têm sido significativamente afetados por este aumento no consumo.

A figura 1.2 mostra as cotações do cobre e alumínio no primeiro dia útil de cada mês na LME (London Metal Exchange), considerada a principal referência no comércio de metais não-ferrosos, entre os anos de 2002 e 2005. Os períodos de Maio a Dezembro de 2004 não foram analisados por falta de dados.

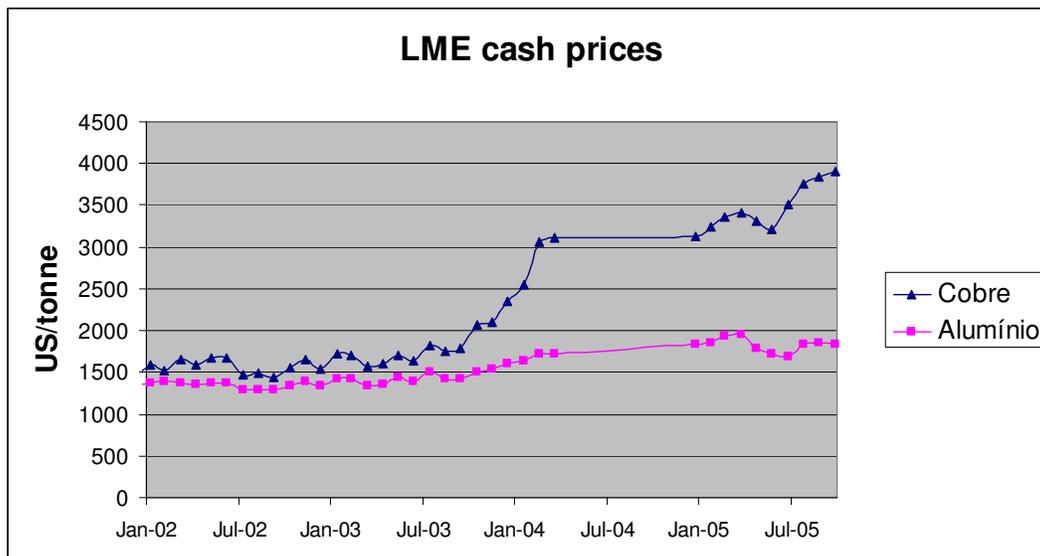


Figura 1.2 – Evolução das cotações internacionais do cobre e alumínio

O alumínio evoluiu de uma cotação de US\$ 1324,00 por tonelada no início de 2002 para US\$ 1831,00 (+ 38.3 %) no início de Outubro/2005, com pico de US\$ 2031,50 (+ 53.4 %) em 15 de Março de 2005.

O cobre evoluiu de uma cotação de US\$ 1431,00 por tonelada no início de 2002 para US\$ 3905,00 (+ 172.9 %) no início de Outubro/2005, com pico de US\$ 4142,50 (+ 189.5 %) em 26 de Outubro de 2005. As cotações internacionais do cobre têm mostrado uma tendência de crescimento.

Um sistema de otimização de projeto pode mostrar a solução mais interessante a partir de um determinado panorama de mercado, considerando em tempo real as oscilações de preços dos metais utilizados como condutores. Além disso, em um sistema

deste tipo a inclusão de uma nova alternativa de metal condutor pode ser implementada rapidamente, ampliando a análise de alternativas de projeto.

1.2.4 Dinâmica da matriz de materiais elétricos

A utilização de modelos construtivos clássicos, como o enrolamento de cobre, núcleo em aço silício e isolamento em papel e óleo para transformadores deve ser motivo de questionamento constante por parte das empresas. O surgimento de novos materiais e as mudanças na matriz de custos das empresas tornou outras alternativas construtivas mais interessantes, quando não apropriadas para casos específicos.

Novos materiais isolantes foram desenvolvidos no passado, para aplicações especiais. O aumento dos volumes e a amortização dos custos de desenvolvimento destes novos materiais têm reduzido consideravelmente os seus preços. Alguns materiais passaram a se tornar interessantes do ponto de vista de projeto, e este fenômeno deve continuar a acontecer com muitos outros. Um sistema de otimização que permita a rápida inclusão de um novo material isolante como alternativa de projeto deve permitir à empresa manter a devida atenção à evolução do mercado de materiais elétricos. Além disso, este sistema pode demonstrar situações especiais com relação aos requisitos especificados que podem tornar atrativa uma certa combinação de material condutor e isolante, a partir das propriedades físicas de cada material.

1.2.5 Variedade de alternativas construtivas

Frequentemente um mesmo equipamento pode ser construído com tecnologias completamente diferentes. Estas tecnologia pode estar ligada ao material do enrolamento, o tipo de isolamento, a geometria de construção, o sistema de resfriamento, entre outros. Cada tipo construtivo tem suas vantagens e geralmente produz o equipamento mais otimizado, ou de menor custo, dentro de uma certa faixa de características técnicas. Ainda dentro de uma mesma tecnologia construtiva, diversas opções de material podem ser encontradas, em termos dimensionais. Muitas vezes a combinação de fios de bitolas totalmente diferentes com o apropriado número de camadas pode resultar no melhor projeto, em um processo de difícil avaliação direta pelo projetista.

Na prática, as alternativas de projeto podem ser tantas que inviabilizam a correta avaliação de um time de projetistas durante um volumoso processo diário de projeto e geração de ofertas. Um fabricante que encontra sempre a melhor opção de projeto tem uma vantagem competitiva considerável sobre seus concorrentes.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo central deste trabalho consiste em desenvolver um sistema de otimização aplicável ao projeto de enrolamentos de equipamentos elétricos. As características desejadas deste sistema de otimização são apresentadas a seguir.

1.3.1 Abrangência

O sistema de otimização deve ser capaz de considerar todos os requisitos especificados para o enrolamento, sejam eles parâmetros ambientais, elétricos, mecânicos, térmicos, etc. O algoritmo deve encontrar uma solução ótima e assegurar que esta solução seja completamente aplicável, através de formulações adequadas. Da mesma forma, as soluções descartadas pelo sistema devem ser seguramente inviáveis como alternativa de projeto passível de avaliação.

1.3.2 Rapidez

O desempenho do sistema deve ser tal que permita a sua utilização em larga escala, dentro de um processo de projeto repetitivo, simultaneamente trabalhando com um espaço de solução extenso e de crescimento exponencial. A rapidez do sistema deve ser obtida através de formulações simplificadas de cálculo, estruturação do algoritmo e outros recursos que possam reduzir o tempo de processamento.

1.3.3 Precisão

As formulações desenvolvidas devem ter simplicidade suficiente para garantir rapidez de processamento mantendo um nível satisfatório de precisão dos cálculos, dentro dos limites de projeto esperados. A precisão alcançada deve ser considerada

suficiente para um processo de otimização, garantindo que os níveis de precisão sejam ser conhecidos e controlados. O nível de precisão do sistema deve ser suficiente e relativamente uniforme para garantir uma análise comparativa entre diferentes alternativas de projeto.

1.3.4 Flexibilidade e atualidade

A parametrização utilizada das tecnologias construtivas e dos materiais deve permitir a inclusão ou exclusão de novas tecnologias construtivas, novas opções de fabricação (mandris, maquinário, etc) e novos materiais, entre outros. A finalidade é permitir a introdução de novos materiais com facilidade, para analisar e avaliar suas possíveis vantagens. Da mesma forma, a utilização de uma nova tecnologia construtiva com suas características próprias ou a fabricação de uma nova ferramenta de fabricação (por exemplo um mandril de diâmetro diferente) podem ser analisados. Além disso, o sistema deve permitir também a alteração de critérios de projeto para avaliar o impacto destas alterações.

A base de dados de custo deve ser construída de maneira a permitir a sua revisão constante, mantendo o sistema sempre atualizado e confiável. Um exemplo típico seria o sistema carregando os dados de custo diretamente da base de dados de estoque ou inventário da empresa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CÁLCULOS DE INDUTÂNCIA

2.1.1 Introdução

O cálculo de indutâncias para geometrias circulares é um problema clássico na engenharia elétrica, tendo sido tratado por diversos pesquisadores desde o século XIX, para diversos casos e geometrias específicos. Entre os estudos mais antigos destacam-se as expressões desenvolvidas por Kirchhoff e Cohen [14] para bobinas concêntricas coaxiais de camada simples, e as expressões desenvolvidas por Nagaoka e Olshausen [15] para casos não concêntricos.

O desenvolvimento destas expressões de forma fechada foi dificultado pelo tempo excessivo requerido para calcular as diferentes funções envolvidas. O desenvolvimento de fórmulas de série para geometrias especiais e a investigação do domínio de cada fórmula tomaram a maior parte do esforço de pesquisa .

A utilização de tabelas-padrão como as publicadas por Rosa [16] e Grover [17], conjugadas com fórmulas simples, tornaram-se uma alternativa interessante para o cálculo de indutâncias numa ampla faixa, evitando o trabalho computacional de cálculo das séries. Apesar do advento dos computadores, em muitos casos estas máquinas são utilizadas apenas para armazenar os dados das tabelas e fazer a interpolação dupla.

Estas tabelas podem apresentar resultados satisfatórios, mas em muitos casos apresentam também várias desvantagens. O principal problema consiste em controlar a precisão alcançada com estes métodos. As precisões alcançadas são limitadas, não-controladas e frequentemente desconhecidas. Grandes precisões são frequentemente necessárias quando indutâncias aparecem em cálculos intermediários, mesmo que o

grau de interesse seja requerido com uma precisão bem mais baixa. Um exemplo é a análise de circuitos indutivos altamente acoplados, com fontes de tensão, onde a matriz de impedância é geralmente mal condicionada e muito sensível a pequenas variações em seus elementos. É o caso dos equipamentos de potência em análise neste trabalho, compostos por enrolamentos múltiplos conectados em paralelo.

O livro de Grover [1] estabelece as fórmulas básicas e os principais métodos para cálculo de indutância aplicados em casos específicos. O livro é uma poderosa fonte de referências bibliográficas para o assunto em questão.

2.1.2 Cálculos Básicos

As fórmulas aplicáveis aos tipos construtivos mais comuns de enrolamentos elétricos partem das fórmulas básicas, assumindo situações ideais. A partir destas fórmulas básicas são desenvolvidas fórmulas apropriadas para a geometria de cada tipo construtivo. Neste trabalho foi dada ênfase ao caso específico de bobinas circulares de camada singular sem núcleo magnético.

De uma maneira geral, as formulações aplicáveis ao cálculo de indutâncias partem de duas formulações básicas:

- a primeira formulação é baseada na definição de linhas de fluxo por Ampère.
Para calcular as linhas de fluxo faz-se necessário escrever a expressão para indução magnética em um determinado ponto do campo e então integrar esta expressão no espaço ocupado pelo fluxo ligado ao elemento em questão.

- a formulação conhecida como método de Neumann baseia-se na aplicação direta da lei de Biot-Savart, e fornece a fórmula mais geral para cálculo de indutância mútua. Ela leva a uma expressão formal muito simples, mas na maioria das vezes não é possível realizar as integrações.

Estes equacionamentos formam a base teórica definitiva para o cálculo de indutância. Para alguns problemas específicos é possível realizar diretamente a

integração das fórmulas básicas em torno da seção transversal do enrolamento. Para a solução de geometrias e problemas específicos foram desenvolvidos dezenas de métodos, em função da sua aplicabilidade ou adequação ao problema em análise. Entre outros métodos, alguns dos mais utilizados são apresentados no livro de Grover [1], como por exemplo:

- Expansão em Séries de Taylor
- Fórmula da Quadratura de Rayleigh
- Método de Lyle de Filamentos Equivalentes
- Princípio da Seção
- Método da Distância Média Geométrica
- Correções do Espaço Isolante

2.1.3 Indutância própria de bobinas circulares de camada singular

A bobina circular de camada singular, construída com o enrolamento helicoidal simples de uma única camada de fio sobre um mandril cilíndrico, apresenta uma geometria construtiva básica encontrada em diversos enrolamentos elétricos. As bobinas circulares de camada singular apresentam, entre outras vantagens, a simplicidade, o baixo custo de fabricação e a baixa capacitância efetiva do enrolamento. Esta última faz com que este tipo de bobina seja largamente utilizada em circuitos de alta frequência, principalmente quando não são necessários altos valores de indutância. Além disso, esta geometria pode ser considerada o elemento básico de enrolamentos elétricos aplicados na maior parte dos equipamentos elétricos construídos.

O cálculo de indutância de uma bobina de camada singular é baseado nas fórmulas para uma lâmina cilíndrica de corrente, ou seja, um enrolamento onde a corrente flui ao redor do eixo de um cilindro em uma camada de espessura radial infinitesimal sobre a superfície deste cilindro. Exceto no caso de enrolamentos helicoidais muito abertos (espaçados), a indutância de uma bobina de camada simples é aproximadamente igual à desta lâmina cilíndrica de corrente tendo o mesmo número de espiras N da bobina, o mesmo raio médio a e um comprimento b igual ao número de espiras vezes a distância entre centros dos fios de duas espiras adjacentes.

Entre as principais fontes de informação sobre o cálculo de indutância de bobinas circulares estão a obra de Grover [1], Dwight [2] e Welsby [3]. Alguns dos diversos métodos estudados são muito conhecidos e utilizados, enquanto outros foram analisados por apresentar vantagens principalmente de simplicidade. Os métodos pesquisados são apresentados a seguir:

a) Fórmula de Nagaoka

A formulação de Nagaoka [4] é baseada na conhecida fórmula para indutância de uma lâmina cilíndrica de corrente de comprimento infinito, onde a indutância é proporcional ao quadrado do número de espiras e à área da seção transversal da bobina, e inversamente proporcional ao comprimento de enrolamento. A fórmula de Nagaoka aplica um fator de correção que leva em consideração o efeito das extremidades da bobina real. A figura 2.1 mostra os principais parâmetros de uma bobina circular de camada simples. Na figura, uma bobina de três camadas é analisada como uma bobina de camada singular com número de espiras N igual à média das três camadas. O comprimento (ou altura) do enrolamento, bem como o diâmetro da bobina, também são considerados pelos seus valores médios.

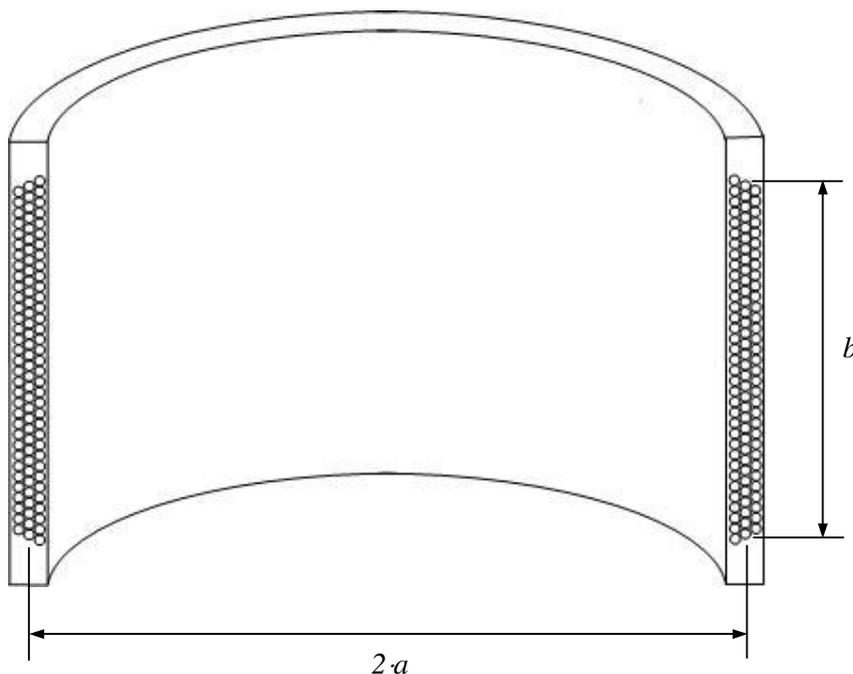


Figura 2.1 – Bobina circular com três camadas

A fórmula tradicional de Nagaoka é:

$$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot b \cdot K \quad (2.1)$$

Onde:

- μ_0 = constante de permeabilidade do vácuo
- n = densidade de enrolamento, em espiras por centímetro do comprimento axial
- a = raio médio da bobina
- b = comprimento axial da bobina
- K = fator de Nagaoka, para correção do efeito das extremidades

A mesma fórmula também pode ser expressa pelo número total de espiras N da bobina, explicitando a variação da indutância inversamente proporcional ao comprimento da bobina.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot \pi \cdot a^2}{b} \cdot K \quad (2.2)$$

O valor do fator K é função do fator geométrico $2a/b$ (diâmetro / comprimento) da bobina. No livro de Grover [1] podem ser encontradas as tabelas padrão com os valores do fator K para cada centésimo do fator geométrico, calculadas por uma combinação de diferentes soluções de forma fechada série para alcançar precisões mais altas. A figura 2.2 mostra o valor do fator K em função da relação $2a/b$ para bobinas curtas e longas.

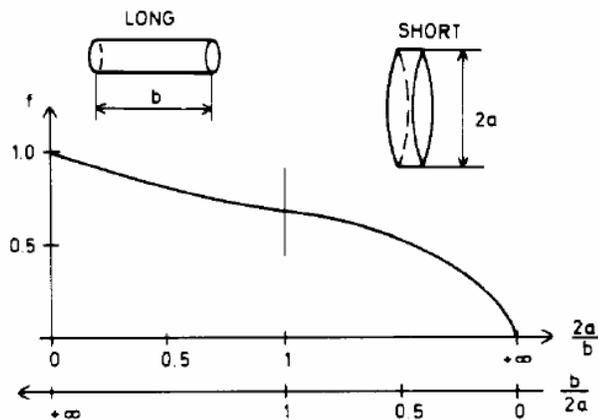


Figura 2.2 – Fator de Nagaoka em função do fator geométrico da bobina [11]

Em 1985, Lundin [11] desenvolveu o cálculo do fator K através de fórmulas aplicáveis às bobinas denominadas curtas (comprimento menor que o diâmetro) e às chamadas bobinas longas (comprimento maior que o diâmetro). As fórmulas de Lundin são assintoticamente corretas e permitem o cálculo de indutâncias com um erro relativo máximo inferior a $0.3 \cdot 10^{-5}$. As fórmulas de Lundin para o cálculo do fator K são apresentadas a seguir, em função do fator geométrico α , sendo:

$$\alpha = \frac{b}{2 \cdot a} \quad (2.3)$$

Para bobinas curtas ($\alpha \leq 1$):

$$K = \frac{2 \cdot \alpha}{\pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{4}{\alpha} - \frac{1}{2} \right) \cdot F + G \right) \quad (2.4)$$

Sendo:

$$F = \frac{1 - 0.383901 \cdot \alpha^2 + 0.017108 \cdot \alpha^4}{1 + 0.258952 \cdot \alpha^2} \quad (2.5)$$

$$G = 0.093842 \cdot \alpha^2 + 0.002029 \cdot \alpha^4 - 0.000801 \cdot \alpha^6 \quad (2.6)$$

Para bobinas longas ($\alpha \geq 1$):

$$K = \frac{1 + \frac{0.383901}{\alpha^2} + \frac{0.017108}{\alpha^4}}{1 + \frac{0.258952}{\alpha^2}} + \frac{0.42441318}{\alpha} \quad (2.7)$$

A aplicação da fórmula de Nagaoka apresentada acima fornece resultados com erro inferior a 0.01 %, quando comparados aos resultados obtidos com a utilização da transformada de Bartky, desenvolvida principalmente para o cálculo de indutâncias mútuas, sendo aplicável também no cálculo de indutâncias próprias (ver item 2.1.4).

b) Fórmula simplificada de Wheeler

A formulação de Wheeler [9], apresentada em 1928, foi desenvolvida principalmente para a fabricação de bobinas para alta frequência. Sua principal

vantagem é a extrema simplicidade, sem a utilização de logaritmos ou polinômios complexos. Esta simplicidade da fórmula relacionando indutância, diâmetro médio e número de espiras permite a dedução de expressões simplificadas para a obtenção de um destes parâmetros em função dos outros dois. A fórmula simplificada de Wheeler, já convertida para unidades métricas, é apresentada a seguir:

$$L = \frac{D^2 \cdot N^2}{b + 0.45 \cdot D} = \frac{4 \cdot a^2 \cdot N^2}{b + 0.9 \cdot a} \quad (2.8)$$

A fórmula não é apropriada para bobinas muito curtas (comprimento / diâmetro < 0.4). No entanto, ainda é possível utilizar este equacionamento em uma ampla gama de situações e projetos, uma vez que não há vantagem em se utilizar bobinas com relação comprimento / diâmetro inferior a 0.4. Deve-se levar em consideração que fatores geométricos abaixo de 0.4 levam a uma tendência exponencial de aumento do comprimento de enrolamento, e por conseguinte do custo. Também não há nenhuma vantagem técnica em se trabalhar com bobinas curtas, já que as exigências dielétricas geralmente implicam em aumento do comprimento de enrolamento (bobinas longas).

Para bobinas de maior comprimento a estimativa de erro máximo é de 1%, embora as verificações tenham encontrado valores um pouco superiores. Ainda assim, os maiores erros encontrados ficam abaixo de 2%. O comportamento relativamente constante do erro em função do fator geométrico permite ainda a adoção de fatores de correção, reduzindo o erro prático obtido com esta formulação.

O mesmo autor desenvolveria ainda outras fórmulas de diferentes precisões através da utilização de aproximações assintóticas, que são apresentadas adiante.

c) Fórmulas de Foelsch

Uma formulação bastante prática para o cálculo de indutância própria de uma bobina de camada singular foi desenvolvida por Foelsch [13]. Ele partiu da formulação de Hak, que estabelece a fórmula para cálculo da indutância através do fator de indutância l , como segue:

$$L = 2 \cdot \pi \cdot D \cdot N^2 \cdot l \quad (2.9)$$

Hak calculou curvas para fator de indutância constante e as apresentou graficamente em função dos coeficientes geométricos α e σ , sendo:

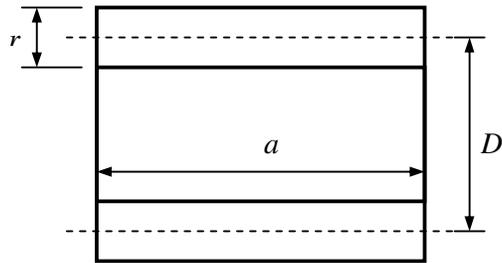


Figura 2.3 – Principais dimensões da bobina para cálculo de Foelsch

$$\frac{a}{D} = \alpha \quad \text{e} \quad \frac{r}{D} = \sigma$$

Foelsch utilizou diversas formulações de cálculo de indutância para estabelecer o cálculo do fator de indutância em função dos coeficientes α e σ . Para manter a precisão estimada de 0.3 % foi preciso estabelecer fórmulas distintas para diferentes valores de α . Para $0 \leq \alpha \leq 0.8$, o fator de indutância é calculado por uma fórmula do tipo:

$$f(\alpha, \sigma) = A + B \cdot \alpha + (C + D \cdot \alpha) \cdot \sigma^2 \quad (2.10)$$

Os fatores A , B , C e D também variam em função dos valores de α , dentro de algumas faixas. Para valores de $\alpha \geq 0.8$, a fórmula de cálculo do fator de indutância é do tipo:

$$f(\alpha, \sigma) = \frac{A + B \cdot \sigma + C \cdot \sigma^2}{D + \alpha + E \cdot \sigma} \quad (2.11)$$

d) Fórmulas de Wheeler por aproximação assintótica

A curva para o fator K que leva em consideração o efeito das extremidades das bobinas foi tratada através de uma aproximação assintótica por Wheeler [10], em 1982. Na prática, o autor utilizou a formulação de Nagaoka, porém desenvolveu as seguintes

fórmulas assintóticas para o fator K para ambos os extremos geométricos (bobinas curtas e longas):

Para bobinas curtas ($\alpha \leq 1$):

$$(\pi \cdot a/b) \cdot K = \ln\left(\frac{8 \cdot a}{b}\right) - \frac{1}{2} \quad (2.12)$$

Para bobinas longas ($\alpha \geq 1$):

$$K = \frac{1}{1 + \frac{8 \cdot a}{3 \cdot \pi \cdot b}} \quad (2.13)$$

A fórmula de Nagaoka foi desenvolvida para bobinas curtas e longas, com a aplicação de fatores que permitiram atenuar o erro e mantê-lo relativamente constante em ambos os tipos de bobinas. As fórmulas desenvolvidas são apresentadas a seguir:

- A partir do formato de bobinas curtas:

$$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot a \cdot [0.48 \cdot \ln(1 + \pi \cdot a/b) + 0.52 \cdot a \sinh(\pi \cdot a/b)] \quad (2.14)$$

Esta fórmula apresenta erro estimado máximo de 1.7 %.

- A partir do formato de bobinas longas:

$$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot a \cdot \left(\frac{2.78}{b/a + 1.1} + \ln(1 + 0.39 \cdot b/a) \right) \quad (2.15)$$

Esta fórmula apresenta erro estimado máximo de 1.0 %.

- A partir do formato de bobinas curtas:

$$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot a \cdot \left(\ln(1 + \pi \cdot a/b) + \frac{1}{2.3 + 1.6 \cdot b/a + 0.44 \cdot (b/a)^2} \right) \quad (2.16)$$

Esta fórmula apresenta erro estimado máximo de 0.1 %.

2.1.4 Indutância mútua de bobinas circulares

A transformada de Bartky pode ser utilizada para calcular diferentes integrais elípticas. A aplicação da transformada para resolver as integrais elípticas resultantes do cálculo de indutâncias próprias e mútuas de bobinas circulares foi desenvolvida em 1978 por T.H. Fawzi e P.E. Burke [5]. A transformada de Bartky ainda foi utilizada pelos mesmos autores para o cálculo da derivada das indutâncias mútuas, no cálculo de forças de curto-circuito entre bobinas [6].

O método de cálculo começa com a expressão de Neumann para indutância, integrando analiticamente ao longo dos comprimentos das bobinas e utilizando a transformada de Bartky sucessivamente, para reduzir o integrando a uma forma que possa ser integrada analiticamente na direção angular. Foi desenvolvido um algoritmo que permite o cálculo de indutâncias em geometrias concêntricas e não concêntricas com precisão controlada.

A utilização da transformada de Bartky permite o cálculo exato de indutâncias próprias e mútuas independentemente das dimensões das bobinas, tornando-se assim o cálculo de referência para comparação dos demais métodos. No entanto, o algoritmo inclui um segmento iterativo de cálculo que torna impossível a sua dedução analítica, no sentido de desenvolver expressões diretas relacionando diâmetro, número de espiras e indutância. Computacionalmente, as iterações não chegam a tornar o cálculo de indutância pesado para um projeto específico, mas inviabiliza a sua utilização em qualquer sistema de busca e otimização que implique no desenvolvimento de um grande número de alternativas de projeto.

Por este motivo, a transformada de Bartky deve ser utilizada especificamente para o projeto final do enrolamento, após o sistema de otimização determinar a melhor solução de projeto através da utilização de métodos mais rápidos e diretos de cálculo de indutância.

2.2 CÁLCULOS TÉRMICOS

2.2.1 Considerações sobre transmissão de calor

A transmissão de calor pode ser definida como a transmissão de energia de uma região para outra, como resultado da diferença de temperatura entre elas. O fluxo de calor, no entanto, não é influenciado por apenas uma única relação, mas por uma combinação de várias leis independentes da física. De uma maneira geral, três modos distintos de fenômenos são considerados: condução, radiação e convecção. Estes três fenômenos ocorrem simultaneamente e dependem de uma série de variáveis próprias do equipamento sob análise, como geometria, disposição, propriedades físicas dos materiais, etc.

Do ponto de vista da engenharia a questão fundamental é a determinação da transmissão de calor por unidade de tempo, para uma diferença de temperatura especificada. Uma análise detalhada do equipamento deve ser realizada para estimar a quantidade de calor transmitida, requerendo sempre algumas premissas e idealizações. É quase impossível descrever exatamente os fenômenos físicos envolvidos e, para exprimir o problema na forma de uma equação que possa ser resolvida, são necessárias algumas aproximações. Propriedades físicas como a condutibilidade térmica ou a viscosidade variam com a temperatura mas, se são selecionados valores médios adequados, é possível simplificar consideravelmente os cálculos sem a introdução de erros significativos no resultado final.

Os cálculos térmicos de equipamentos elétricos, principalmente com relação à elevação de temperatura em regime permanente, requerem uma modelagem desenvolvida especialmente para o equipamento sob projeto, a partir das características próprias dos materiais utilizados e do modelo construtivo do fabricante. Esta modelagem é normalmente muito complexa e computacionalmente pesada, como por exemplo no caso da utilização de métodos de elementos finitos.

Assim sendo, o método simplificado de cálculo de temperatura utilizado para o sistema de otimização deve ser desenvolvido especificamente para cada aplicação,

respeitando as características de cada equipamento e cada tecnologia construtiva. Este método de cálculo deve ser definido a partir de uma simplificação apropriada da modelagem completa do equipamento, permitindo um cálculo rápido com precisão satisfatória.

Os dois itens seguintes apresentam um estudo das normas nacionais e internacionais aplicáveis a transformadores e reatores de potência. Os métodos recomendados de correção de temperatura em ensaios elétricos são analisados com relação à sua utilização no desenvolvimento de uma modelagem simplificada de cálculo de temperatura.

2.2.2 Referências práticas de cálculo em regime permanente

a) Transmissão de calor

CONDUÇÃO: Quando o calor é conduzido através de um corpo uniforme, a queda de temperatura é proporcional à distância ao longo do fluxo de calor e à densidade de potência conduzida (potência pela seção transversal). No projeto de um enrolamento elétrico, o fenômeno de condução não influencia diretamente a capacidade de dissipação total do enrolamento para o ambiente (ar, óleo, etc.) que o envolve. A condução é responsável por uma diferença de temperatura no condutor em relação à média da sua seção, com pontos mais quentes no seu interior. Esta diferença de temperatura pode ser significativa ou não, dependendo das dimensões do condutor, condutividade térmica do material, etc. No entanto, a temperatura máxima no interior do condutor pode não ser relevante, quando o limite de projeto é definido pelas características do material isolante, em contato apenas com as superfícies externas do condutor. Mesmo quando esta diferença de temperatura é relevante, um valor aproximado pode ser estimado e parametrizado como uma característica intrínseca do condutor. Por este motivo, o fenômeno de condução não precisa ser levado em consideração no projeto simplificado desenvolvido para o algoritmo de otimização.

RADIAÇÃO: Quando se trata do calor dissipado por um enrolamento imerso em um ambiente, os fenômenos atuantes são basicamente radiação e convecção. De uma maneira geral, a transmissão de calor por radiação apresenta valores bem inferiores aos

da transmissão por convecção. Os cálculos de radiação são também bastante complexos, pois devem considerar o coeficiente de emissividade do material e a radiação solar absorvida pelo equipamento. Na prática, a radiação solar absorvida torna a dissipação por radiação ainda menor. Assim sendo, a radiação não é considerada um fenômeno relevante no projeto simplificado, embora sua influência possa ser estimada por métodos bastante simples.

CONVECÇÃO: O fenômeno predominante de dissipação de calor por equipamentos elétricos é a convecção, dita natural quando as correntes de ar são basicamente aquelas causadas pelo aquecimento do ar. Quando o ar é colocado em movimento por meios mecânicos, como ventiladores, o resfriamento é dito por convecção forçada.

O fluxo de calor de uma superfície de dimensões significativas (acima de 30 cm) por convecção natural para o ar pode ser calculado por uma fórmula do tipo:

$$W_A = H_t \cdot P^{0.5} \cdot \theta^{1.25} \quad (2.17)$$

onde:

W_A = potência dissipada por metro quadrado de superfície (W/m^2)

H_t = coeficiente de transferência de calor ($W/m^2 \cdot K$)

P = pressão do ar em atmosferas (ao nível do mar e pressão normal = 1)

θ = elevação de temperatura da superfície de dissipação em relação ao ar circundante (K)

Na prática a capacidade de dissipação por convecção de um equipamento é influenciada por uma série de fatores como geometria, materiais, ventiladores, disposição, etc. No entanto, o projeto de um equipamento específico geralmente é definido pelos valores de temperatura e dissipação obtidos para um dado ponto crítico, podendo ser simplificado por uma equação semelhante à equação 2.17, definido o correto coeficiente de transferência de calor para o equipamento em análise e um eventual ajuste do coeficiente exponencial aplicado à elevação de temperatura.

- b) Correção da elevação de temperatura média do enrolamento para corrente reduzida, segundo norma IEEE.

A norma IEEE Std. C57.16-1996 [18], aplicável a reatores série de núcleo de ar tipo seco, menciona a possibilidade de realização de ensaio de elevação de temperatura com uma corrente de ensaio inferior à corrente nominal. Neste caso, a elevação de temperatura nas condições nominais deve ser calculada através de uma correção do valor obtido em ensaio, conforme o trecho a seguir, extraído da norma.

”Quando a corrente de ensaio I_t utilizada no ensaio for inferior à corrente nominal I_r , quando não inferior a 90 %, a elevação de temperatura medida $\Delta\theta_t$ do enrolamento pelo método da variação de resistência deve ser corrigida para a elevação $\Delta\theta_r$ sob condições nominais pela fórmula:

$$\Delta\theta_r = \Delta\theta_t \cdot \left[\frac{I_r}{I_t} \right]^2 \quad (2.18)$$

onde:

I_r = corrente nominal

I_t = corrente de ensaio

$\Delta\theta_r$ = elevação média de temperatura sob corrente nominal

$\Delta\theta_t$ = elevação média de temperatura sob corrente de ensaio “

Uma nota na norma chama a atenção ao fato de que o expoente 2 da fórmula acima é um valor máximo, de caráter conservativo, dentro de uma faixa típica de 1.6 a 2. Um valor mais apropriado para o coeficiente poderia ser obtido através de ensaio. A própria norma, portanto, indica que a elevação de temperatura média poderia ser proporcional à corrente circulante, através de um fator expoente específico do equipamento. A fórmula indicaria uma predominância acentuada do resfriamento por convecção, como já comentado no item anterior.

- c) Correção da elevação de temperatura média do enrolamento para corrente reduzida, segundo normas IEC

A norma IEC 60076-2 [20], aplicável a transformadores de potência, menciona também a possibilidade de realização do ensaio de elevação de temperatura com uma corrente de teste inferior à corrente nominal. O mesmo procedimento é mencionado na IEC 60289 [19], aplicável a reatores, e na IEC 60076-11 [22], aplicável a transformadores do tipo seco. As normas recomendam uma correção idêntica à recomendada pela IEEE C57.16, porém indicam os seguintes valores para o expoente da fórmula:

IEC 60076-2:

$q = 1.6$ para transformadores com resfriamento ON e OF (óleo, circulação natural e forçada)

$q = 2.0$ para transformadores com resfriamento OD (óleo, circulação forçada em equipamento de refrigeração)

IEC 60289 e IEC 60076-11:

$q = 1.6$ para transformadores com resfriamento AN (ar, circulação natural)

$q = 1.8$ para transformadores com resfriamento AF (ar, circulação forçada)

Dessa forma, as normas IEC para reatores e transformadores de potência também indicariam uma predominância acentuada do resfriamento por convecção.

2.2.3 Referências práticas de cálculo em regime transitório

a) Elevação de temperatura devido ao curto-circuito

A IEC 60076-5 [21], aplicável a transformadores de potência, indica as seguintes fórmulas para o cálculo da temperatura média θ_l atingida pelo enrolamento após o curto-circuito:

$$\text{Enrolamento de cobre: } \theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \cdot (\theta_0 + 235)}{\frac{106000}{J^2 \cdot Dur} - 1} \quad (2.19)$$

$$\text{Enrolamento de alumínio: } \theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \cdot (\theta_0 + 225)}{\frac{45700}{J^2 \cdot Dur} - 1} \quad (2.20)$$

onde:

θ_0 = temperatura média inicial do enrolamento ($^{\circ}\text{C}$)

J = densidade de corrente de curto-circuito, baseada no valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrica (A/mm^2)

Dur = duração do curto-circuito (segundos)

As fórmulas apresentadas são baseadas em condições adiabáticas, válidas apenas para curtos intervalos de tempos, não superiores a 10 segundos. A formulação assume a absorção de calor apenas pelo material condutor do enrolamento, sem considerar a massa isolante, adquirindo assim um caráter conservativo. Os coeficientes das fórmulas foram desenvolvidos a partir dos seguintes valores de propriedade dos materiais:

	Cobre	Alumínio
Coeficiente térmico K_t	235	225
Calor específico a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$]	398.4	928
Densidade a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [kg/m^3]	8894	2685
Resistividade a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$\Omega\cdot\text{m}$]	$2.24\cdot 10^{-8}$	$3.55\cdot 10^{-8}$

Tabela 2.1 – Propriedades físicas do cobre e alumínio

O método de cálculo da elevação de temperatura após curto-circuito apresentado pela IEEE Std. C57.16 [18] utiliza uma formulação semelhante, porém mais detalhada. Para fins de projeto no sistema de otimização, o método apresentado pela IEC foi considerado satisfatório devido à sua simplicidade, o caráter conservativo e a abrangência global da norma. As propriedades físicas e elétricas dos materiais utilizados no sistema implementado foram obtidas do “*Standard Handbook for Electrical Engineers*” [8].

b) Elevação de temperatura devido a ciclos de sobrecarga

Para sobrecorrentes de duração superior a 10 segundos é recomendável a utilização de uma modelagem mais abrangente, levando em consideração a dissipação de calor do enrolamento para o ambiente. A equação fundamental de temperatura de um equipamento elétrico relaciona a energia térmica (calor), gerada pelas perdas, com o calor absorvido pela massa do equipamento e o calor dissipado no ambiente. Assim, temos:

$$Q = Q_A + Q_D \quad (2.21)$$

onde:

Q = calor gerado pelas perdas

Q_A = calor absorvido pela massa do equipamento (para elevar a sua temperatura)

Q_D = calor dissipado para o ambiente

Quando o equipamento opera em equilíbrio térmico, o calor gerado pelas perdas é idêntico ao calor dissipado para o ambiente. O equipamento não absorve nenhum calor, e a sua temperatura é mantida constante. No momento em que um equipamento é energizado, o calor dissipado para o ambiente é nulo (uma vez que não há diferença de temperatura entre o equipamento e o ambiente), e todo o calor gerado pelas perdas iniciais é absorvido pelo equipamento, provocando sua elevação de temperatura e o conseqüente surgimento de uma dissipação para o meio ambiente. De uma maneira geral, a equação de temperatura em um dado instante pode ser reescrita para um intervalo de tempo dt , na forma diferencial, segundo a fórmula abaixo:

$$P \cdot dt = Ct \cdot d\theta + Pd \cdot dt \quad (2.22)$$

onde:

P = perdas [W]

Ct = capacidade calorífica do enrolamento, em [J/°C]. É a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura do enrolamento em 1 °C, calculada pelo calor específico e a massa de cada material.

$d\theta$ = elevação de temperatura do enrolamento no período dt [°C]

Pd = potência dissipada pelo enrolamento para o ambiente [W]

θ = elevação de temperatura do reator [°C]

A elevação (ou curva de elevação) de temperatura devido a uma corrente de sobrecarga pode ser calculada pela equação 2.22. No entanto, a potência dissipada depende da elevação de temperatura, que sofre impacto da própria sobrecarga. Por este motivo, a elevação de temperatura $d\theta$ causada pelo impulso de corrente de sobrecarga deve ser calculada cumulativamente em pequenos intervalos de tempo dt , de maneira a refletir o comportamento diferencial da elevação de temperatura.

CAPÍTULO 3

CODIFICAÇÃO DE DADOS E DEFINIÇÕES BÁSICAS

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A modelagem apresentada neste trabalho foi desenvolvida para aplicação em projeto de enrolamentos elétricos de potência compostos por uma ou mais camadas de enrolamento conectadas em paralelo. O modelo foi aplicado no projeto de enrolamentos de reatores de núcleo de ar, como estudo de caso, conforme a figura 3.1.

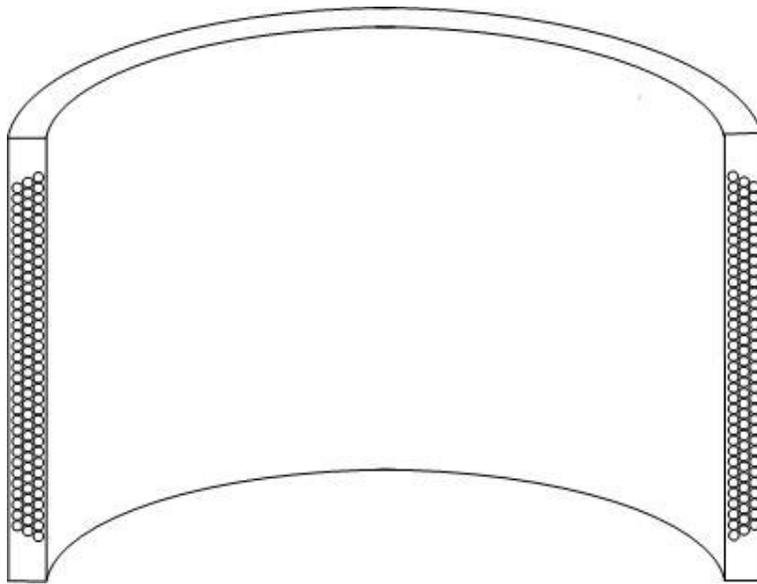


Figura 3.1 – Enrolamento de um reator de núcleo de ar típico (3 camadas)

Os equipamentos elétricos são normalmente construídos por vários enrolamentos concêntricos como o ilustrado, formando cilindros concêntricos. Geralmente cada cilindro é um conjunto de camadas utilizando um condutor com as mesmas características, também conectadas em paralelo. O modelo assume que em um

determinado cilindro apenas um condutor (bitola) pode ser utilizado. A modelagem apresentada pode ser ampliada para considerar diversos cilindros concêntricos.

Este modelo construtivo é aplicável para a maioria dos enrolamentos de equipamentos elétricos de alta potência, onde a seção condutiva é formada por diversos enrolamentos menores conectados em paralelo.

O sistema desenvolvido deve fornecer o projeto ótimo de um enrolamento elétrico a partir de um conjunto de características desejadas, rastreando um espaço de solução formado por todas as alternativas construtivas disponíveis. Assim sendo, o conjunto de variáveis implementado no sistema deve permitir a parametrização completa dos dados de projeto do enrolamento e das tecnologias construtivas disponíveis ao projetista.

As características do enrolamento em projeto são definidas pelo conjunto de variáveis denominado “Variáveis de projeto”, envolvendo dados elétricos, ambientais e restrições típicas de projeto, como perdas e elevação máxima de temperatura média. Os valores destas variáveis são atribuídos a cada novo projeto de enrolamento, compondo a entrada de dados de projeto.

As variáveis responsáveis pela definição do espaço de solução, por sua vez, devem ser tais que permitam definir diferentes soluções construtivas, no que diz respeito tanto aos materiais empregados quanto aos métodos de construção do enrolamento (núcleos, gabaritos, encapsulamentos, carcaças, etc.). As variáveis devem informar as características e restrições de cada solução construtiva, como limites dimensionais, térmicos e mecânicos, conjunto de condutores disponíveis e suas características, etc. Este conjunto de variáveis deve atender os seguintes critérios:

- generalização: as variáveis devem ser aplicáveis a diferentes tecnologias construtivas, ou seja, podem ser aplicadas a um enrolamento seco ou imerso a óleo, com ou sem núcleo de ferro, condutores redondos ou retangulares, etc.

- limites próprios: as variáveis devem informar os limites próprios da solução em questão, abrangendo limites dimensionais, elétricos, térmicos, mecânicos, etc.

- lógica construtiva: as variáveis devem informar as regras de construção e manufatura da tecnologia em análise, como conjuntos de gabaritos, passos dimensionais, conjuntos de acessórios e regras de escolha, etc. As informações devem permitir ao sistema desenvolver as soluções de projeto reais (viáveis na prática), dentro do processo de projeto normal do equipamento.

Para efeito de padronização, as variáveis dimensionais do enrolamento foram nomeadas considerando a instalação do enrolamento na posição vertical, como ocorre no reator de núcleo de ar e na maior parte dos equipamentos de potência. Assim sendo, o enrolamento é definido por um cilindro na vertical, com diâmetro interno, diâmetro externo e altura, denominada altura de enrolamento. O número de espiras foi considerado o mesmo em todas as camadas. Alguns equipamentos podem requerer número de espiras ligeiramente diferentes em cada camada, mas na prática é possível tratar o projeto do enrolamento através de um número médio de espiras.

As variáveis apresentadas neste trabalho têm por principal objetivo a nomenclatura de referência para o desenvolvimento das equações. Por este motivo, não são determinadas as parametrizações de variável típicas do trabalho computacional, que devem ser realizadas de acordo com as características de cada tecnologia ou interface com programas de projeto específicos.

3.2 VARIÁVEIS DE PROJETO

O sistema de otimização deve definir o melhor projeto para um determinado enrolamento desejado, em função das possibilidades de fabricação (construção, materiais, etc.) disponibilizadas pelo fabricante. As variáveis de projeto armazenam as características do enrolamento desejado. Estas variáveis devem envolver os dados elétricos e ambientais do indutor desejado, bem como eventuais restrições sistêmicas especificadas, como por exemplo perdas e elevação máxima de temperatura média.

3.2.1 Dados do Indutor

- L_n indutância nominal (mH)
Valor nominal de indutância do enrolamento em projeto. Trata-se de uma referência informativa, pois o sistema deverá utilizar como base a indutância de projeto.
- L indutância de projeto (mH)
Indutância que será utilizada para o cálculo do enrolamento. Pode ou não ser diferente da indutância nominal, em função de tolerâncias, critérios de projeto, etc.
- I_n corrente nominal (A)
Corrente de referência para cálculo das características nominais garantidas (ex.: perdas máximas).
- I corrente de projeto (A)
Corrente de regime permanente considerada no projeto térmico do enrolamento.
- I_{th} corrente de curto-circuito térmica (kArms)
Corrente nominal de curta duração, em caso de falta.
- Dur duração da corrente de curto-circuito (s)
Intervalo de tempo especificado para a corrente nominal de curta duração.
- I_{dyn} corrente de curto-circuito dinâmica (kAp)
Corrente de curto-circuito assimétrica, pico. Pode ser utilizada pelo sistema para verificações de suportabilidade mecânica.
- f frequência nominal do sistema (Hz)

- *nbi* nível básico de impulso atmosférico entre os terminais do enrolamento, para cálculo dielétrico (kVp)
- *nbs* nível básico de surtos de manobra e outros transitórios dielétricos (kVp)
- *Ta* temperatura ambiente máxima de operação (°C)
- *Ho* altitude de operação, em metros acima do nível do mar (m)

3.2.2 Restrições Sistêmicas

- *PTmax* perdas totais máximas (kW)
Valor máximo de perdas sob corrente e frequência nominais e temperatura de referência de 75 °C (enrolamento). Também pode ser referida na forma de fator de qualidade.
- *DTmax* elevação máxima de temperatura média (°C)
Elevação máxima da temperatura média do enrolamento acima da temperatura ambiente. Este requisito é bastante comum em especificações técnicas, e pode caracterizar uma restrição de projeto.

3.3 VARIÁVEIS DE FAMÍLIA

Para permitir uma parametrização fiel ao tipo de problema de projeto encontrado na prática, durante a construção do espaço de solução, as variáveis construtivas foram divididas em variáveis do tipo “FAMÍLIA” e variáveis do tipo “MEMBRO”. Normalmente, uma família de solução seria a utilização de um tipo específico de tecnologia, envolvendo um sistema construtivo e um conjunto próprio de materiais no enrolamento, com suas características de projeto típicas (limites dielétricos, térmicos, características construtivas, etc.). Cada tecnologia construtiva é denominada “FAMÍLIA”, e tem todos os seus limites próprios definidos em suas variáveis.

Normalmente um enrolamento pode ser construído com mais de uma tecnologia (família) diferente, e o sistema deve comparar as melhores alternativas de cada família.

As variáveis FAMÍLIA são apresentadas a seguir:

3.3.1 Dados Estruturais

- *NomFam* nome de referência da família (tecnologia)
- *NumCmp* número de membros (componentes) da família
- *MinAxi* número mínimo de condutores em paralelo (para cada espira)
- *MaxAxi* número máximo de condutores em paralelo (para cada espira)
- *MinCam* número mínimo de camadas de enrolamento
- *MaxCam* número máximo de camadas de enrolamento
- *DinMin* diâmetro interno mínimo
Valor mínimo possível do diâmetro interno do enrolamento. Pode ser definido por limites de manufatura ou pelo menor gabarito de enrolamento disponível.
- *DinMax* diâmetro externo máximo
Valor máximo permitido do diâmetro externo (final) do enrolamento. Geralmente definido por limites de manufatura (maquinário) ou estrutural (peso, encapsulamento, carcaça, etc.)
- *FabSis* sistema de fabricação
Define se o sistema de alternativas de diâmetro para o enrolamento é do tipo:
 - Gabarito: conjunto de mandris de enrolamento, que definem os diâmetros internos disponíveis.

- Contínuo: mandris variáveis, permitindo valores contínuos de diâmetro interno.

- *CnjMnd* conjunto de mandris
Válido apenas para sistema de fabricação por gabarito. Conjunto de valores disponíveis para diâmetro interno do enrolamento. Geralmente definido pelo conjunto de mandris de enrolamento disponíveis para manufatura.

- *PssMnd* passo de mandril
Válido apenas para sistema de fabricação contínuo. Define o passo entre diâmetros de enrolamento avaliados, para orientar o processamento do algoritmo.

- *HenMin* altura de enrolamento mínima
Valor mínimo permitido da altura (comprimento) do enrolamento. Geralmente definido por limites de manufatura (maquinário, mandris) ou limites práticos de montagem (encapsulamento, carcaça, etc.).

- *HenMax* altura de enrolamento máxima
Valor máximo permitido da altura (comprimento) do enrolamento. Geralmente definido por limites de manufatura (maquinário) ou estrutural (peso, encapsulamento, carcaça, etc.).

- *HwMax* distância de escoamento máxima
Valor máximo possível da distância de escoamento, geralmente em função da altura de enrolamento máxima adicionada de estruturas complementares (carcaça, encapsulamento, etc.).

- *HaMax* distância de arco máxima
Valor máximo possível da distância de arco, geralmente em função da altura de enrolamento máxima adicionada de estruturas complementares (carcaça, encapsulamento, etc.).

- *EspIso* espessura de isolamento dos condutores (mm)
- *EspCam* espessura de isolamento entre camadas de condutores (mm)
- *KtmRes* coeficiente de temperatura
 Coeficiente de variação da resistência pela temperatura do material condutor do enrolamento (ex.: cobre $\Rightarrow Kt = 235$)

3.3.2 Parâmetros de Regime Permanente

- *Classe* classe de temperatura (°C).
 Temperatura máxima de operação contínua permitida para o enrolamento, tipicamente definida pela classe de temperatura do material isolante.
- *Tmin* temperatura média inferior (°C)
 Valor mínimo típico de temperatura média do enrolamento.
 Valores inferiores de temperatura média indicariam sobredimensionamento do enrolamento.
- *Tmax* temperatura média superior (°C)
 Valor máximo típico de temperatura média do enrolamento.
 Limite de projeto permitido para o projeto do equipamento.
- *VmmMax* limite de escoamento (V/mm)
 Limite dielétrico em regime permanente.

3.3.3 Parâmetros de Regime Transitório

- *TccMax* temperatura máxima de curto-circuito (°C).
 Limite de temperatura para curto-circuito.

- *Kcc* coeficiente adiabático de aquecimento ($A^2.s/mm^4$).
Coeficiente de elevação adiabática de temperatura do material do enrolamento, já desenvolvido para o equacionamento utilizado, conforme fator *Km* desenvolvido no item 4.2.

- *DccMax* densidade máxima de curto-circuito-1s (A/mm^2).
Limite máximo de densidade de corrente em curto-circuito, para duração de 1 segundo, sob temperatura ambiente de 40 °C. Este parâmetro permite uma verificação rápida da viabilidade de uma determinada solução com relação ao curto-circuito especificado.

- *KvEspMax* limite de impulso atmosférico (kV/espira).
Valor simplificado para limite dielétrico de impulso atmosférico, na forma de sobretensão entre espiras.

- *KvImmMax* limite de impulso atmosférico (kV/mm).
Valor simplificado para limite dielétrico de impulso atmosférico, baseado na distância de escoamento.

- *KvSmmMax* limite de surto de manobra (kV/mm).
Valor simplificado para limite dielétrico de surtos de manobra, baseado na distância de escoamento.

- *NbiMax* limite máximo permitido de NBI entre terminais (kVp).
Normalmente cada tecnologia construtiva tem um valor máximo de impulso atmosférico que pode suportar.

3.4 VARIÁVEIS MEMBRO

Um conjunto numeroso de soluções de projeto pode ser encontrado dentro de uma determinada família, a partir das diversas opções dimensionais de condutor. Cada opção de condutor que pertença à família é denominado membro. Normalmente, os membros de uma família são componentes de mesmo material condutor, mesmo

isolante, porém com dimensões diferentes. As suas características próprias são armazenadas nas variáveis MEMBRO.

- *Índice* índice de referência e controle do condutor.
- *Bitola* informativo. Referência fabril do condutor.
- *Cs* seção condutiva do condutor (mm^2).
- *Hd* altura do condutor (mm).
Altura do condutor isolado no enrolamento.
- *Wd* largura direta do condutor (mm).
Largura direta (valor físico) do condutor isolado no enrolamento.
Definida pela largura de uma camada simples formada pelo condutor.
- *Ws* largura sobreposta do condutor (mm).
Largura sobreposta do condutor isolado no enrolamento. Definida pelo acréscimo de largura do enrolamento causado pela adição de uma camada sobreposta de condutor. Quando o condutor é redondo, por exemplo, esta largura sobreposta é diferente do diâmetro do condutor, uma vez que a nova camada se insere parcialmente na camada inferior, conforme figura 3.2.

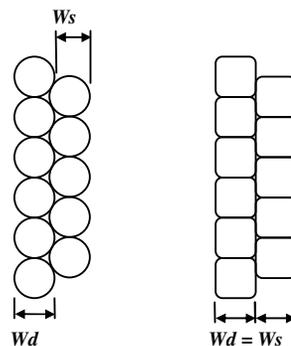


Figura 3.2 – Largura sobreposta de condutor

- *My* massa linear (kg/m).
Peso específico do condutor, por comprimento de enrolamento.
- *Ry* resistência linear (mΩ/m).
Resistência específica do condutor, por comprimento de enrolamento, na temperatura de referência de 20 °C.
- *DrI* limite típico de densidade de corrente (A/mm²).
Valor máximo de densidade de corrente em regime permanente viável para o condutor, em qualquer situação. Permite uma análise rápida de viabilidade para a solução que utiliza o condutor.
- *Cy* custo linear (R\$/m).
Custo por metro do condutor pronto, inserido no enrolamento (já agregados quaisquer custos internos, de isolamento, preparação, etc.).

3.5 VARIÁVEIS SOLUÇÃO

Uma solução sob análise pode ser definida por um conjunto de variáveis típicas apresentadas a seguir:

- *Fam* família da solução.
- *Cond* tipo de condutor utilizado (índice).
- *Ncam* número de camadas do enrolamento.
- *Npar* número de condutores em paralelo do enrolamento.
- *Di* diâmetro interno do enrolamento (mm).
- *Dm* diâmetro médio do enrolamento (mm).

- Ds* diâmetro externo do enrolamento (mm).
- *He* altura do enrolamento (mm).
- *Nesp* número de espiras do enrolamento.
- *Hw* distância de escoamento. É normalmente função da altura total do enrolamento, adicionada de eventuais estruturas complementares (carcaças, encapsulamento, etc.), que compõem a distância de escoamento.
- *Ha* distância de arco. É normalmente função da altura total do enrolamento, adicionada de eventuais estruturas complementares (carcaças, encapsulamento, etc.).
- .
- *Tm* temperatura média em regime permanente do enrolamento (°C).
- *Tcc* temperatura média após curto-circuito do enrolamento (°C).

3.6 DEFINIÇÕES E VARIÁVEIS COMPLEMENTARES

Através dos elementos básicos de entrada de dados, característicos do projeto e construção do enrolamento, podem ser deduzidas algumas grandezas adicionais armazenadas em variáveis próprias para utilização no processamento do algoritmo. Estas grandezas são definidas e demonstradas a seguir:

- *n* densidade de espiras da camada (número de espiras por centímetro).
O número de espiras simples é substituído em muitas formulações de cálculo de indutância pelo número de espiras por unidade de comprimento do solenóide, conforme a relação:

$$n = \frac{N_{esp}}{H_e} \quad (3.1)$$

- l comprimento de enrolamento da camada (mm).

O comprimento utilizado de cada condutor em uma camada pode ser simplificado pela fórmula:

$$l = \pi \cdot Dm \cdot N_{esp} \quad (3.2)$$

A quantidade de condutor utilizado em um enrolamento pode ser calculada aproximadamente por este comprimento de enrolamento vezes o número de condutores em paralelo e número de camadas.

- H_{esp} altura da espira efetiva do enrolamento (mm).

A altura da espira efetiva para uma solução em análise nada mais é que a altura do condutor vezes o número de condutores utilizados em paralelo para fazer uma espira de enrolamento, conforme equação 3.3.

$$H_{esp} = Wd \cdot N_{par} \quad (3.3)$$

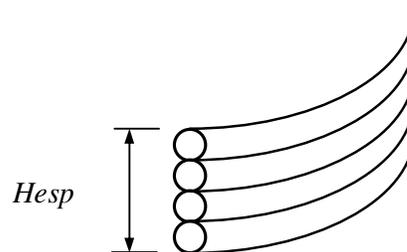


Figura 3.3 – Altura da espira efetiva de enrolamento para 4 condutores paralelos

- We largura do enrolamento (mm).

A largura do enrolamento depende da largura direta e largura sobreposta do condutor utilizado e do número de camadas, conforme a equação:

$$We = Wd + (N_{cam} - 1) \cdot Ws \quad (3.4)$$

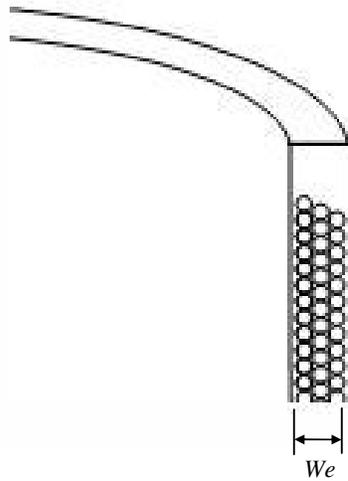


Figura 3.4 – Largura de um enrolamento de 3 camadas

- S_{con} seção condutora do enrolamento (mm^2).
A seção condutora do enrolamento é função básica da seção do condutor utilizado, do número de condutores em paralelo e do número de camadas do enrolamento, conforme a equação:

$$S_{con} = C_s \cdot N_{par} \cdot N_{cam} \quad (3.5)$$

CAPÍTULO 4

MODELOS SIMPLIFICADOS DE CÁLCULO

4.1 MODELAGEM DO CÁLCULO DE INDUTÂNCIA PRÓPRIA

4.1.1 Análise das formulações de cálculo de indutância própria

As formulações de cálculo de indutância própria descritas na revisão bibliográfica foram analisadas quanto à sua precisão, com o objetivo de permitir a escolha de uma formulação adequada ao sistema de otimização. Deve-se lembrar que o sistema de otimização irá realizar um cálculo aproximado, cuja principal função é fazer uma comparação realista entre diferentes alternativas. Após definida a melhor alternativa de projeto, o cálculo final pode ser realizado pelo programa computacional de projeto, com as devidas precisões requeridas. A formulação utilizada deve reunir simplicidade de cálculo (rapidez) e precisão satisfatória.

Para a comparação entre as diferentes formulações foi utilizada uma bobina de camada simples, construída com um fio redondo de diâmetro 4 mm, em um diâmetro médio de 1000 mm. A indutância foi calculada para 700 casos diferentes, com o número de espiras variando de 2 a 5000, o que implica em uma variação do coeficiente α de 0.08 a 20. O cálculo de indutância utilizando transformada de Bartky foi utilizado como referência, por ter o erro controlado. Neste caso, a transformada de Bartky foi utilizada com uma precisão de 10^{-6} . Como a formulação de Nagaoka utiliza expansão em série para o cálculo do fator K, o erro máximo encontrado é inferior a 10^{-5} . As demais formulações analisadas são:

- Foelsch: formulação apresentada por Foelsch [13].
- Wheeler-1: formulação simplificada, apresentada por Wheeler [9] em 1928.
- Wheeler-2: primeira fórmula do artigo de Wheeler [10] em 1982.
- Wheeler-3: segunda fórmula do artigo de Wheeler [10] em 1982.
- Wheeler-4: terceira fórmula do artigo de Wheeler [10] em 1982.

Os gráficos a seguir mostram os erros apresentados por cada formulação em função do coeficiente α .

a) Formulações de Wheeler (1, 2 e 3)

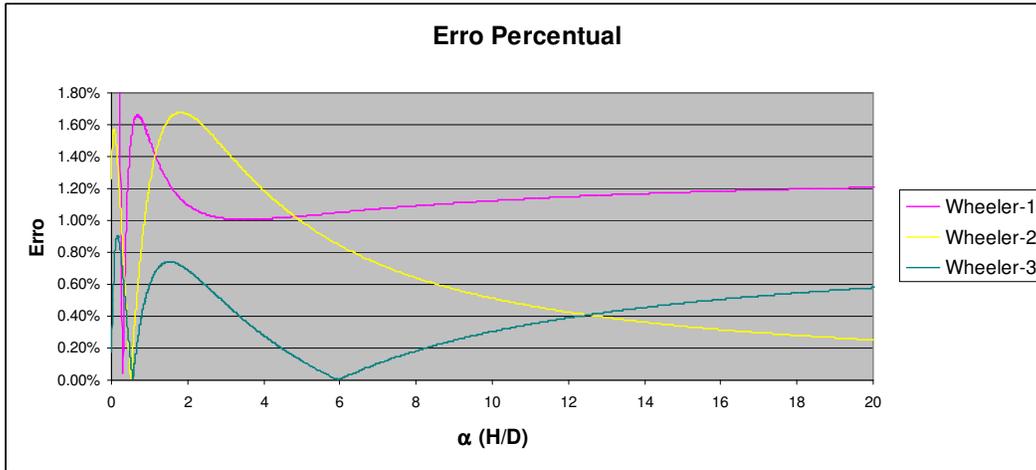


Figura 4.1 – Variação do erro de cálculo pelo fator geométrico

Como já esperado, a formulação simplificada de Wheeler (1) apresenta grande imprecisão para valores de α inferior a 0.4, chegando a valores superiores a 35 %. Acima de 0.4 o erro da formulação é bastante uniforme, embora supere o valor de 1% declarado pelo autor no artigo original.

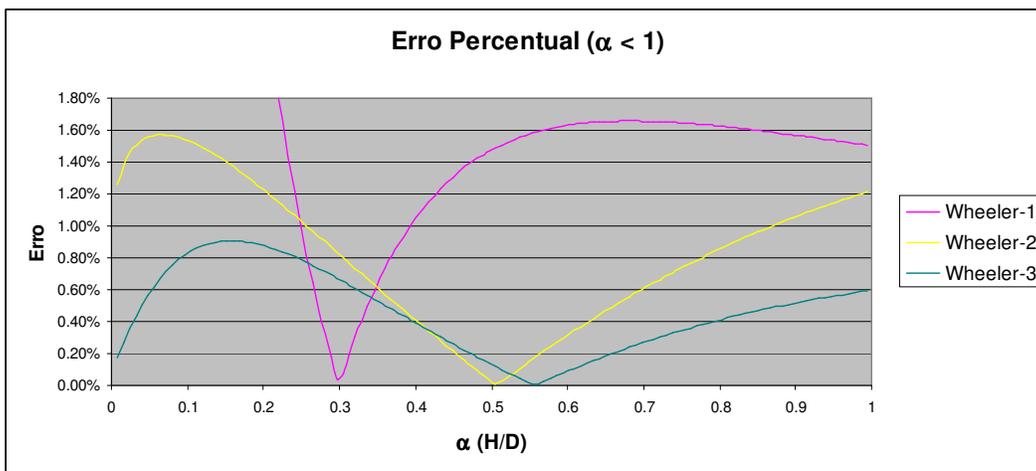


Figura 4.2 – Variação do erro de cálculo ($0 < \alpha < 1$)

b) Formulação de Foelsch e quarta formulação de Wheeler

A formulação de Foelsch tem erro estimado inferior a 0.3 %, o que é verificado pela análise. No trecho de α entre 0 e 0.8, a utilização de coeficientes diferentes na fórmula é importante para manter o erro máximo dentro do limite esperado.

A quarta formulação de Wheeler tem a vantagem de utilizar uma única equação, mantendo-se dentro do limite de erro de 0.1 % em toda a faixa de valores do coeficiente α .

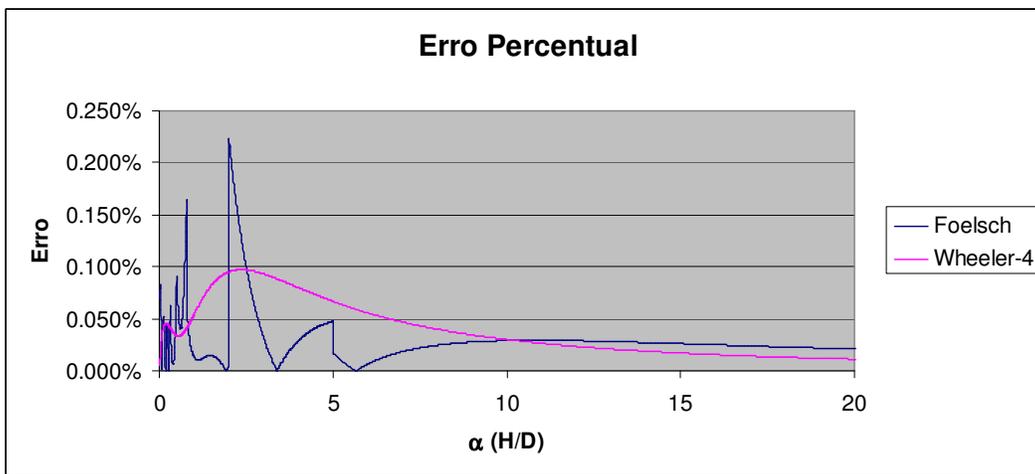


Figura 4.3 – Variação do erro de cálculo pelo fator geométrico por Foelsch

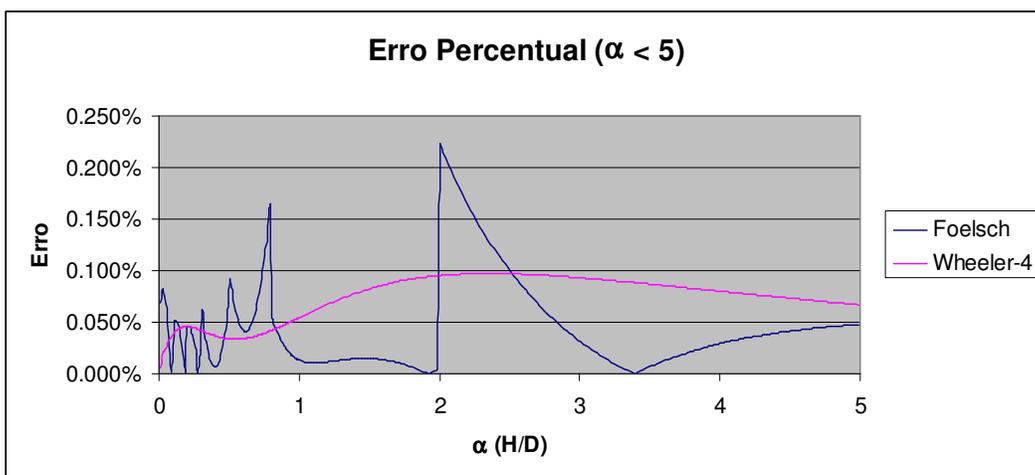


Figura 4.4 – Variação do erro de cálculo por Foelsch ($0 < \alpha < 5$)

4.1.2 Desenvolvimento da formulação simplificada de Wheeler

Normalmente o trabalho de otimização parte de um valor desejado (objetivo) de indutância para a bobina. Para as verificações básicas que relacionam diâmetro, número de espiras e indutância, a formulação de Wheeler simplificada (Wheeler-1) apresenta a vantagem de permitir a dedução direta de uma fórmula para o número de espiras em função do diâmetro e vice-versa. Os parâmetros da bobina desejada podem ser obtidos sem a necessidade de algoritmos iterativos, que demandam maior trabalho computacional. Por este motivo, a utilização da formulação simplificada de Wheeler é extremamente útil para algoritmos computacionais onde os cálculos de indutância, número de espiras e diâmetro devem ser executados um grande número de vezes.

Utilizando a fórmula simplificada de Wheeler [9], apresentada no item 2.1.3-b, e adicionando um fator de correção K_c para redução do erro final obtido, temos:

$$L = \frac{D^2 \cdot N^2}{b + 0.45 \cdot D} \cdot K_c \quad (4.1)$$

Assumindo um valor fixo desejado (objetivo) de indutância, temos:

$$\therefore L \cdot b + 0.45 \cdot L \cdot D = D^2 \cdot N^2 \cdot K_c$$

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot b + 0.45 \cdot L \cdot D}{D^2 \cdot K_c}} \quad (4.2)$$

Da mesma forma:

$$N^2 \cdot K_c \cdot D^2 - 0.45 \cdot L \cdot D - L \cdot b = 0$$

O que resulta em uma equação de segundo grau com relação a D , que resolvida apresenta apenas uma raiz positiva, igual a:

$$D = \frac{0.45 \cdot L + \sqrt{0.45^2 \cdot L^2 + 4 \cdot N^2 \cdot L \cdot b \cdot K_c}}{2 \cdot N^2 \cdot K_c} \quad (4.3)$$

As equações 4.2 e 4.3 são portanto extremamente úteis para o trabalho computacional de otimização. O fator Kc foi inserido para permitir o refinamento da formulação (item seguinte), de acordo com as necessidades de precisão de cada aplicação específica.

4.1.3 Refinamento da formulação simplificada de Wheeler

Torna-se importante analisar esta formulação no sentido de reduzir o seu erro estimado até valores aceitáveis. A seguir, apresenta-se duas alternativas de redução deste erro, considerando precisão e simplicidade. A simulação de cálculo de indutância foi realizada para várias bobinas diferentes (diâmetro médio e diâmetro do fio), tendo sido possível verificar a uniformidade da curva de erro e das reduções de erro obtidas com as alternativas propostas.

a) Fator de correção direto

Por inspeção, pode-se observar que o erro para valores de α de 0.4 a 20 é sempre positivo. Uma alternativa de redução do erro absoluto é a introdução de um fator de correção direto no resultado final, que traz a curva de erro para baixo, conforme o gráfico a seguir:

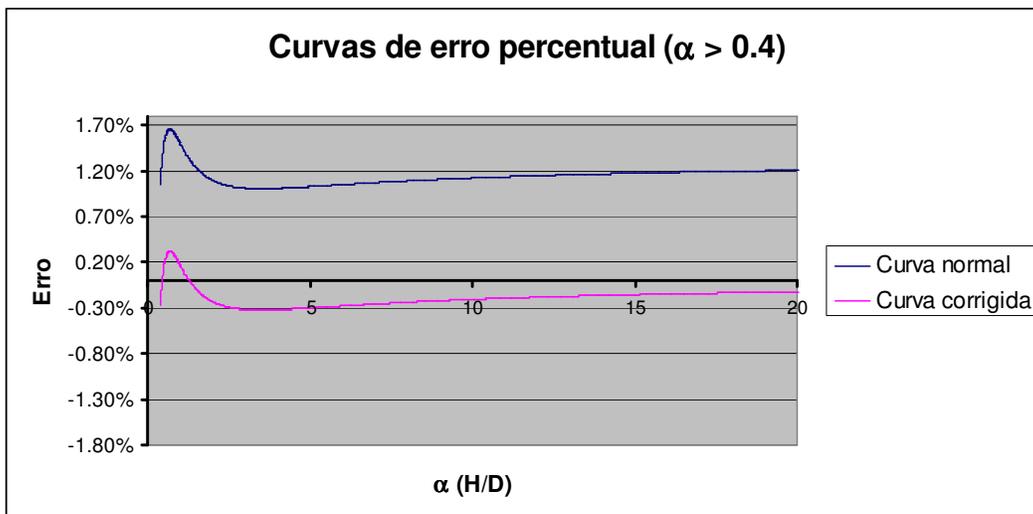


Figura 4.5 – Variação do erro de cálculo com fator de correção direto

A fórmula simplificada de Wheeler com o fator de correção fica da seguinte forma:

$$L = \frac{D^2 \cdot N^2}{b + 0.45 \cdot D} \cdot Kc = \frac{4 \cdot a^2 \cdot N^2}{b + 0.9 \cdot a} \cdot Kc \quad (4.4)$$

A utilização de um fator de correção $Kc = 0.98686$ resulta em uma precisão parecida com a formulação de Foelsch, com um erro absoluto máximo inferior a 0.35 %, o que deve ser considerada uma precisão satisfatória para a maior parte das aplicações.

b) Fator de correção por aproximação polinomial

A obtenção de um erro máximo ainda menor é possível com a utilização de um fator de correção calculado através de uma aproximação polinomial da curva de erro. Devido ao comportamento assintótico da curva, é recomendado fazer aproximações polinomiais em trechos separados. Uma proposta seria a aproximação polinomial com polinômios de quarta ordem, do tipo:

$$\varepsilon = A \cdot \alpha^4 + B \cdot \alpha^3 + C \cdot \alpha^2 + D \cdot \alpha + E \quad (4.5)$$

O levantamento sobre a curva de erro da bobina de camada simples utilizada para análise das diferentes formulações forneceu os seguintes polinômios:

$0.4 \leq \alpha \leq 1.0$:

$$A = -0.1761; \quad B = 0.5918; \quad C = -0.7515; \quad D = 0.4221; \quad E = -0.0714$$

$1.0 \leq \alpha \leq 3.5$:

$$A = 1.203 \cdot 10^{-4}; \quad B = -1.593 \cdot 10^{-3}; \quad C = 8.167 \cdot 10^{-3}; \\ D = -1.924 \cdot 10^{-2}; \quad E = 2.761 \cdot 10^{-2}$$

$3.5 \leq \alpha \leq 20$:

$$A = 0; \quad B = 0; \quad C = -6.509 \cdot 10^{-6};$$

$$D = 2.775 \cdot 10^{-4}; \quad E = 9.09 \cdot 10^{-3}$$

A simulação com várias bobinas permitiu verificar a uniformidade da curva de erro obtido, com erros máximos inferiores a 0.02 %. Exceto nos casos em que os requisitos dielétricos exijam o projeto de bobinas longas, o sistema de otimização estará utilizando apenas uma equação, para $\alpha \leq 1$.

Na prática, a implementação computacional de uma rotina para cálculo do erro com estas aproximações polinomiais se torna bastante simples. Para o cálculo de indutância, a partir dos valores de diâmetro e número de espiras a solução se torna muito simples e rápida, com erro irrisório. No cálculo de número de espiras ou diâmetro médio, conforme equações 4.2 e 4.3, a utilização do fator de correção direto permite um cálculo muito aproximado. Um refinamento da solução pode ser obtido com o cálculo do erro estimado para a bobina encontrada através da aproximação polinomial, e uma correção entre este erro estimado e o fator de correção direto. Uma solução deste tipo mantém a simplicidade computacional necessária, provendo um nível de erro bastante inferior a 0.1 %, o que deve ser mais que o necessário para os propósitos do sistema proposto.

c) Cálculo do fator geométrico α para utilização de Nagaoka

Uma alternativa de grande precisão é a utilização da formulação simplificada de Wheeler para um cálculo preliminar de diâmetro, número de espiras e altura de enrolamento. Estes dados podem ser utilizados para o cálculo do fator geométrico α , a partir do qual pode ser utilizada a formulação de Nagaoka com uma grande precisão de resultados. A partir da formulação simplificada de Wheeler, temos:

$$L = \frac{D^2 \cdot N^2}{b + 0.45 \cdot D} \cdot K_c = \frac{D^2 \cdot \left(\frac{b}{H_{esp}} \right)^2}{b + 0.45 \cdot D} \cdot K_c$$

Substituindo $b = \alpha \cdot D$, temos:

$$L \cdot Hesp^2 = \frac{D^4 \cdot \alpha^2}{\alpha \cdot D + 0.45 \cdot D} \cdot Kc$$

$$\therefore Kc \cdot D^4 \cdot \alpha^2 - L \cdot D \cdot Hesp^2 \cdot \alpha - 0.45 \cdot L \cdot D \cdot Hesp^2$$

Resolvendo a equação de segundo grau temos apenas uma raiz positiva, obtendo o valor de α igual a:

$$\alpha = \frac{L \cdot D \cdot Hesp^2 + \sqrt{L^2 \cdot D^2 \cdot Hesp^4 + 1.8 \cdot L \cdot D^5 \cdot Hesp^2 \cdot Kc}}{2 \cdot Kc \cdot D^4} \quad (4.6)$$

Seguindo a mesma modelagem e desenvolvendo a fórmula com a relação $D = \frac{N \cdot Hesp}{\alpha}$, podemos obter a fórmula para α em função do número de espiras, conforme segue:

$$L = \frac{D^2 \cdot N^2}{b + 0.45 \cdot D} \cdot Kc = \frac{\left(\frac{N \cdot Hesp}{\alpha}\right)^2 \cdot N^2}{N \cdot Hesp + \frac{0.45 \cdot N \cdot Hesp}{\alpha}} \cdot Kc$$

$$\therefore L = \frac{N^4 \cdot Hesp^2 \cdot Kc}{N \cdot Hesp \cdot \alpha^2 + 0.45 \cdot N \cdot Hesp \cdot \alpha}$$

$$\therefore L \cdot N \cdot Hesp \cdot \alpha^2 + 0.45 \cdot L \cdot N \cdot Hesp \cdot \alpha - N^4 \cdot Hesp^2 \cdot Kc = 0$$

Resolvendo a equação de segundo grau temos apenas uma raiz positiva, obtendo o valor de α igual a:

$$\alpha = \frac{-0.45 \cdot L \cdot N \cdot Hesp + \sqrt{0.45^2 \cdot L^2 \cdot N^2 \cdot Hesp^2 + 4 \cdot L \cdot N^5 \cdot Hesp^3 \cdot Kc}}{2 \cdot L \cdot N \cdot Hesp} \quad (4.7)$$

4.2 MODELAGEM DO CÁLCULO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NO CURTO-CIRCUITO

O cálculo de elevação de temperatura no curto-circuito apresentado pela norma IEC 60076-5 [21] foi utilizado como base para a modelagem de cálculo do sistema de otimização, devido ao caráter conservativo do método, a sua simplicidade e a abrangência global da norma. A norma apresenta fórmulas voltadas apenas para enrolamentos construídos em cobre e alumínio puro. No entanto, muitos enrolamentos podem ser construídos em ligas de alumínio e diversos outros tipos de metal ou ligas. Por este motivo, a formulação básica da IEC foi deduzida para permitir a obtenção da fórmula específica para qualquer material condutor, a partir das suas propriedades físicas. A fórmula é desenvolvida a partir da energia gerada pela circulação da corrente de curto-circuito.

A energia gerada pelas perdas com a circulação da corrente de curto-circuito é absorvida pelo enrolamento e resulta na elevação de temperatura desta massa m de enrolamento. O valor desta elevação de temperatura é obtido pela fórmula clássica:

$$\Delta\theta = \frac{E}{m \cdot C_E}$$

onde:

- E = energia total absorvida pelo material [J]
- m = massa do material (enrolamento) [kg]
- C_E = calor específico do material, ou seja, a quantidade de energia necessária para que 1 kg do material se aqueça em 1 °C [$J/kg \cdot ^\circ C$].

Como os eventos de curto-circuito são de curta duração, não é considerada a parcela de energia térmica dissipada para o ambiente, obtendo-se assim um cálculo mais conservativo.

As perdas no enrolamento são calculadas pela sua resistência DC, que pode ser corrigida em função da temperatura pela fórmula a seguir:

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{\theta_2 + K_t}{\theta_1 + K_t} = R_1 \cdot (1 + \alpha_1 \cdot (\theta_2 - \theta_1))$$

onde Kt é o coeficiente de variação da resistência pela temperatura do material (225 para o alumínio), e $\alpha_1 = 1 / (\theta_1 + Kt)$.

A energia total E gerada pela corrente de curto-circuito, que por sua vez terá de ser absorvida pelo enrolamento e transformada em calor, é equivalente a:

$$E = P \cdot t$$

Como $P = R \cdot I^2$, podemos dizer que durante o curto-circuito o valor das perdas aumenta, na medida em que a temperatura do enrolamento aumenta e conseqüentemente a sua resistência também se eleva. O valor das perdas durante o curto-circuito se eleva, durante o tempo t , conforme mostrado na figura 4.6:

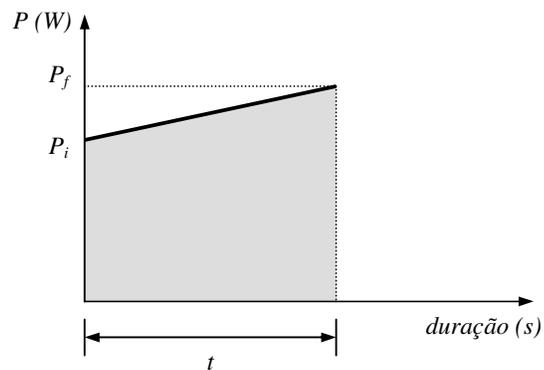


Figura 4.6 – Variação das perdas geradas durante o curto-circuito

O valor das perdas pode então ser corrigido pela mesma fórmula utilizada para correção da resistência, ou seja:

$$P_f = P_i \cdot (1 + \alpha_i \cdot \Delta\theta)$$

Desta forma, podemos dizer que a energia total absorvida pelo enrolamento no curto-circuito pode ser obtida pela área sombreada do gráfico de $P \times t$. Calculando a área do gráfico (área do trapézio) e substituindo o valor de P_f apresentado na equação de perdas, temos:

$$E = P_i \cdot t \cdot \left(1 + \alpha_i \cdot \frac{\Delta\theta}{2}\right) = R_i \cdot I^2 \cdot t \cdot \left(1 + \alpha_i \cdot \frac{\Delta\theta}{2}\right)$$

Para utilizar os dados de resistividade, densidade e calor específico do material referidos à temperatura de 100 °C a resistência R_i (resistência do enrolamento na temperatura inicial) deve ser convertida para a temperatura de 100 °C. Desta maneira temos:

$$R_{100} = R_i \cdot (1 + \alpha_i \cdot (100 - \theta_i))$$

Transformando os dados e considerando $1/(\theta_x + K_t) = \alpha_x$, temos:

$$R_{100} = R_i \cdot (1 - \alpha_i \cdot (\theta_i - 100)) = R_i \cdot (1 - \alpha_i \cdot (\theta_i + K_t - (K_t + 100))) = R_i \cdot \left(1 - \alpha_i \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i} - (K_t + 100)\right)\right)$$

$$R_{100} = (K_t + 100) \cdot \alpha_i \cdot R_i$$

Assim, a fórmula geral de elevação de temperatura fica:

$$\Delta\theta = \frac{E}{m \cdot C_E} = \frac{\frac{R_{100}}{(K_t + 100) \cdot \alpha_i} \cdot I^2 \cdot t \cdot \left(1 + \alpha_i \cdot \frac{\Delta\theta}{2}\right)}{m \cdot C_E} = \frac{R_{100} \cdot I^2 \cdot t}{(K_t + 100) \cdot \alpha_i \cdot m \cdot C_E} \cdot \left(1 + \alpha_i \cdot \frac{\Delta\theta}{2}\right)$$

Considerando as fórmulas de resistência e massa em função da resistividade \mathfrak{R} , volume (seção S x comprimento l) e densidade D do material, temos:

$$R_{100} = \mathfrak{R}_{100} \cdot \frac{l}{S} \quad \text{e} \quad m = V \cdot D = S \cdot l \cdot D$$

Desta maneira, temos:

$$\Delta\theta = \frac{\mathfrak{R}_{100} \cdot \frac{l}{S} \cdot I^2 \cdot t}{(K_t + 100) \cdot \alpha_i \cdot S \cdot l \cdot D \cdot C_E} \cdot \left(1 + \alpha_i \cdot \frac{\Delta\theta}{2}\right)$$

Como I/S é a densidade de corrente J do curto-circuito, teremos:

$$\Delta\theta = \frac{\mathfrak{R}_{100} \cdot J^2 \cdot t}{(K_t + 100) \cdot \alpha_i \cdot D \cdot C_E} \cdot \left(1 + \alpha_i \cdot \frac{\Delta\theta}{2}\right)$$

Podemos reescrever esta equação na forma seguinte:

$$\Delta\theta = \frac{\mathfrak{R}_{100}}{2 \cdot (K_t + 100) \cdot D \cdot C_E} \cdot \frac{2 \cdot J^2 \cdot t}{\alpha_i} \cdot \left(1 + \alpha_i \cdot \frac{\Delta\theta}{2} \right) \quad (4.8)$$

O primeiro termo da equação é dependente das características próprias do material condutor, e por isso pode ser isolado através da constante de material:

$$K_m = \frac{2 \cdot (K_t + 100) \cdot D \cdot C_E}{\mathfrak{R}_{100}}$$

Assim, a equação 4.8 fica na forma:

$$\Delta\theta = \frac{2 \cdot J^2 \cdot t}{K_m \cdot \alpha_i} \cdot \left(1 + \alpha_i \cdot \frac{\Delta\theta}{2} \right)$$

Isolando o valor de $\Delta\theta$ e utilizando $\alpha_i = 1 / (\theta_i + K_t)$, temos:

$$\Delta\theta = \frac{2 \cdot (\theta_i + K_t)}{\frac{K_m}{J^2 \cdot t} - 1} \quad (4.9)$$

onde K_t e K_m são coeficientes dependentes do material do enrolamento.

$$K_m = \frac{2 \cdot (K_t + 100) \cdot D \cdot C_E}{\mathfrak{R}} \cdot 10^{-12} \quad (4.10)$$

O coeficiente K_m recebeu o termo 10^{-12} para que a densidade de corrente J possa ser dada em A/mm^2 .

Os valores utilizados pela IEC-60076 parte 5 são apresentados na tabela 2.1. A partir dos valores apresentados pela norma são obtidas as seguintes fórmulas:

$$\Delta\theta = \frac{2 \cdot (\theta_i + 225)}{\frac{45700}{J^2 \cdot t} - 1} \quad \text{para o alumínio} \quad (4.11)$$

$$\Delta\theta = \frac{2 \cdot (\theta_i + 235)}{\frac{106000}{J^2 \cdot t} - 1} \quad \text{para o cobre} \quad (4.12)$$

O fator K_m foi denominado coeficiente adiabático de aquecimento, e deve ser calculado para cada tecnologia construtiva. Os fatores K_m e K_t devem ser informados na entrada de dados como parâmetros constantes de cada família.

CAPÍTULO 5

DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA EM UMA BOBINA SINGULAR

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E FLUXOGRAMA DA SOLUÇÃO

O projeto ótimo de uma bobina deve considerar todas as combinações possíveis de materiais e parâmetros construtivos disponíveis, cada combinação gerando o que se denomina uma solução de projeto, gerada a partir da base de dados construtivos disponível. Este primeiro conjunto de soluções de projeto é denominado “espaço primário de solução”. O desenvolvimento de uma série de formulações simplificadas permite a análise detalhada de cada solução dentro deste espaço primário. Geralmente o número de soluções geradas é muito grande, mas os requisitos de projeto do equipamento tornam inviável a maior parte delas.

A primeira etapa de análise é chamada de eliminação preliminar, e utiliza as limitações gerais da família e da solução em análise para rapidamente, com pouco trabalho computacional, descartar as soluções que são inviáveis pelos próprios parâmetros de projeto. Estes parâmetros podem superar os limites práticos, sejam físicos ou de manufatura, para atender a todos os requisitos técnicos, tornando desnecessário qualquer esforço computacional posterior. Estes limites são definidos geralmente em função de limitações de manufatura (maquinário), dimensionais de projeto (carcaça, suportes, etc.) ou mesmo de limitações estruturais definidas por bom senso. Alguns critérios são verificados em seqüência e podem indicar a inviabilidade de atendimento dos requisitos técnicos para a solução, o componente ou até mesmo a família em análise. Desta maneira grandes blocos do espaço de solução podem ser rapidamente descartados, evitando avançar para cálculos mais elaborados. O conjunto das soluções verificadas como viáveis pelos critérios preliminares compõe o chamado “espaço intermediário de solução”.

O sistema deve desenvolver o projeto básico de cada solução aprovada preliminarmente. Esta etapa pode gerar dois projetos básicos de bobina para cada

solução. A primeira bobina gerada deve ser projetada para resultar em uma bobina com fator geométrico ótimo. Caso a bobina com fator geométrico ótimo não atenda aos requisitos dielétricos, um novo projeto deve ser realizado buscando a menor altura necessária para a bobina que atenda a estes requisitos. Este projeto básico de bobina é analisado com relação ao seu comportamento térmico em função dos requisitos de corrente em regime permanente (corrente nominal) e transitório (corrente de curto-circuito, ciclos de religamento, ciclos de sobrecarga, etc.). Esta análise geralmente é mais complexa e computacionalmente pesada que os critérios de eliminação preliminar. Os projetos aprovados nesta análise podem ser considerados alternativas viáveis de construção. O conjunto das soluções verificadas como viáveis pela análise de regime operativo de temperatura formam o “conjunto de alternativas de projeto”. Dentro destas alternativas, o sistema terá liberdade para escolher a solução que atenda aos critérios de interesse da empresa. Os critérios de interesse podem ser menor custo, menor prazo (disponibilidade de maquinário ou dispositivos de fabricação), disponibilidade de matéria-prima, adequação ao cliente, etc. A figura 5.1 mostra os espaços de solução desenvolvidos.

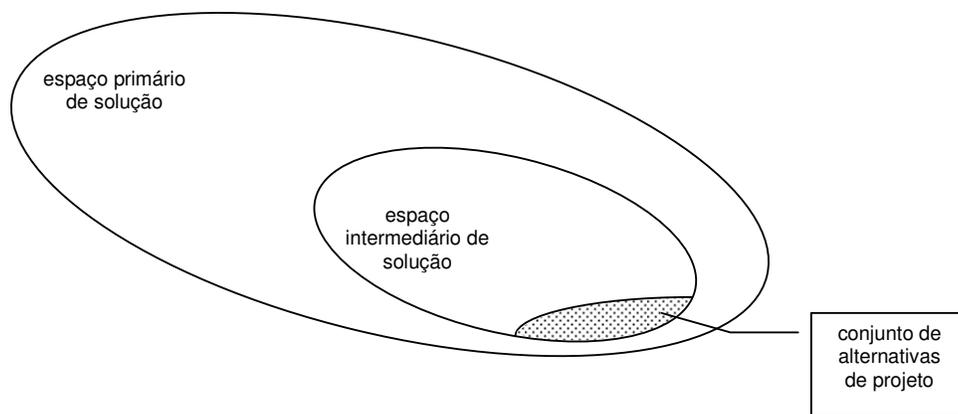


Figura 5.1 – Espaços de solução formados

O fluxograma a seguir apresenta a seqüência simplificada de processos do sistema idealizado.

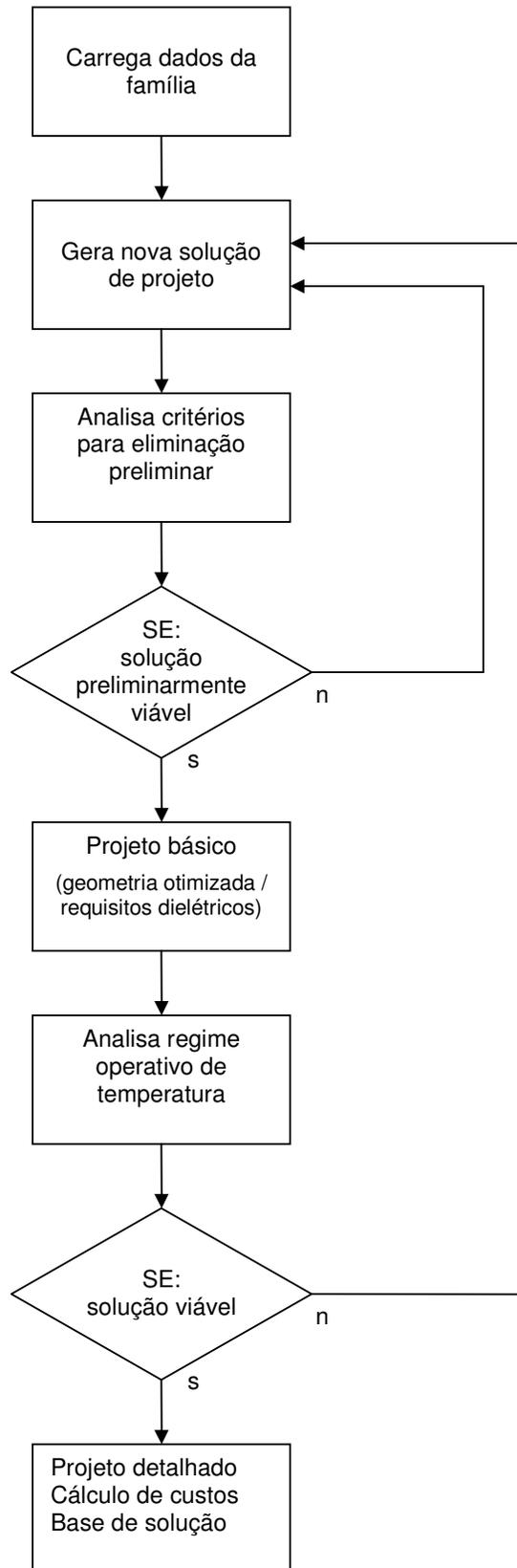


Figura 5.2 – Fluxograma do algoritmo de otimização

5.2 ELIMINAÇÃO PRELIMINAR

5.2.1 Escoamento

O valor de escoamento é um requisito dielétrico de regime permanente. Trata-se de um dos critérios mais comuns em projetos de equipamentos elétricos. O modelo apresentado utiliza um valor máximo especificado de escoamento, em V/mm , que deve ser determinado para cada família. Por outro lado, cada família tem uma distância de escoamento máxima possível de ser atingida, resultado da altura máxima de enrolamento e/ou outros limites dimensionais físicos ou de manufatura.

A queda de tensão entre os terminais do enrolamento é calculada pelos próprios dados de projeto do equipamento desejado, ou seja:

$$\Delta V = X_L \cdot I = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot I \quad (5.1)$$

Como a queda de tensão entre terminais é resultado direto dos parâmetros do enrolamento em projeto, o menor escoamento é possível quando a distância de escoamento é o valor máximo permitido pela família, ou seja:

$$V_{mm_{MIN}} = \frac{\Delta V}{H_{wMax}} \quad (5.2)$$

Se este valor for maior que o valor máximo permitido (variável V_{mmMax}), então qualquer solução dentro da família é preliminarmente inviável, já que mesmo com a maior distância de escoamento possível o valor final de escoamento ainda é superior ao limite máximo definido para o projeto do enrolamento em questão. Neste caso, a família inteira é completamente descartada, já que se deseja projetar um enrolamento com exigências de queda de tensão superior ao limite máximo permitido pelos parâmetros desta família.

5.2.2 Indutância mínima

Um parâmetro direto que pode levar à inviabilidade de uma solução é o valor requerido de indutância do enrolamento. Quando este valor de indutância é muito baixo, as dimensões necessárias para a bobina podem ser inferiores ao limite mínimo dimensional especificado para a família. Este limite normalmente é intrínseco da própria tecnologia construtiva e da gama de enrolamentos que a ela se aplica.

Para cada solução, o menor valor possível de indutância é obtido com o menor diâmetro e menor altura de enrolamento da família. Neste caso, o número de espiras mínimo pode ser calculado em função da menor altura de enrolamento e altura da espira efetiva, pela fórmula:

$$He = N_{esp} \cdot H_{esp} \quad \therefore \quad N_{esp_{MIN}} = \frac{Hen_{Min}}{H_{esp}} \quad (5.3)$$

A indutância mínima possível deve ser calculada para este número mínimo de espiras e para o diâmetro interno mínimo (*DinMin*). Se a indutância mínima for superior ao valor requerido de indutância para o projeto adicionada da sua tolerância superior, então a solução é automaticamente inviável.

5.2.3 Indutância máxima

Normalmente, enrolamentos de alta indutância são projetados para baixa corrente, e vice-versa. No entanto, o espaço de solução normalmente oferece alternativas tanto para baixa corrente (condutores de pequena seção, poucos condutores em paralelo) como para alta corrente (condutores de grande seção, muitos condutores em paralelo). Uma solução com grande seção condutiva deve se mostrar pouco competitiva para o projeto de um enrolamento de baixa corrente e alta indutância, durante as análises de custo. Mas esta solução pode-se mostrar inviável já nas verificações preliminares, devido às dimensões resultantes do enrolamento para fornecer a indutância de projeto.

Como a indutância é proporcional aos valores de diâmetro e número de espiras, a máxima indutância obtível para uma determinada solução é aquela que utiliza o diâmetro máximo da família e o máximo número de espiras. Este número máximo de espiras, por sua vez, é função da altura da espira efetiva (intrínseca da solução), sendo limitado pela altura máxima de enrolamento para a família, segundo:

$$N_{esp_{MAX}} = \frac{HenMax}{Hesp} \quad (5.4)$$

A indutância máxima possível seria obtida com este número máximo de espiras e para o diâmetro interno máximo (*DinMax*). Se a indutância máxima for inferior ao valor requerido de indutância para o projeto, então a solução analisada é automaticamente inviável.

5.2.4 Diâmetro mínimo dielétrico

a) Escoamento, comprimento do enrolamento e diâmetro mínimo

Em muitos casos a queda de tensão pode exigir uma distância de escoamento viável, inferior ao valor máximo determinado para a família. No entanto, em função da indutância de projeto, pode ser necessária uma redução significativa do diâmetro interno (em relação ao valor ótimo) de maneira a aumentar o número de espiras necessário para a obtenção da indutância, com o conseqüente aumento do comprimento de enrolamento (e da distância de escoamento) até o valor adequado. Em alguns casos pode ser preciso utilizar um diâmetro interno inferior ao limite mínimo de diâmetro definido para a família em questão, o que caracteriza uma situação de inviabilidade.

A distância de escoamento é função da altura do enrolamento, adicionado de eventuais estruturas complementares (carcaça, encapsulamento, etc.). Logo, esta distância de escoamento é diretamente proporcional à altura da espira efetiva vezes o número de espiras, em uma equação na forma:

$$H_w = A \cdot H_e + B$$

$$\therefore H_w = A \cdot N_{esp} \cdot H_{esp} + B \quad (5.5)$$

Os fatores A e B são função do tipo construtivo e outras características construtivas da solução em análise, que influenciam a distância de escoamento dielétrica do equipamento.

Para atender ao critério de escoamento (queda de tensão em regime permanente), deve ser necessária uma distância de escoamento mínima (H_{wMIN}), que resulta em um respectivo número mínimo de espiras, conforme segue:

$$H_{wMIN} = \frac{\Delta V}{V_{mmMax}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot I}{V_{mmMax}}$$

Como a altura da espira efetiva é uma característica intrínseca à solução em análise, pode-se dizer que para obter a necessária distância de escoamento H_{wMIN} será preciso um número mínimo de espiras de enrolamento:

$$N_{espMIN} = \frac{H_{wMIN} - B}{A \cdot H_{esp}} \quad (5.6)$$

Assim sendo, a viabilidade da solução é verificada apenas se este número mínimo de espiras, associado ao diâmetro interno mínimo da família em análise, resultar em uma indutância inferior à indutância de projeto do enrolamento em análise. Definidos diâmetro interno e número de espiras, a indutância resultante pode ser calculada rapidamente por uma formulação simplificada (Nagaoka ou Wheeler) e comparada com a indutância de projeto, utilizando um fator de precisão apropriado que considere o erro de cálculo da formulação utilizada.

b) Impulso atmosférico, número de espiras e diâmetro mínimo

O valor de tensão entre espiras ocasionado por um impulso atmosférico é um critério dielétrico de regime transitório. No modelo apresentado, a simplificação de cálculo é realizada assumindo uma distribuição capacitiva da tensão impulsiva ao longo do enrolamento. Embora em muitos casos reais esta simplificação possa apresentar um erro significativo, na maior parte das vezes este erro pode ser avaliado e/ou estimado de

maneira a se obter um fator de ajuste que permita conhecer a tensão entre espiras no ponto mais exigido do enrolamento.

O valor de tensão entre espiras sob impulso pode então ser calculado por uma fórmula do tipo:

$$KvEsp = \frac{nbi}{Nesp}$$

Assim sendo, o enrolamento deve ser projetado com um número mínimo de espiras de modo a manter a tensão entre espiras dentro do limite máximo permitido.

$$Nesp_{MIN} = \frac{nbi}{KvEspMax} \quad (5.7)$$

A viabilidade da solução é verificada apenas se este número mínimo de espiras, associado ao diâmetro interno mínimo da família em análise, resultar em uma indutância inferior à indutância de projeto do enrolamento em estudo, de forma semelhante ao item anterior.

c) Impulso atmosférico, distância de arco e diâmetro mínimo

O impulso atmosférico ocasiona uma tensão externa entre os terminais do enrolamento que deve ser considerada com relação à distância de arco. Assim como a distância de escoamento, a distância de arco geralmente é função da altura do enrolamento, adicionado de eventuais estruturas complementares (carcaça, encapsulamento, etc.). De acordo com cada equipamento, esta distância pode ser calculada por uma equação similar à da distância de escoamento, na forma:

$$\begin{aligned} Ha &= C \cdot He + D \\ \therefore Ha &= C \cdot Nesp \cdot Hesp + D \end{aligned} \quad (5.8)$$

Os fatores C e D são função do tipo construtivo e outras características construtivas da solução em análise, que influenciam a distância de arco dielétrica do equipamento. Deve ser necessária uma distância de arco mínima, que por sua vez resulta em um respectivo número mínimo de espiras, conforme segue:

$$Ha_{MIN} = \frac{nbi}{KvImmMax}$$

Como no caso da distância de escoamento, pode-se dizer que para obter a necessária distância de arco Ha_{MIN} será preciso um número mínimo de espiras de enrolamento:

$$Nesp_{MIN} = \frac{Ha_{MIN} - C}{D \cdot Hesp} \quad (5.9)$$

Assim sendo, a viabilidade da solução é verificada apenas se este número mínimo de espiras, associado ao diâmetro interno mínimo da família em análise, resultar em uma indutância inferior à indutância de projeto do enrolamento em análise.

5.2.5 Densidade de corrente de curto-circuito

O valor da corrente térmica de curto-circuito é também um importante parâmetro que pode inviabilizar um número considerável de alternativas de solução. Basicamente, este critério tem por objetivo determinar o valor mínimo de seção condutora necessário para manter a elevação de temperatura durante o curto-circuito dentro do limite estabelecido para a família. As alternativas de solução cuja seção condutora estiverem abaixo deste valor mínimo devem ser automaticamente descartadas.

No momento da ocorrência do curto-circuito a temperatura de operação do enrolamento irá influir diretamente na temperatura final após a falta. A filosofia de eliminação preliminar assume a temperatura do enrolamento no instante inicial de curto-circuito igual à temperatura ambiente máxima, isto é, assumindo que não há elevação de temperatura causada pela corrente de regime permanente. A formulação simplificada desenvolvida para o cálculo da elevação de temperatura no curto-circuito deve ser utilizada da seguinte forma:

$$\Delta\theta = \frac{2 \cdot (\theta_i + K_t)}{\frac{K_m}{J^2 \cdot t} - 1}$$

$$\therefore \frac{K_m}{J^2 \cdot t} - 1 = \frac{2 \cdot (Ta + K_t)}{TccMax - Ta}$$

$$\therefore K_m = \left(\frac{2 \cdot (Ta + K_t)}{TccMax - Ta} + 1 \right) \cdot J^2 \cdot t$$

$$\therefore K_m = \left(\frac{2 \cdot (Ta + K_t)}{TccMax - Ta} + 1 \right) \cdot \left(\frac{I_{th}}{Scon_{MIN}} \right)^2 \cdot t$$

$$Scon_{MIN} = I_{th} \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \cdot (Ta + K_t)}{TccMax - Ta} + 1 \right) \cdot \frac{t}{K_m}} \quad (5.10)$$

As alternativas de solução com seção condutora inferior ao valor calculado de $Scon_{MIN}$ são consideradas inviáveis, devendo ser automaticamente descartadas.

5.2.6 Densidade de corrente em regime permanente

Os critérios térmicos para operação em regime permanente são na maior parte das vezes o ponto crucial do projeto, que define as principais características de um enrolamento. Os cálculos térmicos são em geral bastante complexos, resultando em uma carga computacional considerável, mesmo com a utilização de simplificações matemáticas abrangentes. No entanto, o procedimento apresentado a seguir permite estabelecer de maneira simples e rápida as alternativas de solução que não apresentam possibilidade de atender os critérios térmicos, basicamente os limites de temperatura em regime permanente.

A equação fundamental de temperatura de um equipamento elétrico relaciona a energia térmica (calor) gerada pelas perdas com o calor absorvido pela massa do equipamento e o calor dissipado no ambiente. Assim, temos:

$$Q = Q_A + Q_D \quad (5.11)$$

onde: Q = calor gerado pelas perdas
 Q_A = calor absorvido pela massa do equipamento
 Q_D = calor dissipado para o ambiente

Quando o reator opera em equilíbrio térmico (regime permanente) o calor gerado pelas perdas é idêntico ao calor dissipado para o ambiente. O equipamento não absorve nenhum calor, pois a sua temperatura é mantida constante. Um cálculo térmico simplificado pode ser estabelecido considerando $Q_A = 0$, e desenvolvendo modelos simplificados de cálculo para as perdas no enrolamento e o calor dissipado para o ambiente.

Conforme apresentado no item 2.2.2, existe uma grande predominância do fenômeno de convecção na transferência de calor em equipamentos elétricos. Por este motivo, é possível desenvolver um procedimento de cálculo com precisão satisfatória para o cálculo do calor dissipado para o ambiente, utilizando um modelo baseado neste fenômeno. De uma maneira geral, o calor por unidade de tempo (potência) dissipado para o ambiente pode ser calculado por uma expressão do tipo:

$$P_D = H_t \cdot P^{0.5} \cdot S \cdot \theta^{1.25} \quad (5.12)$$

onde:

P_D = potência dissipada (W)
 H_t = coeficiente de transferência de calor ($W/m^2 \cdot K$)
 P = pressão do ar em atmosferas (ao nível do mar e pressão normal = 1)
 S = área de dissipação para o ar (m^2)
 θ = elevação de temperatura da superfície de dissipação em relação ao ar circundante (K)

O coeficiente de calor é um fator característico de cada equipamento, que pode ser levantado normalmente através de ensaios de elevação de temperatura em

laboratório. Este coeficiente é influenciado por diversas características como geometria, dimensões, orientação, etc. A determinação do correto coeficiente de transferência de calor para projeto térmico do equipamento pode implicar na definição dimensional do equipamento, que deve ocorrer apenas no projeto básico. Porém, o sistema pode utilizar um valor máximo do coeficiente de transferência de calor nesta etapa de eliminação preliminar, uma vez que este valor máximo e os valores calculados em função das dimensões não apresentam normalmente grandes diferenças.

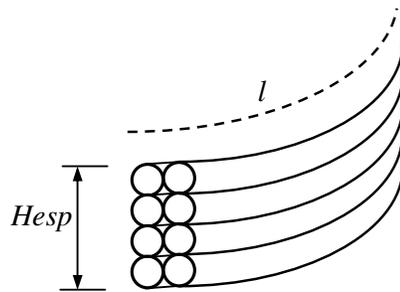


Figura 5.3 – Área de dissipação de calor de um trecho de enrolamento

A área de dissipação de calor S deve ser calculada em função do comprimento de enrolamento. Considerando um enrolamento formado por diversos condutores em paralelo e diversas camadas, conforme figura 5.3, podemos dizer que a área de dissipação deste espira seria:

$$S = 2 \cdot H_{esp} \cdot l$$

Utilizando um comprimento de enrolamento $l = 1$ metro, temos a potência dissipada P_D calculada por unidade de comprimento do enrolamento, dada em W/m . Considerando a temperatura ambiente como a temperatura ambiente máxima (T_a) e a temperatura do enrolamento igual à máxima temperatura em regime permitida para a família em questão (T_{max}), pode-se calcular a potência que o equipamento pode dissipar para o ambiente utilizando a elevação de temperatura $\theta = T_{max} - T_a$. Esta potência é portanto a máxima potência que o equipamento pode dissipar sem exceder as suas condições operativas normais.

$$P_D \text{ max} = 2 \cdot H_{esp} \cdot H_t \cdot P^{0.5} \cdot (T_{\text{max}} - T_a)^{1.25} \quad [W/m] \quad (5.13)$$

As perdas geradas no enrolamento são dependentes também da própria temperatura do enrolamento, e são normalmente compostas por perdas Joule (normalmente denominadas perdas DC) e perdas adicionais devido à corrente alternada (perdas por efeito pelicular, perdas induzidas, etc.). Os cálculos de perdas adicionais resultam em modelagens tão ou mais complexas que as modelagens de temperatura, tornando inviável um cálculo apurado em um sistema de otimização como o proposto.

Felizmente, é possível obter um valor de perdas bastante satisfatório com o cálculo das perdas DC e a utilização de um fator simples de perdas adicionais, geralmente conhecido como fator K, que deve depender principalmente da bitola do condutor, a condutividade do material e a frequência ($P_{AC} = K \cdot P_{DC}$). As perdas DC geradas por unidade de comprimento do enrolamento podem ser calculadas diretamente por $P_{DC} = R_{DC} \cdot I^2$. O sistema utiliza uma variável direta Ry de resistência por unidade de comprimento, em $[m\Omega/m]$ na temperatura base de 20 °C. Esta resistência é reduzida pela colocação de fios em paralelo e camadas. Desta forma, a resistência por metro do enrolamento tem o seguinte valor:

$$R_{DC20^{\circ}C} = \left(\frac{Ry \cdot 10^{-3}}{Npar \cdot Ncam} \right) [\Omega/m] \quad (5.14)$$

Esta formulação de perdas é válida para uma temperatura no enrolamento de 20 °C. A temperatura do enrolamento é igual à temperatura ambiente máxima (considerada para o projeto) mais a elevação de temperatura do enrolamento em regime permanente. Assim, o valor de perdas é também dependente da própria elevação de temperatura do enrolamento. A resistência R_{DC} do enrolamento deve ser corrigida, resultando em uma equação para cálculo das perdas DC da seguinte forma:

$$P_{DC} = \left(\frac{K_t + Ta + \theta}{K_t + 20} \right) \cdot \left(\frac{Ry \cdot 10^{-3}}{Npar \cdot Ncam} \right) \cdot I^2 \quad [W/m] \quad (5.15)$$

Considerando uma elevação de temperatura tal que $Ta + \theta = Tmax$, referente à máxima temperatura em regime permanente permitida para a família, e o fator K

apropriado, teremos as perdas geradas no enrolamento (por unidade de comprimento) na condição de máxima perda dissipada para o ambiente. Nesta condição, se as perdas geradas forem superiores à perda dissipada máxima (P_{Dmax}), então a alternativa de solução pode ser considerada inviável, pelo critério de máxima densidade de corrente em regime permanente.

Uma aproximação de caráter conservativo poderia ser a utilização das perdas DC como uma única fonte de aquecimento do enrolamento ($K = 1$), suficiente para inviabilizar uma parcela considerável das alternativas de solução. No caso da adoção de um fator K para o cálculo de perdas adicionais, é recomendável utilizar um valor mínimo garantido, de maneira a descartar apenas as alternativas seguramente inviáveis.

5.2.7 Dimensionamento mínimo

Os critérios anteriores de eliminação preliminar utilizam modelagens simplificadas, com parâmetros ótimos que podem indicar quando uma alternativa de solução deve ser descartada por não atender a limites definidos de projeto, mesmo considerando a melhor situação possível.

Quando uma solução é considerada viável preliminarmente, a mesma seqüência de verificações pode ser realizada sobre ela, desta vez assumindo os valores mínimos. Trata-se portanto de utilizar as mesmas modelagens simplificadas, porém utilizando os parâmetros em sua pior situação, como por exemplo utilizando o pior coeficiente de transferência de calor possível para a família. Desta forma, pode-se verificar a viabilidade completa da solução, ou seja, confirmar que esta alternativa irá prover uma solução completa de projeto, não se mostrando inviável durante o projeto final com as modelagens detalhadas.

Uma vez comprovada a viabilidade total de uma alternativa de solução, é possível afirmar que toda solução com dimensional superior será viável, porém terá custo maior. É o caso em que um determinado condutor pode ser utilizado para formar um enrolamento com 1 a 8 condutores em paralelo. Se o enrolamento formado com 3 condutores paralelos é viável na pior situação de projeto (piores parâmetros), então as alternativas com mais de 3 condutores devem ser todas viáveis, exceto pelo critério de

indutância máxima. No entanto, é possível afirmar que todas as soluções com mais de 3 condutores terão custo superior, e por isto podem ser descartadas. Este procedimento elimina uma parcela significativa do espaço de solução e de esforço computacional, mas deve ser utilizado apenas quando o critério de escolha da melhor solução for o critério de menor custo.

5.3 PROJETO DA SOLUÇÃO BÁSICA

5.3.1 Cálculo do fator geométrico ótimo

O diâmetro médio do enrolamento pode ser definido em uma larga faixa de valores, dentro das limitações de fabricação impostas pelo maquinário, mandris, etc. No entanto, o diâmetro médio ideal para uma determinada formação de enrolamento deve ser aquele que resulta no menor comprimento de enrolamento (consumo de material) para a indutância especificada. O diâmetro médio que resulta no menor consumo de material é definido pela proporção entre altura e diâmetro do enrolamento, onde se obtém o máximo acoplamento entre as espiras. Esta proporção é definida pelo fator α , definido como segue:

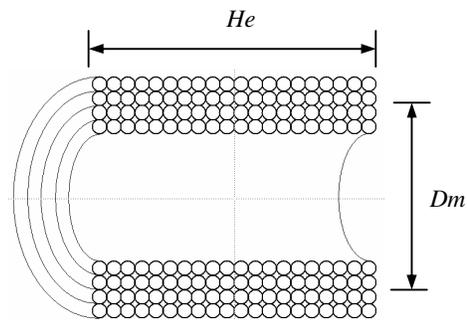


Figura 5.4 – Dimensões gerais da bobina

$$\alpha = \frac{H_e}{D_m}$$

Para a definição do diâmetro médio ideal foi utilizada a formulação de Nagaoka [4]. A fórmula original de Nagaoka está apresentada a seguir:

$$L = 0.004 \cdot \pi^2 \cdot a^2 \cdot b \cdot n^2 \cdot K$$

onde:

- a = raio médio ($Dm/2$)
- b = comprimento do enrolamento (He)
- n = densidade de enrolamento (número de espiras por centímetro)
- K = fator de correção das extremidades, em função da relação α

Considerando que nos termos do trabalho em questão $a = Dm / 2$, $b = He$ e $n = Nesp/He$, a fórmula de Nagaoka pode ser desenvolvida como:

$$L = 0.004 \cdot \pi^2 \cdot \frac{Dm}{2} \cdot \frac{Dm}{2} \cdot He \cdot \frac{Nesp^2}{He^2} \cdot K$$

$$\therefore \boxed{L = 0.001 \cdot \pi^2 \cdot Dm \cdot Nesp^2 \cdot \left(\frac{Dm}{He}\right) \cdot K} \quad (5.16)$$

O termo Dm/He foi isolado nesta fórmula porque tem o valor inverso do fator geométrico α , que deve ser desenvolvido neste trabalho.

O fator de correção K dos extremos pode ser calculado por fórmulas de séries. Basicamente trabalha-se com duas fórmulas, sendo uma fórmula para as bobinas de pequeno comprimento ($He/Dm \leq 1$), e outra para as chamadas bobinas longas ($He/Dm \geq 1$). No livro de Grover são apresentadas tabelas com os valores de K para cada centésimo do valor da relação He/Dm .

Considerando-se uma bobina formada por apenas um condutor, a fórmula de cálculo de indutância deve ser então desenvolvida de maneira que, para um dado valor de indutância requerido, o comprimento l de enrolamento necessário seja minimizado. O comprimento de condutor pode ser calculado por:

$$l = \pi \cdot Dm \cdot Nesp \quad \therefore \quad Nesp = \frac{l}{\pi \cdot Dm}$$

A altura de enrolamento He pode ser substituída pela altura da espira efetiva, através de:

$$He = Nesp \cdot Hesp = \frac{l \cdot Hesp}{\pi \cdot Dm}$$

A aplicação destas duas expressões na fórmula de Nagaoka resulta em:

$$L = 0.001 \cdot \pi^2 \cdot Dm \cdot \left(\frac{l}{\pi \cdot Dm} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{Dm}{l \cdot Hesp}} \cdot \sqrt{\frac{Dm}{He}} \cdot K$$

$$\therefore \quad L = 0.001 \cdot l^{3/2} \cdot \sqrt{\pi} / \sqrt{Hesp} \cdot \sqrt{\frac{1}{\alpha}} \cdot K$$

$$\therefore \quad l^{3/2} = L \cdot 10^3 \cdot \sqrt{Hesp} / \sqrt{\pi} \cdot \frac{1}{G(\alpha)}, \text{ onde} \quad G = \sqrt{\frac{1}{\alpha}} \cdot K \quad (5.17)$$

Como a altura da espira efetiva $Hesp$ é um parâmetro fixo da solução, o comprimento de enrolamento de uma bobina de indutância definida e formação determinada é inversamente proporcional ao valor de $G(\alpha)$, que por sua vez é uma função do fator geométrico α , que deve ser maximizada. Através das fórmulas de cálculo de K , pode-se deduzir que o maior valor da função $G(\alpha)$ ocorre para um valor de $\alpha = 0.408$.

A figura 5.5 mostra o comprimento de enrolamento relativo ao valor mínimo possível (valor igual à unidade), em função do fator geométrico α . Para valores muito baixos de α o comprimento necessário de enrolamento tende a se elevar geometricamente, caracterizando um projeto pouco otimizado. Para valores de α acima de 1.0 a curva assume uma tendência de reta, com o equipamento se tornando progressivamente mais caro.

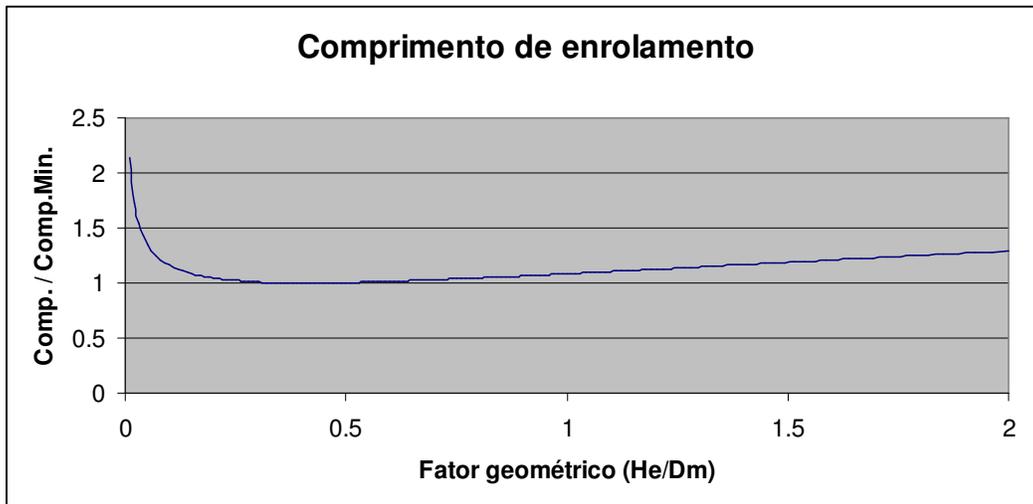


Figura 5.5 – Variação do comprimento de enrolamento pelo fator geométrico

A figura 5.6 mostra que o ponto de mínimo se apresenta em uma região bastante “achatada” da curva, ou seja, variações razoáveis do fator geométrico resultam em um aumento relativamente pequeno do comprimento de enrolamento. Na prática, valores de α entre 0.37 e 0.45 resultam em um aumento no comprimento de enrolamento inferior a 0.1% em relação ao valor mínimo possível. Valores de α entre 0.30 e 0.56 asseguram um aumento no comprimento de enrolamento inferior a 1% em relação ao valor mínimo possível.

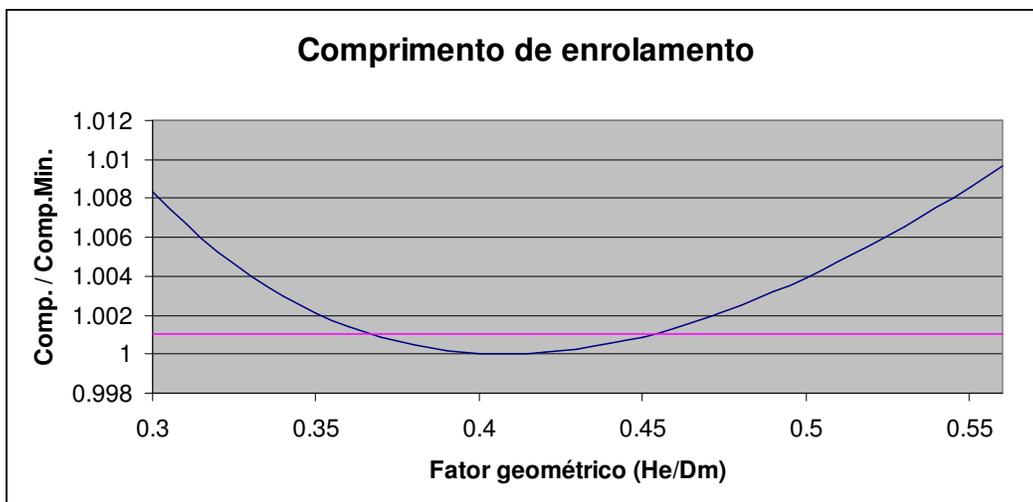


Figura 5.6 – Variação do comprimento de enrolamento (região ótima)

5.3.2 Cálculo do número de espiras para diâmetro otimizado

Para uma determinada alternativa de enrolamento (configuração de condutores), o projeto ótimo implica no dimensionamento de uma bobina com a geometria ótima de construção, verificada quando o fator geométrico é igual a 0.408. Considerando que a altura de cada espira é fixa, determinada pela configuração de condutores da alternativa em análise, pode-se dizer que a altura (ou comprimento) da bobina é dependente apenas do número de espiras desta bobina. Neste caso, o fator geométrico pode ser expresso por uma função dependente do número de espiras e do diâmetro da bobina. Dado uma indutância desejada, é possível portanto desenvolver a fórmula de Nagaoka para fornecer o número de espiras ou o diâmetro médio que resultará em uma bobina com fator geométrico ótimo. A formulação é demonstrada a seguir:

A fórmula de Nagaoka para as variáveis D e He fica da seguinte forma:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot \pi \cdot a^2}{b} \cdot K = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-7} \cdot N^2 \cdot (D/2)^2}{He} \cdot K \quad (5.18)$$

Considerando na fórmula de Nagaoka um valor de indutância em μH ($10^{-6} H$), temos:

$$L = \frac{0.1 \cdot \pi^2 \cdot N^2 \cdot D^2}{He} \cdot K \quad (5.19)$$

Considerando:

$$He = N \cdot Hesp \quad (5.20)$$

Então:

$$\alpha = \frac{N \cdot Hesp}{D} \quad (5.21)$$

Substituindo as equações 5.20 e 5.21 em 5.19, temos:

$$L = \frac{0.1 \cdot \pi^2 \cdot N^2 \cdot \left(\frac{N \cdot Hesp}{\alpha} \right)^2}{N \cdot Hesp} \cdot K$$

$$\therefore L = \frac{0.1 \cdot \pi^2 \cdot N^3 \cdot Hesp}{\alpha^2} \cdot K$$

$$\therefore N = 1.0044 \cdot \sqrt[3]{\frac{\alpha^2 \cdot L}{Hesp \cdot K}} \quad (5.22)$$

O número de espiras deve ser então calculado para o fator geométrico ótimo de $\alpha = 0.408$. O fator de Nagaoka para $\alpha = 0.408$ pode ser calculado pela formulação de Lundin [11], resultando em:

$$K = 0.47657648 \quad (5.23)$$

Substituindo os valores de α e K na fórmula 5.22, temos:

$$N = 0.7073418 \cdot \sqrt[3]{\frac{L}{Hesp}} \quad (5.24)$$

Nesta fórmula o valor de indutância deve ser informado em μH (micro-Henry) e a altura da espira efetiva em metros. O diâmetro médio da bobina pode ser derivado rapidamente, considerando que este número de espiras resulta no fator geométrico $\alpha = 0.408$. Assim:

$$\alpha = \frac{He}{D} = \frac{N \cdot Hesp}{D} \quad \therefore D = 2.451 \cdot N \cdot Hesp \quad (5.25)$$

5.3.3 Cálculo do número de espiras para requisitos dielétricos

O projeto básico ótimo da bobina de camada singular parte do princípio de que o menor comprimento de enrolamento, portanto o menor custo, seria obtido com uma fator geométrico específico. Na prática, não há motivos para que este fator geométrico seja reduzido, ou seja, que o projeto utilize uma bobina mais achatada (relação altura/diâmetro reduzida). No entanto, em muitos projetos os critérios dielétricos podem resultar na necessidade de uma bobina com maior altura que a calculada para o fator geométrico ótimo. Neste caso, o projeto com diâmetro otimizado deve ser abandonado e um novo projeto com a altura necessária deve ser realizado, ainda que fugindo das dimensões ótimas.

Sejam os requisitos dielétricos responsáveis pela necessidade de um número mínimo de espiras ou uma altura de enrolamento mínima, para uma dada configuração de condutores estes requisitos devem resultar sempre em um número mínimo de espiras. Desta forma, o diâmetro da bobina que resulta neste número de espiras pode ser calculado pela formulação simplificada de Wheeler, com ou sem refinamento, conforme apresentado nos itens 4.1.2 e 4.1.3.

5.3.4 Adequação dos valores de diâmetro e número de espiras

Na aplicação em sistemas reais de fabricação os parâmetros dimensionais de manufatura, como por exemplo o diâmetro da bobina, são geralmente limitados a um conjunto de valores padronizados. Um exemplo típico é o conjunto de mandris padronizados de enrolamento, que resulta em um conjunto padrão de possíveis diâmetros de bobina. Neste caso, os valores finais do projeto básico devem ser ajustados para que possam ser aplicados no modelo real.

Para esta etapa final de refinamento do projeto, a formulação simplificada de Wheeler é de extrema utilidade, exatamente por fornecer um relacionamento simplificado do diâmetro com o número de espiras. As alternativas desenvolvidas de refinamento de cálculo devem permitir a obtenção de uma precisão suficiente ao sistema de otimização. O ajuste de número de espiras e diâmetro pode também ser influenciado pelos custos adicionais (acessórios, carcaças, etc.), devendo ser avaliado para cada caso específico de implementação do sistema de otimização.

5.4 ELIMINAÇÃO PELO REGIME OPERATIVO DE TEMPERATURA

Após a realização do projeto básico do enrolamento, definidas as suas dimensões gerais, torna-se possível a utilização de parâmetros mais apropriados de cálculo, como por exemplo o coeficiente de transferência de calor. Nesta etapa deve-se realizar então uma análise mais detalhada do regime de temperatura ao qual o enrolamento é submetido, considerando simultaneamente a corrente em regime permanente, a corrente

de curto-circuito e outros possíveis regimes transitórios, como ciclos de sobrecarga e de religamento. Uma eliminação mais refinada das soluções inviáveis permite reduzir ainda mais o espaço de solução, antes dos cálculos finais de custo, mantendo apenas as alternativas de solução mais apropriadas aos critérios de projeto do enrolamento desejado.

Nesta formulação foram consideradas a corrente de projeto em regime permanente e a corrente de curto-circuito térmica com sua respectiva duração. A inclusão de demais ciclos transitórios de corrente deve ser analisada para cada caso específico.

Nas verificações preliminares foi verificada a suportabilidade do enrolamento à corrente de curto-circuito térmica, assumindo que o enrolamento estaria na temperatura ambiente no instante inicial da falta. A metodologia utilizada busca definir a máxima temperatura de operação θ_K (em regime permanente) que o enrolamento pode apresentar, de maneira que esta suportabilidade ao curto-circuito seja mantida. A seguir, realiza-se um processo de verificação do critério de densidade de corrente em regime permanente, similar ao realizado no item 5.2.6. Desta vez, porém, a máxima temperatura média do enrolamento deve ser θ_K , ao invés da máxima temperatura média permitida para a família (T_{max}). Este procedimento resulta em uma simplificação matemática importante para evitar processos iterativos de cálculo de temperatura em regime permanente, mantendo a agilidade do algoritmo.

A máxima temperatura de operação θ_K (em regime permanente) pode ser calculada a partir da equação utilizada para cálculo de elevação de temperatura em curto-circuito, assumindo que $\theta_i = \theta_K$ e conseqüentemente $\Delta\theta = T_{ccMax} - \theta_K$. A equação 4.9 pode ser desenvolvida da seguinte forma:

$$T_{ccMax} - \theta_K = \frac{2 \cdot (\theta_K + K_t)}{\frac{K_m}{J^2 \cdot t} - 1}$$

$$\begin{aligned}
\therefore TccMax \cdot \left(\frac{K_m}{J^2 \cdot t} - 1 \right) - \theta_K \cdot \left(\frac{K_m}{J^2 \cdot t} - 1 \right) &= 2 \cdot \theta_K + 2 \cdot K_t \\
\therefore \theta_K \cdot \left(\frac{K_m}{J^2 \cdot t} + 1 \right) &= TccMax \cdot \left(\frac{K_m}{J^2 \cdot t} - 1 \right) - 2 \cdot K_t \\
\therefore \theta_K &= \frac{TccMax \cdot \left(\frac{K_m}{J^2 \cdot t} - 1 \right) - 2 \cdot K_t}{\left(\frac{K_m}{J^2 \cdot t} + 1 \right)} \quad (5.26)
\end{aligned}$$

5.5 CÁLCULO DO CUSTO DA SOLUÇÃO, AVALIAÇÃO E SELEÇÃO

Quando uma alternativa de solução atende a todos os requisitos de projeto, já definido o seu projeto básico, ela deve ser inserida no conjunto de soluções viáveis para o projeto do enrolamento. O sistema proposto tem como objetivo formar este conjunto de soluções viáveis com uma dimensão reduzida, mantendo apenas as alternativas tecnicamente viáveis.

Uma etapa posterior de projeto deve definir eventuais componentes adicionais do equipamento como encapsulamento, carcaça, buchas, estruturas de suporte, acessórios, etc. Este processo deve ser desenvolvido para cada tipo de equipamento específico, de acordo com as regras de projeto e os recursos de cada fabricante. Definido o projeto completo, o cálculo de custo do equipamento para cada solução deve ser calculado, de acordo com as regras próprias de cada fabricante, podendo incluir custos fixos, custos de mão-de-obra, custos administrativos, comerciais, etc.

A avaliação e seleção da alternativa mais apropriada deve atender os critérios de interesse de cada projetista, como menor custo, menor prazo (disponibilidade de maquinário ou dispositivos de fabricação), disponibilidade de matéria-prima, adequação ao cliente, etc.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DE CUSTO

O custo final da solução projetada pode ser pouco ou muito afetado pelo custo adicional dos componentes intrínsecos do equipamento (encapsulamento, carcaça, óleo, etc.). Alguns enrolamentos de maior custo podem resultar em custo final menor, devido à redução ou adequação do seu dimensional a estes componentes intrínsecos. Este impacto pode afetar também a relação de geometria otimizada, devendo ser considerado adequadamente no algoritmo de projeto da solução básica.

A análise e determinação de custo dos componentes intrínsecos e sua influência no projeto da solução básica e no custo final dependem das características próprias de cada equipamento, sua aplicação, construção (imerso em óleo ou seco, com ou sem núcleo de ferro, etc.) e mesmo da tecnologia construtiva do fabricante. Dentro deste contexto, a solução desenvolvida deve ser específica para cada caso em análise, não sendo portanto objeto deste estudo.

CAPÍTULO 6

VALIDAÇÃO E AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO

6.1 COMPARAÇÃO COM O SOFTWARE DE PROJETO VALIDADO

O sistema de otimização proposto deve ter como principal característica a capacidade de realizar o projeto completo do enrolamento para cada alternativa dentro de um espaço de solução fixo, garantindo:

- rapidez ;
- abrangência;
- precisão;
- flexibilidade;
- modularidade;

A rapidez de cálculo é necessária para permitir a sua utilização diária em projetos de proposta, o que significa que o sistema de otimização deve ser executado dezenas de vezes por dia. O sistema deve ser abrangente para analisar e fornecer como resultado soluções realmente aplicáveis para cumprir todos os requisitos da especificação de projeto. Para atender a estes requisitos foram desenvolvidas várias modelagens simplificadas, uma vez que cálculos mais precisos demandam modelos complexos e tempos de cálculo geralmente muito extensos. A precisão destes modelos deve ser considerada satisfatória. Na prática, os resultados devem garantir a aplicabilidade das soluções analisadas, e a precisão deve ser suficiente para permitir uma boa análise comparativa entre as soluções.

Deve-se enfatizar o fato de que a principal função do sistema de otimização é o de determinar a alternativa (ou grupo de alternativas) mais vantajosa com relação ao critério de escolha definido. Após definida a melhor alternativa de projeto, o programa computacional específico de projeto pode ser executado com esta alternativa construtiva, utilizando as modelagens detalhadas e o conhecimento acumulado do fabricante.

A adequação dos procedimentos de cálculo desenvolvidos foi verificada através da execução do sistema de otimização para três casos diferentes de reatores de núcleo de ar. O projeto completo de cada reator foi executado no programa computacional específico, para cada alternativa considerada viável pelo sistema de otimização. A comparação entre os dados apresentados pelo sistema de otimização e o programa computacional permitiu avaliar a precisão dos modelos simplificados em uma amostragem significativa.

Para fins de validação o sistema de otimização foi executado em uma base de cinco famílias diferentes, todas elas baseadas em uma construção do tipo encapsulado, variando os materiais de enrolamento utilizados. As famílias são as seguintes:

FALUR-M170: fio de alumínio redondo com isolamento em filme poliéster, com espessura de isolamento de 170 microns.

FALUR-N230: fio de alumínio redondo com isolamento em papel aramida, com espessura de isolamento de 230 microns.

FCOBR-M170: fio de cobre redondo com isolamento em filme poliéster, com espessura de isolamento de 170 microns.

FCOBR-N230: fio de cobre redondo com isolamento em papel aramida, com espessura de isolamento de 230 microns.

FCOBR-ESM: fio de cobre redondo com isolamento em verniz isolante (esmaltado), com espessura de isolamento de 50 microns.

Todas as famílias apresentam uma gama de diâmetros de condutor que varia de 4 a 12 AWG, incluindo fios intermediários (exemplo 4.5 AWG). Na base de dados utilizada para validação o espaço de solução apresenta 680 combinações para cada família, resultando em um espaço de solução global com 3400 alternativas de projeto. A aplicação em sistemas reais pode apresentar um espaço de solução muito superior ao exemplo mostrado. Além disso, torna-se possível a inclusão de novas famílias, permitindo analisar as vantagens de uma nova tecnologia construtiva ou de novos materiais condutores e isolantes.

Os casos executados são apresentados a seguir:

CASO 01

Indutância Nominal	L_{nom}	2 mH
Indutância de Projeto	L	2 mH
Corrente Nominal	I_{nom}	100 A
Corrente de Projeto	I	100 A
Corrente de Curto-Circuito Térmica	I_{th}	3 kA
Duração da Corrente de Curto-Circuito	dur	1 s
Corrente de Curto-Circuito Dinâmica	I_{dyn}	7.6 kAp
Frequência Nominal	f	60 Hz
NBI Entre Terminais	nbi	550 kVp
Surto de Manobra Entre Terminais	nbs	550 kVp
Temperatura Ambiente	Ta	40 °C
Normalização	$Norma$	ANSI

Os dados do espaço de solução e critérios de eliminação preliminar são apresentados a seguir:

Espaço de solução	3400	
Eliminação preliminar	3378	99.4%
Soluções P-Viáveis	22	0.6%

CRITÉRIOS DE ELIMINAÇÃO

Escoamento entre terminais	0	0.0%
Máximo NBI entre terminais	2040	60.4%
Densidade de corrente CC	175	5.2%
Densidade de corrente regime	81	2.4%
Limite mínimo indutância	0	0.0%
Limite máximo indutância	0	0.0%
Altura mínima V/mm	0	0.0%
Altura mínima kV/espira	29	0.9%
Altura mínima kV/mm	84	2.5%
Temperatura em regime	25	0.7%
Dimensionamento mínimo	944	27.9%

A tabela 6.1 mostra o relatório de saída de dados com o projeto básico e de custo de todas as 22 alternativas apresentadas como viável.

Tabela 6.1 – Saída de dados de projeto para o caso 01

CASO 01										Custo (R\$)						
FAMÍLIA	FIO	//	CAM	Nesp	Dm (mm)	He (mm)	Ds (mm)	Hs (mm)	Cruzeta	Enrol.	Encap.	Suporte	Total			
1	FALUR-M170	9 AWG	3	x	2	131.62	414.0	1283.3	425.1	1535.7	3" x 4	R\$ 192.11	R\$ 169.16	R\$ 172.62	R\$ 533.90	
2	FALUR-M170	6 AWG	2	x	2	144.38	375.8	1287.8	389.1	1540.2	3" x 4	R\$ 225.66	R\$ 158.98	R\$ 164.50	R\$ 549.14	2.86%
3	FALUR-M170	10 AWG	3	x	3	143.38	375.0	1260.3	388.0	1512.7	3" x 4	R\$ 241.25	R\$ 154.95	R\$ 164.25	R\$ 560.45	4.97%
4	FALUR-M170	4 AWG	2	x	1	144.38	415.8	1596.5	426.3	1848.9	3" x 4	R\$ 186.80	R\$ 206.48	R\$ 172.90	R\$ 566.18	6.05%
5	FALUR-M170	12 AWG	4	x	3	134.13	405.8	1283.3	417.3	1535.7	3" x 4	R\$ 236.28	R\$ 166.91	R\$ 170.87	R\$ 574.05	7.52%
6	FALUR-M170	10.5 AWG	4	x	2	115.41	476.7	1283.3	486.9	1535.7	3" x 4	R\$ 201.60	R\$ 192.36	R\$ 186.59	R\$ 580.55	8.74%
7	FALUR-M170	6 AWG	3	x	1	96.25	581.5	1287.8	591.0	1540.2	3" x 4	R\$ 174.59	R\$ 232.94	R\$ 210.08	R\$ 617.61	15.68%
8	FALUR-M170	11.5 AWG	5	x	2	102.05	544.7	1283.3	554.3	1535.7	3" x 4	R\$ 217.34	R\$ 218.20	R\$ 201.81	R\$ 637.35	19.38%
9	FALUR-M170	7.5 AWG	4	x	1	84.43	670.7	1283.3	679.5	1535.7	3" x 4	R\$ 176.69	R\$ 265.20	R\$ 230.06	R\$ 671.94	25.86%
10	FALUR-M170	12 AWG	6	x	2	89.42	629.5	1283.3	638.9	1535.7	3" x 4	R\$ 244.36	R\$ 251.33	R\$ 220.91	R\$ 716.60	34.22%
11	FALUR-M170	8.5 AWG	5	x	1	75.05	764.7	1283.3	773.1	1535.7	3" x 4	R\$ 185.18	R\$ 300.69	R\$ 251.21	R\$ 737.09	38.06%
12	FALUR-M170	9.5 AWG	6	x	1	69.44	834.5	1283.3	842.6	1535.7	3" x 4	R\$ 187.01	R\$ 326.50	R\$ 266.90	R\$ 780.41	46.17%
13	FCOBR-M170	6 AWG	2	x	1	144.38	375.8	1287.8	385.3	1540.2	3" x 4	R\$ 529.74	R\$ 150.54	R\$ 163.63	R\$ 843.91	58.07%
14	FCOBR-M170	8 AWG	3	x	1	118.83	462.0	1283.3	470.6	1535.7	3" x 4	R\$ 512.29	R\$ 182.14	R\$ 182.89	R\$ 877.32	64.32%
15	FCOBR-M170	12 AWG	4	x	2	134.13	405.8	1283.3	415.2	1535.7	3" x 4	R\$ 576.06	R\$ 162.02	R\$ 170.40	R\$ 908.47	70.16%
16	FCOBR-M170	10 AWG	3	x	2	145.03	372.5	1274.8	382.9	1527.2	3" x 4	R\$ 651.60	R\$ 149.97	R\$ 163.11	R\$ 964.68	80.69%
17	FCOBR-M170	9 AWG	4	x	1	98.72	564.7	1283.3	573.0	1535.7	3" x 4	R\$ 557.45	R\$ 221.51	R\$ 206.02	R\$ 984.98	84.49%
18	FCOBR-M170	10 AWG	5	x	1	87.60	643.9	1283.3	651.8	1535.7	3" x 4	R\$ 566.98	R\$ 251.35	R\$ 223.82	R\$ 1,042.15	95.20%
19	FCOBR-M170	11 AWG	6	x	1	80.90	703.3	1283.3	710.9	1535.7	3" x 4	R\$ 551.12	R\$ 273.35	R\$ 237.16	R\$ 1,061.63	98.85%
20	FCOBR-M170	12 AWG	7	x	1	76.64	746.9	1283.3	754.3	1535.7	3" x 4	R\$ 530.18	R\$ 289.23	R\$ 246.96	R\$ 1,066.36	99.73%
21	FALUR-M170	10 AWG	7	x	1	62.57	939.6	1283.3	947.5	1535.7	3" x 8	R\$ 205.17	R\$ 366.79	R\$ 561.93	R\$ 1,133.89	112.38%
22	FALUR-M170	10.5 AWG	8	x	1	57.70	1031.4	1283.3	1039.2	1535.7	3" x 8	R\$ 218.08	R\$ 401.72	R\$ 603.31	R\$ 1,223.11	129.09%

Para cada uma das alternativas construtivas apresentadas como viável pelo sistema de otimização foi realizado um projeto detalhado, no programa computacional específico de reatores de núcleo de ar. Todas as soluções apresentadas foram confirmadas como viáveis, atendendo a todos os requisitos técnicos especificados.

A tabela comparativa a seguir mostra os erros apresentados nos valores de indutância, temperatura média e elevação de temperatura no curto-circuito obtidos pelo sistema de otimização e pelo programa computacional de projeto.

Erro máximo (OpDesign x programa de projeto)

	Indutância	Temp. Média	Elevação C.C.
1	-0.754%	0.213%	0.125%
2	-0.567%	0.222%	0.119%
3	-0.655%	0.215%	0.121%
4	-0.421%	0.220%	0.095%
5	-0.675%	0.245%	0.113%
6	-0.722%	0.231%	0.115%
7	-0.410%	0.240%	0.120%
8	-0.687%	0.265%	0.124%
9	-0.388%	0.218%	0.118%
10	-0.677%	0.223%	0.119%
11	-0.435%	0.201%	0.112%
12	-0.425%	0.262%	0.121%
13	-0.392%	0.253%	0.124%
14	-0.413%	0.245%	0.118%
15	-0.588%	0.210%	0.115%
16	-0.605%	0.235%	0.113%
17	-0.421%	0.239%	0.120%
18	-0.510%	0.211%	0.123%
19	-0.453%	0.211%	0.118%
20	-0.405%	0.238%	0.123%
21	-0.415%	0.216%	0.124%
22	-0.397%	0.223%	0.120%

Os maiores erros encontrados foram no cálculo de indutância, principalmente pelo fato de que o programa computacional trabalha com diferente número de espiras entre as camadas. Por este motivo, as alternativas com apenas uma camada apresentaram erro de indutância um pouco menor. Ainda assim, os valores de erro são bastante semelhantes, garantindo a confiabilidade da análise comparativa entre as alternativas.

O caso 02 foi executado com um reator de menor indutância e NBI, porém com maior corrente nominal:

CASO 02

Indutância Nominal	L_{nom}	0.2 mH
Indutância de Projeto	L	0.2 mH
Corrente Nominal	I_{nom}	200 A
Corrente de Projeto	I	200 A
Corrente de Curto-Circuito Térmica	I_{th}	3 kA
Duração da Corrente de Curto-Circuito	dur	1 s
Corrente de Curto-Circuito Dinâmica	I_{dyn}	7.6 kAp
Frequência Nominal	f	60 Hz
NBI Entre Terminais	nbi	250 kVp
Surto de Manobra Entre Terminais	nbs	250 kVp
Temperatura Ambiente	Ta	40 °C
Normalização	$Norma$	IEC

Os dados do espaço de solução e critérios de eliminação preliminar são apresentados a seguir:

<i>Espaço de solução</i>	3400	
<i>Eliminação preliminar</i>	3351	98.6%
<i>Soluções P-Viáveis</i>	49	1.4%

CRITÉRIOS DE ELIMINAÇÃO

Escoamento entre terminais	0	0.0%
Máximo NBI entre terminais	680	20.3%
Densidade de corrente CC	330	9.8%
Densidade de corrente regime	713	21.3%
Limite mínimo indutância	0	0.0%
Limite máximo indutância	0	0.0%
Altura mínima V/mm	0	0.0%
Altura mínima kV/espira	186	5.6%
Altura mínima kV/mm	132	3.9%
Temperatura em regime	4	0.1%
Dimensionamento mínimo	1306	39.0%

A tabela 6.2 mostra o relatório de saída de dados com o projeto básico e de custo das 25 primeiras alternativas apresentadas como viável.

Tabela 6.2 – Saída de dados de projeto para o caso 02

CASO 02								Custo (R\$)							
FAMÍLIA	FIO	//	CAM	Nesp	Dm (mm)	He (mm)	Ds (mm)	Hs (mm)	Cruzeta	Enrol.	Encap.	Suporte	Total		
1	FALUR-M170	10 AWG	5 x 3	28.67	382.2	420.0	394.0	672.4	3" x 4	R\$ 81.95	R\$ 53.29	R\$ 165.61	R\$ 300.86		
2	FALUR-M170	7 AWG	4 x 2	26.25	424.6	421.1	435.9	673.5	3" x 4	R\$ 76.36	R\$ 58.01	R\$ 175.06	R\$ 309.44	2.85%	
3	FALUR-M170	5 AWG	4 x 1	26.25	463.3	520.8	472.1	773.2	3" x 4	R\$ 61.61	R\$ 66.72	R\$ 183.23	R\$ 311.56	3.56%	
4	FALUR-M170	8 AWG	4 x 3	29.06	375.6	418.4	389.3	670.8	3" x 4	R\$ 92.88	R\$ 56.24	R\$ 164.54	R\$ 313.66	4.26%	
5	FALUR-M170	11 AWG	6 x 3	26.48	419.9	420.0	430.9	672.4	3" x 4	R\$ 84.46	R\$ 56.64	R\$ 173.94	R\$ 315.04	4.72%	
6	FALUR-M170	12 AWG	7 x 3	25.08	447.8	420.0	458.2	672.4	3" x 4	R\$ 85.34	R\$ 58.61	R\$ 180.09	R\$ 324.04	7.71%	
7	FALUR-M170	11.5 AWG	6 x 4	27.83	395.8	420.0	408.6	672.4	3" x 4	R\$ 103.38	R\$ 57.59	R\$ 168.91	R\$ 329.87	9.64%	
8	FALUR-N230	6 AWG	4 x 1	26.25	448.3	480.9	456.7	733.3	3" x 4	R\$ 97.47	R\$ 59.61	R\$ 179.76	R\$ 336.84	11.96%	
9	FALUR-M170	12 AWG	6 x 5	28.92	376.5	415.0	391.0	667.4	3" x 4	R\$ 118.16	R\$ 57.93	R\$ 164.92	R\$ 341.01	13.35%	
10	FALUR-N230	8 AWG	4 x 2	28.23	389.3	420.0	400.0	672.4	3" x 4	R\$ 136.90	R\$ 51.87	R\$ 166.97	R\$ 355.74	18.24%	
11	FALUR-N230	9.5 AWG	5 x 2	26.25	424.2	420.0	434.0	672.4	3" x 4	R\$ 141.26	R\$ 54.12	R\$ 174.63	R\$ 370.01	22.98%	
12	FALUR-M170	8.5 AWG	5 x 2	24.56	459.3	420.0	469.4	672.4	3" x 6	R\$ 72.80	R\$ 59.70	R\$ 264.33	R\$ 396.82	31.90%	
13	FALUR-N230	10.5 AWG	5 x 3	28.97	377.7	420.0	389.4	672.4	3" x 4	R\$ 185.41	R\$ 52.47	R\$ 164.56	R\$ 402.44	33.76%	
14	FALUR-N230	8.5 AWG	4 x 3	28.81	375.5	407.9	388.9	660.3	3" x 4	R\$ 188.35	R\$ 54.99	R\$ 164.46	R\$ 407.80	35.55%	
15	FCOBR-N230	7.5 AWG	4 x 1	26.79	414.1	420.0	421.9	672.4	3" x 4	R\$ 194.68	R\$ 47.90	R\$ 171.89	R\$ 414.47	37.76%	
16	FALUR-M170	9.5 AWG	6 x 2	22.73	504.4	420.0	513.9	672.4	3" x 6	R\$ 73.98	R\$ 63.70	R\$ 279.40	R\$ 417.08	38.63%	
17	FALUR-M170	6.5 AWG	5 x 1	21.00	567.2	443.1	575.2	695.5	3" x 6	R\$ 55.96	R\$ 69.49	R\$ 300.15	R\$ 425.60	41.46%	
18	FCOBR-M170	6.5 AWG	4 x 1	26.25	433.5	443.1	441.5	695.5	3" x 4	R\$ 197.89	R\$ 53.11	R\$ 176.34	R\$ 427.34	42.04%	
19	FALUR-N230	11.5 AWG	6 x 3	26.57	418.2	420.0	429.2	672.4	3" x 4	R\$ 200.59	R\$ 56.35	R\$ 173.55	R\$ 430.49	43.09%	
20	FCOBR-M170	10 AWG	5 x 2	28.67	382.2	420.0	391.5	672.4	3" x 4	R\$ 220.31	R\$ 47.65	R\$ 165.04	R\$ 433.00	43.92%	
21	FCOBR-M170	11 AWG	6 x 2	26.48	419.9	420.0	428.6	672.4	3" x 4	R\$ 215.39	R\$ 51.04	R\$ 173.43	R\$ 439.86	46.20%	
22	FCOBR-M170	12 AWG	7 x 2	25.08	447.8	420.0	456.1	672.4	3" x 4	R\$ 208.07	R\$ 53.21	R\$ 179.62	R\$ 440.90	46.55%	
23	FALUR-M170	7.5 AWG	6 x 1	18.42	654.0	420.0	661.6	672.4	3" x 6	R\$ 56.39	R\$ 75.18	R\$ 329.40	R\$ 460.96	53.22%	
24	FCOBR-N230	12 AWG	6 x 2	27.87	395.2	420.0	403.7	672.4	3" x 4	R\$ 252.52	R\$ 47.48	R\$ 167.80	R\$ 467.79	55.49%	
25	FALUR-N230	7 AWG	5 x 1	21.00	562.5	433.7	570.4	686.1	3" x 6	R\$ 105.87	R\$ 67.44	R\$ 298.52	R\$ 471.84	56.83%	

Assim como no caso 01, foram realizados projetos completos para cada uma das 25 primeiras alternativas apresentadas pelo sistema de otimização no programa computacional específico de reatores de núcleo de ar. Novamente, todas as soluções apresentadas foram confirmadas como viáveis, atendendo a todos os requisitos técnicos especificados.

A tabela comparativa a seguir mostra os erros apresentados nos valores de indutância, temperatura média e elevação de temperatura no curto-circuito obtidos pelo sistema de otimização e pelo programa computacional de projeto.

Erro máximo (OpDesign x programa de projeto)

	Indutância	Temp. Média	Elevação C.C.
1	-0.429%	0.213%	0.121%
2	-0.689%	0.239%	0.124%
3	-0.736%	0.269%	0.119%
4	-0.400%	0.221%	0.120%
5	-0.421%	0.226%	0.125%
6	-0.769%	0.204%	0.119%
7	-0.578%	0.239%	0.122%
8	-0.668%	0.243%	0.114%
9	-0.413%	0.242%	0.121%
10	-0.617%	0.214%	0.116%
11	-0.429%	0.214%	0.096%
12	-0.520%	0.242%	0.114%
13	-0.444%	0.218%	0.124%
14	-0.462%	0.223%	0.114%
15	-0.701%	0.216%	0.122%
16	-0.396%	0.234%	0.124%
17	-0.691%	0.244%	0.126%
18	-0.462%	0.243%	0.116%
19	-0.413%	0.249%	0.121%
20	-0.418%	0.214%	0.125%
21	-0.617%	0.214%	0.113%
22	-0.429%	0.266%	0.124%
23	-0.520%	0.257%	0.119%
24	-0.600%	0.249%	0.119%
25	-0.434%	0.225%	0.120%

Os erros apurados foram bastante semelhantes ao caso 01, porém ligeiramente maiores como um todo, devido principalmente ao valor muito baixo de indutância do projeto. A confiabilidade da análise comparativa foi mantida.

No caso 03 o sistema foi executado para um reator típico de aterramento de neutro, com alta impedância (50Ω), baixa corrente nominal e corrente de curto-circuito de maior duração. Considerada temperatura ambiente máxima de $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

CASO 03

Indutância Nominal	L_{nom}	159.155 mH
Indutância de Projeto	L	159.155 mH
Corrente Nominal	I_{nom}	25 A
Corrente de Projeto	I	25 A
Corrente de Curto-Circuito Térmica	I_{th}	1 kA
Duração da Corrente de Curto-Circuito	dur	10 s
Corrente de Curto-Circuito Dinâmica	I_{dyn}	2.55 kAp
Freqüência Nominal	f	50 Hz
NBI Entre Terminais	nbi	350 kVp
Surto de Manobra Entre Terminais	nbs	350 kVp
Temperatura Ambiente	Ta	50 $^\circ\text{C}$
Normalização	$Norma$	NBR

Os dados do espaço de solução e critérios de eliminação preliminar são apresentados a seguir:

Espaço de solução	3400	
Eliminação preliminar	3347	98.4%
Soluções P-Viáveis	53	1.6%

CRITÉRIOS DE ELIMINAÇÃO

Escoamento entre terminais	0	0.0%
Máximo NBI entre terminais	680	20.3%
Densidade de corrente CC	381	11.4%
Densidade de corrente regime	0	0.0%
Limite mínimo indutância	0	0.0%
Limite máximo indutância	1431	42.8%
Altura mínima V/mm	0	0.0%
Altura mínima kV/espira	0	0.0%
Altura mínima kV/mm	0	0.0%
Temperatura em regime	15	0.4%
Dimensionamento mínimo	840	25.1%

A tabela 6.3 mostra o relatório de saída de dados com o projeto básico e de custo das 25 primeiras alternativas apresentadas como viável.

Tabela 6.3 – Saída de dados de projeto para o caso 03

CASO 03								Custo (R\$)							
FAMÍLIA	FIO	//	CAM	Nesp	Dm (mm)	He (mm)	Ds (mm)	Hs (mm)	Cruzeta	Enrol.	Encap.	Suporte	Total		
1	FALUR-M170	8.5 AWG	1 x 5	254.43	2132.7	870.1	2151.8	1122.5	3" x 6	R\$ 1,750.87	R\$ 599.70	R\$ 851.40	R\$ 3,201.98		
2	FALUR-M170	6.5 AWG	1 x 3	237.21	2453.5	1001.0	2468.8	1253.4	3" x 6	R\$ 1,640.67	R\$ 707.55	R\$ 958.79	R\$ 3,307.01	3.28%	
3	FALUR-M170	7.5 AWG	1 x 4	245.65	2287.9	933.5	2305.4	1185.9	3" x 6	R\$ 1,753.68	R\$ 654.14	R\$ 903.42	R\$ 3,311.25	3.41%	
4	FALUR-M170	5 AWG	1 x 2	224.77	2732.5	1114.9	2745.6	1367.3	3" x 8	R\$ 1,555.81	R\$ 820.65	R\$ 1,391.19	R\$ 3,767.65	17.67%	
5	FALUR-M170	11.5 AWG	2 x 5	223.72	2758.2	1125.3	2773.2	1377.7	3" x 8	R\$ 2,412.88	R\$ 866.37	R\$ 1,403.67	R\$ 4,682.92	46.25%	
6	FALUR-M170	9.5 AWG	2 x 3	209.11	3157.2	1288.1	3169.4	1540.5	3" x 8	R\$ 2,130.37	R\$ 1,053.66	R\$ 1,582.58	R\$ 4,766.61	48.86%	
7	FALUR-M170	10.5 AWG	2 x 4	216.38	2948.7	1203.1	2962.5	1455.5	3" x 8	R\$ 2,337.91	R\$ 955.87	R\$ 1,489.14	R\$ 4,782.93	49.37%	
8	FALUR-M170	8 AWG	2 x 2	211.61	3289.5	1523.6	3300.0	1776.0	3" x 8	R\$ 1,974.57	R\$ 1,236.61	R\$ 1,641.56	R\$ 4,852.73	51.55%	
9	FALUR-N230	5 AWG	1 x 2	222.99	2776.4	1132.8	2789.7	1385.2	3" x 8	R\$ 2,976.71	R\$ 848.44	R\$ 1,411.12	R\$ 5,236.27	63.53%	
10	FALUR-N230	7.5 AWG	1 x 4	243.11	2335.8	953.0	2353.7	1205.4	3" x 6	R\$ 3,800.46	R\$ 683.81	R\$ 919.80	R\$ 5,404.06	68.77%	
11	FALUR-N230	6.5 AWG	1 x 3	235.00	2499.8	1019.9	2515.5	1272.3	3" x 8	R\$ 3,383.35	R\$ 736.11	R\$ 1,287.26	R\$ 5,406.72	68.86%	
12	FALUR-M170	11.5 AWG	3 x 3	215.19	3289.3	1623.6	3300.0	1876.0	3" x 8	R\$ 2,490.99	R\$ 1,312.20	R\$ 1,641.56	R\$ 5,444.74	70.04%	
13	FALUR-M170	5 AWG	2 x 1	240.07	3291.2	2381.5	3300.0	2633.9	3" x 8	R\$ 2,001.43	R\$ 1,827.81	R\$ 1,641.56	R\$ 5,470.80	70.86%	
14	FALUR-N230	8.5 AWG	1 x 5	251.52	2182.3	890.4	2201.9	1142.8	3" x 6	R\$ 3,982.39	R\$ 630.22	R\$ 868.38	R\$ 5,480.99	71.17%	
15	FCOBR-M170	10.5 AWG	1 x 5	272.62	1857.6	757.9	1873.8	1010.3	3" x 6	R\$ 4,551.79	R\$ 445.36	R\$ 757.25	R\$ 5,754.40	79.71%	
16	FALUR-M170	9.5 AWG	3 x 2	232.87	3290.5	2151.7	3300.0	2404.1	3" x 8	R\$ 2,472.55	R\$ 1,675.30	R\$ 1,641.56	R\$ 5,789.40	80.81%	
17	FALUR-M170	12 AWG	3 x 4	211.49	3287.6	1517.7	3300.0	1770.1	3" x 8	R\$ 3,018.63	R\$ 1,267.70	R\$ 1,641.56	R\$ 5,927.88	85.13%	
18	FCOBR-M170	9.5 AWG	1 x 4	263.46	1988.9	811.5	2003.8	1063.9	3" x 6	R\$ 4,677.32	R\$ 485.04	R\$ 801.28	R\$ 5,963.65	86.25%	
19	FCOBR-N230	9.5 AWG	1 x 3	260.13	2040.2	832.4	2052.8	1084.8	3" x 6	R\$ 4,725.85	R\$ 479.24	R\$ 817.87	R\$ 6,022.96	88.10%	
20	FCOBR-N230	11.5 AWG	1 x 5	277.53	1792.4	731.3	1808.0	983.7	3" x 6	R\$ 5,137.99	R\$ 412.45	R\$ 734.96	R\$ 6,285.40	96.30%	
21	FCOBR-N230	10.5 AWG	1 x 4	268.80	1910.6	779.5	1924.9	1031.9	3" x 6	R\$ 5,083.37	R\$ 445.27	R\$ 774.55	R\$ 6,303.19	96.85%	
22	FALUR-M170	11 AWG	4 x 2	247.16	3291.3	2614.0	3300.0	2866.4	3" x 8	R\$ 2,746.90	R\$ 1,996.50	R\$ 1,641.56	R\$ 6,384.96	99.41%	
23	FCOBR-N230	7.5 AWG	1 x 2	243.11	2335.8	953.0	2346.9	1205.4	3" x 6	R\$ 4,982.93	R\$ 591.54	R\$ 917.50	R\$ 6,491.96	102.75%	
24	FCOBR-M170	8 AWG	1 x 3	250.11	2206.9	900.4	2220.5	1152.8	3" x 6	R\$ 5,151.06	R\$ 565.59	R\$ 874.69	R\$ 6,591.34	105.85%	
25	FCOBR-M170	6.5 AWG	1 x 2	237.21	2453.5	1001.0	2465.2	1253.4	3" x 6	R\$ 5,060.17	R\$ 655.39	R\$ 957.55	R\$ 6,673.11	108.41%	

Uma parcela considerável do espaço de solução é composto por alternativas onde a altura da espira efetiva torna inviável a fabricação do enrolamento dentro dos limites dimensionais das respectivas famílias, para um alto valor de indutância. Reatores de aterramento de neutro são geralmente projetados para suportar apenas uma pequena corrente de desequilíbrio em regime permanente. Por este motivo, o principal critério de definição do projeto térmico do equipamento é a corrente nominal de curta duração (corrente de curto-circuito térmica), que normalmente tem duração maior.

A tabela comparativa a seguir mostra os erros apurados:

Erro máximo (OpDesign x programa de projeto)

	Indutância	Temp. Média	Elevação C.C.
1	-0.388%	0.211%	0.119%
2	-0.409%	0.211%	0.124%
3	-0.668%	0.262%	0.115%
4	-0.417%	0.231%	0.095%
5	-0.505%	0.240%	0.112%
6	-0.420%	0.239%	0.123%
7	-0.384%	0.223%	0.113%
8	-0.670%	0.222%	0.121%
9	-0.714%	0.235%	0.123%
10	-0.417%	0.265%	0.125%
11	-0.505%	0.218%	0.120%
12	-0.582%	0.210%	0.118%
13	-0.312%	0.238%	0.121%
14	-0.561%	0.215%	0.113%
15	-0.648%	0.201%	0.118%
16	-0.401%	0.235%	0.115%
17	-0.599%	0.253%	0.120%
18	-0.430%	0.245%	0.118%
19	-0.448%	0.239%	0.119%
20	-0.680%	0.238%	0.123%
21	-0.448%	0.211%	0.123%
22	-0.401%	0.220%	0.118%

Desta vez os erros apurados foram ligeiramente menores como um todo, devido principalmente ao alto valor de indutância do projeto. Novamente, a confiabilidade da análise comparativa foi mantida, mantendo-se constante mesmo nos extremos de indutância (valores muito altos ou muito baixos).

6.2 AVALIAÇÃO FINAL DO SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO

A avaliação do sistema de otimização foi realizada através de análises de performance do algoritmo implementado OpDesign, com relação às características esperadas do sistema, ou seja:

- rapidez ;
- abrangência;
- precisão;
- flexibilidade;

Os itens analisados indicam uma performance satisfatória do sistema, como segue:

01 – RAPIDEZ

O sistema de otimização apresentou desempenho satisfatório em todos os testes realizados, fornecendo resultados em menos de 1 segundo, mesmo com uma base de dados composta por 5 famílias. É importante observar que a linguagem de programação utilizada (Visual Basic for Applications) apresenta velocidade de processamento bastante inferior às linguagens de programação compiláveis, normalmente utilizadas para os programas de uso contínuo (C, Delphi, etc.). Além disso, todos os relatórios de saída de dados foram desenvolvidos em planilhas Excel. Este processo de gravação de massa de dados em planilhas ocupa a maior parte do tempo de processamento do algoritmo.

A velocidade de processamento foi obtida com a ordenação dos critérios de eliminação, a simplificação das equações e a checagem invertida das equações exponenciais, que eliminou os ciclos de iteração. Este desempenho deve ser considerado suficiente para a aplicação em sistemas de projeto de larga escala, ainda que com a utilização de uma base de dados muito mais extensa que a considerada.

02 – ABRANGÊNCIA

Todas as alternativas consideradas viáveis pelo programa foram validadas pelo programa computacional de projeto de reatores, indicando a abrangência do sistema de

otimização. A análise do algoritmo permite observar que todos os parâmetros típicos de projeto elétrico estão contemplados. Deve ser dada especial atenção a critérios mecânicos, uma vez que estes não estão contemplados no sistema em questão. Alguns parâmetros especiais como nível de poluição, requisitos sísmicos e vento não foram contemplados e podem ser adicionados apropriadamente para cada equipamento, se desejado pelo fabricante.

03 – PRECISÃO

O sistema de otimização foi executado para diversos projetos diferentes, incluindo extremos opostos de indutância de projeto, corrente de projeto, etc. Os testes realizados indicaram uma precisão bastante satisfatória dos modelos de cálculo utilizados. É importante observar a uniformidade dos valores de erro apresentados, indicando uma excelente confiabilidade do sistema para a finalidade de comparação entre diferentes alternativas.

04 – FLEXIBILIDADE

A parametrização utilizada das tecnologias construtivas (famílias) e dos materiais (membros) permite a inclusão ou exclusão de novas tecnologias construtivas, novas opções de fabricação (mandris, maquinário, etc) e novos materiais, entre outros. Desta maneira, a introdução de novos materiais pode ser facilmente implementada e analisada para avaliar suas possíveis vantagens. Da mesma forma, a utilização de uma nova tecnologia construtiva com suas características próprias ou a fabricação de uma nova ferramenta de fabricação (por exemplo um mandril de diâmetro diferente) podem ser analisados. O sistema permite também a alteração de critérios de projeto para avaliar o impacto destas alterações. Além disso, os dados de custo podem ser revisados constantemente, mantendo o sistema sempre atualizado e confiável.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia de otimização proposta consiste basicamente na utilização dos requisitos especificados para eliminar alternativas de solução diretamente inviáveis, de maneira a reduzir o espaço de solução a dimensões que permitam a avaliação individual de cada alternativa. Os resultados apresentados demonstram que:

- as soluções de menor custo podem ser muitas vezes da mesma tecnologia construtiva (família), mas são radicalmente diferentes com relação à bitola do fio, número de fios em paralelo e número de camadas. No caso 01 (item 6.1), por exemplo, as alternativas número 4 e 5 utilizam fios de bitola 4 e 12 AWG respectivamente, ou seja, o condutor de maior diâmetro e o de menor diâmetro entre os utilizados. Embora a seção do condutor na alternativa 4 seja cerca de 6.4 vezes a seção do condutor na alternativa 5, as duas alternativas apresentam custo de fabricação bastante semelhante. Por este motivo, a aplicação de um sistema de busca heurística dificilmente se apresentaria eficiente na determinação da melhor solução global. A simulação de Monte Carlo [12] também apresentaria problemas neste tipo de aplicação.

- a utilização de modelos simplificados de cálculo em conjunto com critérios adequados de projeto permite descartar uma parcela significativa do espaço de solução, normalmente acima de 98 % deste espaço. Sendo assim, é possível afirmar que um sistema de busca heurística estaria colocando a maior parte do seu esforço computacional sobre um espaço de solução preliminarmente inútil.

- os modelos simplificados de cálculo permitem a realização de um projeto básico das alternativas aprovadas, com extrema rapidez. Este projeto básico tem precisão suficiente com relação às características dimensionais e de custo, permitindo uma análise comparativa confiável entre as alternativas.

A metodologia proposta se mostrou eficiente, abrangente e confiável. A parametrização das tecnologias construtivas e materiais na forma de famílias e membros

provê enorme flexibilidade, permitindo a sua implementação para uma extensa e variada gama de equipamentos elétricos. A sua implementação deve considerar as características específicas de cada equipamento e da tecnologia de construção e de projeto de cada fabricante. A proposta inicial pode ser ampliada com a introdução de parâmetros de projeto e critérios de eliminação adicionais.

Deve ser dada especial atenção quanto aos critérios mecânicos, que não foram considerados no sistema proposto. Os parâmetros de carga estática, vento, tração de cabos, abalos sísmicos, etc. podem influir principalmente no cálculo de estruturas complementares (encapsulamento, carcaças, estruturas suporte, etc.) podendo ter impacto considerável na matriz de custo do equipamento.

Os critérios e procedimentos de cálculo de custo devem ser desenvolvidos por cada fabricante durante a implementação do sistema de otimização. A implementação adequada do sistema requer a inclusão de todos os custos agregados ao produto, como mão-de-obra, custos administrativos, custos comerciais e transporte, entre outros, de maneira a refletir o custo final de venda do ponto de vista do cliente. Alternativas de custo básico semelhante podem apresentar dimensões finais e custos subseqüentes muito diferentes.

Cuidado especial deve ser tomado com relação a fretes internacionais. Ainda que este frete seja a cargo do cliente (FOB), é recomendado que o custo seja considerado no sistema, de maneira a permitir uma avaliação sensível do custo da alternativa do ponto de vista do cliente. Deve-se observar que alternativas que resultem em menores dimensões finais podem levar a uma série de reduções de custo com carcaças, estruturas suporte, embalagem e frete. Da mesma maneira, o sistema pode utilizar as dimensões de cada alternativa para avaliar os custos de frete, considerando critérios específicos como peso cubado, largura excedente, adequação a contêineres padronizados, etc.

O formato da base de dados permite a revisão constante dos dados de custo, garantindo um sistema atualizado e confiável. Esta base de dados permite ainda a inclusão com facilidade de novas alternativas como tecnologias construtivas, materiais, dispositivos de fabricação, etc., para análise de competitividade e interesse.

CAPÍTULO 8

BIBLIOGRAFIA

- [1] GROVER, F. W., "Inductance Calculations – Working Formulas and Tables", 1st edition, New York, Dover Publications, 1946.
- [2] DWIGHT, H. B., "Electrical Coils and Conductors – Their Electrical Characteristics and Theory", 1st edition, New York, McGraw Hill, 1945.
- [3] WELSBY, V. G., "The Theory and Design of Inductance Coils", 2nd edition, London, Macdonald, 1960.
- [4] NAGAOKA, H., "The Inductance Coefficients of Solenoids", J. Coll. Sci., vol. 27, pp. 18-33, 1909.
- [5] FAWZI, T. H. and BURKE, P.E., "The Accurate Computation of Self and Mutual Inductance of Circular Coils", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 2, 1978.
- [6] FAWZI, T. H., GOHAR, M.K. and ABDELAUL, F., "The Accurate Computation of Force Between Circular Coils", IEEE Transactions on Magnetics, vol. MAG-15, no. 6, 1979.
- [7] SILVA, A.P.A., "Tutorial – Genetic Algorithms", UNIFEI, 2002.
- [8] FINK, D. G., BEATY, H. W., "Standard Handbook for Electrical Engineers", 11th edition, New York, McGraw Hill, 1978.
- [9] WHEELER, H. A., "Simple Inductance Formulas for Radio Coils", Proc. IRE, vol. 16, pp. 1398-1400, Oct. 1928.
- [10] WHEELER, H. A., "Inductance Formulas for Circular and Square Coils", Proc. IEEE, vol. 70, pp. 1449-1450, 1982.
- [11] LUNDIN, R., "A Handbook Formula for the Inductance of a Single-Layer Circular Coil", Proc. IEEE, vol. 73, pp. 1428-1429, 1985.
- [12] ANDERSEN, O.W., "Optimized Design of Electric Power Equipment", IEEE Computer Applications in Power, January 1991.
- [13] FOELSCH, "Magnetfeld und Induktivität einer zylindrischen Spule", Archiv für Elektrotechnik, XXX Band., 1936.
- [14] COHEN, L., "An Exact Formula for the Mutual Inductance of Coaxial Solenoids", Bulletin of Bureau of Standards, Vol. 3, No. 2, 1907, pp. 295-303.
- [15] OLSHAUSEN, G. R., "Note on Absolute Formulae for the Mutual Inductance of Coaxial Solenoids", Phys. Rev., Vol. 35, 1912, p. 150.
- [16] ROSA, E. B. and GROVER, F. W., "Formulas and Tables for the Calculation of Mutual and Self-Inductance", Sci. Papers Bur. Stand., No. 169, Dec. 1916.

- [17] GROVER, F. W., "Tables for Calculation of the Mutual Inductance of Any Two Coaxial Single Layer Coils", Proc. IRE, Vol. 21, No. 7, 1933, pp. 1039-1049.
- [18] IEEE Std. C57.16 - IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Dry-Type Air-Core Series-Connected Reactors, IEEE Power Engineering Society, 1996.
- [19] IEC 60289 – Reactors, International Electrotechnical Commission, 1988.
- [20] IEC 60076-2 – Power Transformers – Part 2: Temperature rise, International Electrotechnical Commission, 1993.
- [21] IEC 60076-5 – Power Transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit, International Electrotechnical Commission, 2000.
- [22] IEC 60076-11 – Power Transformers – Part 11: Dry-type transformers, International Electrotechnical Commission, 2004.