



**Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**MEDIÇÃO DAS PERDAS EM REATORES COM NÚCLEO DE AR TIPO SECO
PELO MÉTODO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA**

DENISON GIMENES MESQUITA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Edson da Costa Bortoni, D.Sc.

Itajubá, Novembro de 2020.

*Dedico este trabalho ao meu Deus que me
proporcionou sabedoria e me
conduziu a estar junto à minha
esposa Larissa Mesquita e ao meu
filho Victhor, os principais alicerces
desta dissertação.*

AGRADECIMENTOS

“Deem graças ao Senhor porque ele é bom; o seu amor dura para sempre”

(Salmos 107:1). Sim, agradeço a Deus por ter me dado o fôlego da vida e por estar comigo em todas as circunstâncias. O agradeço por conduzir os meus caminhos e por ter aprimorado o meu conhecimento e sabedoria neste trabalho.

Agradeço à minha esposa Larissa Mesquita pelo apoio e suporte. Nos momentos da minha ausência, sua compreensão foi decisiva para condução e conclusão desta tarefa.

A minha mãe e em especial ao meu pai que, além de ser responsável por muito do que eu sou, também me auxiliou na fase de fabricação dos protótipos utilizados neste experimento.

Ao meu orientador Prof. Dr. Edson Bortoni, pelo inestimável apoio e atenção.

Aos amigos e parceiros do Grupo de Estudos Energéticos Excen, pelo companheirismo e pelo bom-humor, que torna a caminhada mais leve e agradável.

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para aumentar o meu conhecimento em relação ao equipamento e técnicas aqui estudadas.

RESUMO

Reatores com núcleo de ar tipo seco, assim como capacitores, são elementos básicos e parte integral tanto do sistema elétrico de distribuição quanto do sistema de transmissão de potência. Além de fornecer potência reativa para o sistema elétrico, este tipo de reator possui um vasto campo de aplicação como: limitador de corrente de curto-circuito, limitador de corrente de Inrush (para capacitores e motores), filtro de harmônicos, compensação VAR, redução de Ripple ou alisamento, bobinas de bloqueio, aterramento de neutro, amortecimento de transientes de comutação, redução de Flicker de forno de arco, dissintonia de circuito, equilíbrio de carregamento etc. Dependendo da sua função, os reatores são conectados em série ou em paralelo com a rede. Os reatores podem ser conectados diretamente a rede (reatores shunt, limitadores de corrente) ou em conjunto com outros componentes básicos, tais como capacitores de potência (filtros de harmônicos, capacitores shunt, limitadores de corrente de descarga, aterramento de neutro). Os reatores com núcleo de ar tipo seco podem ser instalados em qualquer nível de tensão industrial, de distribuição ou de transmissão e podem estar sujeitos desde alguns ampères a dezenas de milhares de ampères e níveis de corrente de curto-circuito de até centenas de milhares de ampères. Devido a vasta aplicação do reator de núcleo de ar no sistema elétrico de potência, as considerações dos custos relativos às perdas inerentes ao enrolamento e as perdas induzidas é de fundamental importância tanto na concepção do projeto do equipamento quanto nas medições de rotinas realizadas durante o processo de fabricação. Esta dissertação tem por objetivo apresentar uma metodologia para realizar a medição das perdas totais (nos enrolamentos) utilizando a Termografia Infravermelha em reatores com núcleo de ar tipo seco composto de um cilindro. Realizando uma comparação entre o projeto calculado, medido e pela metodologia proposta, foi possível realizar uma avaliação do trabalho realizado com constatação de bons resultados.

ABSTRACT

Dry-type air-core reactors, as well as capacitors, are basic elements and an integral part of the electrical distribution and the power transmission system. In addition to providing reactive power to the electrical system, this type of reactor has a wide field of application such as: short-circuit current limiter, Inrush current limiter (for capacitors and motors), harmonic filters, VAR compensation, Ripple reduction or smoothing, blocking coils, neutral grounding, switching transient damping, arc furnace, Flicker reduction, circuit tuning, charging balance etc. Depending on their function, the reactors are connected in series or in parallel with the network. The reactors can be connected directly to a network (shunt reactors, current limiters) or in conjunction with other basic components, such as power capacitors (harmonic filters, shunt capacitors, discharge current limiters, neutral ground). Dry-type air core reactors can be installed at any industrial plant, distribution or transmission voltage level and can range from a few amps to tens of thousands of amps and short-circuit current levels of up to hundreds of numbers of amps. Due to the wide application of the dry-type air-core reactor in the electrical power system, the cost considerations related to the losses inherent in the winding and the induced losses has fundamental importance in the design of the equipment design and in the measurements of routines performed during the process manufacturing. This dissertation aims to present a methodology to perform a measurement of the total losses (in the windings) using an Infrared Thermography in reactors with a dry-type air-core composed of a single cylinder. By making a comparison between the project carried out, measured and by the proposed methodology, it will be possible to carry out an evaluation of the work carried out with confirmation of good results.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS	12
Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	16
1.1 – Motivação	16
1.2 – Objetivo	17
1.3 – Organização do trabalho	18
Capítulo 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 – Aplicação dos reatores com núcleo de ar tipo seco	21
2.2 – Projeto de reatores	26
2.3 – Cálculo das indutâncias dos reatores	31
2.4 – Cálculo das resistências cc do reator	35
2.5 – Cálculo das correntes de distribuição	36
2.6 – Determinação da temperatura média do reator	37
2.7 – Ensaios normalizados	57
Capítulo 3 – PRINCÍPIOS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA	64
3.1 – A radiação térmica	64
3.2 – Teoria da medição e detecção de radiação	65
3.3 – A termografia infravermelha	69
3.4 – Detectores e medidores de radiação	71
3.5 – Fontes de erro na medição infravermelha	77
3.6 – Determinação da temperatura de radiação refletida	77
3.7 – Ajuste da emissividade	78
Capítulo 4 – MÉTODO PROPOSTO PARA MEDIÇÃO DE PERDAS	80
Capítulo 5 – CONSTRUÇÃO E MEDIÇÕES DE REATORES COM NÚCLEO DE AR – PROTÓTIPOS	83
5.1 – Programa de cálculo	83
5.2 – Especificações dos protótipos	86
5.3 – Construção dos protótipos	89

5.4 – Ensaio de rotina nos reatores protótipos	95
5.5 – Ensaio de elevação de temperatura	97
5.6 – Determinação da temperatura média do enrolamento pelo método da resistência	103
Capítulo 6 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	107
6.1 – Temperatura média do reator – T_s	107
6.2 – Área da superfície radiante dos reatores protótipos	119
6.3 – Coeficiente de película – h'	120
6.4 – Cálculos das perdas pelo método calorimétrico	121
6.5 – Análise e comparação dos resultados.....	122
Capítulo 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	124
Capítulo 8 – REFERÊNCIAS.....	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Reator de núcleo de Ar – aberto.....	19
Figura 2.2 – Reator de núcleo de ar – encapsulado.....	20
Figura 2.3 – Reator de aterramento de neutro	22
Figura 2.4 – Figura ilustrativa do reator de ar tipo seco	27
Figura 2.5 – Etapas do projeto dos reatores.....	30
Figura 2.6 – Bobinas dos reatores.....	32
Figura 2.7 – Circuito de corrente de distribuição	36
Figura 2.8 – Efeito Pelicular.....	39
Figura 2.9 – Interação dos campos magnéticos	42
Figura 2.10 – Distribuição do campo magnético de um reator de núcleo de ar.....	45
Figura 2.11 – Lei Biot-Savart.....	46
Figura 2.12 – Vetor campo magnético.....	47
Figura 2.13 – Fluxo de calor em um material	50
Figura 2.14 – Variação do coeficiente h'	56
Figura 2.15 – Diagrama de blocos para cálculo de temperatura	57
Figura 2.16 – Método de medição de perdas	59
Figura 2.17 – Wattímetro Digital.....	60
Figura 2.18 – Curvas do ensaio de descarga capacitiva	61
Figura 2.19 – Circuito de descarga capacitiva.....	62
Figura 2.20 – Circuito básico de um gerador de impulso atmosférico	63
Figura 2.21 – Gerador de impulsos atmosféricos	63
Figura 3.1 – Espectro eletromagnético.....	65
Figura 3.2 – Potência irradiada por um corpo negro em diferentes temperaturas.....	66
Figura 3.3 – Leis de Wien e Rayleigh concordando com a Lei de Planck.	67
Figura 3.4 – Frações da Radiação	69
Figura 3.5 – Esquema simplificado de um termovisor.....	70
Figura 3.6 – Esquema pirômetro de banda larga	71
Figura 3.7 – Pirômetro Óptico.....	72
Figura 3.8 – Termovisor tipo Scanning.....	72
Figura 3.9 – Câmera termográfica FLIR	73
Figura 3.10 – Matriz de Plano Focal – FPA.....	73
Figura 3.11 – Ilustração FOV e IFOV	74

Figura 3.12 – Termovisor <i>FLIR System E40</i>	76
Figura 3.13 – Exemplo de imagem termográfica do reator protótipo.....	76
Figura 3.14 – Ajuste da Emissividade	79
Figura 3.15 – Configurações da Câmera Termográfica.....	79
Figura 5.1 – Programa de Cálculo de Reatores	84
Figura 5.2 – Cálculo do Protótipo 1	87
Figura 5.3 – Cálculo do Protótipo 2	88
Figura 5.4 – Cálculo do Protótipo 3	88
Figura 5.5 – Reatores antigos	89
Figura 5.6 – Corte vertical no reator.....	90
Figura 5.7 – Sistema de bobinagem do reator.....	91
Figura 5.8 – Exemplo de fio de alumínio isolado com Nomex®	92
Figura 5.9 – Enrolamento do reator de um cilindro / duas camadas	92
Figura 5.10 – Espaçadores entre cilindros	93
Figura 5.11 – EXCEN – Centro de Excelência em Eficiência Energética.....	95
Figura 5.12 – Circuito de alimentação dos protótipos.....	99
Figura 5.13 – Configuração do ensaio no laboratório.....	100
Figura 5.14 – Elevação de temperatura do Protótipo 1	102
Figura 5.15 – Elevação de temperatura do Protótipo 2	102
Figura 5.16 – Elevação de temperatura do Protótipo 3	102
Figura 5.17 – Resistência CC após desligamento – Protótipo 1.....	105
Figura 5.18 – Resistência CC após desligamento – Protótipo 2.....	105
Figura 5.19 – Resistência CC após desligamento – Protótipo 3.....	106
Figura 6.1 – Imagens térmicas – Protótipo 1	108
Figura 6.2 – Imagens térmicas – Protótipo 2	109
Figura 6.3 – Imagens térmicas – Protótipo 3.....	110
Figura 6.4 – Análise das imagens térmicas através ThermaCAM.....	111
Figura 6.5 – Matriz de pixels do protótipo.....	112
Figura 6.6 – Temperatura na Linha Horizontal – 50mm	113
Figura 6.7 – Temperatura na Linha Horizontal – 125mm	114
Figura 6.8 – Temperatura na Linha Horizontal – 200mm	114
Figura 6.9 – Área de Medição	115
Figura 6.10 – Temperatura da linha vertical do reator.....	116
Figura 6.11 – Histograma das temperaturas médias do Protótipo 1.....	118

Figura 6.12 – Histograma das temperaturas médias do Protótipo 2.....	118
Figura 6.13 – Histograma das temperaturas médias do Protótipo 3.....	118
Figura 6.14 – Ilustração da área da superfície do reator	120
Figura 6.15 – Comparação das perdas estimadas	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores típicos de emissividade.....	68
Tabela 3.2 – Dados técnicos da câmera	75
Tabela 5.1 – Especificações iniciais	87
Tabela 5.2 – Componentes e materiais dos reatores protótipos	94
Tabela 5.3 – Fotos dos reatores protótipos	95
Tabela 5.4 – Medição de Rcc.....	96
Tabela 5.5 – Medição de Indutância, Rac e Perdas totais	96
Tabela 5.6 – Erros calculados vs medidos – Protótipo 1	96
Tabela 5.7 – Erros calculados vs medidos – Protótipo 2.....	97
Tabela 5.8 – Erros calculados vs medidos – Protótipo 3.....	97
Tabela 5.9 – Dados do circuito de elevação de temperatura	100
Tabela 5.10 – Dados dos gráficos do ensaio de elevação de temperatura	101
Tabela 5.11 – Perdas medidas na temperatura nominal	103
Tabela 5.12 – Medição de resistências após o desligamento	104
Tabela 5.13 – Temperatura média segundo norma.....	106
Tabela 6.1 – Temperatura média das imagens térmicas.....	117
Tabela 6.2 – Temperatura média dos protótipo.....	119
Tabela 6.3 – Área da superfície do reator	120
Tabela 6.4 – Cálculo do Coeficiente de transferência de calor	121
Tabela 6.5 – Perdas totais pelo método calorimétrico.....	122
Tabela 6.6 – Comparação entre as perdas calculadas, medidas e método calorimétrico	122

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

A	Área da superfície radiante
B	Magnitude do campo magnético
B	Densidade de fluxo magnético B na localização desejada
c_1 e c_2	Constantes de radiação
C	Corresponde ao calor específico do fluido
D_{cr}	Distância câmera e reator
D_{co}	Distância da câmera e o objeto
dl	Comprimento infinitesimal da espira
dB	Densidade do fluxo magnético de uma espira circular
d	Diâmetro do condutor
D	Diâmetro médio da camada de espiras
e	Espessura do perfil
E	Espessura do corpo
E_r	Energia radiante
E_λ	Irradiância espectral do corpo negro
E_o	Radiação real do objeto
E_{cn}	Radiação do corpo negro
$f(\theta)$	Função de diretividade
FOV_h	Ângulo FOV horizontal
FOV_v	Ângulo FOV vertical
f	Frequência
g	aceleração da gravidade
h'	Coeficiente de transferência de calor
H	Campo magnético incidente no condutor
h	Altura do perfil
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção
h'	Coeficiente de transferência de calor '
\dot{I}_T	Corrente total
I	Corrente nominal do reator
i	Corrente na espira

I_m	Corrente Medida
K	Condutância do material
k	Condutividade térmica do meio
$L_{i,i}$	Auto-indutância de cada camada de enrolamento
l_1 e l_2	Altura das bobinas
l	Comprimento do condutor
L	Altura do reator
m	Corresponde a vazão mássica do fluido
$M_{j,i}$	Indutância mútua entre as camadas
n_1 e n_2	Número de espiras por unida de comprimento
n_1 e n_2	Número de espiras por unida de comprimento
n	Número de voltas por unidade de comprimento
N	Número de espiras
P_{cc}	Perdas por Efeito Joule
P_p	Perdas por proximidade
P_f	Perdas Foulcault
P_s	Perdas por Efeito Pelicular
P_m	Potência ativa medida
P_h	Número de pixel horizontal
P_v	Número de pixel vertical
P_e	Perdas no equipamento
P	Perdas Totais por convecção e irradiação
q	Fluxo de calor
Q_c	Taxa de transferência de calor por convecção
R_r	Raio do reator
R_D	Resistência CC no instante do desligamento (extrapolada na curva)
R_0	Resistência CC na temperatura ambiente medida antes da energização
R_t	Resistência na temperatura de referência
R_a	Resistência na temperatura ambiente
R_i	Resistência CC mais a adição devido ao efeito Efeito Pelicular
R'_{cc}	Resistência elétrica na temperatura de referência
R_{cc}	Resistência CC na temperatura ambiente

R	Resistência elétrica
R_1 e R_2	Raios das bobinas
R_i	Resistência CC de cada camada
\hat{r}	Vetor unitário do vetor \hat{r}
$ r ^2$	Distância entre a espira e o ponto do campo
r, θ	Coordenadas
S	Área da seção transversal do condutor
T_a	Temperatura ambiente
T_r	Temperatura de referência
T_1	Temperatura do corpo na face 1
T_2	Temperatura do corpo na face 2
T_s	Temperatura da superfície
T_s	Temperatura da superfície
T	Temperatura absoluta
T_k	Constante de temperatura para a liga de alumínio (225)
\dot{U}	Tensão sobre o reator
ν	Viscosidade cinemática do ar
V_m	Tensão Medida
x	Altura do enrolamento
Y	225 para alumínio ou 235 para cobre
Z_i	Separação das 2 bobinas
α	Coeficiente de temperatura do material
β	Coeficiente de dilatação volumétrica do ar
δ	Profundidade de penetração
ε	Emissividade
θ	Ângulo horizontal
θ_s	Temperatura de saída do fluido
θ_e	Temperatura de entrada do fluido
θ	Temperatura média do enrolamento no instante do desligamento
θ_0	Temperatura correspondente a resistência medida a frio
λ	Comprimento de onda
λ_{\max}	Comprimento de onda na intensidade máxima de radiação (m);
μ	Permeabilidade magnética do ar

μ_0 Permeabilidade magnética do vácuo

ρ Resistividade elétrica do material

σ Condutividade do material

ζ Constante de Stefan-Boltzmann

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

O novo cenário do mercado energético e a frequente preocupação na redução de custos operativos do setor de energia obrigam as empresas produtoras e transmissoras de energia a se tornarem cada vez mais competitivas, buscando maneiras para redução de custos associada ao ganho de confiabilidade e disponibilidade do setor elétrico.

Neste contexto, a constante busca do aumento da eficiência energética demanda uma identificação cada vez mais precisa das perdas inerentes ao sistema e a análise do rendimento dos equipamentos instalados na rede, tornando-se metas inquestionáveis no campo atual.

Em se tratando de reatores com núcleo de ar tipo seco, a análise das perdas e a obtenção da sua grandeza estão previstas em normas que utilizam metodologias já conhecidas e sedimentadas. No entanto, estes métodos exigem o desligamento da máquina quando em campo e, na maioria das vezes, só é possível realizar estas medições em ambiente externo preparado ou em laboratórios específicos. Esta dificuldade é justificável devido a necessidade de instalação de instrumentação dedicada e a montagem de circuitos complexos para aquisição destes dados.

1.1 – Motivação

O desenvolvimento de um sistema prático e conciso para realizar as medições de perdas em reatores com núcleo de ar tipo seco utilizando-se de termografia infravermelha torna-se um importante recurso para as empresas fabricantes deste tipo de equipamento e para as controladoras de subestações. Uma verificação prática do comportamento das perdas elétricas pode fornecer uma série de benefícios e indicadores do comportamento do equipamento em operação. Com dificuldades crescentes em realizar desligamentos na rede elétrica de potência, que opera no limite, as solicitações de intervenções no sistema para as manutenções preventivas e corretivas vem sendo atendidas após exaustivas negociações. Logo, as solicitações de desligamento de máquinas, para ensaios de perdas, junto ao Operador Nacional

do Sistema - ONS, tornam-se praticamente inviáveis.

Um ponto de desperdício que pode ser observado é que os reatores se deterioram ao longo do tempo de operação, sinalizando o aumento das perdas elétricas em função do tempo de funcionamento. Assim, uma troca de equipamento de tempo em tempos é necessária para mitigar os prejuízos. Para concluir se a troca é realmente viável é preciso determinar as perdas elétricas do reator. Essa tarefa não é simples visto que na maioria dos casos essa avaliação só é possível com a parada da subestação, que devido as restrições políticas, nem sempre pode ser realizada.

Neste contexto, a evolução das câmeras termográficas surge como uma alternativa relevante de equipamento na avaliação das perdas envolvidas nos reatores com núcleo de ar tipo seco. Isto porque, a termografia infravermelha permite a leitura das temperaturas sem a necessidade de contato com as partes energizadas ou componentes móveis, garantindo a segurança do pessoal envolvido com as medições. Outra vantagem está na possibilidade de realizar as medições com o reator ligado à rede de energia elétrica.

Além da possibilidade de analisar o equipamento através da termografia infravermelha, outro fator importante é a verificação dos pontos quentes do reator, permitindo analisar as condições térmicas do mesmo. Logo, uma simples inspeção de forma rotineira pode contribuir para a definição do momento mais adequado da troca da unidade, evitando desperdícios e riscos de paradas não programadas.

Outra vantagem passível de exploração é realizar e desenvolver metodologias para o acompanhamento do envelhecimento da bobina que pode ser acompanhada do aumento das perdas elétricas. Portanto, um método pertinente para acompanhamento da evolução das perdas dos reatores certamente contribuirá na definição do momento de manutenções preventivas e para realizar o suporte para o planejamento da troca do equipamento em casos de necessidade.

1.2 – Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método para estimar as perdas de reatores com núcleo de ar tipo seco composto de um cilindro, tendo como base princípios da calorimetria e a utilização das técnicas de termografia infravermelha. Ao

invés da instalação de medidores de temperatura por contato nas faces internas e externas da superfície dos reatores, foram realizadas medidas de temperatura à distância. Sendo assim, este trabalho estima as perdas pelo método calorimétrico e compara com as perdas medidas por métodos tradicionais, bem como com as calculadas pelo meio de programa de cálculo.

1.3 – Organização do trabalho

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os reatores com núcleo de ar abordando a aplicabilidade dos reatores no sistema elétrico de potência assim como os conceitos para o desenvolvimento e cálculo do mesmo. Também foi tratado os tipos de perdas e os principais conceitos utilizados na sua determinação assim como o cálculo térmico de reatores de um cilindro. Uma abordagem igualmente foi descrita em relação as metodologias utilizadas nas obtenção das perdas de reatores consoante com as normas vigentes.

Em seguida, o Capítulo 3 aborda os princípios da termografia infravermelha e características de medição e detecção de radiação. Ainda dentro do referencial teórico, o Capítulo 4 traz uma abordagem sobre o método calorimétrico em reatores com núcleo de ar, onde é apresentada o principal conceito da metodologia de medição. O capítulo 5 traz um descritivo da construção dos protótipos empregados na dissertação assim como as medições base de referência.

No Capítulo 6 é apresentado a aplicação da técnica de medição de temperatura e perdas utilizando a termografia infravermelha direcionada para reatores com núcleo de ar tipo seco. Também apresenta o modo como foi o processamento das imagens termográficas para comparação dos resultados mediante os métodos tradicionais. E por último, o Capítulo 7 mostra a bancada os resultados e expõe as conclusões, considerações e recomendações da pesquisa.

Capítulo 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os reatores podem ser de tipo seco ou imerso em óleo. Os reatores de tipo seco podem ser de construção de núcleo de ar ou de núcleo de ferro. No passado, os reatores com núcleo de ar tipo seco só estavam disponíveis em construção no estilo aberto (Figura 2.1). Seus enrolamentos eram mantidos no lugar por um sistema de aperto mecânico, e o isolamento básico fornecido pelo espaço de ar entre as voltas.

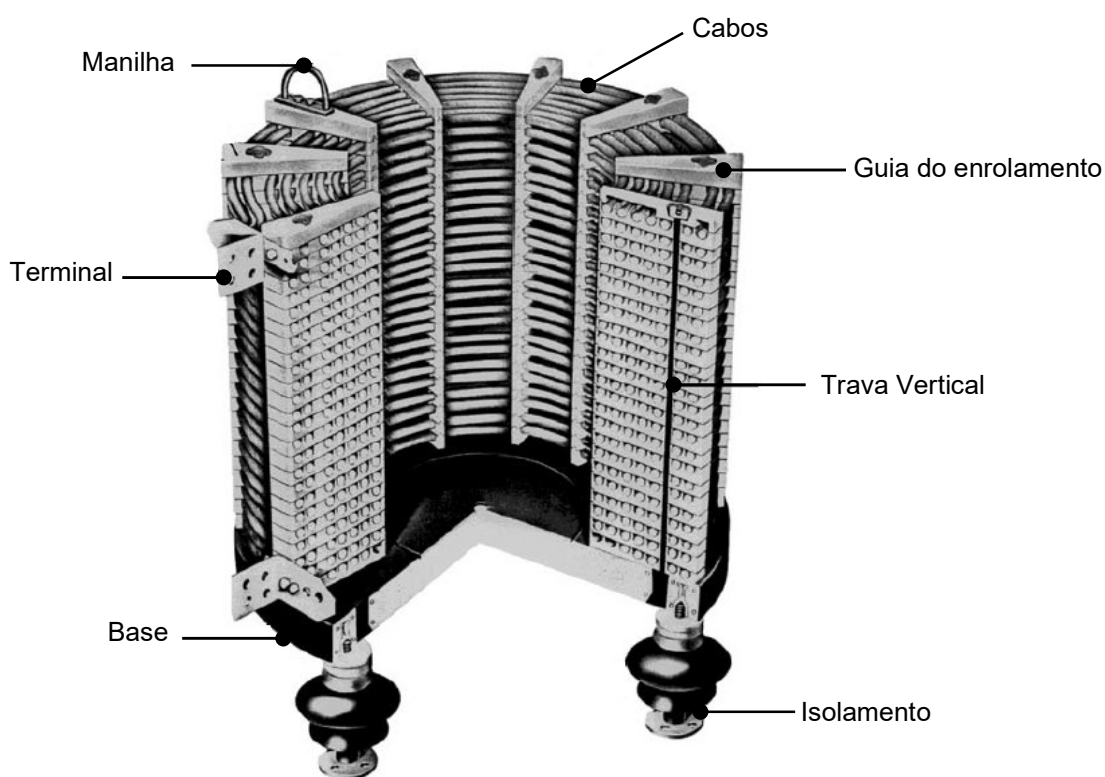


Figura 2.1 – Reator de núcleo de Ar – aberto

Fonte: (HARLOW, 2004)

A faixa de aplicação para as diferentes tecnologias de reator sofreu um grande realinhamento com o uso histórico. No passado, os reatores com núcleo de ar (tecnologia de enrolamento de estilo aberto) estavam limitados a aplicações na classe de distribuição de tensão. Os reatores modernos de núcleo de ar tipo seco (totalmente em, capsulados com enrolamentos de dielétrico sólido) são empregados em toda a

gama de tensões de distribuição e transmissão, incluindo classes de tensão de transmissão de alta tensão e extra alta tensão. Os reatores com núcleo de ar modernos (Figura 2.2) apresentam enrolamentos totalmente encapsulados com isolamentos que hoje podem ser realizados via filmes laminados, papel Kraft, fibra de vidro, dielétricos de esmalte dentre outros.

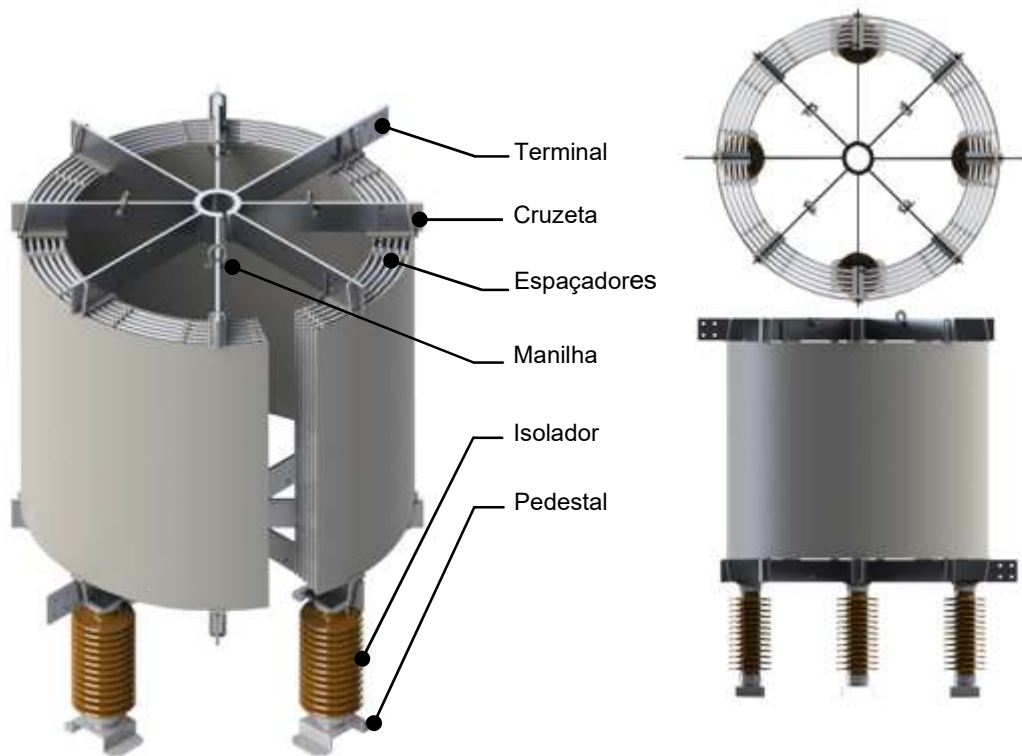


Figura 2.2 – Reator de núcleo de ar – encapsulado

Fonte: <https://www.hilkar.com>

As normas aplicáveis, como IEEE C57.21, IEEE C57.16, IEC 60076-6 e IEC 60076-11 refletem essas práticas. Essas normas fornecem informações importantes, não só referentes a classificações críticas do reator, características operacionais, tolerâncias e testes, mas também orientações para instalação e considerações importantes para a aplicação específica.

De uma forma geral, um reator de núcleo de ar tipo seco, foco desta dissertação, apresenta as seguintes características principais:

- Ocupa aproximadamente 45% da área de um reator isolado com óleo isolante;

- Projetos com reatores com núcleo de ar tipo seco, além de ocuparem menor espaço, simplificam as obras civis que são necessárias com os transformadores em líquido isolante (dispensam a execução de poços de recolhimento de líquido, sistemas de combate a incêndio, paredes corta-fogo);
- Apresentam baixo custo operacional, pois não requerem manutenção nem apresentam os instrumentos de proteção e controle, típicos de transformadores com líquido isolante;
- Devido à inexistência de fluido isolante, não há risco de explosão;
- São insensíveis à umidade, permitindo a energização a qualquer momento, mesmo estando desligados por longos períodos;
- Suportam fortes sobrecargas e apresentam excelente resistência a curto-circuito devido à configuração e construção das bobinas;
- Admitem uma elevação de temperatura superior aos transformadores isolados a óleo.

Como todo equipamento do sistema elétrico, os reatores com núcleo de ar tipo seco também apresentam perdas elétricas quando energizados. Devido ao baixo custo operacional relacionado a manutenção, as perdas elétricas surgem como a principal despesa na operação dos reatores. Fundamentado nesta característica, compreender os principais fenômenos causadores destes desperdícios se torna relevante. Devido as características estruturais e do campo magnético deste equipamento, podemos dividir as perdas elétricas no reator em quatro tipos: perdas joules, perdas por efeito pelicular, perdas por efeito de proximidade e perdas Foucault. No decorrer deste capítulo, estes fenômenos serão abordados individualmente.

2.1 – Aplicação dos reatores com núcleo de ar tipo seco

Os reatores sempre fizeram parte integrante dos sistemas de energia. O tipo de tecnologia empregada para as várias aplicações mudou ao longo dos anos com base na evolução do projeto e avanços na construção e emprego de novos materiais. Os reatores com núcleo de ar tipo seco tradicionalmente foram usados para aplicações limitadoras de corrente devido à sua linearidade inerente de indutância versus

corrente. Para esta aplicação, o modelo totalmente encapsulado tornou-se mais utilizado porque suas características mecânicas melhoradas permitiram que os reatores suportassem correntes de falhas mais altas.

Uma revisão das aplicações modernas do reator é apresentada segundo a referência (HARLOW, 2004):

Limitadores de Corrente: Os reatores de limitação de corrente são instalados principalmente para reduzir a corrente de curto-circuito em níveis consistentes com o nível de resistência eletromecânica dos componentes do circuito (especialmente os transformadores e disjuntores) e reduzir a queda de tensão do curto-circuito nos barramentos para níveis que são consistentes com a prática de coordenação de isolamento. As altas correntes de falhas em sistemas de distribuição ou transmissão, caso não limitadas dentro de valores aceitáveis, podem causar falhas catastróficas nos equipamentos e podem representar uma séria ameaça para a segurança operacional do sistema. Em resumo, os reatores limitadores de corrente são instalados para reduzir a magnitude das correntes de curto-circuito.

Aterramento de neutro: Os reatores de aterramento de neutro são usados para controlar falhas de fase e terra. Eles não limitam os níveis de corrente de falha de fase e fase. São particularmente úteis nos níveis de transmissão, quando são utilizados autotransformadores com um secundário em estrela. Também aumentam a sensibilidade de relés de proteção pela medição da tensão nos reatores. A Figura 2.3 mostra um reator típico de aterramento neutro.

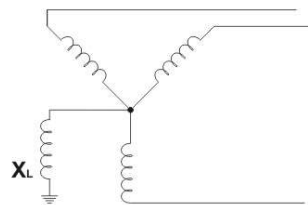


Figura 2.3 – Reator de aterramento de neutro

Esses transformadores de subestações podem ser uma fonte de correntes de sequência-zero e, como resultado, a corrente de falta fase-terra pode exceder substancialmente a corrente de falha trifásica. Esses dispositivos, normalmente

instalados entre o transformador ou o neutro e o solo do gerador, são efetivos no controle de falhas de linha a terra, uma vez que a impedância do curto-circuito do sistema geralmente é amplamente reativa. Os reatores de neutro reduzem os estresses de curto-circuito nos transformadores da subestação para o tipo de falha mais prevalente em um sistema elétrico.

Limitador de inrush para bancos de capacitores: O chaveamento de bancos de capacitores pode causar transientes significativos no capacitor comutado. Os transientes mais comuns são:

- Sobretensão no banco de capacitores comutado durante o chaveamento;
- Elevação de tensão em capacitores de baixa tensão;
- Sobretensões de fase-fase no transformador de final de linha;
- Corrente de outro capacitor durante a troca de back-to-back;
- Sobretensão dinâmica ao trocar um capacitor e um transformador simultaneamente.

Os reatores de inrush são usados para reduzir a severidade de alguns dos transientes listados acima, a fim de minimizar os esforços dielétricos em disjuntores, capacitores, transformadores, pára-raios e equipamentos elétricos de subestação associados. A interferência transitória de alta frequência nos equipamentos de controle e comunicação nas proximidades também é reduzida.

Reatores limitadores de corrente de descarga: Os bancos de capacitores em série de alta tensão são utilizados em sistemas de transmissão para melhorar os limites de operação de estabilidade. Os bancos de capacitores série podem ser fornecidos com uma série de etapas de inserção e retiradas utilizando dispositivos de comutação. Em ambos os casos, ocorre uma descarga do capacitor e a energia associada à descarga deve ser limitada por um circuito de amortecimento. Um reator de limitação de corrente de descarga é parte integrante deste circuito para o amortecimento. Portanto, o reator de limitação de corrente de descarga deve ser projetado para suportar a corrente em alta frequência sobreposta à corrente de potência do sistema.

Reatores de controle de fluxo de potência: Uma aplicação mais recente dos reatores em série em sistemas de transmissão é a do controle de fluxo de potência ou

sua variante, mitigação de sobrecarga. O fluxo de energia através de um sistema de transmissão é uma função da impedância do circuito e da tensão complexa (módulo e fase) nas extremidades da linha. Nos sistemas interligados, o controle do fluxo de potência é uma preocupação importante porque um movimento não programado pode dar origem a uma série de problemas, tais como:

- Sobrecarga de linhas;
- Aumento das perdas do sistema;
- Redução nas margens de segurança;
- Violações contratuais relativas à importação / exportação de energia;
- Aumento nos níveis de falhas além da classificação do equipamento.

Os reatores de controle de fluxo de potência são usados para otimizar a transferência de potência nas linhas de transmissão através de uma modificação da impedância de transferência. A inserção estratégica de reatores de fluxo de potência pode servir para aumentar a transferência de potência de pico, reduzir as perdas na transferência e melhorar a confiabilidade do sistema de potência.

Reatores Shunt: As linhas de transmissão de alta tensão, particularmente as linhas longas, geram uma quantidade substancial de potência reativa. Como consequência, a menos que a linha de transmissão esteja operando sob o balanço de potência reativa, a tensão no sistema não pode ser mantida dentro dos valores nominais. Para obter um equilíbrio de potência reativa aceitável, a linha deve ser compensada por uma determinada condição operacional. Sob carga pesada, o balanço de potência é negativo e é necessária uma compensação capacitiva. Isso geralmente é fornecido pelo uso de capacitores de derivação. Por outro lado, sob carga leve, o balanço de potência é positivo e é necessária uma compensação indutiva. Isso geralmente é fornecido pelo uso de reatores shunt. Os reatores shunt podem ser conectados diretamente à linha de transmissão e a conexão pode estar no final de uma linha de transmissão, em uma subestação, ou em um ponto intermediário, dependendo das considerações de perfil de tensão.

Reatores controlados por tiristores (Compensação reativa dinâmica): À medida que as características de operação da rede abordam os limites do sistema, como a

estabilidade dinâmica ou de tensão, ou no caso de grandes cargas industriais dinâmicas, como os fornos de arco, surge a necessidade de compensação dinâmica. Normalmente, os compensadores estáticos (SVC - Static Var Compensator) são usados para fornecer uma compensação dinâmica em um barramento final, através do controle do microprocessador, para manter uma reserva dinâmica capacitiva quando há uma necessidade súbita. Ao variar o ângulo de disparo, do reator controlado por tiristor (TCR - Thyristor Controlled Reactor), a quantidade de corrente absorvida pelo reator pode variar continuamente. O reator então se comporta como uma indutância variável. Conseqüentemente, o suporte capacitivo fornecido pelo condensador fixo e/ou pelo condensador com comutador de tiristor (TSC - Thyristor Switched Capacitor) pode ser ajustado para a necessidade específica do sistema.

Reatores de filtro de harmônicas: A crescente presença de cargas não-lineares e o uso generalizado de dispositivos eletrônicos de comutação estão causando um aumento de harmônicas nos sistemas de alimentação. As harmônicas podem ter efeitos prejudiciais em equipamentos como transformadores, motores, bancos de capacitores, fusíveis e relés de proteção. Transformadores, motores e outros equipamentos podem sofrer aumento de perdas e aquecimento excessivo. Para minimizar a propagação de harmônicas na distribuição e no sistema de transmissão, os filtros são frequentemente aplicados perto da origem das harmônicas. Tais filtros de derivação, em sua forma de realização mais simples, consistem em uma indutância em série (reator de filtro) e um capacitor (capacitor de filtro). Se mais de um harmônico for filtrado, vários conjuntos de filtros diferentes são aplicados no mesmo barramento.

Reatores para aplicação HVDC: Em um sistema HVDC - High Voltage Direct Current, os reatores são usados para várias funções. Os reatores de alisamento HVDC são conectados em série com uma linha de transmissão ou inseridos no circuito intermediário DC de um link back-to-back para reduzir os harmônicos no lado DC, para reduzir o aumento atual causado por falhas no sistema DC e para melhorar a estabilidade dinâmica do sistema de transmissão HVDC.

Reatores série para aplicação de forno a arco: Os reatores podem ser instalados no alimentador de média tensão de um forno a arco elétrico de corrente alternada para

melhorar a eficiência e para reduzir o consumo do eletrodo do forno. Tais reatores são conectados ao transformador do forno ou podem ser unidades separadas e autônomas. Normalmente, os reatores são equipados com Tap's para facilitar a otimização do desempenho do forno.

2.2 – Projeto de reatores

Os reatores com núcleo de ar podem assumir configurações distintas quanto ao formato. Porém, a configuração mais comum é o formato cilíndrico e o mais apropriado em se tratando de métodos fabris. O enrolamento do reator é basicamente composto de um número de enrolamentos encapsulados e bobinados de forma coaxial estando os enrolamentos em paralelismo elétrico. É constituído de um ou mais cilindros que por sua vez é formado de camadas de enrolamentos de cobre ou alumínio, bobinadas uma sobre as outras. O acoplamento eletromagnético entre as espiras resulta nas indutâncias próprias e mútuas com efeito direto na indutância global do equipamento. Entre os cilindros há vias de resfriamento suportadas por vários espaçadores cuja composição é de material isolante. As cruzetas, que são braços de alumínio na parte superior e inferior dos enrolamentos, desempenham um papel determinante para os enrolamentos pois serve de ponte de conexão para os terminais do sistema. Também funciona como distribuidor de corrente entre as camadas de fio e como estrutura suporte para fixação ao solo. A estrutura do modelo é mostrada na Figura 2.4 onde o enrolamento consiste de dois cilindros paralelos. Existem duas camadas paralelas no primeiro encapsulamento (cilindro interno), enquanto o cilindro externo é composto de três bobinas ou camadas.

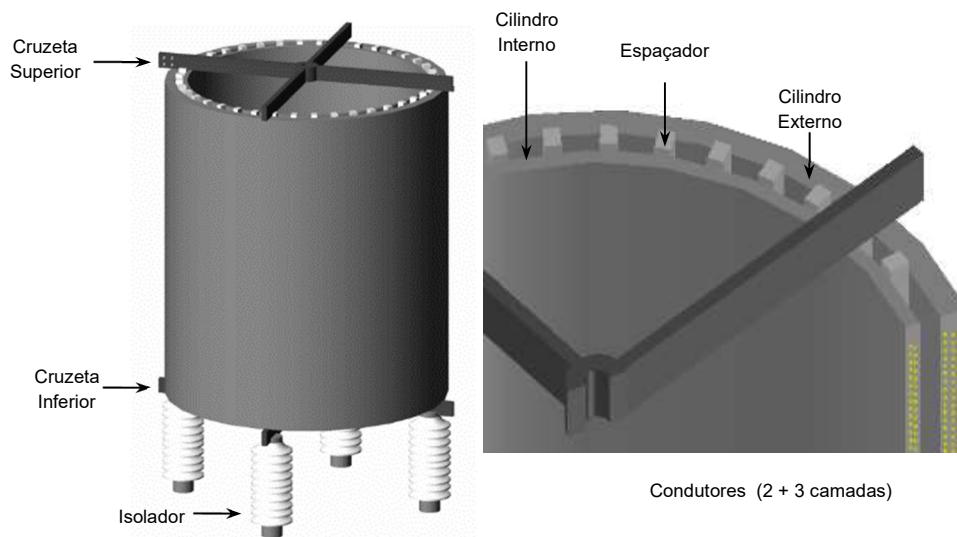


Figura 2.4 – Figura ilustrativa do reator de ar tipo seco

As equações equivalentes de tensão do reator de núcleo de ar são as seguintes:

$$\begin{bmatrix} R_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R_i \end{bmatrix} + 2\pi f j \begin{bmatrix} L_{1,1} & M_{1,2} & \dots & M_{1,i} \\ M_{2,1} & L_{2,2} & \dots & M_{2,i} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ M_{i,1} & M_{i,2} & \dots & L_{i,i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \vdots \\ \dot{U} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

As variáveis são:

R_i – Resistência em corrente contínua R_{cc} de cada camada (Ω);

$L_{i,i}$ – Auto-indutância de cada camada de enrolamento (H);

$M_{j,i}$ – Indutância mútua entre as camadas (H);

\dot{I}_i – Corrente em cada camada do enrolamento (A);

f – Frequência (Hz);

\dot{U} – Tensão sobre o reator (V).

Na equação (2.1) a tensão \dot{U} sobre o reator é conhecida e as variáveis \dot{I}_i devem ser calculadas. Com os dados elétricos determinados, é possível seguir no levantamento das demais informações relevantes como o campo magnético no reator, perdas envolvidas e temperatura final do equipamento. Baseado nestas informações, o projeto de reatores com núcleo de ar pode ser dividido em oito etapas distintas descritas a seguir e resumidas na Figura 2.5:

1. Do ponto de vista de projeto, a maior parte dos reatores com núcleo de ar 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;
2. Para satisfazer a indutância especificada, neste ponto é definido o número de espiras de cada camada, a auto-indutância de cada enrolamento, as indutâncias mútuas entre as camadas paralelas e finalmente a indutância global do reator;
3. Neste estágio é obtido a resistência em corrente contínua R_{cc} de cada camada, cuja definição se encontra no item 2.5. Baseado nas espiras já calculadas, é possível calcular a distribuição de corrente em qualquer camada do reator. Trabalhando com o modelo matemático matricial apresentado na equação (2.1), tem-se a exata identificação do fluxo das correntes no reator;
4. Aqui é calculado a densidade do fluxo magnético axial B_z e a densidade de fluxo magnético radial B_r de cada camada na região do enrolamento. A densidade do fluxo magnético referente a cada camada é proporcional a distribuição de corrente calculada;
5. Nesta etapa, são calculadas as perdas induzidas no condutor pelo fluxo transversal gerado pelos demais condutores do enrolamento em cada camada – perdas por proximidade. Finalmente, soma-se as perdas induzidas nos enrolamentos, as perdas joules de cada camada e por último as perdas de Foucault induzidas nas partes adjacentes do reator como cruzeta e pedestais. Desta forma, para o reator em projeto, é possível obter a resistência em corrente alternada R_{ca} (ver conceito no item 2.7.5);
6. Com as perdas totais já calculadas, determina-se a temperatura do reator utilizando as teorias de transferência de calor. Devido à sua importância, pode-se considerar que a temperatura do equipamento é um dos pontos mais importantes a se verificar, pois indica substancialmente a vida útil do equipamento frente a classe de isolamento escolhido;
7. Neste estágio avaliam-se as especificações mecânicas (dimensional, esforços mecânicos e etc...) e elétricas (indutância, exigências dielétricas, temperatura,

etc.). Mudanças devem ser realizadas na concepção inicial a fim de atender os requisitos dezoantes;

8. Por fim, o reator projetado é conduzido aos testes elétricos divididos em 2 segmentos: ensaios de rotina e tipo. Estes são regulamentados em normas específicas a fim de certificar o equipamento para a operação no ambiente do sistema elétrico referido.

A seguir serão detalhados os cálculos inerentes aos reatores com núcleo de ar tipo seco que alicerçam o desenvolvimento de softwares de cálculos.

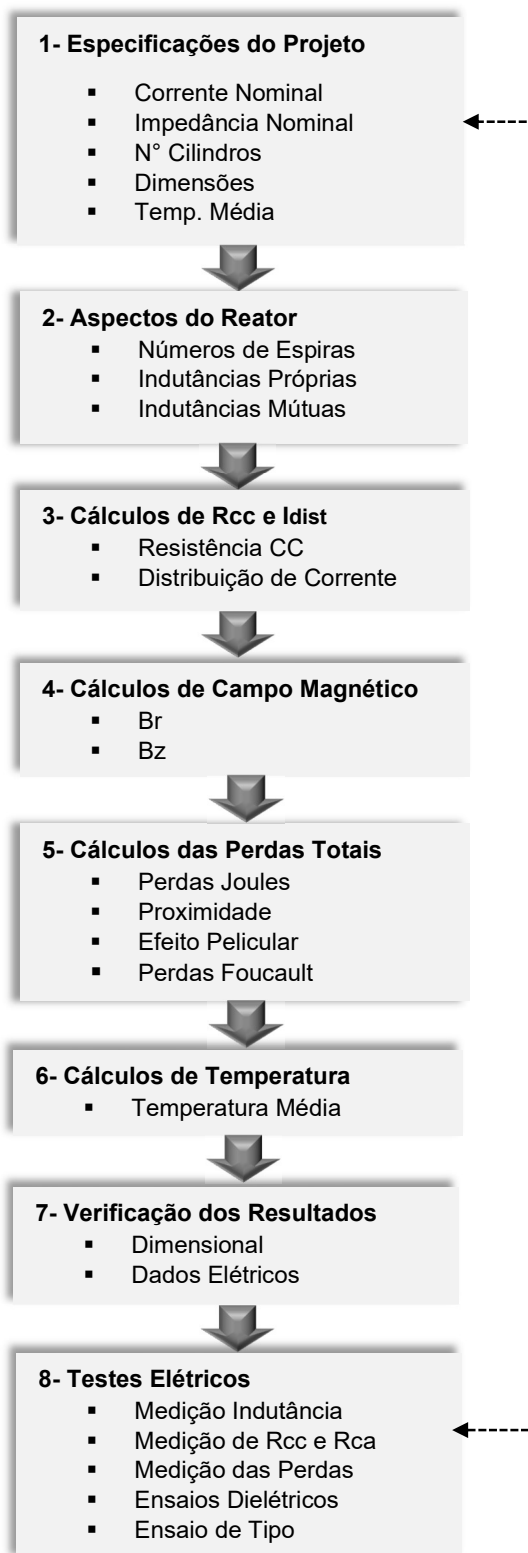


Figura 2.5 – Etapas do projeto dos reatores

2.3 – Cálculo das indutâncias dos reatores

A indutância do reator é o parâmetro mais importante no reator de núcleo de ar do tipo seco e a precisão no cálculo afeta diretamente os outros parâmetros do reator assim como o desempenho do equipamento.

Neste trabalho enfatiza-se o caso específico de bobinas circulares de camada singular sem núcleo magnético. Para a solução de geometrias e problemas específicos foram desenvolvidos dezenas de outros métodos em função da sua aplicabilidade e da adequação ao problema em análise. Entre outros métodos, alguns dos mais utilizados são apresentados, como exemplo (GROVER, 1946) :

- 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.

2.3.1 – Indutância mútua e própria de bobinas circulares

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. 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.

O método de cálculo começa com a expressão de Neumann que é baseada na aplicação direta da Lei de Biot-Savart (YOUNG e FREEDMAN, 2009). O método fornece a fórmula mais geral para o cálculo de indutância em bobinas concêntricas e não concêntricas. Utilizando-se da transformada de Bartky (BARTKY, 1938), para reduzir o integrando, é possível calcular a integral elíptica que resulta na obtenção da indutância mútua e a indutância própria das bobinas circulares. A aplicação da transformada para resolver as integrais elípticas foi desenvolvida em 1978 por T.H. Fawzi e P.E. Burke (FAWZI e BURKE, 1978). O método possibilita o cálculo exato das indutâncias, independentemente das dimensões das bobinas, tornando-se o cálculo de referência para comparação dos demais métodos existentes. 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.

De acordo com a fórmula de Neumann no eletromagnetismo, a indutância mútua entre duas bobinas concêntricas ou não concêntricas coaxiais pode ser demonstrada pela seguinte integral:

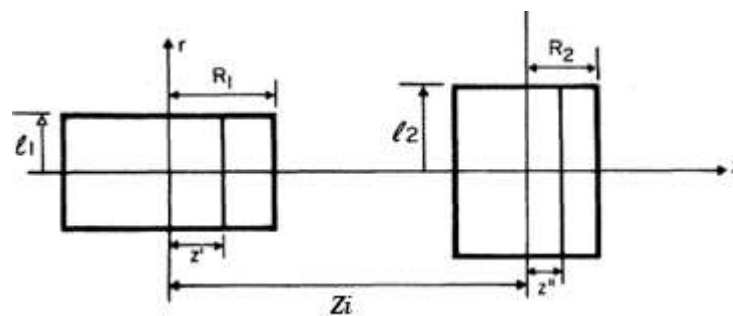


Figura 2.6 – Bobinas dos reatores

$$M = \mu n_1 n_2 \int_{-l_2}^{l_2} \int_{-l_1}^{l_1} \int_0^\pi \frac{R_1 R_2 \cos \theta}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 + (z' - z'') - 2R_1 R_2 \cos \theta}} d\theta dz' dz'' \quad (2.2)$$

Integrando em relação a θ , z' e z'' :

$$M = 2\pi \mu_0 (R_1 R_2)^{\frac{3}{2}} n_1 n_2 [C_i (R_1, R_2, Z_1) - C_i (R_1, R_2, Z_2) + C_i (R_1, R_2, Z_3) - C_i (R_1, R_2, Z_4)] \quad (2.3)$$

$$C_i(R_1, R_2, Z) = \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{2\pi} \int_0^\pi \frac{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 + z^2 - 2 R_1 R_2 \cos \theta \sin^2 \theta}}{R_1^2 + R_2^2 - 2 R_1 R_2 \cos \theta} d\theta \quad (2.4)$$

Com Z dado por:

$$Z_1 = Z_i + \frac{H_1}{2} + \frac{H_2}{2} \quad (2.5)$$

$$Z_2 = Z_i + \frac{H_1}{2} - \frac{H_2}{2} \quad (2.6)$$

$$Z_3 = Z_i - \frac{H_1}{2} - \frac{H_2}{2} \quad (2.7)$$

$$Z_4 = Z_i - \frac{H_1}{2} + \frac{H_2}{2} \quad (2.8)$$

Onde:

n_1 e n_2 – Número de espiras por unida de comprimento;

R_1 e R_2 – Raios das bobinas (m);

Z_i – Separação das 2 bobinas (m);

l_1 e l_2 – Altura das bobinas (m);

θ – Ângulo horizontal (°)

A equação (2.4) está relacionado apenas com o raio, a altura e a posição relativa de dois enrolamentos, mas independentemente do número de voltas dos enrolamentos. Após a análise, sabe-se que a equação (2.3) é uma integral elíptica e que o cálculo direto das integrais é complexo e não é fácil de ser alcançado. Porém a equação pode ser simplificada e então resolvida com a solução numérica aplicada de

acordo com o método de transformação de Bartky (BARTKY, 1938). Depois de usar a simplificação e a transformação Bartky, a expressão fica:

$$C_i(R_1, R_2, Z) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} [A \sin^2 \varphi + B \cos^2 \varphi + C \frac{\sin^2 \varphi}{q^2 \cos^2 + \sin^2 \varphi}] \frac{1}{\sqrt{k^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}} d\varphi \quad (2.9)$$

onde:

$$\varphi = \frac{\theta}{2} \quad (2.10)$$

$$q = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.11)$$

$$k^2 = \frac{(R_1 - R_2)^2 + Z^2}{((R_1 + R_2)^2 + Z^2)} \quad (2.12)$$

$$\gamma = \frac{Z^2}{(4 R_1 R_2)} \quad (2.13)$$

$$A = \sqrt{1 - k^2} \left[-\gamma + \frac{1}{3(1 - k^2)} \right] \quad (2.14)$$

$$B = -\frac{k^2}{3\sqrt{1 - k^2}} \quad (2.15)$$

$$C = \gamma \sqrt{1 - k^2} \quad (2.16)$$

Pelo método de transformação de Bartky, a integral elíptica complicada pode ser simplificada para ser facilmente resolvida com um cálculo mais preciso.

O cálculo da indutância própria se torna um caso especial da equação (2.9) considerando: $R_1=R_2=R$, $2l_1=2l_2=h$:

$$L = 4 \pi \mu_0 (R^2)^{\frac{3}{2}} [C_i (R_1, R_2, h) - C_i (R_1, R_2, 0)] \quad (2.17)$$

Utilizando as equações (2.17) e (2.3) as indutâncias próprias e mútuas do enrolamento do reator são calculadas e já podem ser inseridas na matriz de indutância.

2.4 – Cálculo das resistências cc do reator

A resistência elétrica de um condutor é diretamente proporcional ao comprimento e à resistividade e inversamente proporcional à área da seção transversal (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2012). Portanto:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.18)$$

Tendo em mãos o diâmetro médio de cada camada do enrolamento, é possível realizar o cálculo das resistências CC de cada camada em uma determinada temperatura de referência. Uma boa precisão no cálculo das resistências, neste ponto do projeto, é de primordial importância pois a distribuição de corrente nas camadas do reator será em função das resistências aqui calculadas. Manipulando a equação (2.18) para adequar aos enrolamentos cilíndricos, a equação é descrita da seguinte forma:

$$R_{cc} = \rho \frac{4 D N}{d^2} \quad (2.19)$$

D – Diâmetro médio da camada de espiras (m);

N – Número de espiras;

d – Diâmetro do condutor (m);

ρ – Resistividade elétrica do material ($\Omega \cdot m$);

Então as resistências de corrente contínua de cada camada do enrolamento são determinadas e estão em paralelismo elétrico. A resistência CC global do reator nada mais é do que a inversa da soma das inversas destas resistências.

2.5 – Cálculo das correntes de distribuição

Com as resistências CC, as indutâncias próprias e mútuas de cada camada já calculadas é possível calcular a distribuição de corrente no reator. Este processo envolve o cálculo da equação matricial (2.1) sendo que neste momento a única incógnita é a matriz de corrente.

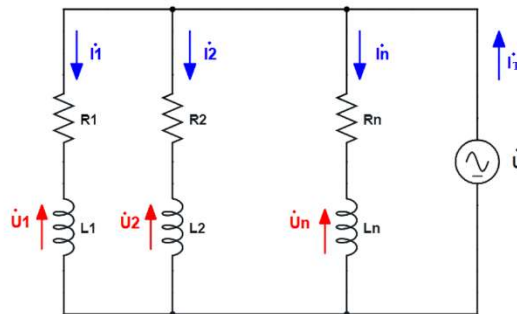


Figura 2.7 – Circuito de corrente de distribuição

Além da equação (2.1) é necessário adicionar uma restrição a equação, isto é:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dots \dot{I}_i = \dot{I}_T \quad (2.20)$$

Como o modelo consiste em materiais não magnéticos, atribui-se que a parte real de \dot{U} é 1 e a parte imaginária é 0. A corrente \dot{I}_i é obtida pela equação (2.1), e a corrente total \dot{I}_T pela equação (2.20). O real valor de cada camada é calculado pelo método:

$$\dot{I}_i = \dot{I}'_i \cdot \left(\frac{\dot{I}_T}{\dot{I}'_T} \right) \quad (2.21)$$

$$\dot{U} = \frac{\dot{I}_T}{\dot{I}'_T} \quad (2.22)$$

Vale lembrar que dificilmente utiliza-se bitolas diferentes nas camadas de um mesmo cilindro do reator. Desta forma, uma boa distribuição de corrente tem como meta fazer com que as correntes nas camadas sejam praticamente iguais, minimizando a possibilidade de temperaturas diferentes entre camadas em um mesmo cilindro.

2.6 – Determinação da temperatura média do reator

Para a determinação da temperatura média em um reator de núcleo de ar, nas condições nominais de tensão e corrente, primeiramente é necessário calcular as perdas elétricas do equipamento. As perdas em um reator são incorridas no próprio enrolamento e perdas induzidas em outros componentes estruturais metálicos adjacentes ao reator. Devido a importância das perdas no processo de cálculo da temperatura média, vale discutir em um nível mais detalhado cada tipo de perda elétrica inerente a este tipo de equipamento. São divididas em 4 principais grupos:

- Perdas Joules nas resistências CC do enrolamento;
- Perdas por Efeito Pelicular;
- Perdas por Efeito de Proximidade;
- Perdas por corrente Foucault nas partes adjacentes;

2.6.1 – Perdas joules nas resistências cc no enrolamento

A passagem da corrente elétrica num condutor provoca o aumento de temperatura liberando calor. A energia elétrica, que se transforma em energia calorífica num condutor, é diretamente proporcional à resistência CC multiplicada ao quadrado da intensidade da corrente que o percorre. As perdas por Efeito Joule podem ser consideradas de fácil obtenção e cálculo pois tanto os parâmetros dos fios quanto as técnicas de medição da resistência R_{cc} são bem difundidas. Abaixo segue a equação para determinar as perdas por Efeito Joule:

$$P_{cc} = R'_{cc} I^2 \quad (2.23)$$

R'_{cc} – Resistência elétrica na temperatura de referência (Ω);

I – Corrente nominal do reator (A).

Além do tipo de material e de suas dimensões, a resistência elétrica também depende da temperatura, ou seja, da mobilidade das partículas no interior do condutor. Para a maioria das substâncias, a elevação da temperatura resulta em maior resistência elétrica, pois amplia a mobilidade (agitação térmica) das partículas, gerando colisões entre estas e os elétrons livres em movimento no interior do condutor. Isso ocorre principalmente nos metais.

Para condutores metálicos sólidos, o comportamento da resistência com a temperatura é ditado pela equação.

$$R'_{cc} = R_{cc} [1 + \alpha (T_r + T_a)] \quad (2.24)$$

Na qual:

T_a – Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

T_r – Temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$);

R_{cc} – Resistência elétrica na temperatura ambiente - (Ω);

α – Coeficiente de temperatura do material.

2.6.2 – Perdas por efeito pelicular

O efeito pelicular é o fenômeno responsável pelo aumento da resistência aparente de um condutor elétrico em função do aumento da frequência da corrente elétrica que o percorre. Consequência das Equações de Maxwell, a corrente elétrica alternada tende para a superfície do condutor diminuindo a área efetiva de condução.

Este processo resulta no aumento da resistência do condutor e é proporcional a intensidade da corrente e aumenta com a raiz quadrada de frequência.

Pode-se compreender detalhadamente o efeito pelicular nas referências (CASIMIR e UBBINK, 1967) e (ROBERT, 2000), considerando uma corrente elétrica filamental fluindo na parte interna de um condutor. Assumindo que esta corrente elétrica sofra uma variação em sua intensidade em função do tempo, esta terá um campo magnético rotacional H associado, o qual também tem uma variação em sua intensidade em função do tempo. Esta variação temporal do campo magnético induz a um campo elétrico rotacional E . A corrente elétrica, bem como os campos magnéticos e elétricos associados a ela estão representados esquematicamente na Figura 2.8.

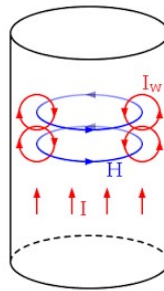


Figura 2.8 – Efeito Pelicular

Segundo a Lei de Lenz, a direção do campo elétrico induzido é oposta ao aumento da corrente elétrica I na região central do condutor (JACKSON, 1999). Isso gera uma corrente elétrica induzida oposta a essa corrente elétrica I e induz a uma corrente elétrica no mesmo sentido de I na superfície do condutor. Considerando várias correntes elétricas filamentosas, ao longo de toda a seção transversal de um condutor, o resultado será um aumento da intensidade da corrente elétrica na superfície e uma redução no centro do condutor.

A impedância interna complexa de um condutor cilíndrico sólido é obtida segundo a relação entre a queda de tensão ao longo da superfície e a corrente elétrica total no condutor segundo (MATICK, 1969) e (CHIPMAN, 1968). O resultado desta relação é uma equação que possui as funções de Bessel (MCLACHLAN, 1955) que apresentam argumentos complexos. Assim sendo, elas podem ser expressas por uma

parte real e uma imaginária, chamadas de funções de Kelvin, conforme a equação abaixo:

$$Z = \frac{\gamma}{2} \frac{ber(\gamma) - ibei'(\gamma)}{ber'(\gamma) + ibei(\gamma)} \quad (2.25)$$

Simplificando a equação (2.25) em parte real e parte imaginária tem-se a equação (2.26), parte real, para a resistência elétrica para os valores de CC:

$$\frac{R_i}{R'_{cc}} = \frac{\gamma}{2} \frac{ber(\gamma) bei'(\gamma) - bei(\gamma) ber'(\gamma)}{[bei'(\gamma)]^2 + [ber'(\gamma)]^2} \quad (2.26)$$

$$\gamma = \frac{d}{\sqrt{2} \delta} \quad (2.27)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 2 \pi f \sigma}} \quad (2.28)$$

$$ber(\gamma) = 1 - \frac{\gamma^4}{2^4 2!^2} + \frac{\gamma^8}{2^8 4!^2} - \frac{\gamma^{12}}{2^{12} 6!^2} + \dots \quad (2.29)$$

$$ber(\gamma) = \frac{\gamma^2}{2^2 1!^2} - \frac{\gamma^6}{2^6 3!^2} + \frac{\gamma^{10}}{2^{10} 5!^2} - \dots \quad (2.30)$$

$$ber'(\gamma) = -\frac{\gamma^3}{2^3 1! 2!} + \frac{\gamma^7}{2^7 3! 4!} - \frac{\gamma^{11}}{2^{11} 5! 6!} + \dots \quad (2.31)$$

$$bei'(\gamma) = \frac{\gamma}{2^1 0! 1!} - \frac{\gamma^5}{2^5 2! 3!} + \frac{\gamma^9}{2^9 4! 5!} - \dots \quad (2.32)$$

Desta forma pode-se calcular as perdas adicionais devido ao efeito pelicular substituindo a equação (2.26) na equação (2.33):

$$P_S = (R_i - R'_{cc}) I^2 \quad (2.33)$$

$$P_S = \left[\left(\frac{R_{cc} \gamma}{2} \frac{ber(\gamma) bei'(\gamma) - bei(\gamma) ber'(\gamma)}{[bei'(\gamma)]^2 + [ber'(\gamma)]^2} \right) - R'_{cc} \right] I^2 \quad (2.34)$$

$$P_S = \left[\left(\frac{\gamma}{2} \frac{ber(\gamma) bei'(\gamma) - bei(\gamma) ber'(\gamma)}{[bei'(\gamma)]^2 + [ber'(\gamma)]^2} \right) - 1 \right] R'_{cc} I^2 \quad (2.35)$$

Na qual:

- I – Corrente total (A);
- R_i – Resistência CC mais a adição devido ao efeito Efeito Pelicular (Ω);
- R'_{cc} – Resistência elétrica na temperatura de referência (Ω);
- σ – Condutividade do material ($\Omega \cdot m$)⁻¹;
- δ – Profundidade de penetração (m);
- f – Frequência (Hz);
- d – Diâmetro do condutor (m).

2.6.3 – Perdas por efeito de proximidade

Uma corrente alternada que percorre um fio cria um campo magnético alternado associado em torno deste condutor. Quando dois ou mais condutores são colocados próximos um do outro, seus campos eletromagnéticos interagem entre si gerando correntes parasitas no condutor adjacente, isto altera a distribuição da corrente que flui através deles. O resultado é que a corrente está concentrada nas áreas do condutor mais afastadas dos condutores próximos que transportam corrente na mesma direção. Da mesma forma, em dois condutores adjacentes que transportam correntes alternadas que fluem em direções opostas, como as encontradas em cabos de potência e pares de barramentos, a corrente em cada condutor é concentrada em uma faixa no lado voltado para o outro condutor.

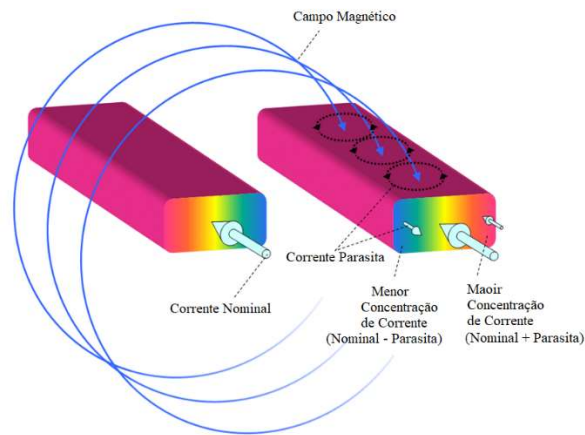


Figura 2.9 – Interação dos campos magnéticos

Devido a essa interação, a corrente em cada um deles é redistribuída de tal forma que a maior densidade de corrente é concentrada naquela parte do fio mais distante do condutor interferente. Conseqüentemente, a distribuição de corrente não é uniforme ao longo da seção transversal e uma proporção maior é transportada pelas metades remotas. Se as correntes estiverem em direções opostas, as metades em proximidade terão a maior densidade de corrente.

Como a corrente alternada em alguns outros fios próximos podem causar o campo externo, dando origem ao fenômeno, este caso é geralmente chamado de Efeito de Proximidade sendo um caso especial de efeito pelicular (DWIGHT, 1945).

No reator de núcleo de ar, as perdas por proximidade são devido à presença do condutor no campo magnético gerado por todas as outras correntes de cada camada de enrolamento. Assim, o efeito de proximidade aumenta a resistência efetiva do enrolamento e está associado aos campos magnéticos de seus condutores, que estão próximos uns dos outros.

O efeito de proximidade resulta no incremento da resistência aparente do condutor e pode aumentar significativamente a resistência CA de condutores adjacentes quando comparado à sua resistência a uma corrente CC. O efeito aumenta com a frequência. Em frequências mais altas, a resistência CA de um condutor pode facilmente exceder dez vezes sua resistência CC. A resistência adicional aumenta as perdas de energia que, nos circuitos de potência, podem gerar um aquecimento indesejável. O Efeito de Proximidade e o Efeito de Pelicular complicam

significativamente o projeto de transformadores e indutores, que sejam eficientes, operando em altas frequências.

O efeito de proximidade depende principalmente dos seguintes fatores:

1. Frequência - O efeito de proximidade aumenta com o aumento da frequência;
2. Diâmetro - O efeito de proximidade aumenta com o aumento do condutor;
3. Estrutura - Este efeito é mais no condutor sólido em comparação com o condutor trançado;
4. Material - Se o material é composto de material ferromagnético, o efeito de proximidade é mais na sua superfície.

A perdas por proximidade é tratado em detalhes na referência (LAMMERANER e STAFL, 1966), que apresenta a seguinte expressão para as perdas por unidade de comprimento induzidas no condutor:

$$P_p = \hat{G} \frac{H^2}{\sigma} \quad (2.36)$$

$$(2.37)$$

$$\hat{G} = \pi \gamma^2 \frac{ber(\gamma) bei'(\gamma) - ber'(\gamma) bei(\gamma)}{[ber(\gamma)]^2 + [bei(\gamma)]^2}$$

Sendo:

$$H = B_r^2 + B_z^2 \quad (2.38)$$

H – Campo magnético incidente no condutor (T);

Para calcular as perdas por proximidade no enrolamento é essencial calcular a densidade do fluxo magnético no condutor na região. Como é um campo rotativo assimétrico, a densidade de fluxo magnético em qualquer ponto da região tem dois componentes: o componente axial B_z e o radial componente B_r .

De acordo com a estrutura do reator é necessário aplicar a Lei Biot-Savart para obter o campo magnético de uma espira e depois obter a densidade do fluxo

magnético do enrolamento de camada única utilizando a integral do campo magnético. As equações são descritas da seguinte forma:

$$B_{r(R_0, Z_0)} = \frac{\mu i}{4 \pi} \int_{-\frac{x}{2}}^{\frac{x}{2}} \int_0^{2\pi} \frac{(Z_0 - Z) \cos \theta n R}{(R^2 R_0^2 + (Z_0 - Z)^2 - 2 R R_0 \cos \theta)^{\frac{3}{2}}} dz d\theta \quad (2.39)$$

$$B_{z(R_0, Z_0)} = \frac{\mu i}{4 \pi} \int_{-\frac{x}{2}}^{\frac{x}{2}} \int_0^{2\pi} \frac{(R - R_0 \cos \theta) n R}{(R^2 R_0^2 + (Z_0 - Z)^2 - 2 R R_0 \cos \theta)^{\frac{3}{2}}} dz d\theta \quad (2.40)$$

onde:

- μ – Permeabilidade magnética do ar (T/A m);
- n – Número de voltas por unidade de comprimento;
- x – Altura do enrolamento (m);
- i – Corrente na espira (A);

A densidade do fluxo magnético de uma única camada em $P_0(R_0, Z_0)$ pode ser obtido por resolução iterativa das equações (2.39) e (2.40) com a transformada de Bartkey. Assim, pode-se obter a densidade total do fluxo magnético em um ponto somando a densidade de fluxo magnético de todas as camadas nesta referência. Portanto, o cálculo do campo magnético do enrolamento de camada única é um ponto chave. A densidade do fluxo magnético em qualquer ponto da região em torno do reator pode ser obtida simplesmente somando a densidade de fluxo magnético de todas as camadas no local.

2.6.4 – Perdas por corrente foucault nas partes adjacentes

As correntes de Foucault são laços fechados de corrente induzida que circulam em planos perpendiculares ao fluxo magnético. Eles normalmente viajam paralelamente ao enrolamento da bobina e o fluxo é limitado à área do campo magnético do indutor. As correntes de Foucault concentram-se perto da superfície

adjacente a uma bobina de excitação e a sua resistência diminui com a distância da bobina, isto é, a densidade de Foucault diminui exponencialmente com a profundidade.

Como os reatores com núcleo de ar tipo seco não possuem um núcleo magnético para restringir o campo magnético, o campo é transmitido dentro e ao redor do reator como mostra a Figura 2.10. A intensidade deste campo disperso em torno do equipamento depende da potência nominal do reator e é comumente referido como campo de dispersão. Em geral, quanto maior a classificação da potência do reator, maior a força do campo de dispersão. Este campo afeta tanto os próprios componentes do reator como enrolamentos, cruzetas, anéis anti-corona e suportes, mas também peças adjacentes como terminais, conectores, barramentos, suportes de barramento e qualquer material eletricamente condutivo adjacente.

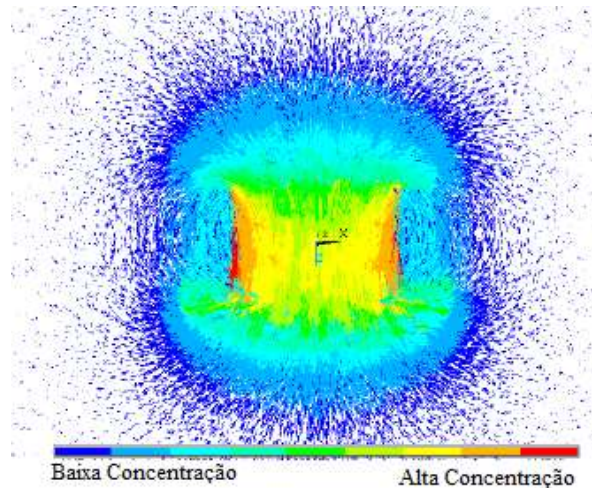


Figura 2.10 – Distribuição do campo magnético de um reator de núcleo de ar

A Lei de Biot-Savart conforme Figura 2.11 pode ser aplicada para calcular o campo magnético de um enrolamento cilíndrico (YOUNG e FREEDMAN, 2009).

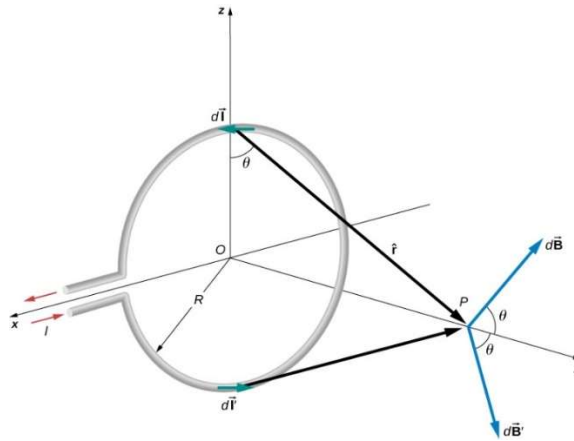


Figura 2.11 – Lei Biot-Savart

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i dl \times \hat{r}}{|r|^2} \quad (2.41)$$

Onde:

- dB – Densidade do fluxo magnético de uma espira circular (H/m);
- μ_0 – Permeabilidade magnética do vácuo ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m);
- i – Corrente elétrica (A);
- dl – Comprimento infinitesimal da espira (m);
- \hat{r} – Vetor unitário do vetor \hat{r} ;
- $|r|^2$ – Distância entre a espira e o ponto do campo (m);

O campo magnético externo de um reator de núcleo de ar do tipo seco enrolado a uma distância significativa do enrolamento pode ser aproximado pelo campo de uma volta da corrente como mostrado na Figura 2.12. Essa aproximação vale para bobinas com um comprimento de enrolamento menor que cerca de três vezes o diâmetro do enrolamento. O campo produzido por uma espira de enrolamento de corrente na distância r de mais de três vezes o diâmetro pode ser aproximado de acordo com (SMYTHE, 1968) pelas equações (2.42) e (2.43).

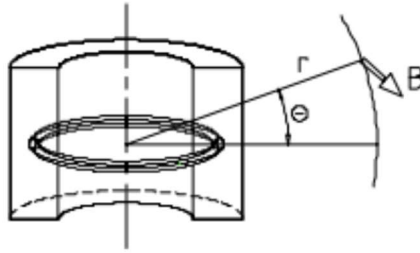


Figura 2.12 – Vetor campo magnético

$$|B| = \frac{\mu_0 N i D^2}{8 r^3} f(\theta) \quad (2.42)$$

$$f(\theta) = \sqrt{\sin^2(\theta) + \frac{\cos^2(\theta)}{4}} \quad (2.43)$$

- |B| – Magnitude do campo magnético (H);
- μ_0 – Permeabilidade magnética do vácuo (H/m);
- n – Números de espiras;
- i – Corrente na espira (A);
- D – Diâmetro médio da camada de espiras (m);
- r, θ – Coordenadas (m), ($^\circ$);
- $f(\theta)$ – Função de diretividade $f(\theta)$.

Usando as equações (2.42) e (2.43) na direção lateral $\theta = 0$, $f(\theta) = 0,5$ a magnitude da densidade do fluxo magnético a distâncias moderadas do reator pode ser estimada por:

$$|B| = \frac{\pi n I D^2}{4 r^3} 10^{-7} \quad (2.44)$$

Como pode ser visto na equação (2.44), a força do campo cai rapidamente com o aumento da distância do reator, sendo inversamente proporcional ao cubo da distância.

No caso de reatores com núcleo de ar que transportam corrente alternada, o campo magnético disperso induzirá correntes parasitas em quaisquer partes condutoras que permaneçam dentro do campo de dispersão, sejam elas de material ferromagnético ou não magnético. Para o objetivo deste trabalho, uma abordagem mais simplificada é aceitável e abordada a seguir.

A profundidade de penetração do campo no material condutor é calculada da seguinte forma:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 2 \pi f \sigma}} \quad (2.45)$$

Para um perfil com dimensões bem definidas, as perdas Foucault podem ser calculadas com alguma aproximação conforme a seguinte relação (STOLL, 1974) :

$$P_f = \frac{B^2 \gamma^3 h}{6 \mu_0^2 \sigma \delta} \quad (2.46)$$

$$\gamma = \frac{e}{\delta} \quad (2.47)$$

Sendo:

- B – Densidade de fluxo magnético B na localização desejada (H);
- e – Espessura do perfil (m);
- h – Altura do perfil (m);

A aproximação anterior é aceitavelmente precisa para geometrias de material não magnético com $d < \delta$ à frequência fundamental.

Para reatores de pequeno porte, como é o caso deste estudo, as perdas induzidas em partes metálicas adjacentes ao reator são extremamente pequenas em comparação com as perdas no enrolamento, ou seja, podem ser desconsideradas.

2.6.5 – Cálculo da resistência CA do reator

Uma vez obtido os valores das perdas típicas dos reatores com núcleo de ar, pode-se determinar a resistência em corrente alternada R_{CA} do objeto em projeto. Esta grandeza é o resultado da razão entre a soma das perdas Joules, perdas por efeito pelicular, proximidade e perdas Foulcalt pelo quadrado da corrente nominal do projeto. A equação (2.48) descreve o conceito em detalhe:

$$R_{CA} = \frac{P_{cc} + P_s + P_p + P_f}{I^2} \quad (2.48)$$

Vale enfatizar que a resistência R_{CA} está intimamente relacionada a frequência a que o reator está sujeito. O fato é comprovado realizando uma breve inspeção no equacionamento das perdas por efeito pelicular, proximidade e perdas Foulcalt.

2.6.6 – Princípios da transmissão de calor

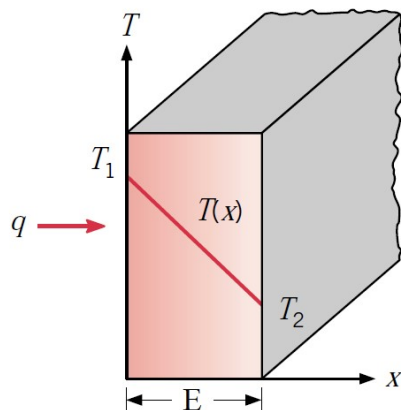
Os cálculos térmicos de equipamentos elétricos, principalmente com relação à elevação de temperatura em regime permanente, requerem uma modelagem desenvolvida especialmente para o equipamento sob projeto, a partir das características próprias dos materiais utilizados e do modelo construtivo do fabricante. Esta modelagem é normalmente resumida dentro dos princípios da termodinâmica referentes a transmissão de calor. As modelagens, quando bem desenvolvidas, auxiliam os cálculos computacionais de temperatura não havendo grandes necessidades de utilização de métodos mais robustos.

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 (INCROPERA, 2006). 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.

Então para o cálculo da temperatura em regime permanente de um reator de núcleo de ar se faz necessário um aprofundamento nos fenômenos de transmissão de calor que são:

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). 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. O fluxo de calor sempre ocorre a partir de uma região de maior temperatura para uma região de baixa temperatura, e atua no sentido de equalizar as diferenças de temperatura. Genericamente, a propagação de calor por condução ocorre sem transporte da substância ou matéria do sistema. A Lei de Fourier, estabelece que o fluxo de calor através de um material é proporcional ao diferença de temperatura.



$$q = -k \frac{(T_2 - T_1)}{E} \quad (2.49)$$

Figura 2.13 – Fluxo de calor em um material

Onde:

- q – Fluxo de calor (W/m^2);
- E – Espessura do corpo (m);

- k – Condutividade térmica do meio ($W/m \cdot ^\circ C$)
- T_1 – Temperatura do corpo na face 1 ($^\circ C$);
- T_2 – Temperatura do corpo na face 2 ($^\circ C$).

Em se tratando dos reatores com núcleo de ar o fenômeno de condução não influencia diretamente a capacidade de dissipação total de calor do enrolamento para o meio ambiente. A área de contato, sujeitos a condução, com a massa de enrolamento do reator se dá unicamente através de sapatas suporte. Estes conectam o reator aos isoladores e por possuir uma pequena área de contato com o reator, as perdas por condução podem ser completamente desconsideradas. Já no enrolamento propriamente dito, a condução é responsável por uma pequena diferença de temperatura no interior do condutor em relação à média da sua seção. 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.

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. A Lei de Stefan-Boltzmann descreve o fenômeno da radiação do calor governada pela diferença entre as fontes (T_s) que é a temperatura da superfície e a temperatura ambiente (T_a), cada qual elevada à quarta potência. A expressão é apresentada na forma:

$$Q_r = \zeta \varepsilon A (T_s^4 - T_a^4) \quad (2.50)$$

- ζ – Constante de Stefan-Boltzmann (W/m^2k);
- ε – Emissividade;
- A – Área da superfície radiante (m^2);
- T_s – Temperatura da superfície ($^\circ C$);
- T_a – Temperatura ambiente ($^\circ C$);

Reescrevendo a equação (2.50):

$$Q_r = \zeta \varepsilon A (T_s + T_a) (T_s^2 - T_a^2) (T_s - T_a) \quad (2.51)$$

Pode-se apresentar a equação (2.51) no mesmo formato da equação (2.54). Assim:

$$Q_r = h_r A (T_s - T_a) \quad (2.52)$$

$$h_r = \zeta \varepsilon (T_s + T_a) (T_s^2 - T_a^2) \quad (2.53)$$

Onde:

h_r – Coeficiente de transferência de calor por radiação ($W/m^2\text{°C}$)

A emissividade de um material é a razão da energia irradiada pelo material em relação energia irradiada por um corpo negro na mesma temperatura. É uma medida da capacidade de um material absorver e irradiar energia. Um corpo negro verdadeiro teria $\varepsilon = 1$ enquanto qualquer objeto real teria $\varepsilon < 1$. A emissividade é um valor adimensional e não tem unidades.

Em um reator de núcleo de ar tipo seco, a radiação ocorre principalmente a partir da superfície externa do cilindro mais externo e da superfície interna do cilindro mais interno do equipamento. A radiação não é considerada um fenômeno tão relevante no projeto de reatores se comparado a convecção, podendo inclusive ser descartada a sua influência na dissipação de calor em regime transitório e permanente.

CONVECÇÃO: O fenômeno predominante de dissipação de calor por equipamentos elétricos é a convecção. A convecção é o processo de transferência de calor devido a um movimento macroscópico de fluídos transferindo energia das porções quentes para as porções frias através da ação combinada de condução de calor,

armazenamento de energia e movimento de misturas. A convecção de calor ocorre em fluidos em movimento (ar, água, óleo, etc.) e obedece à Lei de Newton. É dita natural quando as correntes de ar são basicamente aquelas geradas pelo aquecimento do ar. Quando o ar é colocado em movimento por meios mecânicos, como ventiladores, o resfriamento é dito por convecção forçada.

Nos reatores de ar tipo seco, a convecção ocorre no espaço aéreo dentro e fora dos cilindros na condição de convecção natural assim, o movimento do fluido é induzido por diferenças de densidade resultantes dos gradientes de temperatura no ar. Na prática, a capacidade de dissipação por convecção de um equipamento é influenciada por uma série de fatores como geometria, materiais, número de dutos de resfriamento, distanciamento dos cilindros, disposição, etc.

A transferência de calor por convecção entre uma superfície e um fluido pode ser calculada através da Lei de Newton do resfriamento que fornece a relação entre a taxa de transferência de calor e a diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente:

$$Q_c = h_c A (T_s - T_a) \quad (2.54)$$

h_c – Coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

O coeficiente de calor por convecção também é conhecido por *coeficiente de película* ou *condutância de película* que, de acordo com (HOLMAN, 1983), é devido à sua relação com o processo de condução na fina camada de fluido estacionário junto à superfície aquecida. O coeficiente de transferência de calor para este regime pode ser relacionado à flutuabilidade e às propriedades térmicas do fluido. Vários modelos empíricos foram desenvolvidos para a convecção de calor da parede vertical para o ar circundante. A literatura de transferência de calor contém muitas equações teóricas e correlações empíricas que podem ser usadas para determinar o coeficiente de transferência de calor para fluidos especificados fluindo dentro de canais ou ao longo de superfícies de várias geometrias.

2.6.7 – Determinação da temperatura média do reator

No que se refere aos reatores com núcleo de ar tipo seco, fazendo uso das equações (2.52) e (2.54), o total das perdas liberadas por convecção e radiação pode ser expressa da seguinte maneira:

$$Q_c + Q_r = h_c A (T_s - T_a) + h_r A (T_s - T_a) \quad (2.55)$$

Adotando:

$$Q_p = Q_c + Q_r \quad (2.56)$$

Assim:

$$Q_p = (h_c + h_r) A (T_s - T_a) \quad (2.57)$$

$$h' = (h_c + h_r) \quad (2.58)$$

$$Q_p = h' A (T_s - T_a) \quad (2.59)$$

O parâmetro h' , fundamental para o cálculo da temperatura média do reator, não é obtido com facilidade, pois a convecção e a radiação em paredes verticais é um fenômeno bastante complexo. Para alguns sistemas é possível o cálculo analítico, e para outras situações mais complexas, a determinação é experimental ou numérica. No entanto, pode-se afirmar que este parâmetro apresenta dependência com as seguintes variáveis: viscosidade do fluido, condutividade térmica, calor específico, densidade e velocidade, além de depender da geometria da superfície do sólido.

O coeficiente de transferência de calor representa um valor integrado para a taxa de transferência de calor em toda a superfície, uma vez que o valor h' varia com a distância vertical da borda inicial da superfície vertical do reator. Para reatores com núcleo de ar, o coeficiente de transferência de calor médio, segundo (GOTTER, 1954), trata-se de um parâmetro obtido de forma empírica. Baseado nas equações que regem a convecção natural descritas na referência (INCROPERA e DEWITT, 2006),

pode-se obter o coeficiente de transferência de calor h' em função do número de Nusselt da seguinte maneira:

$$h' = \frac{k \text{Nu}}{L} \quad (2.60)$$

O número de Nusselt é descrito em função do número de Grashof e do número de Prandtl:

$$\text{Nu} = A (\text{Gr Pr})^{0,25} \quad (2.61)$$

Enquanto o número de Prandtl apresenta um valor de 0,7 para no ar, o número de Grashof é dado por:

$$\text{Gr} = \frac{g \beta (T_s - T_a) L^3}{\nu^2} \quad (2.62)$$

- g – Aceleração da gravidade (m/s^2);
- k – Condutividade térmica do ar ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$);
- β – Coeficiente de dilatação volumétrica do ar ($^\circ\text{C}^{-1}$);
- L – Altura do reator (m);
- ν – Viscosidade cinemática do ar (m^2/s);

Considerando o formato cilíndrico do reator, o coeficiente de transferência de calor também está sujeito as dimensões do mesmo. A variável A , obtida de forma empírica relaciona a dependência do parâmetro h' com o diâmetro D e a altura L do equipamento. A equação (2.63) é válida para $\frac{L}{D} < 10$ (MARTIN, 1967):

$$A = L^{0,25} \left[3,017 + 1,25 \cdot 10^{-1} \left(\frac{L}{D} \right) - 14,58 \cdot 10^{-2} \left(\frac{L}{D} \right)^2 + 61,39 \cdot 10^{-3} \left(\frac{L}{D} \right)^3 - 13,55 \cdot 10^{-3} \left(\frac{L}{D} \right)^4 + 1,34 \cdot 10^{-3} \left(\frac{L}{D} \right)^5 - 4,76 \cdot 10^{-5} \left(\frac{L}{D} \right)^6 \right] \quad (2.63)$$

É possível colocar de forma gráfica a variação do coeficiente h' em relação a diferença de temperatura da superfície T_s do reator e a temperatura ambiente T_a .

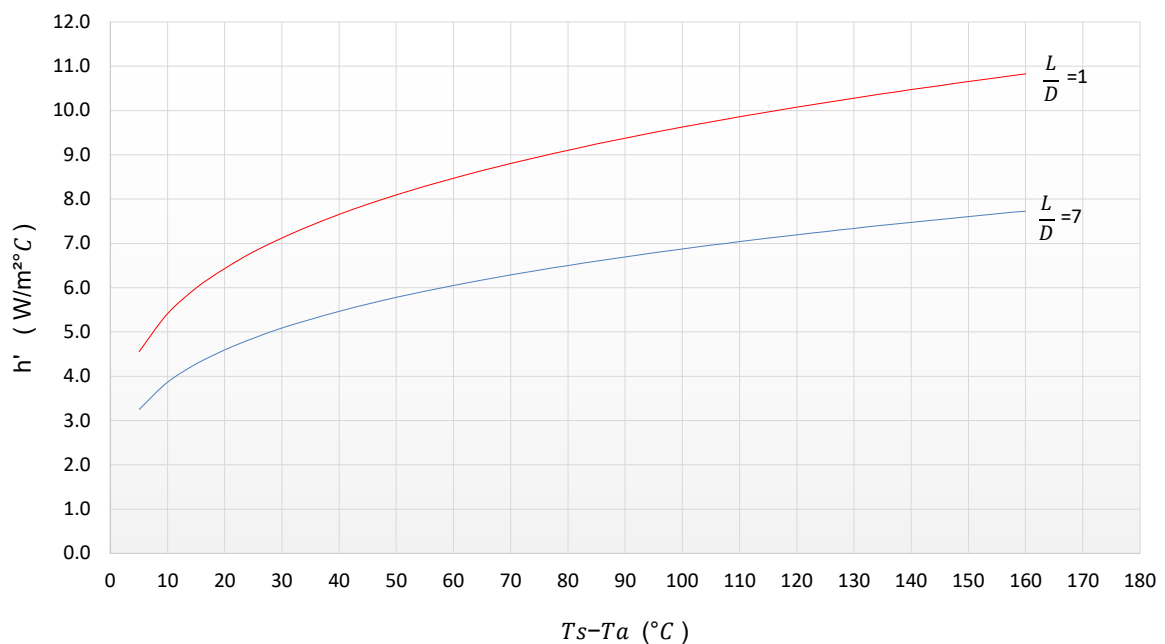


Figura 2.14 – Variação do coeficiente h'

Desenvolvido toda a teoria das perdas elétricas envolvidas no reator e os processos de transferência de calor, é possível equacionar o cálculo da temperatura em regime permanente T_s a que o reator será submetido considerando as especificações técnicas. Portanto, o cálculo da temperatura do reator de núcleo de ar tipo seco de um cilindro em regime permanente é obtido igualando-se as perdas elétricas e as perdas liberadas por convecção e radiação segundo a equação (2.64). Remanejando as variáveis, obtêm-se a equação (2.66) que resulta na temperatura almejada.

$$Q_p = P_{cc} + P_s + P_f \quad (2.64)$$

$$h' A (T_s - T_a) = P_{cc} + P_s + P_f \quad (2.65)$$

$$T_s = \frac{P_{cc} + P_s + P_p}{h' A} + T_a \quad (2.66)$$

Devido a dependência das perdas e do coeficiente h' em função da temperatura T_s do reator, forma-se um sistema retroalimentado pela temperatura T_s . Para alcançar a estabilidade e o equilíbrio, o número de ciclos necessário depende exclusivamente da configuração e especificação de cada equipamento.

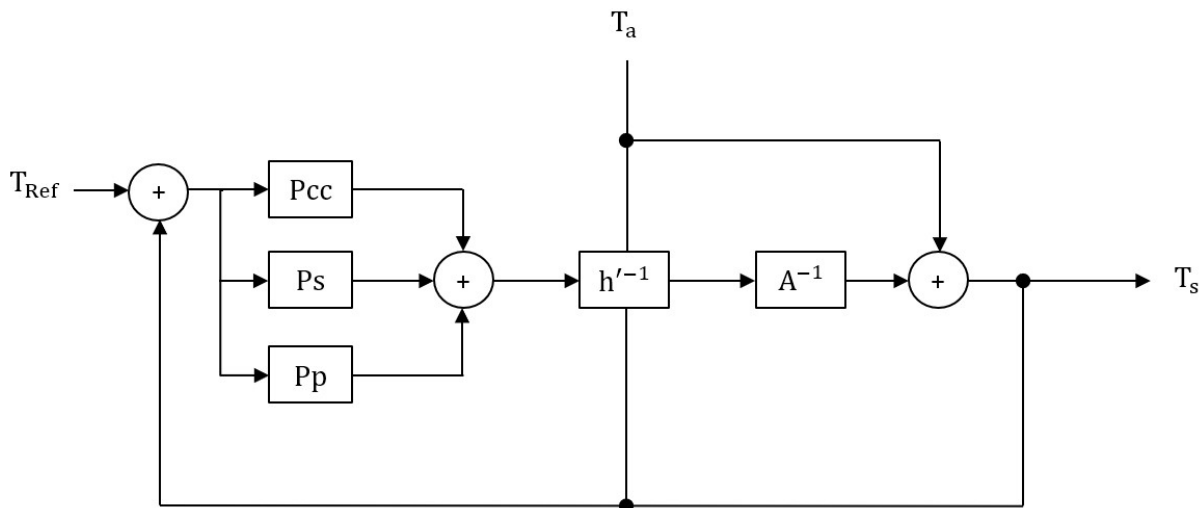


Figura 2.15 – Diagrama de blocos para cálculo de temperatura

2.7 – Ensaio normalizados

Os ensaios elétricos têm por objetivo testar o equipamento baseado nos parâmetros de projetos e especificações delimitadas por critérios específicos para este determinado equipamento. Os fatores que regulam os ensaios nos reatores constam na norma IEC-60076-6 (2007) e são divididos entre ensaios de rotina e ensaios de tipo. Segundo a norma, os ensaios aplicáveis nos reatores com núcleo de ar são divididos em:

Ensaio de Rotina:

- Medição da resistência CC do enrolamento;
- Medição da Indutância/ Reatância;
- Medição das Perdas;
- Ensaio Dielétricos.

Ensaio de Tipo:

- Ensaio de Elevação de Temperatura;
- Avaliação do Ruído.

A seguir será exposto uma breve abordagem dos ensaios de rotina realizados em um reator de núcleo de ar tipo seco baseando na norma IEC-60076-6 (2007).

2.7.1 – Medição de resistência CC do enrolamento

A resistência ôhmica deve ser medida entre os terminais do reator. Esta medição é realizada em corrente contínua, usando uma ponte Kelvin ou um microhmímetro digital de alta precisão. Antes de cada medição o transformador deve permanecer pelo menos 3 horas desenergizado e em repouso no mesmo ambiente onde será efetuado o ensaio.

A resistência e a temperatura ambiente devem ser registadas simultaneamente sendo que a temperatura deve ser medida através de sensores localizados nos enrolamentos. Nas medições de resistência, cuidados devem ser tomadas para se reduzirem ao mínimo os efeitos de auto-indutância.

Todos os valores de resistência medidos devem ser corrigidos para a temperatura de referência/desejada conforme equação:

$$R_t = R_a \frac{(Y + T_r)}{(Y + T_a)} \quad (2.67)$$

Onde:

R_t – Resistência na temperatura de referência (Ω);

R_a – Resistência na temperatura ambiente (Ω);

Y – 225 para alumínio ou 235 para cobre;

T_a – Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

2.7.2 – Medição da indutância e perdas em reatores com núcleo de ar

As medições da indutância e das perdas totais no reator é realizada de forma simultânea neste momento. Devido ao comportamento linear (indutância x corrente) dos reatores com núcleo de ar, as medições podem ser realizadas em tensão e corrente reduzidas em comparação aos dados nominais do equipamento. Desta forma, o circuito de ensaio fica bem simplificado e não exige altas potências. Com o circuito da Figura 2.16 é possível obter estes parâmetros.

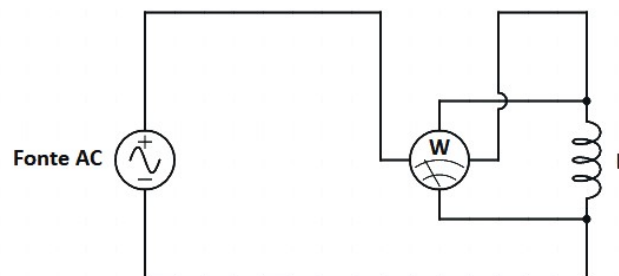


Figura 2.16 – Método de medição de perdas

Aplicando uma tensão CA na frequência fundamental no reator, utiliza-se um wattímetro digital para medir a tensão (V), a corrente (I) e perdas totais CA (P) geradas. Assim, a impedância (Z), a resistência CA (R_{CA}), e a indutância (L) são calculados a partir dos valores medidos, segundo as equações abaixo:

$$Z = \frac{V_m}{I_m} \quad (2.68)$$

$$R_{CA} = \frac{P_m}{I^2} \quad (2.69)$$

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R_{AC}^2}}{(2 \pi f)} \quad (2.70)$$

Os valores R_{CA} devem ser corrigidos para a temperatura de referência se necessário:

$$R'_{CA} = R_{CA} \frac{(Y+T_a)}{(Y+T_r)} \quad (2.71)$$

Onde:

- V_m – Tensão Medida (V);
- I_m – Corrente Medida (A);
- P_m – Potência ativa medida (W);
- T_r – Temperatura de referência ($^{\circ}C$);

A partir dos valores de R'_{CA} na temperatura de referência calcula-se as perdas totais na temperatura de referência (P_R) considerando a corrente nominal:

$$P_R = R'_{CA} I_n^2 \quad (2.72)$$



Figura 2.17 – Wattímetro Digital

2.7.3 – Ensaio dielétricos

Antes que o reator seja colocado em plena operação, este deve ser submetido ao ensaio dielétrico. Este ensaio é destinado a fazer uma avaliação no sistema de isolamento do equipamento. A técnica resume-se a submeter o isolamento das espiras a uma sobretensão para verificar a integridade do material isolante. Este teste prova a capacidade de isolamento do sistema, tanto entre espiras de uma mesma camada como o isolamento de camadas adjacentes. Também tem como objetivo verificar o escoamento da superfície do reator e o nível básico de isolamento.

Segundo a norma IEC-60076-6 (2007), o ensaio deve ser realizado aplicando-se uma tensão na frequência industrial igual ao dobro da tensão nominal. Porém, para reatores com núcleo de ar tipo seco, este ensaio se torna impraticável já que a corrente de teste também seria o dobro da corrente nominal projetada. Esta determinação se aplica exclusivamente para reatores imersos em óleo. Por este motivo, este ensaio é substituído pelo ensaio de Descarga Capacitiva (Turn-to-Turn overvoltage test) ou pelo ensaio de Impulso Atmosférico (Lightning Impulse Test), em função da tensão nominal do equipamento.

A - Ensaio de Descarga Capacitiva

O ensaio consiste em aplicar entre os terminais do reator uma série de pulsos de tensão senoidal com decaimento exponencial gerados pelo carregamento e descarregamento de um capacitor posicionado paralelamente ao reator. O disparo se dá através de gaps ou esferas posicionadas a uma distância aferida para atuar na tensão desejada.

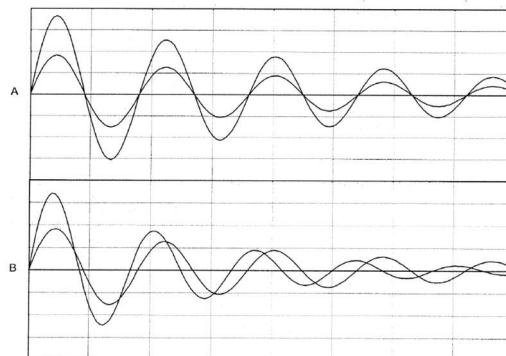


Figura 2.18 – Curvas do ensaio de descarga capacitiva
Fonte: IEC-60076-6 (2007)

A sequência de teste consiste em uma aplicação com valor reduzido (geralmente 50% do valor da tensão de ensaio) servindo como base para comparação. Em seguida uma série de 7200 ciclos é aplicado ao reator sendo que o primeiro pico de tensão deve ter o valor especificado da tensão de ensaio. A duração do ensaio é de 60 segundos. No final, é realizada a comparação dos ciclos da tensão reduzida e as ondas na tensão plena de ensaio conforme Figura 2.18. Caso identificado alguma distorção, conforme ciclos B da Figura 2.18 o equipamento é reprovado.

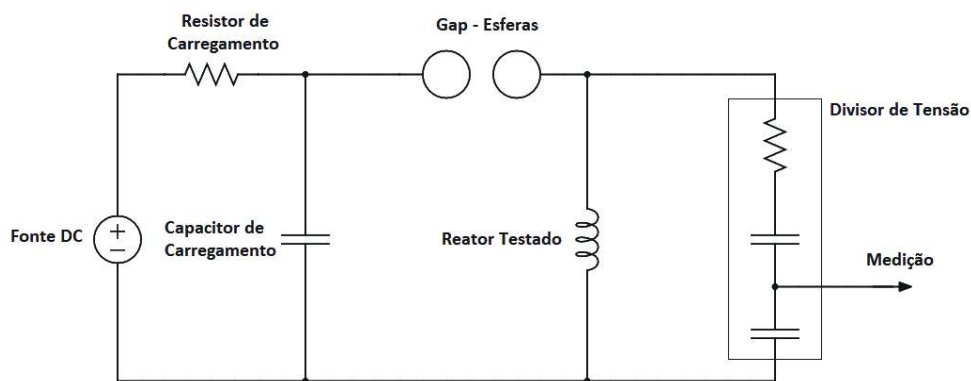


Figura 2.19 – Circuito de descarga capacitiva

B- Ensaio de Impulso Atmosférico

Deve-se aplicar ao equipamento 3 impulsos atmosféricos como uma forma de onda padronizada de $1,2 \times 50\mu\text{s}$ na tensão plena de ensaio. Antes, uma onda reduzida (geralmente 50% da tensão necessária) com as mesmas características da anterior deve ser aplicada servindo como a base para comparação. Ao final, como a descarga capacitiva, é realizada uma comparação entre a onda reduzida e as plenas. Se as ondas possuírem o mesmo comportamento o equipamento é aprovado. O ensaio é realizado utilizando um gerador de impulsos atmosféricos cujo circuito básico está representado na Figura 2.20.

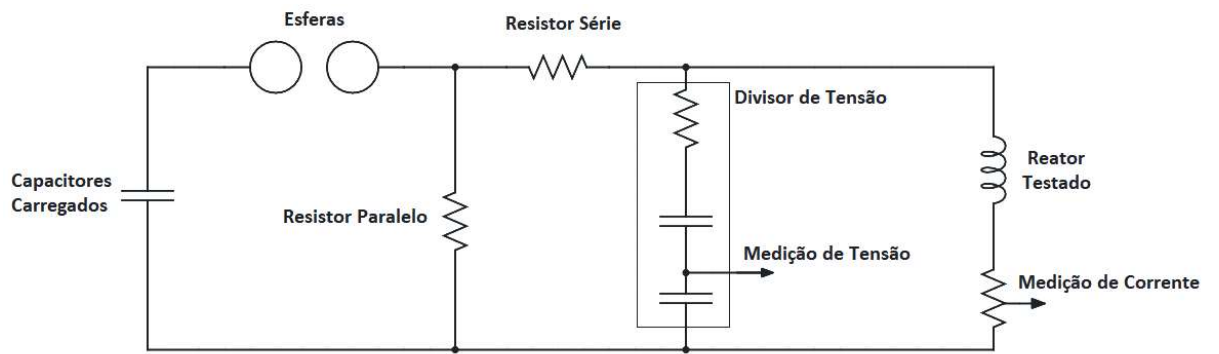


Figura 2.20 – Circuito básico de um gerador de impulso atmosférico



Figura 2.21 – Gerador de impulsos atmosféricos

Capítulo 3 – PRINCÍPIOS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A natureza da luz branca foi demonstrada pela primeira vez por Newton em 1664, quando foi decomposta a luz solar por meio de um prisma, projetando-a em uma tela a imagem alongada e colorida do sol e foi chamada por ele de espectro.

O estudo da radiação teve uma grande evolução a partir no século XIX. Um marco notável foi quando Gustav Kirchhoff (1860) demonstrou que um bom absorvedor de radiação é também um bom emissor. Em 1873, Maxwell apresentou as equações que concluíram que luz visível e radiação dos corpos aquecidos estavam relacionadas. A partir de então uma série de estudos e propostas foram apresentadas baseados na radiação térmica, permitindo a utilização prática dos conceitos demonstrados.

Como será abordado adiante, a radiação térmica é emitida em várias faixas do espectro eletromagnético e contempla a radiação infravermelha. Para temperaturas típicas encontradas na Terra, a maior parte da radiação térmica é emitida dentro da faixa de infravermelho. Este fato faz com que os detectores de infravermelho possam ter uma grande aplicabilidade em inúmeras áreas. A grosso modo, a termografia detecta a radiação infravermelha emitida pelo objeto inspecionado, que é invisível ao olho humano, e a transforma em imagens térmicas visíveis com a possibilidade de convertê-la em leituras de temperatura.

Neste capítulo será abordado os conceitos sobre a radiação térmica, teoria da medição e detecção da radiação assim como os medidores infravermelhos.

3.1 – A radiação térmica

Todos os objetos acima do zero absoluto emitem radiação térmica devido à agitação térmica de átomos dos quais são constituídos. Um corpo pode emitir radiação sob o efeito de diversas excitações, seja de origem térmica ou elétrica, as quais podem ser representadas sob forma de ondas eletromagnéticas.

O espectro de ondas eletromagnéticas é formado por uma faixa muito larga de frequências, a qual é subdividida em grupos como raios X, raios gama, radiação térmica, ondas de rádio. Veja Figura 3.1:

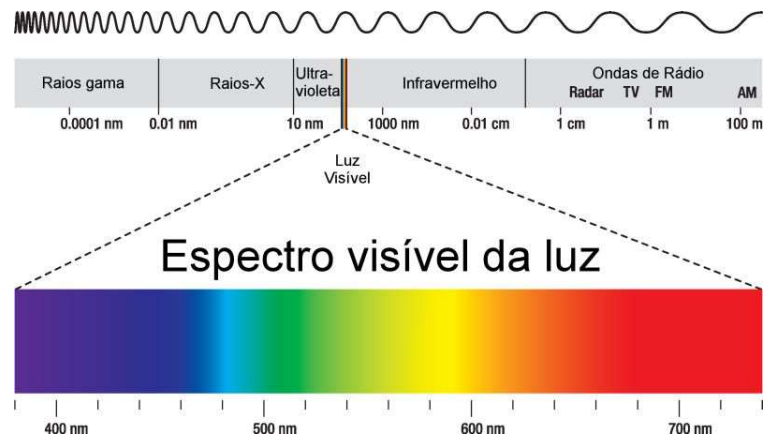


Figura 3.1 – Espectro eletromagnético

A faixa compreendida entre 0,1 e 100 nm está ligada à produção de radiação por variação de temperatura de um corpo e, por isso, recebe o nome de radiação térmica. A radiação térmica está subdividida em três grupos: Ultravioleta, luz visível e infravermelho. A radiação infravermelha é a parcela do espectro eletromagnético compreendida entre 780 nm e 1 mm.

3.2 – Teoria da medição e detecção de radiação

Em 1879, Joel Stefan, deduziu a partir de dados experimentais a lei que relaciona a energia radiante de um corpo negro com a temperatura. Em 1884, Ludwig Boltzmann chegou as mesmas conclusões a partir de estudos baseados na termodinâmica, resultando na Lei de Stefan-Boltzmann (HOLMAN, 1983):

$$E_r = \zeta \cdot T^4 \quad (3.1)$$

T – Temperatura absoluta (K);

ζ – Constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2 \cdot K^4$);

E_r – Energia radiante (W/m^2).

A Figura 3.2 mostra a potência irradiada por um corpo negro em função do comprimento de onda para 5 temperaturas distintas:

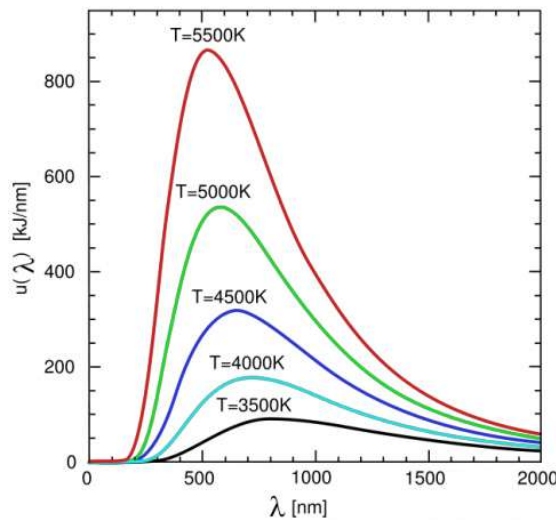


Figura 3.2 – Potência irradiada por um corpo negro em diferentes temperaturas

Em 1884, W. Wien publicou a lei que relaciona o comprimento de onda onde se situa a máxima emissão de radiação eletromagnética de corpo negro e sua temperatura.

$$\lambda_{\max} \cdot T = 0,0028976 \quad (3.2)$$

λ_{\max} – Comprimento de onda na intensidade máxima de radiação (m);

Todavia a experiência de Wien se aplicava à baixas temperaturas e pequenos comprimentos de onda.

Em 1900, Rayleigh e Jeans desenvolveram uma nova teoria relacionando a radiação do corpo negro com o comprimento de onda. Embora seja utilizado até os dias atuais, seus estudos se aplicavam a uma pequena parte do espectro, ou seja, eram válidos para os grandes comprimentos de onda.

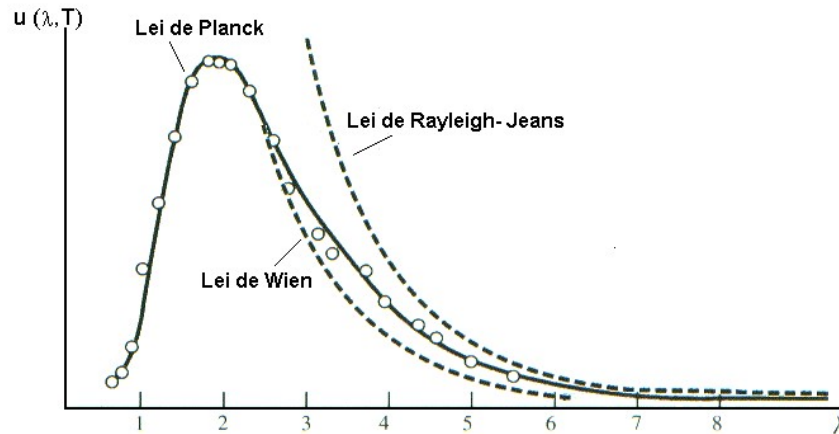


Figura 3.3 – Leis de Wien e Rayleigh concordando com a Lei de Planck.

Planck procurou interpolar os resultados de Wien e Rayleigh-Jeans, como mostra a Figura 3.3 e, com a introdução do conceito do quantum de energia, chegou, em 1900, na equação para a distribuição de radiação do corpo negro.

$$E_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \left(\frac{1}{e^{c_2/\lambda} - 1} \right) \quad (3.3)$$

Onde:

E_{λ} – Irradiância espectral do corpo negro ($W/m^2 \cdot \mu m$);

c_1 – Constante de radiação ($W \cdot \mu m^4/m^2$);

c_2 – Constante de radiação ($m \cdot k$);

λ – Comprimento de onda (m).

Existem duas relações entre as propriedades radiativas dos materiais que são muito importantes. A primeira é a que relaciona absorvância, refletância e transmitância no balanço da energia radiativa. E a segunda é a Lei de Kirchhoff que relaciona absorvância e emissividade.

Conforme descrito anteriormente, o corpo negro é elemento de estudo ideal com capacidade total de absorção de energia radiante sobre ele incidido. Os objetos reais não absorvem toda a radiação conforme descrito na Lei de Planck. Essa taxa de emissão é calculada através da razão entre a energia irradiada por um determinado material e a energia irradiada por um corpo negro para um mesmo comprimento de onda:

$$\varepsilon = \frac{E_o}{E_{cn}} \quad (3.4)$$

E_o – Radiação real do objeto (W/m^2);

E_{cn} – Radiação do corpo negro (W/m^2);

A emissividade é um número adimensional que varia de 0 a 1. A Tabela 3.1 mostra alguns valores típicos para diferentes materiais, podendo sofrer variações com o comprimento de onda, forma do objeto, temperatura, qualidade da superfície e ângulo de incidência.

Tabela 3.1 – Valores típicos de emissividade

Material	Emissividade (ε)
Aço inoxidável – típico, polido	0,07
Alumínio – altamente polido	0,04
Água	0,96
Areia	0,90
Concreto	0,88 – 0,93
Janela de vidro	0,90 – 0,95
Placas de amianto	0,93 – 0,96
Tijolo, vermelho	0,93 – 0,96
Vegetação	0,92 – 0,96
Cobre polido	0,01
Vidro	0,92
Ferro polido	0,23
Corpo Negro	1

Segundo a lei da radiação de Kirchhoff, quando um corpo real for atingido por uma radiação pode apresentar os seguintes fenômenos:

- ❖ Uma fração da radiação incidente pode ser absorvida α .
- ❖ Uma fração da radiação incidente pode ser refletida ρ .
- ❖ Uma fração da radiação incidente pode ser transmitida τ .

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (3.5)$$

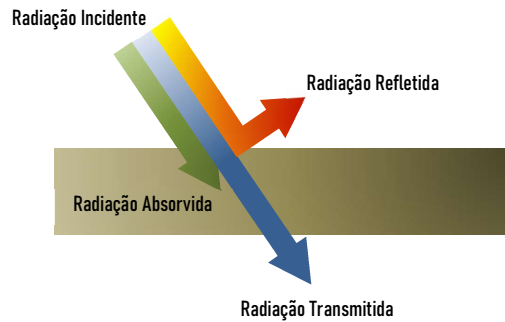


Figura 3.4 – Frações da Radiação

Como a transmitância raramente desempenha um papel na prática, então τ é omitida e a equação fica:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (3.6)$$

Isto significa que quanto menor a emissividade:

- maior a porcentagem de radiação infravermelha refletida;
- maior dificuldade em fazer medições precisas de temperatura;
- maior importância em configurar corretamente a compensação de temperatura refletida.

3.3 – A termografia infravermelha

Somente na década de 1960 foram introduzidos no mercado os sistemas infravermelhos para medição de temperatura. A grande dificuldade estava na propriedade física das lentes, pois o vidro apresentava propriedades de transmitância e refletância específicas e que impossibilitavam o seu uso nos equipamentos. A partir de então, com a evolução das técnicas ópticas, materiais especiais tais como silício, germânio, compostos de zinco e cádmio possibilitaram o início dos sistemas infravermelhos.

A termografia por infravermelho, que opera na faixa da radiação infravermelha, é uma técnica de aquisição e análise de informações térmicas a partir de imagens obtidas a distância, ou seja, sem contato. Emprega instrumentos denominados termovisores ou câmeras termográficas. A Figura 3.5 mostra um esquema simplificado do funcionamento de um termovisor. O objeto sob análise emite uma potência

eletromagnética na faixa de frequência do infravermelho que se propaga pela atmosfera até o termovisor. Essa irradiação recebida pelo termovisor, em seu detector, é amplificada em circuitos eletrônicos e é convertida em um sinal condicionado para o processamento eletrônico, por exemplo tensão elétrica. Cálculos são efetuados para se correlacionar a irradiação recebida com a temperatura do objeto e, finalmente, a imagem térmica é construída e visualizada ou armazenada pelo operador.

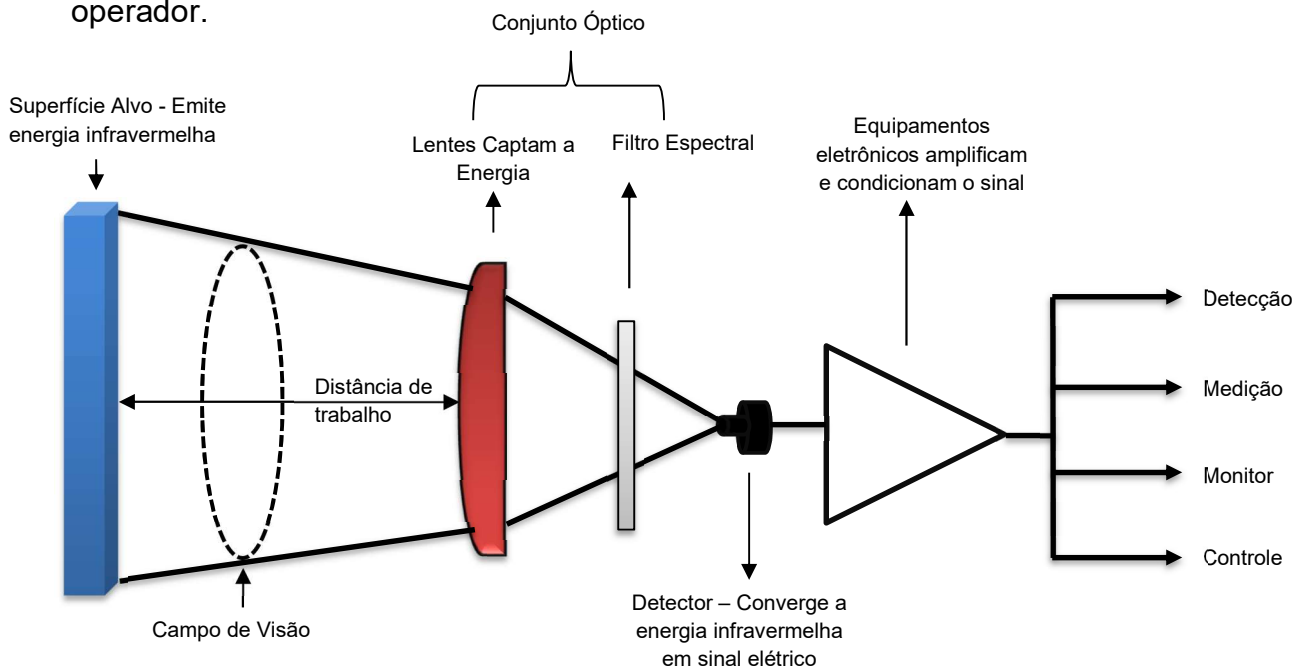


Figura 3.5 – Esquema simplificado de um termovisor

A termografia infravermelha é uma técnica de inspeção e testes não destrutivos. Através de sensoriamento remoto permite-se a medição das temperaturas e mapeamento térmico com o objetivo de analisar as condições operacionais de um equipamento ou um processo. Dentre as vantagens de sua aplicação, pode-se citar:

- **Eficiência:** reduz o número de homem-hora de manutenção preventiva pela exatidão da localização da anormalidade e eliminando intervenções desnecessárias;
- **Sistemas mecânicos:** monitoramento de rolamentos, mancais, vazamentos de vapor, análise de isolamentos térmicos, extrusoras de plásticos, cabines de pintura, etc;

- **Atividades militares:** identificação de indivíduos, equipamentos e veículos em inspeções noturnas;
- **Sistemas elétricos:** identificação de contatos oxidados de seccionadoras e disjuntores, identificação de cordoalhas danificadas, sobreaquecimento em comutadores, identificação de falha de conexões e sobre carga de equipamentos;
- **Siderurgia:** análise de refratários, laminação de aço;
- **Produtividade:** as inspeções podem ser realizadas com equipamentos em pleno funcionamento sem a interferência na produção.

3.4 – Detectores e medidores de radiação

Devido à grande aplicação e o desenvolvimento tecnológico existe atualmente uma infinidade de instrumentos utilizados para a detecção de calor. Em função de sua aplicação, podem variar a sua forma construtiva, dimensão, precisão e, conseqüentemente, os seus custos.

a) Pirômetro de banda larga: Insere-se na classe dos medidores de temperatura de não-contato, também chamado de radiômetro. A radiação é coletada por um arranjo óptico e dirigido a um detector do tipo termopilha ou um circuito mais sofisticado, utilizando semicondutores, onde é gera do sinal elétrico que em seguida é amplificado e convertido em temperatura.

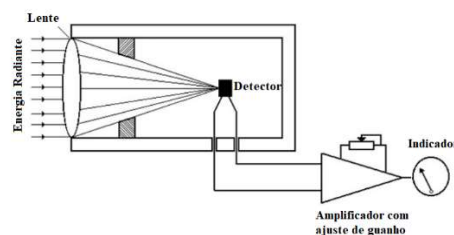


Figura 3.6 – Esquema pirômetro de banda larga

b) Pirômetro de banda estreita ou Pirômetro óptico: Se trata de um dispositivo que não necessita de contato direto possibilitando medir a temperatura de objetos muito quentes. Trata-se de um instrumento onde a luminosidade de um objeto é comparada

como luminosidade conhecida de uma fonte padrão a qual é convertida em temperatura. Os limites de utilização do pirômetro ótico podem variar de 750 a 2850 °C.



Figura 3.7 – Pirômetro Ótico

c) Sistema de imagem térmica por varredura (scanning): Também chamados de termovisores, são câmeras de vídeo com sistema de infravermelho as quais criam figuras eletrônicas a partir de um determinado cenário onde as diferentes cores ou tonalidades representam níveis de radiação térmica. Estes equipamentos que podem varrer (scanear) uma superfície em alta velocidade através de deflexões de espelhos. Através de detectores de varredura horizontais e verticais e um prisma com movimento rotativo, uma imagem termográfica pode ser reproduzida em alguns milissegundos.

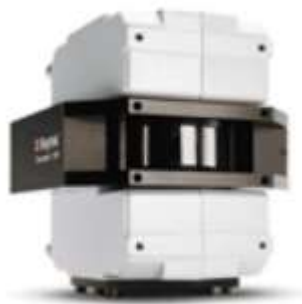


Figura 3.8 – Termovisor tipo Scanning

d) Termovisores matriciais: São os termovisores mais modernos com resolução de temperatura de até 0,05 °C podendo representar a emissão de radiação através de 256 cores ou tonalidades de cinza. A faixa de operação está entre -5 e 2000 °C. Não existe o mecanismo de espelhos rotativos, e por este motivo sua dimensão e peso

são muito menores, como mostra a Figura 3.9 – . Os detectores são fixos em grande número, sem necessidade de varreduras, monitorando pontualmente cada região durante todo o tempo da inspeção.



Figura 3.9 – Câmera termográfica FLIR

Geralmente as câmeras indicadas por fabricantes para termografia infravermelha aplicada à manutenção industrial são do tipo staring system, que têm a imagem projetada simultaneamente em todos os pixels do conjunto detector Figura 3.10. Esse sistema é conhecido também como FPA (matriz de plano focal, do inglês focal plane array). No FPA, os detectores são distribuídos em uma matriz de colunas e linhas e recebem simultaneamente toda a irradiação infravermelha direcionada pelo conjunto óptico.

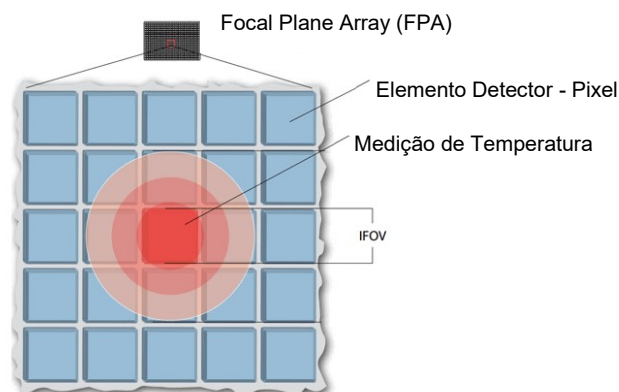


Figura 3.10 – Matriz de Plano Focal – FPA

Fonte: <https://www.flir.com.br>

Atualmente, os termovisores disponíveis no mercado indicados à aplicação em manutenção elétrica utilizam como detector, predominantemente, um microbolômetro não refrigerado.

Para câmeras FPA, duas variáveis devem ser elevadas em conta para se determinar as dimensões do campo de visão apropriadas e o tamanho mínimo do objeto a ser medido que é mensurável:

- o ângulo de visão (FOV – Field Of View - campo de visão ou ângulo de abertura de lente);
- o menor objeto identificável (IFOV – Identifiable Field of View).

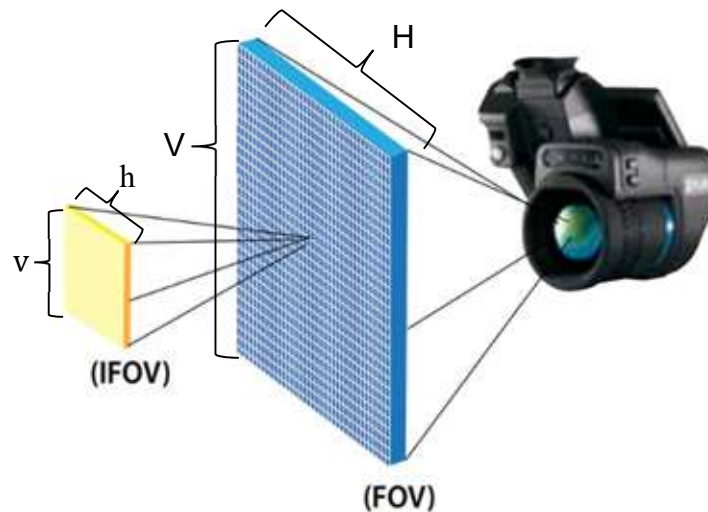


Figura 3.11 – Ilustração FOV e IFOV

Fonte: <https://www.flir.com.br>

Para se determinar a largura H e a altura V do campo de visão da câmera tomando-se como base o FOV da câmera, basta utilizar as seguintes expressões (BORTONI, SINISCALCHI e JARDINI, 2011):

$$H = 2 D \tan\left(\frac{\text{FOV}_h}{2}\right) \quad (3.7)$$

$$V = 2 D \tan\left(\frac{\text{FOV}_v}{2}\right) \quad (3.8)$$

Onde:

- D_{co} – Distância da câmera e o objeto (m);
- FOV_h – Ângulo FOV horizontal – (°);

FOV_v – Ângulo FOV vertical – (°).

O IFOV também pode ser determinado dividindo-se o FOV pelo número de pixels. Por exemplo, um termovisor com FOV de 25° e 320 pixels em uma dimensão vertical, terá IFOV de 1,36 mrad. Nestas condições, podemos determinar as dimensões do menor objeto identificável da seguinte forma:

$$h = 2 D \tan\left(\frac{FOV_h}{2 P_h}\right) \quad (3.9)$$

$$v = 2 D \tan\left(\frac{FOV_v}{2 P_v}\right) \quad (3.10)$$

P_h – Número de pixel horizontal;

P_v – Número de pixel vertical;

A Tabela 3.2 apresenta os dados técnicos do Termovisor *E40* fabricado pela *FLIR System*. Para capturar as imagens termográficas utilizadas neste trabalho esta mesma câmera foi empregada. A Figura 3.12 mostra as características externa do equipamento seguida de uma imagem termográfica como exemplo (Figura 3.13):

Tabela 3.2 – Dados técnicos da câmera

DADOS TÉCNICOS TERMOVISOR FLIR System – E40	
Faixa de medição	0 a 650 °C
Amplitude espectral	7,5 a 13,0 μm
Tipo de detector	Matriz de plano focal (FPA), com microbolômetro não refrigerado - 160 × 120 pixels
Precisão	±2 °C ou ±2% da leitura para temperaturas ambiente de 10 °C a 35 °C e temperatura de objetos acima de +0 °C
Campo de visão (FOV)	$FOV_{vertical}=25^\circ$ / $FOV_{Horizontal} =19^\circ$
Comprimento Focal	18 mm
Sensibilidade Térmica	<0,07 °C a +30 °C
Frequência de imagens	60Hz
Display	3,5 pol. LCD, 320 _{vertical} × 240 _{horizontal} pixels

Bateria	Aprox. 4 horas
Temperatura de funcionamento	-15 até 50 °C
Temperatura de armazenamento	-40 até 70 °C
Umidade de funcionamento e armazenamento	IEC 60068-2-30/24h, 95% de umidade relativa de +25 °C a +40 °C
Grau de proteção	IP 54 (IEC 60529)

Fonte: <https://www.flir.com.br/support/products/e40#Specifications>



Figura 3.12 – Termovisor *FLIR System E40*

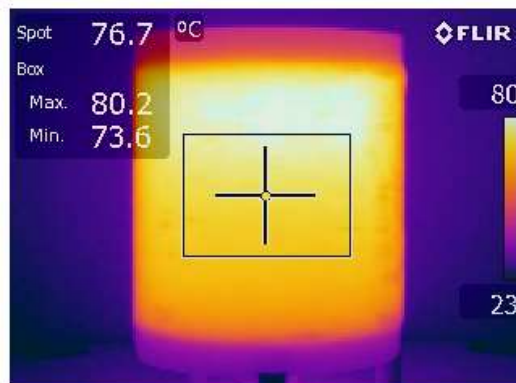


Figura 3.13 – Exemplo de imagem termográfica do reator protótipo

O manual do usuário da *FLIR Systems* apresenta as informações e regras a serem seguidas para melhorar a qualidade e precisão das imagens.

3.5 – Fontes de erro na medição infravermelha

Durante a realização das medições é necessário adotar procedimentos para evitar a obtenção de imagens com erros. Os fatores apresentados a seguir podem distorcer o resultado da medição infravermelha:

- Ajuste incorreto de emissividade;
- Ajuste incorreto da temperatura de radiação refletida (RTC);
- Imagem térmica desfocada. É muito importante focar a imagem no momento da captura, uma vez que o foco não pode ser modificado posteriormente;
- Distância de medição muito longa ou muito curta. Ao medir, é necessário respeitar a distância mínima de foco da câmera termográfica e escolher a menor distância de medição possível;
- Efeito de fontes externas de radiação (ex. luzes, sol, aquecedores, etc.);
- Mudança rápida da temperatura ambiente. Se houver mudanças na temperatura ambiente de frio para quente, há o risco de condensação nas lentes;
- Interpretação errônea da imagem térmica devido à falta ou desconhecimento do desenho do objeto medido. O tipo e desenho do objeto medido devem ser conhecidos;
- Ângulos de medição;
- Transmissividade (como em plásticos de filme fino).

3.6 – Determinação da temperatura de radiação refletida

Uma vez que foram evitadas todas as fontes possíveis de interferência que possam afetar a medição, a temperatura da radiação infravermelha refletida será a mesma da temperatura ambiente. Pode-se medir a temperatura ambiente com um termômetro, e com base nisso, obter a RTC do termovisor.

Outro meio de obtenção da temperatura da radiação refletida é através de um radiador Lambert que é um objeto que reflete a radiação incidente com a melhor difusão. Se a equipe de medição não dispor de tal objeto, um pedaço de alumínio amassado e depois desamassado é um substituto apropriado para o radiador Lambert, pois a folha tem elevada refletância e graças à estrutura que foi amassada, provoca reflexão difusa da radiação.

3.7 – Ajuste da emissividade

Para a determinação da emissividade da região que se pretende medir existem duas maneiras que estão descritas a seguir:

- a) Método com a câmera termográfica: Primeiramente deve-se fixar uma fita adesiva de emissividade conhecida no objeto a ser medido. Depois de um curto período de tempo, medir a temperatura da superfície do objeto na área coberta pela fita adesiva usando o termovisor com ajuste de emissividade da fita adesiva (geralmente igual 0,95) que será a temperatura de referência. Posteriormente deve-se ajustar o valor da emissividade até que o termovisor meça a mesma temperatura na área sem a fita em relação a temperatura de referência medida. A emissividade ajustada será a emissividade da superfície do objeto medido.
- b) Método usando termômetro de contato: Inicialmente deve-se medir a temperatura da superfície do objeto com o termômetro de contato. Depois será medida a temperatura da superfície com o termovisor com pré-ajuste da emissividade igual a 1. A diferença entre o valor da temperatura medida pelo termômetro de contato e o termovisor será o valor da emissividade. Abaixando gradualmente o ajuste de emissividade, a temperatura medida irá alterar até corresponder ao valor obtido na medição com o termômetro de contato. A emissividade ajustada corresponde é a emissividade da superfície do objeto medido.

Para os ensaios apresentados neste trabalho, foi realizado o ajuste da temperatura da radiação refletida pelo método do radiador Lambert com papel alumínio amassado. Já o ajuste da emissividade, Figura 3.14, foi realizado pelo método da câmera termográfica com termômetro de contato. Também foram seguidas, na medida do possível, as técnicas de termografia para melhorar a precisão das imagens.



Figura 3.14 – Ajuste da Emissividade

A Figura 3.15 apresenta os parâmetros de ajuste da câmera utilizados durante a realização das imagens, que basicamente são: a emissividade, distância entre o objeto e a câmera e a temperatura refletida.

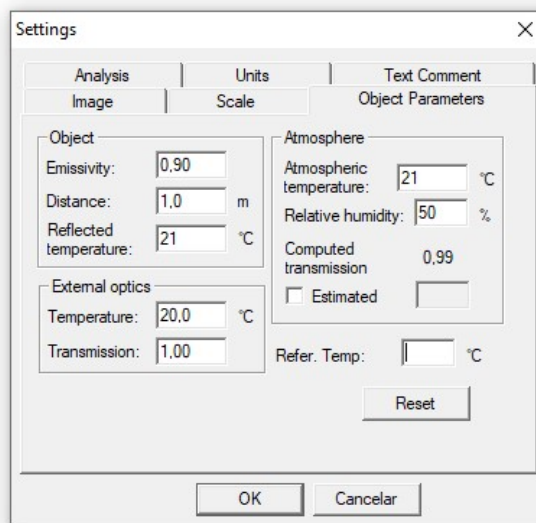


Figura 3.15 – Configurações da Câmera Termográfica

Capítulo 4 – MÉTODO PROPOSTO PARA MEDIÇÃO DE PERDAS

O método calorimétrico aliado às técnicas de termografia infravermelha já vem sendo empregado amplamente na determinação de rendimentos de hidrogeradores e determinação das perdas e rendimentos de motores elétricos (BORTONI, SINISCALCHI e JARDINI, 2011), (SINISCALCHI, 2009) (YAMACHITA, 2013). O método calorimétrico aplicado em reatores com núcleo de ar tipo seco de 1 cilindro baseia-se em determinar suas perdas através da medição da temperatura da superfície externa do equipamento partindo do princípio que a somatória das perdas do reator é transformada em calor. Essa metodologia se torna prática e unicamente aplicável em alguns casos devido às características de operação do sistema em que o equipamento está sendo empregado (ver item 6.6).

Por meio da equação fundamental da calorimetria, é possível obter as perdas totais geradas por um equipamento através da quantidade de calor trocado por um fluido refrigerante que o envolve. Este fluido ao sofrer uma variação na sua temperatura permite identificar tal variável. A equação que rege o conceito é:

$$P_e = m c (\theta_s - \theta_e) \quad (4.1)$$

Sendo:

P_e – Perdas no equipamento (kJ/s);

m – Corresponde a vazão mássica do fluído (kg/s);

c – Corresponde ao calor específico do fluído (kJ/Kg. °C);

θ_s – Temperatura de saída do fluído (°C);

θ_e – Temperatura de entrada do fluído (°C);

Neste contexto, as perdas descritas pela equação (4.1) representam o calor total dissipado englobando as trocas por condução, irradiação e convecção. Baseado no processo que ocorre nos reatores com núcleo de ar, as perdas por condução são

muito pequenas e podem ser desconsideradas. Excluindo o processo anterior, resta a convecção e a irradiação como únicos sistemas de troca de calor neste tipo de equipamento.

A convecção é classificada em dois tipos: A convecção natural, que é aquela que dissipa calor para o meio de maneira natural, e a convecção forçada, dissipando calor por meio de ventiladores. Exceto raras exceções, a convecção natural, frente à convecção forçada, é o processo mais envolvido no resfriamento da parte ativa dos reatores. Logo, a equação (4.2) se torna mais adequada para o cálculo das perdas nos reatores com núcleo ar tipo seco. A equação anterior juntamente com técnicas de medição de temperatura através da termografia infravermelha e processamento de imagens termográficas, obter as perdas totais do reator se torna um processo interessante.

As perdas por convecção natural e irradiação no reator acontecem por meio do aquecimento da parte ativa do reator em contato com o ar ambiente e sua equação é dada por:

$$P = h' A (T_s - T_a) \quad (4.2)$$

Onde:

P – Perdas Totais por convecção e irradiação (W);

A – Área da superfície (m²);

T_s – Temperatura da superfície (°C);

T_a – Temperatura do ambiente (°C);

h' – Coeficiente de transferência de calor (W/m² · °C);

Inicialmente, para a determinação das perdas liberadas pela superfície externa é preciso calcular a diferença de temperatura entre a superfície do reator e a temperatura do ar ambiente, que é o meio refrigerante. A temperatura média da superfície do equipamento será determinada através de uma técnica termográfica. Já a temperatura ambiente será obtida com o uso de sensores instalados no laboratório.

Assim, com o uso da termografia infravermelha é possível transformar as imagens térmicas, que fornecem as temperaturas da superfície, em taxas de perda de energia possibilitando determinar as perdas do reator de núcleo de ar.

Capítulo 5 – CONSTRUÇÃO E MEDIÇÕES DE REATORES COM NÚCLEO DE AR – PROTÓTIPOS

Este capítulo traz uma visão geral das etapas que abordam a construção de um reator de núcleo de ar tipo seco. Para verificar o método calorimétrico na obtenção das perdas totais dos reatores com núcleo de ar, protótipos com características semelhantes aos reatores utilizados em campo são necessários para fazer uma boa avaliação do método. À vista disto, os tópicos seguintes concentram-se na concepção e elaboração dos protótipos empregados na validação da metodologia, alvo do trabalho. Apesar da abordagem neste capítulo convergir para a construção de protótipos, de forma geral, os reatores atuais são concebidos com os mesmos critérios.

O conteúdo do capítulo inclui desde o programa de cálculo utilizado até os ensaios executados na obtenção dos parâmetros de referência. Os tópicos abordados são:

- Programa de cálculo;
- Especificações dos protótipos;
- Construção dos protótipos;
- Medições nos reatores protótipos;
- Ensaio de elevação de temperatura;
- Determinação da temperatura média do enrolamento pelo método da resistência.

5.1 – Programa de cálculo

No Capítulo 2 foi demonstrado os princípios e leis que regem o cálculo dos parâmetros de um reator de núcleo de ar. Utilizando-se de tais processos, foi desenvolvido um curto programa de cálculo de reatores com núcleo de ar onde os procedimentos de cálculos foram implementados.

Devido à complexidade dos cálculos de indutância e perdas principalmente em se tratando de reatores de mais de uma camada, a necessidade de um software de cálculo de reatores se faz praticamente indispensável. Benefícios como a redução do

tempo para cálculo, simplificação para se calcular reatores de mais de uma camada, possibilidade de comparação entre reatores, padronização para comparação entre dados teóricos e práticos, possibilidade de ajustes e evoluções, precisão e fidelidade potencializaram a necessidade de desenvolver um sistema de cálculo.

O programa, Figura 5.1, foi desenvolvido especificamente para reatores de 1 cilindro e 3 camadas já que a metodologia aplicada visa contemplar reatores que possuem um cilindro.

Figura 5.1 – Programa de Cálculo de Reatores

Segue abaixo um resumo de cada elemento dentro do sistema de cálculo:

Especificação do Reator

- **Indutância:** valor desejado de indutância para o reator em questão;
- **Corrente Nominal:** campo deve ser preenchido com o valor da corrente que se espera fluir através do reator nas condições nominais;
- **Frequência:** 50 Hz ou 60 Hz, frequências comumente adotadas;
- **Diâmetro do tubo (D):** as espiras do reator serão bobinadas em torno do diâmetro requerido. Tem um impacto direto no número das espiras calculadas e, para um mesmo valor de indutância, quanto maior o diâmetro menor número de espiras serão necessárias;

- *Temperatura ambiente*: é o nome dado à temperatura do ar no local onde o reator será instalado ou testado.

Configuração do enrolamento

- *Material*: usualmente, em escala industrial, os enrolamentos dos reatores são construídos de alumínio ou cobre, cada qual com sua vantagem e desvantagem;
- *Fio (d)*: bitola do fio utilizado nas camadas do reator. Traz um impacto mais proeminente na temperatura média do equipamento;
- *Isolamento (e)*: espessura do isolamento das espiras;
- *Fibra Interna*: espessura da camada interna de fibra de vidro e está relacionada a rigidez estrutural do reator;
- *Fibra externa*: espessura da fibra que irá fazer o revestimento externo do reator e também está relacionado a rigidez estrutural do equipamento.

Dados Físicos

Uma vez realizado a entrada de dados para a inicialização do cálculo final do reator, o programa disponibilizará as informações do projeto necessários para a fabricação do protótipo: diâmetro interno e externo, altura do enrolamento, seção total e número de espiras de cada camada.

Dados de Fabricação

Fabricar os protótipos de reatores com núcleo de ar exatamente segundo os resultados do campo *Dados Físicos* tornar-se em uma tarefa extremamente trabalhosa. Dificuldade em atingir exatamente o Diâmetro do tubo (D), no momento da fabricação, assim como adição e subtração no número de espiras pode impactar significativamente os valores já calculados e exibidos no campo *Relatório Elétrico*. Assim, o campo *Dados de Fabricação* foi desenvolvido para atualizar o relatório elétrico segundo os valores reais de fabricação após a montagem do reator.

Relatório Elétrico

O programa trata também de disponibilizar o relatório elétrico do reator calculado/atualizado. Os dados de interesse servem para comparação com os dados elétricos levantados no momento do teste do reator em laboratório. Os dados apresentados são: - Indutância; Corrente de Projeto; Tensão no Reator; Temperatura Média do reator; Resistência CC a temperatura Ambiente; Resistência CC na temperatura média do enrolamento; Resistência CA na temperatura média do enrolamento; Perdas por Efeito Joule; Perdas por Efeito Pelicular; Perdas por Efeito de Proximidade e Triângulo de Potência.

5.2 – Especificações dos protótipos

Após várias simulações realizadas com o objetivo de adequar os melhores protótipos dentro da potência disponível em laboratório e disponibilidades de equipamentos para a construção dos mesmos, foram calculados 3 reatores protótipos cuja especificações atendem o propósito do trabalho.

Em máquinas elétricas como transformadores, motores e geradores é comum verificar temperaturas de trabalho em regime permanente em torno 100 °C. Os reatores com núcleo de ar não se diferenciam neste ponto pois possuem um sistema de isolamento semelhante. Com interesse de simular condições térmicas parecidas a que os reatores com núcleo de ar são submetidos em campo, os três reatores protótipos foram calculados para atingir a temperatura de 100 °C. Além da simplicidade de se obter esta temperatura em laboratório, esta padronização simplifica a análise futura dos dados e serve como uma boa referência para um eventual estudo de vida útil.

A Tabela 5.1 traz os dados teóricos, construtivos e elétricos, tomados como base para a produção dos equipamentos. Construtivamente, os protótipos se diferenciam no número de camadas paralelas no único cilindro. Esta diferença tem como objetivo mostrar a eficácia do método frente a várias configurações.

Tabela 5.1 – Especificações iniciais

	Especificações Iniciais - Entrada de Dados		
	Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3
Indutância (H)	1,5	1,5	1,5
Corrente Nominal (A)	25,80	36,87	45,28
Frequência (Hz)	60	60	60
Diâmetro Interno (mm)	250	250	250
Temperatura Ambiente (°C)	23,8	21,2	22,2
Material do Condutor	Alumínio	Alumínio	Alumínio
Fio (AWG)	10	10	10
Isolamento (mm)	Esmalte -0,05	Esmalte -0,05	Esmalte -0,05
Número de Camadas	1	2	3
Fibra Interna (mm)	1	1	1
Fibra externa (mm)	1	1	1
Meta de Temperatura (°C)	100	100	100

Com os dados da Tabela 5.1 como as entradas de dados para a inicialização dos cálculos dos reatores, as Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4 apresentam os resultados calculados pela rotina desenvolvida:

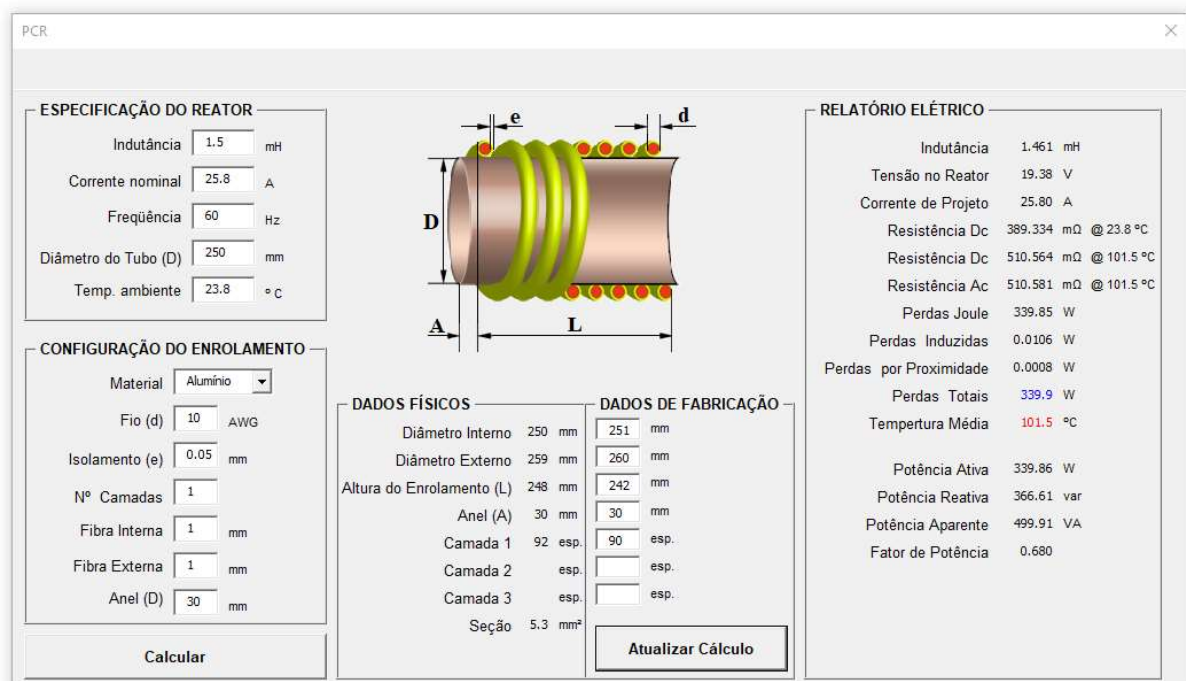


Figura 5.2 – Cálculo do Protótipo 1

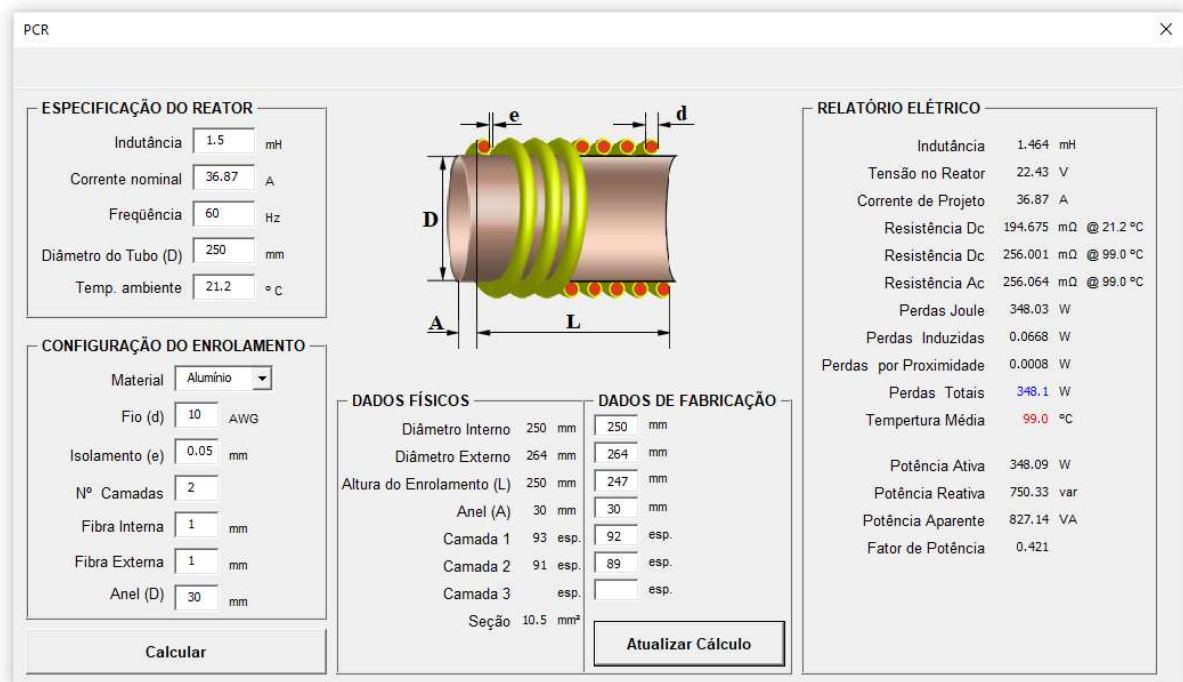


Figura 5.3 – Cálculo do Protótipo 2

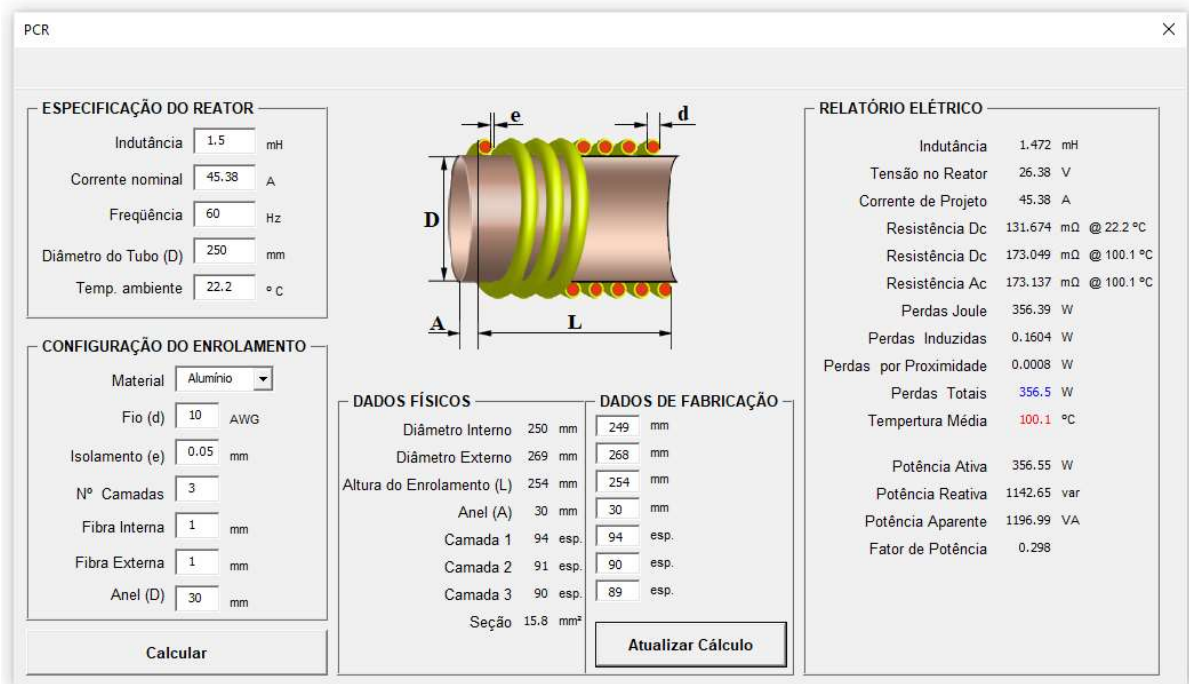


Figura 5.4 – Cálculo do Protótipo 3

Com os dados teóricos calculados, os requisitos necessários para construção dos protótipos estão disponíveis e abre caminho para a fabricação.

5.3 – Construção dos protótipos

A tecnologia de reatores do tipo seco tem sido empregada desde o início de 1900. A tecnologia era baseada em conceitos de construção de "estilo aberto", consistindo de enrolamentos com ar isolante entre as espiras. As espiras eram fixadas por vários suportes feitos de concreto ou de material cerâmico a fim de suportarem os esforços mecânicos oriundos principalmente de curto-circuitos. A aplicação de tais reatores era restrita a baixas potências e eram instalados principalmente em ambientes fechados. Esta tecnologia já se encontra praticamente extinta do mercado do sistema elétrico.



Figura 5.5 – Reatores antigos

Em meados dos 60, a impregnação completa e encapsulamento dos enrolamentos foram introduzidos em detrimento da tecnologia anterior. A utilização de novas matérias de isolamentos e novos métodos de encapsulamento dos enrolamentos facilitou drasticamente a fabricação dos reatores em escala industrial, além de possibilitar que os reatores fossem instalados em ambientes mais agressivos. Trouxe também uma facilidade no uso de reatores de tipo seco a níveis mais altos de tensão e potência. Mediante as colocações anteriores, é válido fazer uma breve abordagem da fabricação dos reatores assim como os seus componentes.

Devido a fatores industriais na metodologia de fabricação, os reatores com núcleo de ar são, em sua maioria, fabricados no formato cilíndrico e raramente são vistos em outro formato. Excluindo complexidades particulares de projetos específicos, a fabricação de reatores pode ser resumida em fases bem definidas.

Nesta seção será apresentado um breve descritivo dos passos que são adotados para a concepção de reatores com núcleo de ar tipo seco encapsulados conforme Figura 5.6.

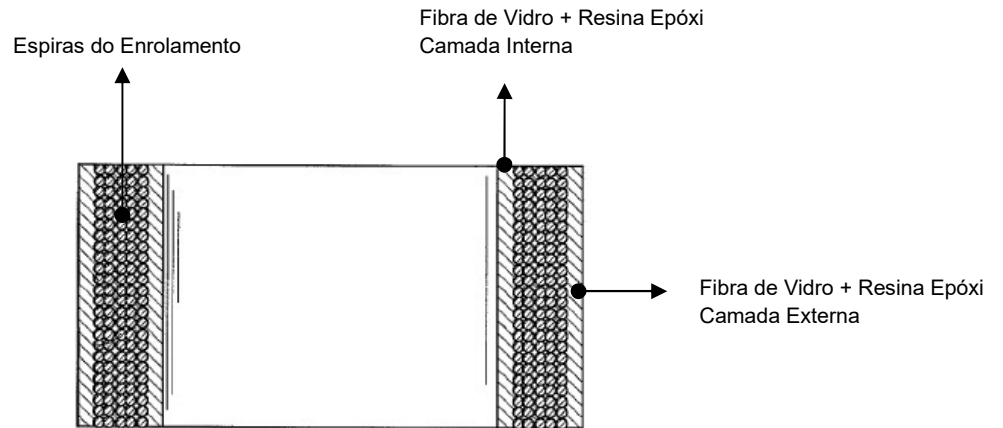


Figura 5.6 – Corte vertical no reator

- 1. Definição do gabarito:** Os reatores são fabricados obedecendo uma ordem lógica que busca melhorar o rendimento necessário para um processo produtivo em alta escala. Com o propósito de obedecer a eficiência, os reatores são sempre bobinados de dentro para fora no sentido radial, ou seja, do enrolamento mais interno para o enrolamento externo. Então, deve-se primeiramente conhecer o diâmetro interno do equipamento com o objetivo de adotar um gabarito adequado que atenda o início da bobinagem. Em geral, os gabaritos são elaborados de objetos cilíndricos feitos de fibra de vidro pré-moldados e também podem ser de policloreto de polivinila (PVC). Em processos fabris encontra-se gabaritos preparados de metalon fixados, em uma configuração paralela, para formar um cilindro. Em síntese, o gabarito tem por finalidade apenas servir de objeto para moldar a primeira camada interna de fibra de vidro impregnada com resina epóxi, base interna do reator. A cruzeta, parte fundamental na distribuição de corrente nos enrolamentos, é fixada juntamente com o gabarito antes que se inicie a bobinagem.
- 2. Camada interna:** A próxima etapa da operação é a aplicação do primeiro revestimento interno do reator. A tecnologia atual utiliza-se de fibra de vidro impregnada com resina epóxi. Neste contexto, existem procedimentos distintos para realização da aplicação da mistura a superfície do gabarito. Nos processos industriais emprega-se fios de fibra de vidro torcidos entre si formando cordões. Estes cordões são encharcados com

resina epóxi líquida e então enrolados ao redor do gabarito, conforme Figura 5.7. A espessura desta primeira camada de fibra está relacionada aos esforços mecânicos que o reator será submetido durante, por exemplo, um curto-circuito na sua vida útil. Uma boa aplicação também resulta em impactos positivos na prevenção dos efeitos que intempéries podem causar no equipamento.

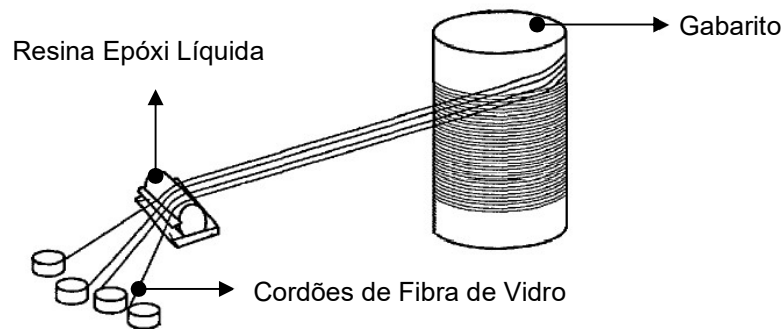


Figura 5.7 – Sistema de bobinagem do reator

3. Enrolamento: Os reatores com núcleo de ar são, em sua maioria, constituídos de enrolamentos compostos de alumínio. Em raras exceções o cobre também pode ser utilizado para redução de perdas joules. Em se tratando do perfil da seção transversal do cabo, este pode assumir vários formatos como: redondo, quadrado, retangular ou flat, sendo rígidos ou flexíveis. Por questões práticas, o perfil mais empregado é o redondo-rígido com bitolas variando de 4 AWG até 15 AWG. Um dos pontos mais importantes do enrolamento é o tipo do isolamento a qual o fio é recoberto. Este componente tem o intuito de realizar o isolamento entre as espiras adjacentes evitando um possível contato entre elas. Pela responsabilidade em realizar o isolamento e proteger toda a extensão do fio, o isolamento está sujeito a exigências dielétricas. Por sua vez, o isolamento tem que ser capaz de suportar altas temperaturas, o que demanda uma boa qualidade do material de fabricação. Não muito diferente de motores e geradores elétricos, o isolamento pode ser constituído de papel Kraft, esmalte, aramida e Nomex®, cada qual com suas peculiaridades térmicas e dielétricas. A classe de temperatura de um reator de núcleo de ar é ditada em função do material utilizado como isolante que geralmente se enquadra nas classes B (130°C), F (155°C) e H (180°C). Definido o fio e seu isolamento mais adequados, a primeira camada de espiras já pode ser bobinada na camada interna de

fibra. Vale ainda salientar que esta camada de fio é bobinada com a fibra e resina ainda úmidas.



Figura 5.8 – Exemplo de fio de alumínio isolado com Nomex®

Na sequência, as demais camadas de enrolamentos são bobinadas uma sobre as outras tracionadas adequadamente e sem a necessidade de camadas intermediárias de fibra de vidro. Ao término, uma próxima camada de fibra de vidro é depositada sobre o último enrolamento, com espessura estabelecida pelo projeto segundo os esforços mecânicos.



Figura 5.9 – Enrolamento do reator de um cilindro / duas camadas

4. Cilindros e espaçadores: Para os reatores que possuam mais de um cilindro, o processo é continuado fixando espaçadores na face externa do primeiro cilindro. Forma-se então, dutos de resfriamento tanto para a face externa do primeiro cilindro quanto para a face interna no segundo cilindro. Os espaçadores também são fabricados de resina epóxi, ideais para isolar as quedas de tensões verticais e horizontais a que estão sujeitos. Variando a espessura dos espaçadores aumenta-se o resfriamento da parte intermediária do reator. Porém, há um acréscimo das dimensões externas e um eventual aumento de peso.

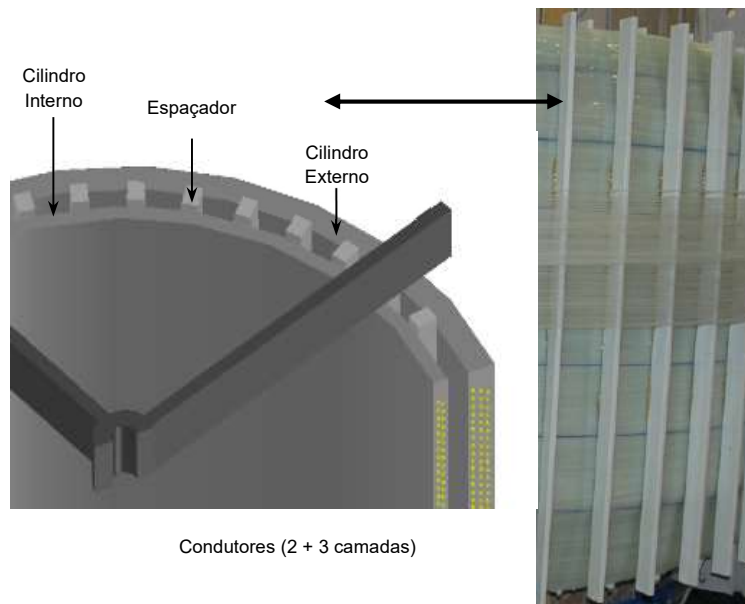


Figura 5.10 – Espaçadores entre cilindros

- 5. Forno e cura da resina epóxi:** Bobinados tantos cilindros quanto forem necessários, a extensão externa do aparelho é igualmente acabada com fibra de vidro impregnada com resina epóxi. Neste ponto, o conjunto está pronto para ser direcionado ao forno em um processo isotérmico de 80°C a 100°C a fim de realizar a cura da resina epóxi e conseqüentemente o enrijecimento de todo o conjunto. Ao fim de aproximadamente 12 horas, o conjunto pode ser retirado do forno viabilizando o fácil manuseio do equipamento. Com a parte ativa já rígida, o gabarito pode ser retirado.
- 6. Terminais e acabamento:** Finalizado o enrolamento, as terminações de cada camada já podem ser soldadas nos braços da cruzeta inferior e superior. Também na fase de acabamento serão colocados os pedestais para fixação dos isoladores. No

final, um acabamento superficial do reator é realizado com a aplicação de tintas especiais.

- 7. Ensaios elétricos:** Neste momento o reator é conduzido ao laboratório específico de testes para ser submetido aos ensaios normalizados que inclui: ensaios dielétricos de alta tensão, medição da indutância e resistência CC, verificações das perdas e possíveis ensaios de tipo.

Seguindo a linha dos processos de fabricação descritos, os protótipos foram implementados de forma a replicar a produção de reatores concebidos em escala industrial.

Na frequência fundamental e para reatores de pequeno e médio porte, as perdas envolvidas na cruzeta, responsável por conectar os enrolamentos aos terminais, tem uma pequena participação no total das perdas globais do reator. Essas perdas dificilmente ultrapassam 0,5% das perdas totais envolvidas em um equipamento. Assim, os protótipos foram montados sem a participação das cruzetas, o que não impacta significativamente o objetivo do trabalho.

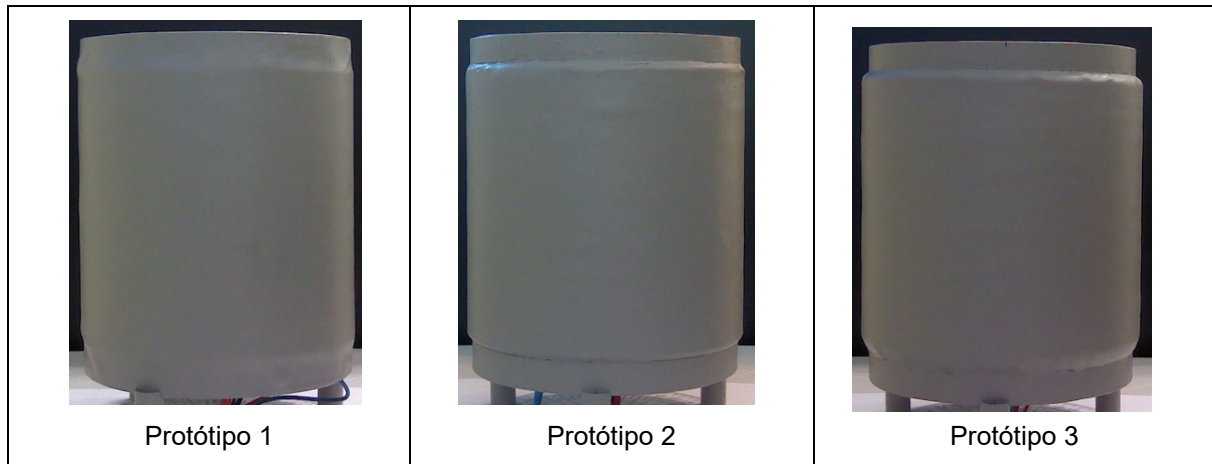
A Tabela 5.2 apresenta os componentes e processos utilizados nos reatores protótipos:

Tabela 5.2 – Componentes e materiais dos reatores protótipos

COMPONENTE	MATERIAL / PROCESSO
Material do Gabarito	Tubo 250 mm de Policloreto de Polivinila - PVC
Tipo de fibra de vidro	Tecido bidirecional de fibra de vidro tipo 300
Resina Epoxi e endurecedor	Resina Epoxi 2001-Transparente com Endurecedor 3154 - Redelease
Material do Condutor	Alumínio
Isolamento do condutor	Esmalte politetrafluoretileno classe B (130°C)
Método da Cura da Resina	Forno em 80°C por 12 horas
Acabamento da superfície	Tinta poliuretânica alifática - cor cinza Munsell N6.5
Local dos ensaios	Laboratório Excen

A seguir estão as fotos dos reatores protótipos já fabricados:

Tabela 5.3 – Fotos dos reatores protótipos



5.4 – Ensaio de rotina nos reatores protótipos

Finalizado a construção dos reatores com núcleo de ar que servirão de protótipos nos estudos, cabe agora realizar as medições dos parâmetros elétricos envolvidos na concepção do equipamento. Os ensaios a seguir foram realizados no laboratório do EXCEN – Centro de Excelência em Eficiência Energética localizada no campus da UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá.



Figura 5.11 – EXCEN – Centro de Excelência em Eficiência Energética

Auxiliados pelos métodos, equipamentos e circuitos descritos no item 2.8 do Capítulo 2, os dados reais de indutância, resistência CC, resistência CA e perdas nas respectivas temperaturas de referência foram medidas.

Conforme medição regulada no item 11.2 da norma IEC-60076-1 (2011), a Tabela 5.4 exibe os valores obtidos de R_{cc} :

Tabela 5.4 – Medição de R_{cc}

Protótipos	Valores Medidos	Valores Extrapolados
	R_{cc} (m Ω)	R_{cc} (m Ω)
1	388,0 @ 21,0 °C	392,4 @ 23,7 °C
2	196,7 @ 22,0 °C	196,1 @ 21,2 °C
3	131,8 @ 22,0 °C	132,0 @ 22,2 °C

Conectando devidamente o wattímetro no circuito e aplicando uma tensão e corrente CA de 60Hz é possível obter os demais dados descritos no item 2.8.2. Vale ainda destacar que a corrente injetada em cada protótipo não corresponde a corrente nominal de cada reator o que não altera em nada as medições necessárias de indutância e resistência CA segundo item 7.8.6 da norma IEC-60076-6 (2007). Neste caso, as perdas devem ser corrigidas para corrente nominal e para a temperatura de referência.

Tabela 5.5 – Medição de Indutância, R_{ca} e Perdas totais

Protótipos	Valores Medidos					Valores Extrapolados		
	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Indutância (H)	R_{ca} (m Ω)	R_{ca} (m Ω)	Perdas Totais (W)	
1	7,014	10,476	42,910	1,442	390,992 @ 22,9 °C	514,612 @ 101,5 °C	342,546 @ 101,5 °C	
2	5,887	10,063	19,804	1,463	195,568 @ 20,5 °C	257,924 @ 99,0 °C	350,621 @ 99,0 °C	
3	5,742	10,113	13,458	1,465	131,589 @ 21,4 °C	173,500 @ 100,1 °C	357,306 @ 100,1 °C	

Agora pode-se realizar as comparações do projeto calculado em relação ao finalizado. Neste ponto é possível identificar erros grosseiros como adição ou subtração de espiras, espiras em curto-circuito ou camadas mal conectadas.

Tabela 5.6 – Erros calculados vs medidos – Protótipo 1

	Protótipo 1		
	Calculado	Medido	Erro
Indutância (H)	1,461	1,442	-1,322%
R_{cc} @ 23,8°C (m Ω)	389,3	392,4	0,786%
R_{ca} @ 101,5°C (m Ω)	510,581	514,612	0,789%
Perdas Totais (W)	339,9	342,55	0,790%

Tabela 5.7 – Erros calculados vs medidos – Protótipo 2

	Protótipo 2		
	Calculado	Medido	Erro
Indutância (H)	1,464	1,463	-0,101%
Rcc @ 21,2°C (mΩ)	194,7	196,1	0,723%
Rca @ 99,0°C (mΩ)	256,064	257,924	0,726%
Perdas Totais (W)	348,1	350,62	0,727%

Tabela 5.8 – Erros calculados vs medidos – Protótipo 3

	Protótipo 3		
	Calculado	Medido	Erro
Indutância (H)	1,472	1,465	-0,470%
Rcc @ 22,2°C (mΩ)	131,7	132,0	0,213%
Rca @ 100,1°C (mΩ)	173,137	173,500	0,209%
Perdas Totais (W)	356,5	357,30	0,209%

Analisando a Tabela 5.6, Tabela 5.7, Tabela 5.8 e os erros inerentes, é possível concluir que os desvios estão dentro do esperado e os reatores se encontram em condições de serem submetidos aos ensaios de elevação de temperatura.

A aplicação dos ensaios dielétricos citados no item 2.8.3 não foram realizados pois não contribuem para o objetivo deste trabalho.

5.5 – Ensaio de elevação de temperatura

O método calorimétrico consiste em fazer as medições das perdas totais do reator na temperatura nominal atingida pelo equipamento sob corrente de projeto. Desta forma, o ensaio de elevação, classificada com ensaio de tipo na norma IEC-60076-6 (2007), se faz indispensável para a metodologia investigada. O ensaio tem como principal finalidade a obtenção da temperatura final que o reator alcançará tendo como base a injeção da corrente nominal projetada nos seus enrolamentos. Visa replicar, o mais próximo possível, as condições elétricas ao que o reator será submetido.

Neste ensaio é possível obter importantes parâmetros como: temperatura média do equipamento, identificação de pontos quentes, fonte de base de dados para programas de cálculo, reconhecimento do cilindro mais aquecido e a constante de tempo para se alcançar 63,2% da temperatura nominal do reator. Considerando a gama dos ensaios de tipo inclusos em normas, este talvez seja o teste mais requisitado por demonstrar o comportamento do equipamento frente às principais especificações. Visa garantir, de forma indireta, o tempo de vida útil do equipamento decorrente da classe de temperatura a qual o reator foi projetado.

Neste trabalho, o ensaio de elevação de temperatura contribuirá servindo como a principal base de comparação entre as perdas concretas dos protótipos e as obtidas pela técnica apresentada. Do ensaio será retirado as seguintes informações relevantes para o trabalho:

- Perdas totais na temperatura nominal dos reatores;
- Temperatura média dos protótipos via o método das resistências.

5.5.1- Circuito do ensaio de elevação de temperatura

Em se tratando de circuito de energização do equipamento, a norma IEC-60076-2 (2011) exige que o teste seja realizado com corrente não inferior a 90% da corrente nominal. Esta imposição exige fontes robustas para fornecer a potência necessária na execução do ensaio. Na prática, utiliza-se uma fonte de tensão tipo variável ou variador. A fonte variável possibilita atender uma gama maior de reatores cada qual com sua tensão nominal. Também proporciona um ajuste fino na tensão/corrente injetada no equipamento. Desse modo, a fonte de tensão se torna o principal componente do circuito e o mais oneroso.

Em sistema industriais, sabendo-se da característica passiva do reator, realiza-se compensações reativas a fim de otimizar os custos do circuito. Como técnica, para se reduzir a potência aparente da fonte, é empregado compensações série e/ou paralelo aplicando-se capacitores de potência no circuito do reator. Quando a compensação é bem aplicada pode-se alcançar a ressonância entre os elementos reativos e capacitivos, reduzindo substancialmente a potência exigida da alimentação.

Nos ensaios realizados nos protótipos, por se tratar de elementos que necessitam de baixas correntes nominais, o artifício da compensação pode ser ignorado. Imediatamente abaixo contém o circuito utilizado na energização dos reatores para os ensaios de elevação de temperatura e a Figura 5.13 apresenta uma foto ilustrativa:

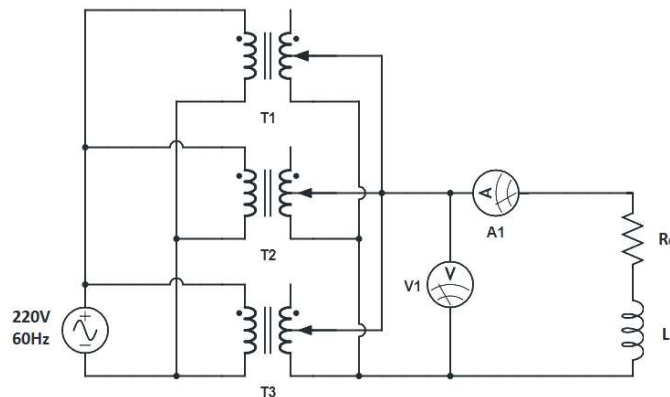


Figura 5.12 – Circuito de alimentação dos protótipos

Para a execução dos ensaios, a norma IEC-60076-2 (2011) exige que algumas etapas devem ser obrigatoriamente cumpridas para um bom levantamento dos dados:

- Medição de resistência R_{cc} do reator na temperatura ambiente deve ser medida antes da energização do circuito;
- No decorrer no ensaio a temperatura ambiente deve ser monitorada e registrada;
- O objeto de ensaio deve permanecer em um mesmo ponto de referência durante todo o período de teste assim como os sensores de medição de temperatura;
- Para cada elemento a ser testado, a tensão e frequência de alimentação devem permanecer constantes do início ao fim do ensaio;
- Deve ser considerado que o reator entrou em regime permanente se a temperatura não variar mais de 1°C no período de 1 hora.

Obedecendo os critérios acima, os ensaios de elevação de temperatura em cada protótipo foram realizados através do circuito a seguir:

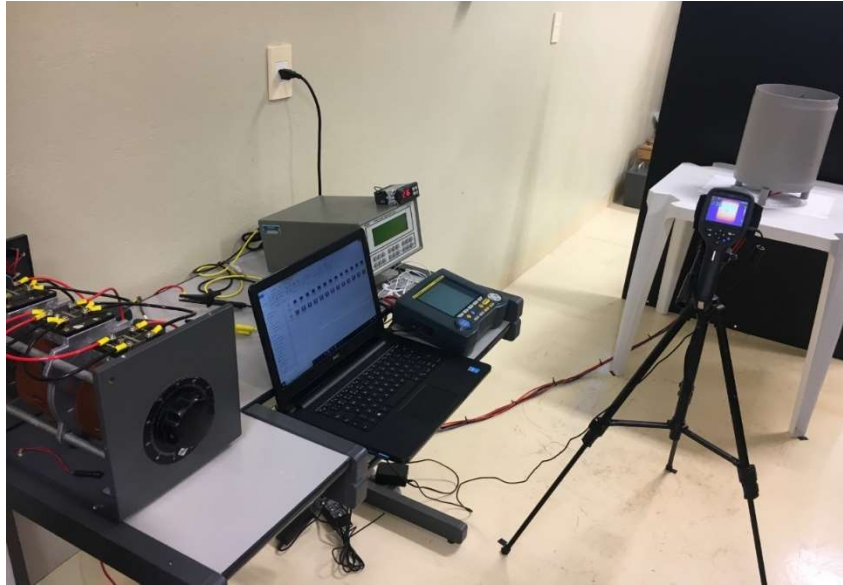


Figura 5.13 – Configuração do ensaio no laboratório

Os equipamentos utilizados são:

- Variador: AUJE - Entrada: 220V Saída:0-220V Potência: 10 kVA
- Wattímetro: VOLTECH - Three Phase Power Analyzer PM300
- Medidor de Temperatura ambiente: COEL - TLZ10
- Microhmímetro: MEGABRAS - MPK256
- Câmera Termográfica: FLIR – E40
- Trena 10 Metros: Starrett - KTS1-10ME

5.5.2 – Medição de resistência Rcc dos reatores protótipos na temperatura ambiente

Na Tabela 5.9 estão os valores das resistências antes da energização e os valores de corrente e tensão empregada em cada protótipo:

Tabela 5.9 – Dados do circuito de elevação de temperatura

	Dados do Circuito Elevação de Temperatura		
	Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3
L (mH)	1,442	1,463	1,465
RCC (mΩ)	391,0 @ 22,9 °C	195,5 @ 20,5 °C	131,5 @ 21,4 °C
I (A)	25,80	36,87	45,38
V(v)	19,33	22,47	26,29

5.5.3 – Medições e gráficos do ensaio de elevação de temperatura

Posicionando a câmera termográfica conforme Figura 5.13 e ajustando o dispositivo de acordo com a Figura 3.15, cada protótipo foi energizado com sua corrente nominal segundo a Tabela 5.9. Com a câmera FLIR E40, a cada 5 minutos foi registrado a temperatura dos reatores que era exibida na tela. O ponto central foi de cada protótipo foi adotado como referência. A temperatura ambiente também foi memorizada. Os dados foram registrados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Dados dos gráficos do ensaio de elevação de temperatura

Tempo de Ensaio	Protótipo 1		Protótipo 2		Protótipo 3	
	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura Reator (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura Reator (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura Reator (°C)
00:00	22,9	23,5	20,5	20,5	21,4	22,2
00:05	23,1	59,8	20,4	44,3	21,5	41,1
00:10	23,2	79,4	20,6	61,7	21,8	55,7
00:15	23,3	89,2	20,8	73,6	22,0	66,8
00:20	23,4	95,1	21,0	81,3	22,1	75,2
00:25	23,7	99,1	21,0	87,1	21,9	81,7
00:30	23,7	100,3	21,1	90,7	22,0	87,0
00:35	23,6	101,2	21,3	93,4	22,2	90,3
00:40	23,8	101,1	21,4	96,0	21,7	92,7
00:45	23,7	101,1	21,5	97,6	21,9	94,6
00:50	23,7	100,9	21,1	98,6	21,9	95,8
00:55	23,6	101,0	21,2	98,8	22,0	97,0
01:00	23,7	100,8	21,3	99,0	22,1	97,8
01:05	23,8	100,9	21,4	99,0	22,1	98,5
01:10	23,8	101,0	21,5	99,1	22,0	99,0
01:15	23,7	101,1	21,1	99,2	22,1	98,9
01:20	23,7	101,0	21,2	99,1	22,2	99,0
01:25	23,6	101,2	21,2	99,0	22,0	98,9
01:30	23,7	101,0	21,3	99,1	22,1	99,2
01:35	23,7	101,1	21,4	99,2	22,2	99,4
01:40	23,6	101,0	21,2	99,2	22,1	99,5
01:45	23,7	101,1	21,3	99,1	22,0	99,4
01:50	-	-	21,4	99,0	22,1	99,4
01:55	-	-	21,2	99,1	22,1	99,5
02:00	-	-	-	-	22,2	99,4
02:05	-	-	-	-	22,1	99,4
02:10	-	-	-	-	22,2	99,5
02:15	-	-	-	-	22,1	99,5

De forma gráfica:

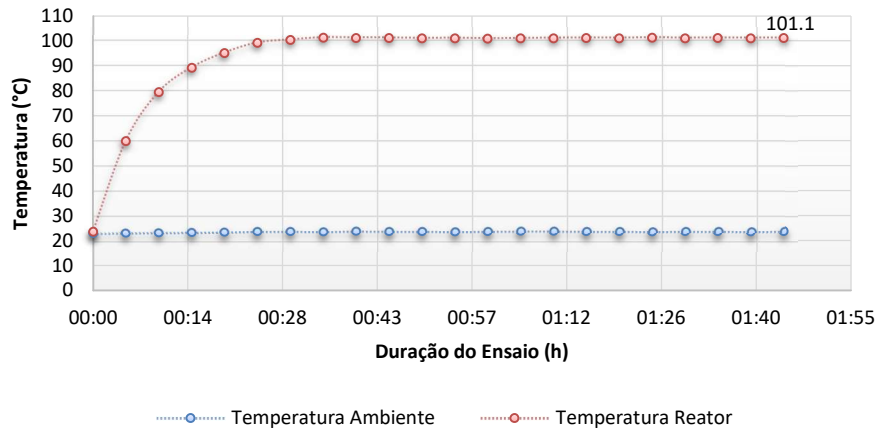


Figura 5.14 – Elevação de temperatura do Protótipo 1

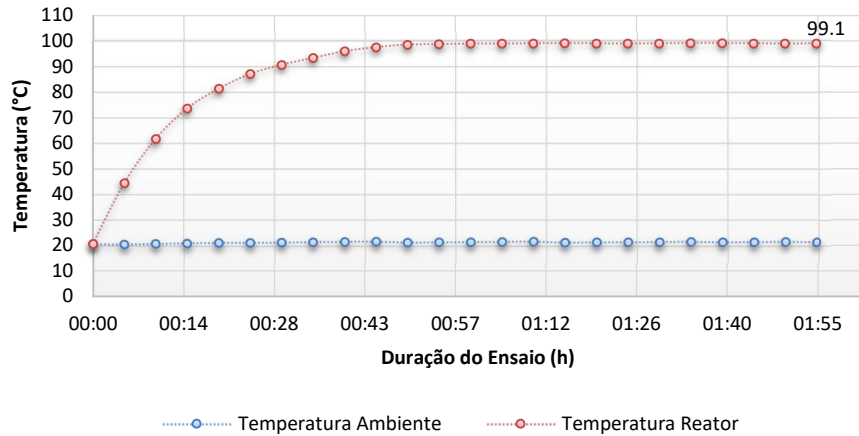


Figura 5.15 – Elevação de temperatura do Protótipo 2

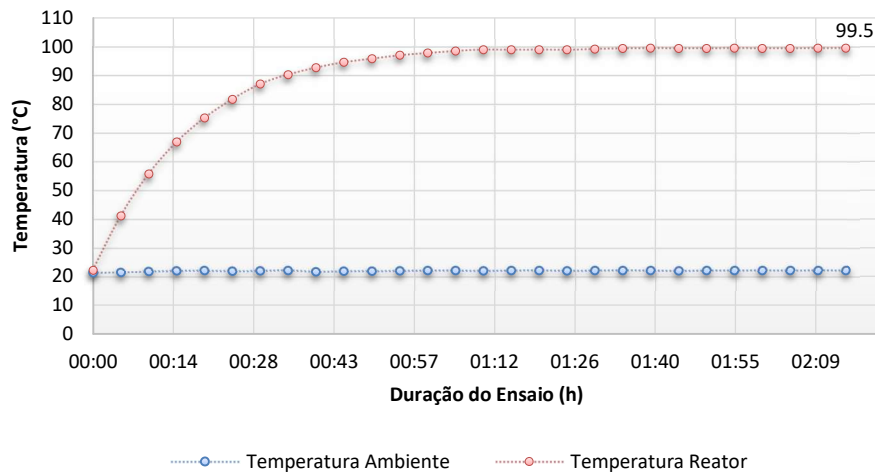


Figura 5.16 – Elevação de temperatura do Protótipo 3

Segundos antes do desligamento de cada energização, foram realizadas novas medições de indutância e perdas totais. Essas perdas, na última coluna da Tabela 5.11, serão consideradas como os valores de referência para validação da metodologia proposta.

Tabela 5.11 – Perdas medidas na temperatura nominal

Protótipos	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Indutância (H)	Perdas Totais (W)
1	19,327	25,80	342,9	1,44	342,9 ± 0,7 @ 101,1 °C
2	22,470	36,87	351,4	1,46	351,4 ± 0,7 @ 99,1 °C
3	26,290	45,38	358,0	1,47	358,0 ± 0,7 @ 99,5 °C

5.6 – Determinação da temperatura média do enrolamento pelo método da resistência

O método da resistência, segundo o item 7.7 da norma IEC-60076-2 (2011), consiste em realizar medições da resistência em corrente contínua do reator imediatamente após o desligamento do ensaio elevação de temperatura. Identificando-se a resistência ôhmica R do reator no momento do desligamento e utilizando a equação (5.1), pode-se calcular a temperatura média do equipamento.

Na prática, é inexequível realizar a medição da resistência R imediatamente após o desligamento. Fato comprovado devido ao tempo necessário para se desconectar a fonte de tensão CA do reator e conectar a ponte de medição de resistência CC. Assim, é indispensável realizar várias medições da resistência CC após o desligamento, durante um intervalo de tempo, e extrapolar os valores para a obtenção da resistência R no momento do desligamento. A equação a seguir demonstra como obter a temperatura média do reator utilizando o método da resistência:

$$\theta = \left[\frac{R_D}{R_0} (T_k + \theta_0) \right] - T_k \quad (5.1)$$

θ – Temperatura média do enrolamento no instante do desligamento. (°C);

- θ_0 – Temperatura correspondente a resistência medida a frio ($^{\circ}\text{C}$);
- R_D – Resistência CC no instante do desligamento (extrapolada na curva) (Ω);
- R_0 – Resistência CC na temperatura ambiente medida antes da energização (Ω);
- T_k – Constante de temperatura para liga de alumínio (225).

Assim, para os protótipos em questão, foram realizadas as seguintes medições de resistências de corrente contínua após o desligamento e registradas na Tabela 5.12:

Tabela 5.12 – Medição de resistências após o desligamento

	Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3
Tempo (s)	Rcc (m Ω)		
30	493,5	249,5	167,0
60	483,6	244,0	165,0
90	477,6	240,9	162,3
120	471,9	238,5	160,7
150	466,8	236,1	159,3
180	461,9	234,3	158,0
210	457,6	232,9	157,0
240	453,3	230,7	156,1
270	449,4	228,9	154,9
300	446,5	227,6	153,7
330	443,8	225,9	152,6

Aplicando uma linha de tendência em cada conjunto de dados e verificando a intersecção com o eixo y, obtêm-se a resistência CC (R_D) no instante de desligamento.

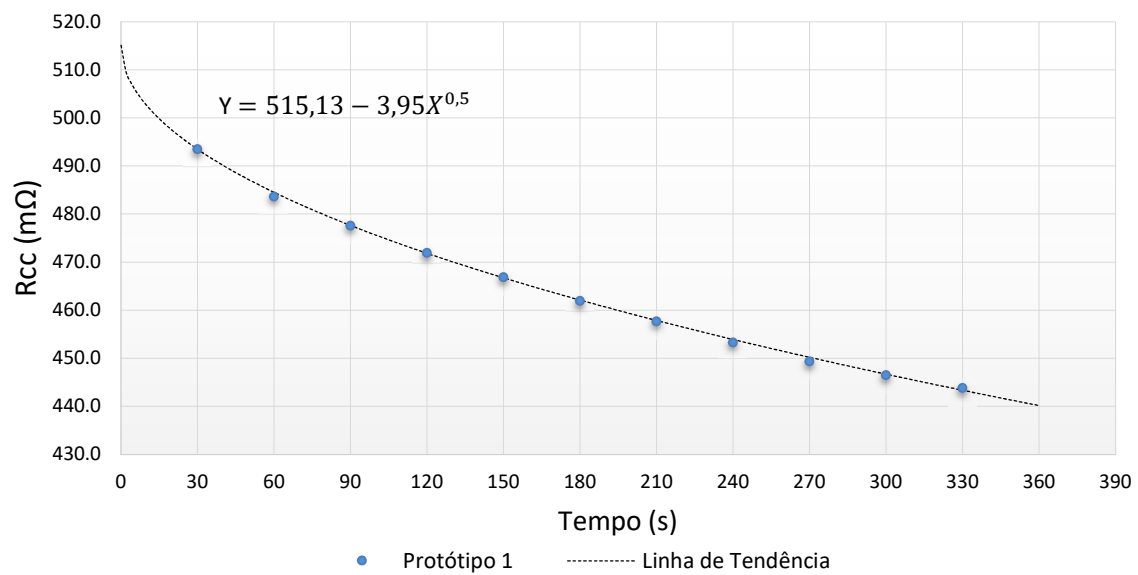


Figura 5.17 – Resistência CC após desligamento – Protótipo 1

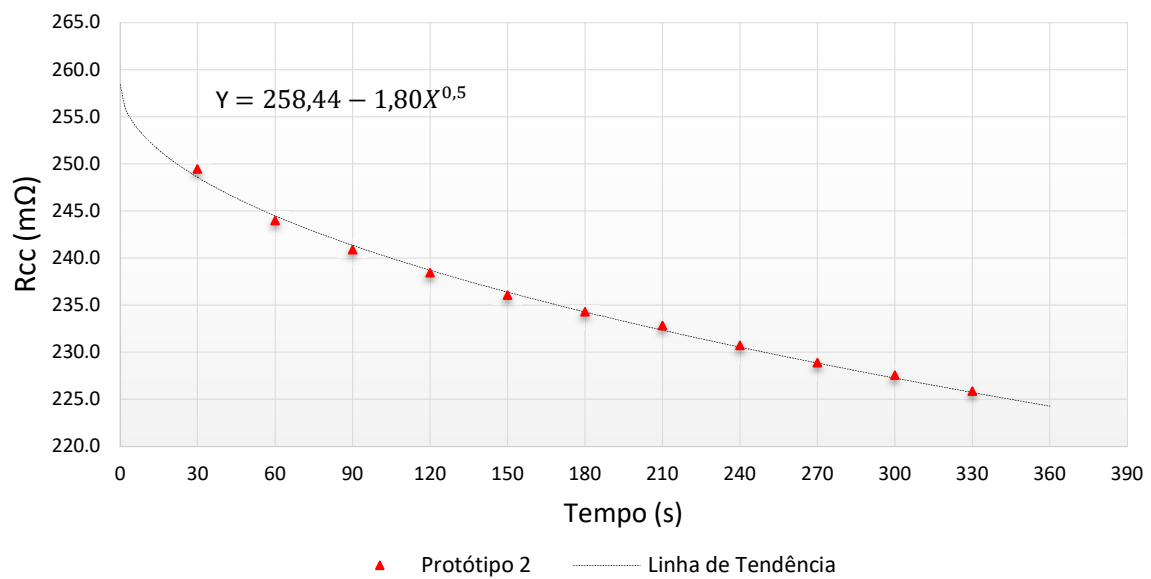


Figura 5.18 – Resistência CC após desligamento – Protótipo 2

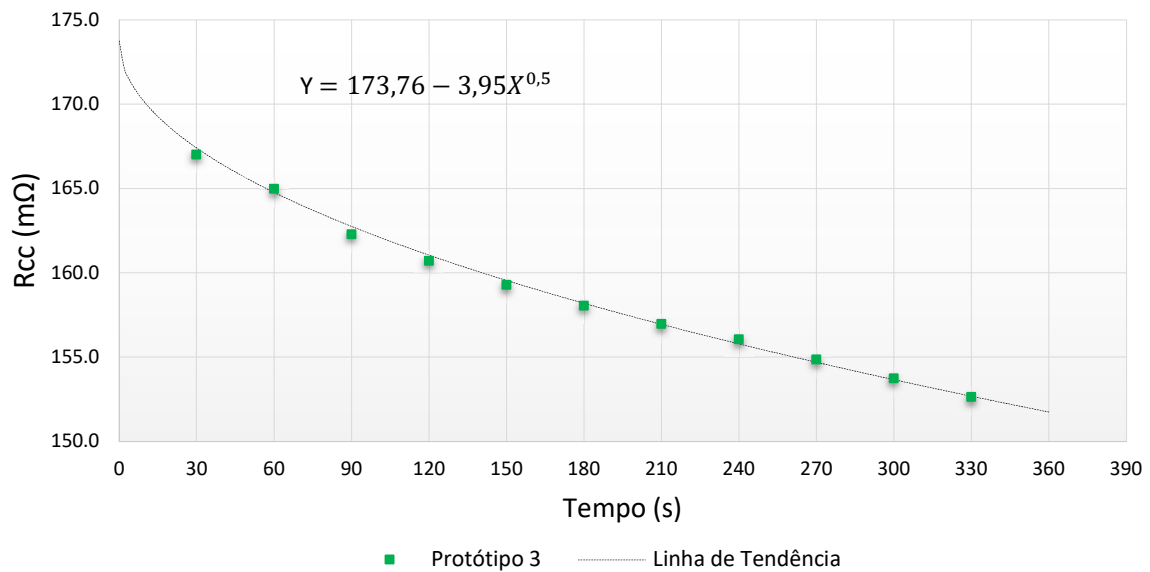


Figura 5.19 – Resistência CC após desligamento – Protótipo 3

Com os dados de cada variável da equação (5.1) identificados, é possível determinar a temperatura média dos protótipos:

Tabela 5.13 – Temperatura média segundo norma

	Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3
R ₀ (mΩ)	391,0	195,5	131,5
θ ₀ (°C)	22,9	20,5	21,4
R _D (mΩ)	515,1	258,4	173,8
θ (°C)	101,8	99,8	100,8

É observado que a temperatura média de cada protótipo está coerente com a temperatura medida. Esta similaridade atesta um bom ajuste dos parâmetros da câmera termográfica. Os valores da temperatura média θ serão adotados como referência na técnica proposta.

Capítulo 6 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Como apresentado no Capítulo 4, o modelo para a medição das perdas nos reatores com núcleo de ar pelo método calorimétrico é baseado na equação (4.1). Neste cenário, a termografia infravermelha cumpri o papel de servir como ferramenta para a identificar a temperatura média T_s do equipamento. Neste capítulo é abordado os processos para identificar as variáveis necessárias para o método proposto. A obtenção dos dados será desencadeada da seguinte forma:

- Temperatura média do reator – T_s
- Área da superfície radiante do reator – A
- Coeficiente de transferência de calor – h'

6.1 – Temperatura média do reator – T_s

6.1.1 – Método de obtenção das imagens

O ensaio de elevação de temperatura com o monitoramento através da câmera termográfica tem como objetivo identificar a temperatura média dos protótipos. Devido a configuração cilíndrica dos reatores, apenas uma parcela da área da superfície externa do reator é monitorada durante todo o ensaio de elevação de temperatura. Desta forma, as medições realizadas neste tipo de superfície podem ser influenciadas pelos diferentes ângulos das ondas emitidas pelo objeto em relação a câmera termográfica. A fim de realizar comparações e verificar a melhor maneira de obter a temperatura média do reator, de cada protótipo foram registradas doze imagens térmicas. Ao final do processo de estabilização de temperatura e após a primeira imagem térmica ter sido capturada, o reator foi deslocado em 30° (sentido anti-horário) em relação ao eixo central e uma nova imagem foi gravada. O processo anterior foi reproduzido em passos de 30° até toda a superfície ter sido completamente registrada. As imagens foram inseridas na Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3.

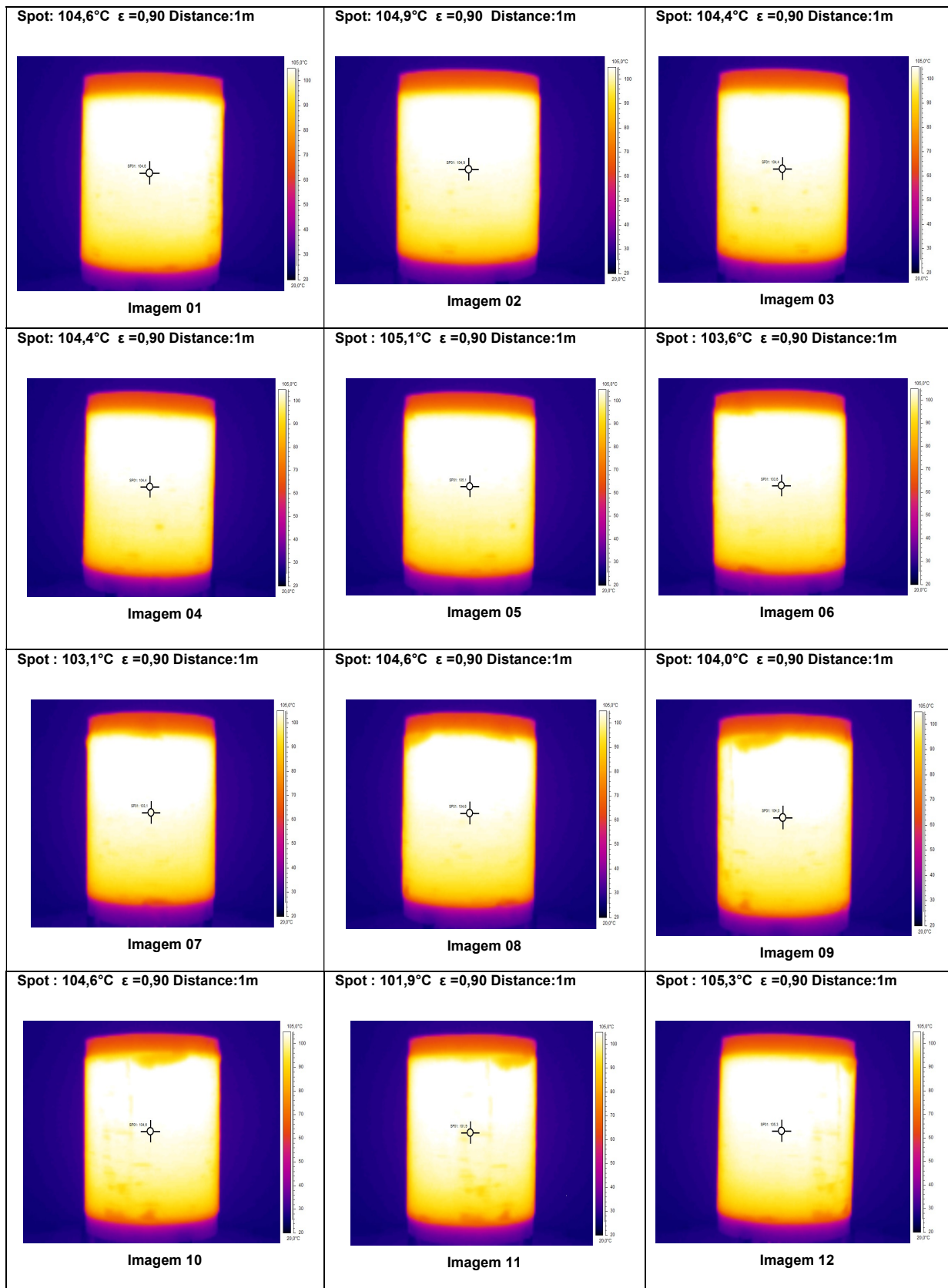


Figura 6.1 – Imagens térmicas – Protótipo 1

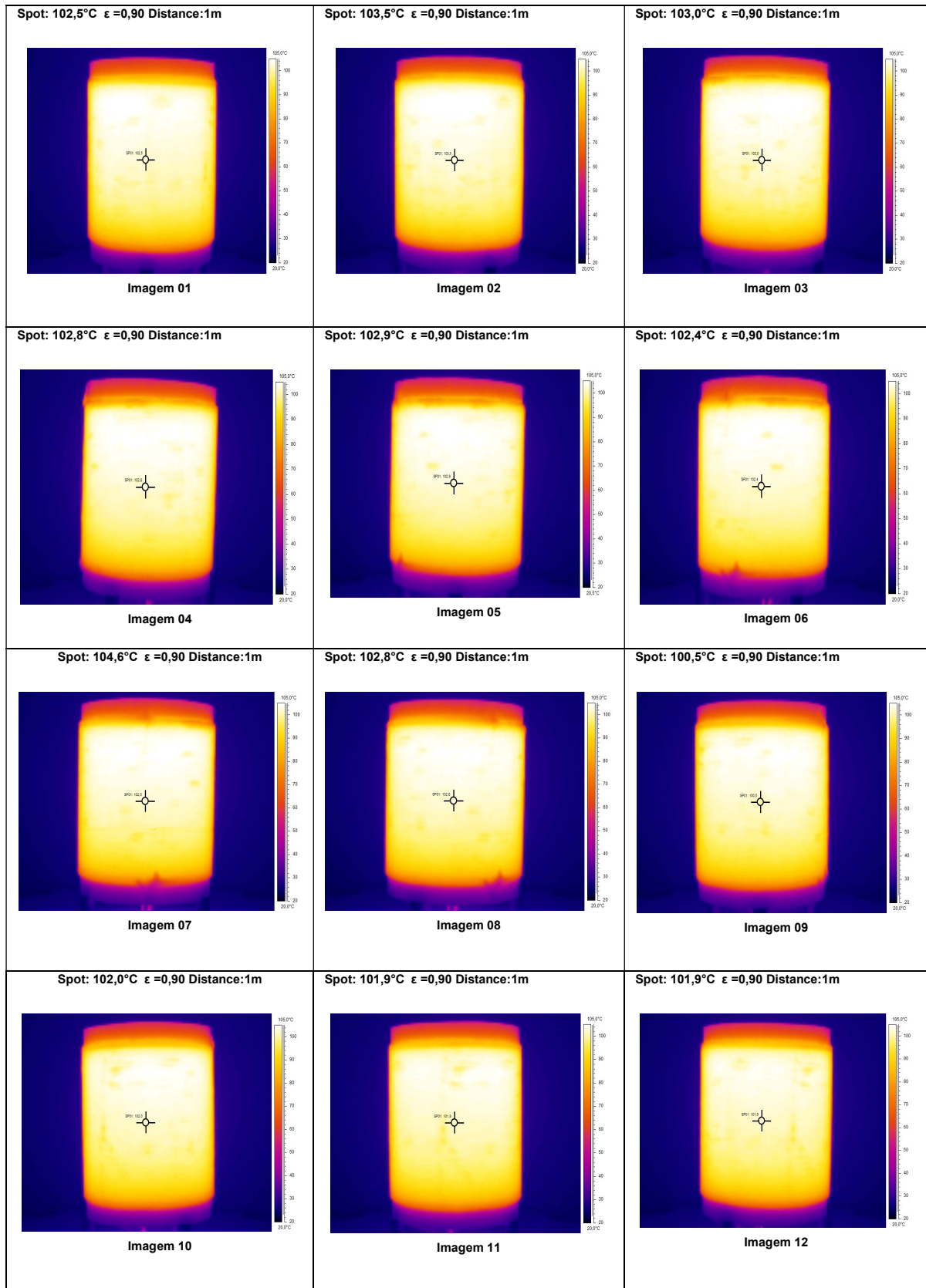


Figura 6.2 – Imagens térmicas – Protótipo 2

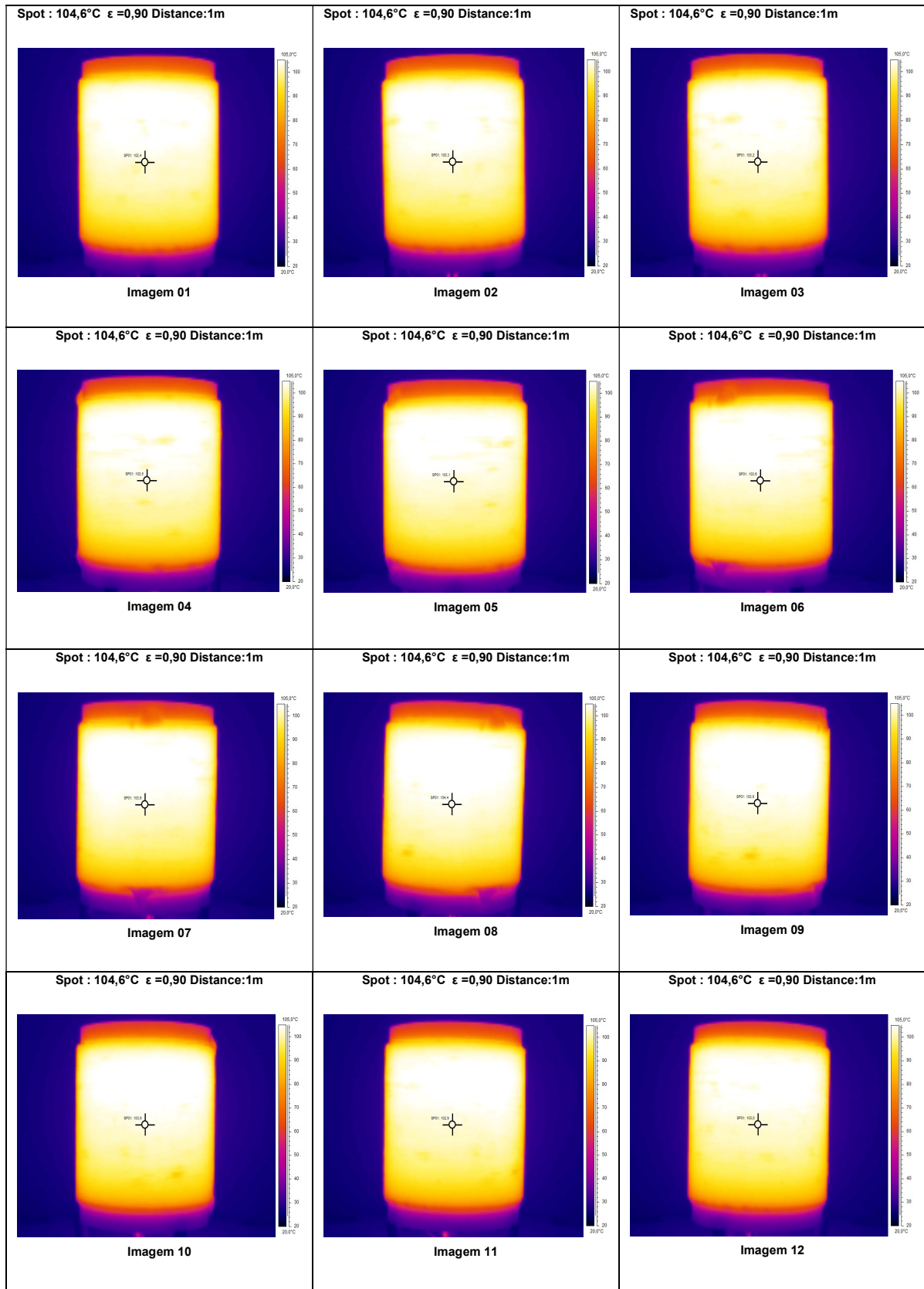


Figura 6.3 – Imagens térmicas – Protótipo 3

Como o objetivo adiante será adquirir a temperatura média dos protótipos por meio de imagem termográfica, é coerente haver a necessidade de obter as mesmas imagens térmicas das superfícies internas de cada reator. Porém, as superfícies internas não possuem um fácil acesso, com restrições tanto elétricas quanto físicas em posicionar a câmera termográfica na parte interna do equipamento. Face as estas restrições, pontos internos e externos, com as mesmas coordenadas, serão considerados iguais no quesito temperatura. Este ajuste torna a metodologia factível e presume-se que a adoção dessa medida não impacte de maneira significativa os resultados.

6.1.2 – Matriz de pixel

Uma boa tratativa dos dados é de extrema importância dentro do novo procedimento exposto. A análise das imagens termográficas deve ser feita com uma ferramenta computacional adequada composta de inúmeras funções e recursos para o exame das imagens. No mercado existem vários fabricantes de câmeras termográficas e cada um deles possui o seu programa para análise. Na captação das imagens infravermelhas foi utilizado a câmera *E40* fabricado pela *FLIR System* que possui o software avançado de análise térmica *ThermaCAM Reseacher Pro 2.10*. Com essa ferramenta é possível selecionar, de maneira desejada, a imagem infravermelha com as funções “*polygon*”, “*box area*” dentre outras. A Figura 6.4 mostra como é realizado o processo de seleção da imagem de uma das faces do reator.

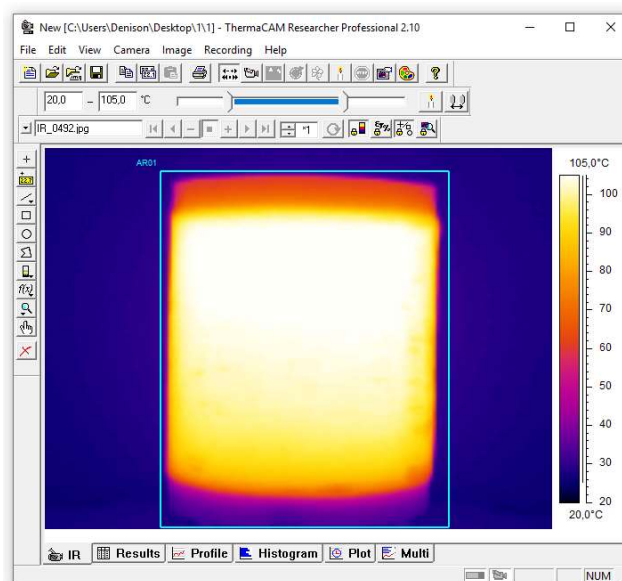


Figura 6.4 – Análise das imagens térmicas através ThermoCAM

Salvando a seleção da imagem como um arquivo de extensão “.csv” é possível transformar a imagem em uma matriz na qual cada célula representa um pixel e nela está associada sua respectiva temperatura. A obtenção da matriz de pixel é indicada pela Figura 6.5 referente a análise realizada no reator.

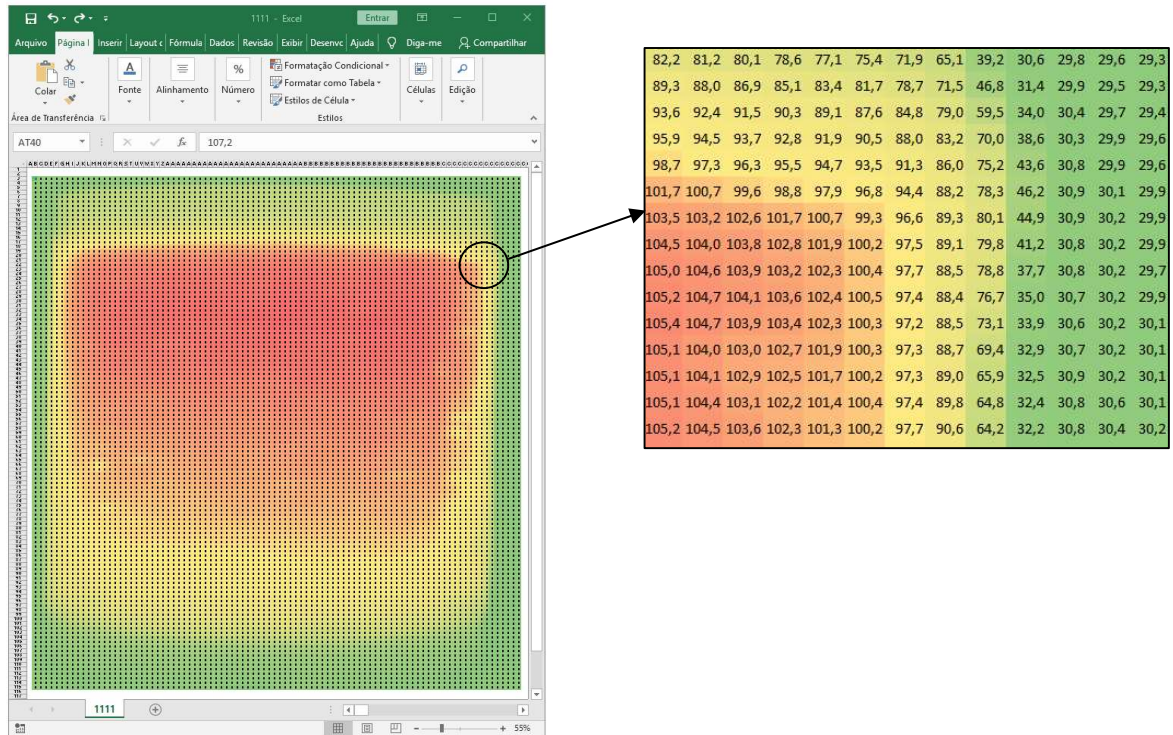


Figura 6.5 – Matriz de pixels do protótipo

As leituras de temperaturas exportadas para o editor de planilhas *Microsoft Office Excel* formam a base necessária para dar continuidade na obtenção da temperatura média do reator.

6.1.3 – Influência do ângulo na medição termográfica nos reatores

Para fazer diagnósticos precisos, os erros associados aos resultados da medição de temperatura devem ser minimizados. A medição de temperatura por termografia infravermelha é suscetível a erros causados por ângulos de visão não adequados para utilizações que demandam uma boa precisão. Conforme estudos realizados (LITWA, 2010) e (MUNIZ, CANI e MAGALHÃES, 2014) os resultados

indicam que os ângulos das ondas infravermelhas emitidas pelo corpo radiante podem introduzir erros que comprometem de forma significativa o diagnóstico.

Antes de dar continuidade ao estudo é importante verificar o impacto da geometria dos protótipos nas medições de temperatura. Os reatores cilíndricos emitem radiações que atingem a câmera termográfica com vários ângulos. Esta peculiaridade pode acarretar em divergência no cálculo da temperatura média dos protótipos analisados e exige uma investigação.

Tomando como base a matriz de pixels gerada no item 6.1.2, é relativamente simples a verificação do impacto a curvatura da superfície na medição da temperatura. Para cada pixel foi calculado o ângulo que o representa dentro da circunferência. Sabendo-se que em uma linha horizontal do protótipo a temperatura é praticamente a mesma, foi traçado um gráfico coletando as temperaturas no decorrer de um corte horizontal na matriz, ou seja, os dados de uma linha da matriz de pixels. Nesta análise, a primeira imagem térmica coletada após estabilização do protótipo 1 foi empregada. A fim de verificar a reprodutibilidade dos resultados, 3 cortes horizontais à alturas diferentes foram também examinadas. A Figura 6.6, Figura 6.7 e Figura 6.8 exibem o procedimento e resultados:

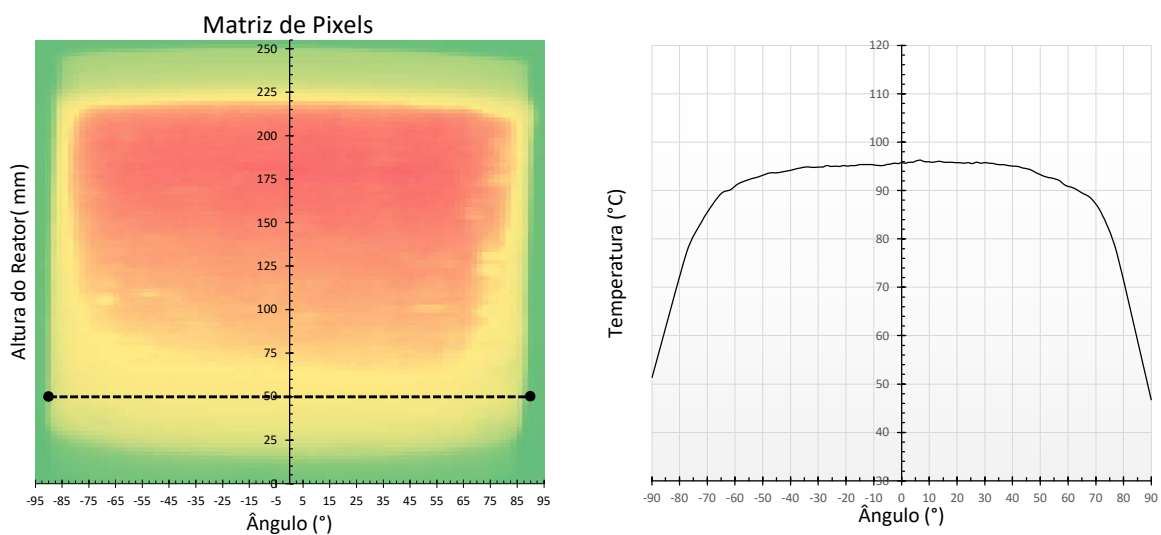


Figura 6.6 – Temperatura na Linha Horizontal – 50mm

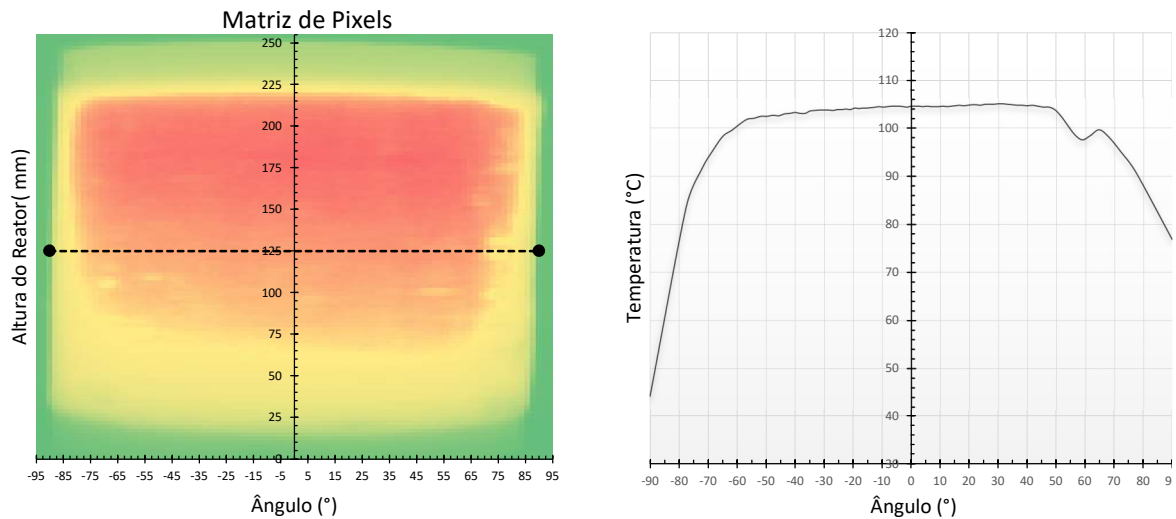


Figura 6.7 – Temperatura na Linha Horizontal – 125mm

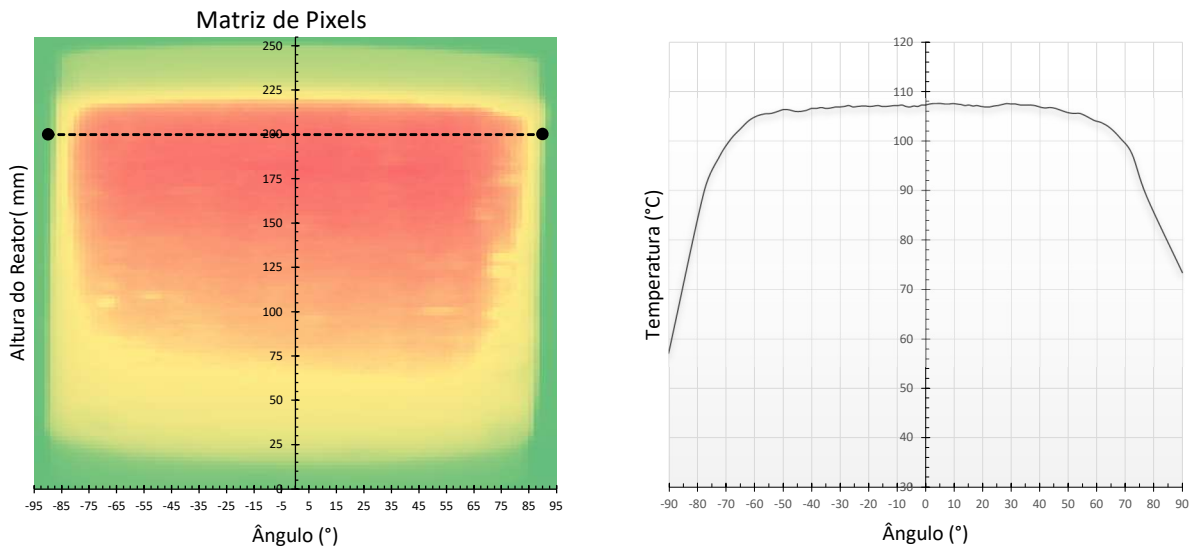


Figura 6.8 – Temperatura na Linha Horizontal – 200mm

Por intermédio dos resultados obtidos, verificou-se que as medições para ângulos de visão maiores que 50° sobrecarregam os resultados com um erro adicional considerável. Os erros podem ultrapassar a casa de 2% no valor da leitura do pixel. Os resultados estão coerentes com o estudo apresentado no artigo na referência (MUNIZ, CANI e MAGALHÃES, 2014).

Assim, para a medição da temperatura média do reator utilizando a câmera termográfica é recomendado utilizar áreas dentro do limite de -30° a 30° cuja soma em módulo nos dá um total de 60° . Este ângulo de referência só é recomendado para uma relação de raio do reator e distância da câmera segundo a equação (6.1). Para

outras relações um ajuste no ângulo de referência deve ser analisado. A Figura 6.9 apresenta a área útil para medição da temperatura média do reator.

$$\frac{R_r}{D_{cr}} \leq 1,2 \quad (6.1)$$

R_r – Raio do reator (m);

D_{cr} – Distância entre a câmera e reator (m).

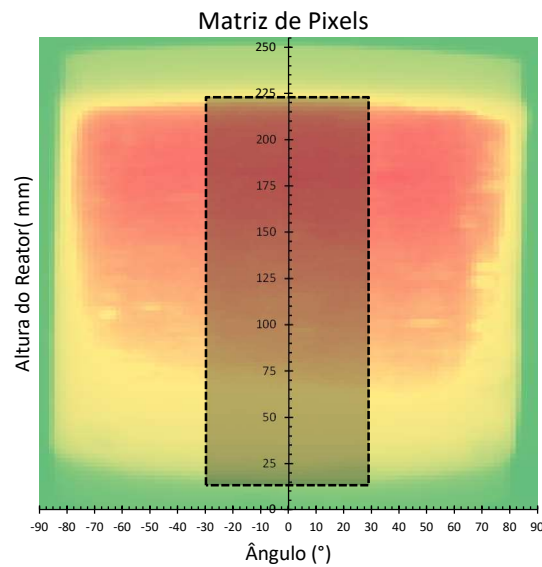


Figura 6.9 – Área de Medição

6.1.4 – Breve abordagem sobre o “Ponto Quente” em reatores

Como fica evidente nas imagens térmicas dos protótipos, em reatores com núcleo de ar tipo seco a distribuição da temperatura não apresenta um comportamento constante em uma linha vertical sobre a superfície do reator. Este fato pode ser verificado fazendo-se uma rápida inspeção nas imagens térmicas. Regiões com tonalidades diferentes indicam as diferenças de temperatura presentes na extensão vertical da superfície, com ponto de máxima na parte superior do enrolamento. O comportamento observado segue um padrão em paredes verticais na transferência de calor para o meio ambiente.

A temperatura máxima que ocorre no enrolamento é chamada de “Temperatura do ponto quente” e é a temperatura limite do carregamento desse

equipamento. Este processo se dá basicamente porque o ar refrigerado entra na parte inferior do enrolamento e passa para cima mais aquecido. Nesta circunstância, a temperatura do cilindro não sobe linearmente com a altura como confirmado na Figura 6.10. A altura do enrolamento é o principal parâmetro que influencia a proporção entre o ponto mais quente e o aumento médio da temperatura do enrolamento. Isso se deve ao grande gradiente térmico que ocorre de baixo para cima no enrolamento devido ao fluxo de ar por convecção natural. Os altos coeficientes de transferência de calor na parte inferior do enrolamento, antes que o fluxo se torne totalmente desenvolvido, contribuem para menores temperaturas na parte inferior do cilindro. No topo, o fluxo se torna totalmente desenvolvido e o coeficiente de transferência de calor são menores e a temperatura do ar é alta, contribuindo para o aumento da temperatura na região superior do reator. A imagem 1 do protótipo 1 foi analisada neste aspecto.

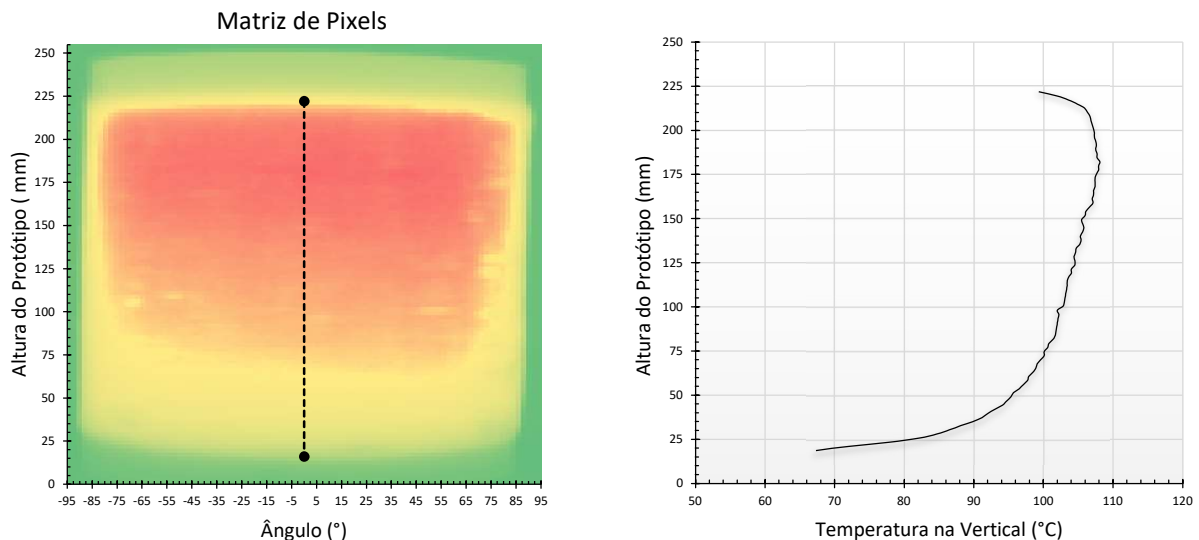


Figura 6.10 – Temperatura da linha vertical do reator

Dado à importância do ponto quente como fator limitante em projetos, na prática, cálculos adicionais são implementados para determinar o seu valor. Apesar da facilidade de se identificar o ponto quente utilizando imagens térmicas, neste trabalho tanto o cálculo como a identificação do ponto quente não têm tanta relevância, pois o que se busca é a temperatura média como variável de interesse.

6.1.5 – Temperatura média dos protótipos

Procurando fazer uma boa análise dos dados, no item 6.1.1 foi descrito o método da obtenção das imagens termográficas em cada protótipo. Com o propósito de obter a temperatura média T_s dos reatores, as temperaturas médias de cada uma

das imagens apresentadas na Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3 foram calculadas. Empregando o ângulo de medição conforme Figura 6.9, a matriz de pixel gerada de cada imagem apresentou três mil dados de medição de temperatura. Devido a configuração não homogênea da temperatura na superfície do reator, Figura 6.10, e aplicando o teste de normalidade de Anderson-Darling na amostra dos dados (MONTGOMERY e RUNGER, 2012), é verificado que o conjunto de temperatura não segue uma distribuição normal padrão. Utilizando a equação (6.2) para os referidos dados, foi retirado exclusivamente a temperatura média de cada uma das doze imagens térmicas coletadas.

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (6.2)$$

As temperaturas médias das 12 imagens foram registradas na tabela a seguir:

Tabela 6.1 – Temperatura média das imagens térmicas

	Protótipo 1 (°C)	Protótipo 2 (°C)	Protótipo 3 (°C)
Imagem 1	102,0	100,3	100,7
Imagem 2	101,6	100,4	100,5
Imagem 3	101,2	100,0	100,5
Imagem 4	101,1	99,6	100,6
Imagem 5	101,3	100,0	100,6
Imagem 6	101,5	99,6	100,4
Imagem 7	101,5	99,4	100,3
Imagem 8	101,8	99,7	101,0
Imagem 9	101,5	99,8	100,9
Imagem 10	100,8	99,6	100,6
Imagem 11	100,9	99,2	100,3
Imagem 12	102,1	99,3	100,4

Utilizando a ferramenta computacional Minitab para realizar uma análise estatística mais precisa das amostras das temperaturas médias, foram obtidos os dados estatísticos das três colunas da Tabela 6.1 e concentrados da seguinte maneira:

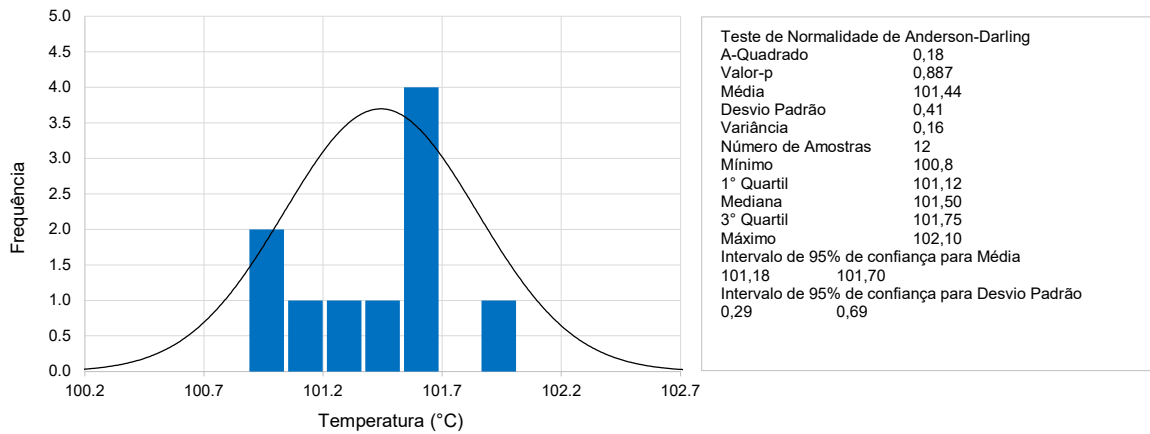


Figura 6.11 – Histograma das temperaturas médias do Protótipo 1

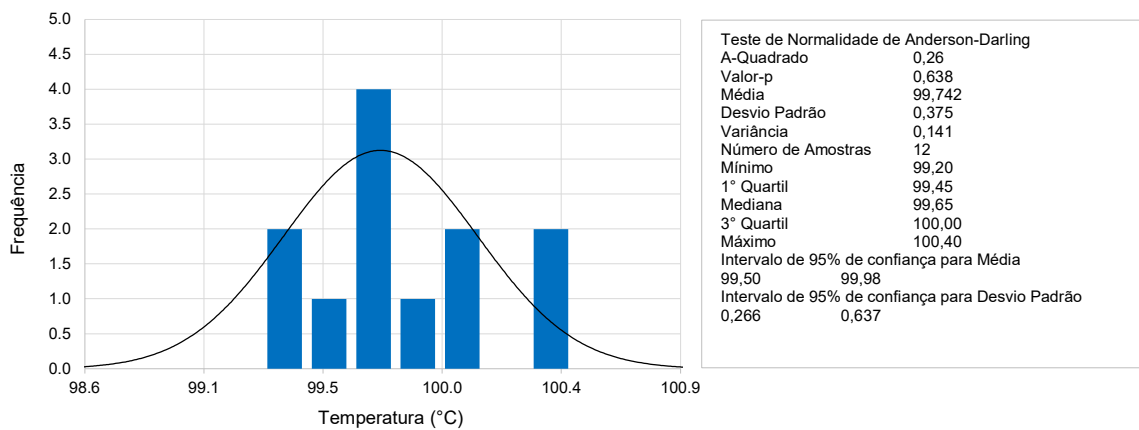


Figura 6.12 – Histograma das temperaturas médias do Protótipo 2

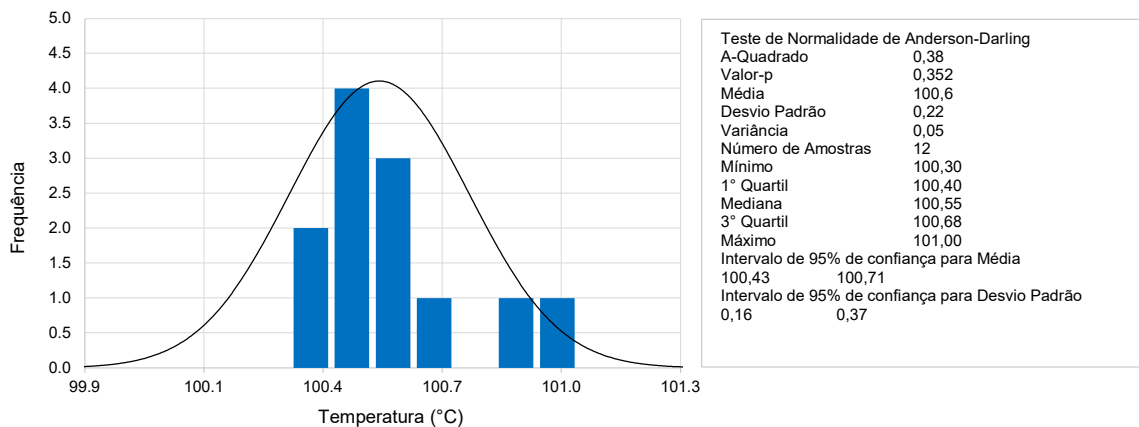


Figura 6.13 – Histograma das temperaturas médias do Protótipo 3

Classificando os dados em histograma e realizando o teste de normalidade da série de dados, é atestado que as médias atendem a suposição de normalidade confirmando a distribuição gaussiana. Este resultado possibilita analisar os dados de forma probabilística. Cada gráfico disponibiliza a temperatura média T_s de cada protótipo assim como o desvio padrão, variância, dados do gráfico de caixa e intervalos de confiança.

Uma breve inspeção na distribuição dos elementos do histograma dentro da curva da função densidade e probabilidade, verifica-se uma boa disposição dos elementos o que caracteriza ausência de pontos atípicos e com erros intrínsecos que devem ser descartados. Também, valores pequenos de variância, como encontrado nos gráficos, nos indica que há uma baixa dispersão dos elementos em relação a média obtida. Desta forma, as temperaturas médias T_s dos protótipos são identificadas conforme as médias resultantes da análise anterior mais as incertezas do equipamento. Os valores são:

Tabela 6.2 – Temperatura média dos protótipo

Protótipo 1 (°C)	Protótipo 2 (°C)	Protótipo 3 (°C)
101,4 ± 0,6	99,7 ± 0,6	100,6 ± 0,6

Frente aos resultados obtidos, percebe-se uma baixa variabilidade dos valores das medições em relação média obtida, ou seja, variâncias baixas. Este resultado abre a possibilidade de adotar a temperatura da superfície do reator como a temperatura média da matriz de pixel coletada de apenas uma imagem termográfica. Em outras palavras, no levantamento da temperatura da superfície do reator, poderia ser adotado apenas uma foto termográfica para definir a temperatura média da superfície de cada protótipo. Isto significaria uma redução do esforço na obtenção das imagens térmicas, exigindo uma única imagem bem capturada do equipamento analisado. Esta simplificação pode ser importante para equipamentos onde há uma dificuldade na coleta de imagens térmicas de toda a superfície.

6.2 – Área da superfície radiante dos reatores protótipos

Fator indispensável para o cálculo das perdas dissipadas por um reator, utilizando o método calorimétrico, é ter o conhecimento do valor da área da superfície

sujeita a convecção. Tratando-se de reatores com núcleo de ar que possuem o formato cilíndrico a questão da obtenção desta área se torna relativamente simples. Os reatores com um cilindro, base de estudo deste trabalho, possui somente a superfície interna e externa. Com as informações do diâmetro interno, externo e a altura da parte ativa do equipamento obtêm-se toda a área sujeita a convecção. Estes valores são facilmente identificados nos desenhos técnicos de cada fabricante.

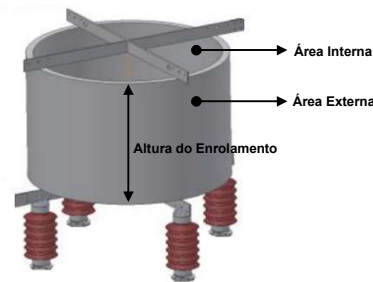


Figura 6.14 – Ilustração da área da superfície do reator

Como para o projeto dos protótipos os dados da Figura 6.14 são essenciais na construção, os valores já foram calculados no programa de projeto e o resumo consta na

Tabela 6.3 – Área da superfície do reator

	Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3
Diâmetro Interno (m)	0,2510	0,2500	0,2490
Diâmetro Externo (m)	0,2600	0,2640	0,2687
Altura (mm)	0,3080	0,3100	0,3136
Área Interna (m ²)	0,2429	0,2435	0,2453
Área Externa(m ²)	0,2516	0,2571	0,2647
Área Total (m ²)	0,4944 ± 0,0002	0,5006 ± 0,0002	0,5100 ± 0,0002

6.3 – Coeficiente de película – h'

O coeficiente de película ou coeficiente de transferência de calor é obtido de forma direta aplicando o conceito apresentado no item 2.7.6. Inserindo as variáveis

apresentadas na Tabela 6.4 na Equação (2.61) é possível obter rapidamente a variável indispensável para o levantamento das perdas.

Tabela 6.4 – Cálculo do Coeficiente de transferência de calor

	Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3
Diâmetro - D (m)	0,2600	0,2640	0,2687
Altura - L (m)	0,3080	0,3100	0,3136
Aceleração da Gravidade - g (m/s ²)	9,81	9,81	9,81
Condutividade térmica do ar - k (W/m·°C)	0,0271	0,0271	0,0271
Coeficiente de dilatação volumétrica do ar - β (°C ⁻¹)	$3,12 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-3}$
Viscosidade cinemática do ar - ν (m ² /s)	$16,96 \cdot 10^{-6}$	$16,96 \cdot 10^{-6}$	$16,96 \cdot 10^{-6}$
Temperatura da Superfície - T _s (°C)	101,4	99,7	100,6
Temperatura Ambiente - T _a (°C)	23,7	21,1	22,1
Coeficiente de Transferência de Calor - h' (w/m ² ·°C ⁻¹)	9,0 ± 0,1	9,0 ± 0,1	9,0 ± 0,1

6.4 – Cálculos das perdas pelo método calorimétrico

Após apresentado as etapas para a adquirir as variáveis necessárias para a identificação das perdas pelo meio do método calorimétrico, neste item será apresentado os resultados. A equação que rege o método é:

$$P = h' \cdot A \cdot (T_s - T_a) \quad (6.3)$$

Onde:

P – Perdas por convecção e irradiação (W);

A – Área da superfície (m²);

T_s – Temperatura da superfície (°C);

T_a – Temperatura do ambiente (°C);

h' – Coeficiente de transferência de calor (W/m² · °C);

Na Tabela 6.5 encontram-se compactados os valores dos coeficientes de transferência, as áreas e as temperaturas de cada reator protótipo. Com as variáveis em mãos, finalmente é exposto as perdas totais calculadas pela metodologia:

Tabela 6.5 – Perdas totais pelo método calorimétrico

	Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3
Coeficiente de Transferência h' (W/m ² .°C)	9,0	9,0	9,0
Área total da superfície (m ²)	0,4944	0,5006	0,5100
Temperatura ambiente (°C)	23,7	21,2	22,1
Temperatura da Superfície (°C)	101,4	99,7	100,6
Perdas Totais (W)	346,6 ± 5,2	355,6 ± 5,2	362,2 ± 5,2

6.5 – Análise e comparação dos resultados

Neste item são apresentados os resultados das perdas e as análises das medições realizadas com o método calorimétrico frente aos outros parâmetros. Os resultados da aplicação da metodologia juntamente com as referências de projeto e as medições do teste prático estão concentrados na tabela a seguir:

Tabela 6.6 – Comparação entre as perdas calculadas, medidas e método calorimétrico

	Perdas Calculadas (W)	Perdas Medidas (W)	Método Calorimétrico (W)	Variação Percentual
Protótipo 1	339,9	342,9 ± 0,7	346,6 ± 5,2	+1,08%
Protótipo 2	348,1	351,4 ± 0,7	355,6 ± 5,2	+1,19%
Protótipo 3	356,6	358,0 ± 0,7	362,2 ± 5,2	+1,18%

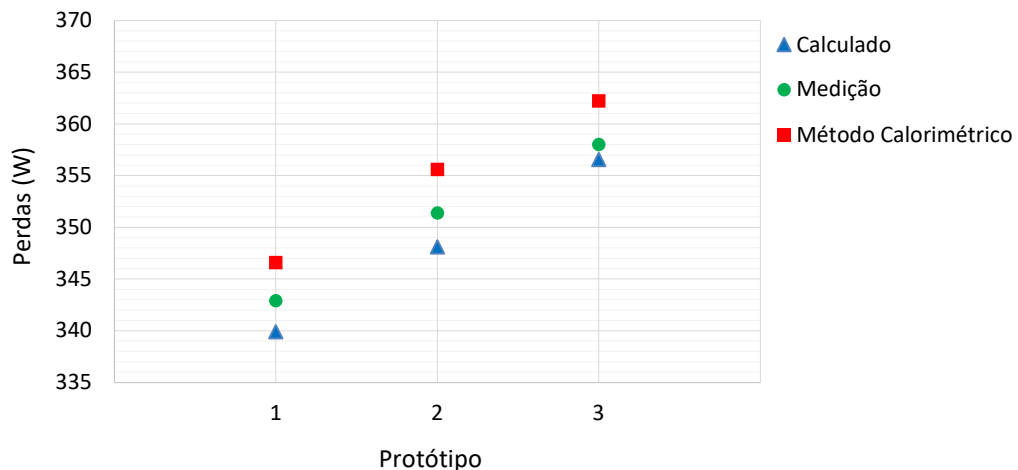


Figura 6.15 – Comparação das perdas estimadas

Com base na variação percentual proveniente da comparação entre as perdas medidas e os valores obtidos no método calorimétrico, pode-se dizer que a diferença

encontrada é pouco significativa em ambos os casos. A semelhança entre os desvios em cada protótipos também aponta que boas práticas de medição de referência foram adotadas assim como a aplicação da técnica proposta. Neste mesmo sentido, a diferença entre os valores das perdas calculadas, medidas e determinadas pelo método calorimétrico são relativamente pequenas mesmo com as aproximações propostas a fim de simplificar e tornar o método exequível.

Nota-se também que para os reatores com núcleo de ar com um cilindro que se diferenciam no número de camadas (de 1 a 3), esta desigualdade nada influência na medição das perdas pelo método proposto. Com esses resultados, entende-se que para equipamentos com mais de 3 camadas o método também seja eficiente.

De forma geral, vale ressaltar que os valores encontrados para as perdas estão próximos dos valores de referência, uma vez que as variações se encontram dentro de uma faixa considerada pequena, de 0 a 1,5%. Para as aplicações onde o método é recomendado, os resultados foram extremamente satisfatórios.

Capítulo 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No Capítulo 2 foram apresentados os principais conceitos teóricos que norteiam o projeto de reatores com núcleo de ar tipo seco. A primeira abordagem do trabalho foi desenvolver um programa de cálculo de reatores que, aplicando os conceitos apresentados, serviu como base para a concepção de protótipos para o estudo da nova metodologia. Além de apresentar os princípios da termografia infravermelha, uma explanação rápida como os reatores com núcleo de ar tipo seco são construídos também foi descrita.

Com base nas medições realizadas, tomando como pilar as normas vigentes para o equipamento em questão, foi possível verificar que os protótipos necessários para a aplicação do método calorimétrico foram concebidos conforme as expectativas dos valores nominais de projeto. De outro modo, os valores de indutância, temperatura, perdas totais, dentre outros, estavam de acordo com os dados inseridos desenvolvidos no programa de cálculo. No item 5.6 do capítulo 5, com o ensaio de elevação de temperatura nos protótipos, verificou-se que a temperatura média calculada através do método da resistência estava de acordo com a temperatura calculada. Esta coerência entre projeto e medição deu respaldo para a continuidade da atividade planejada.

Avançando, ao aplicar o método proposto na capítulo 4 e desenvolvido no capítulo 6, foi possível concluir que o método calorimétrico para a observação das perdas nos reatores com núcleo de ar tipo seco de um cilindro pode ser aplicado somado a bons resultados. A conclusão anterior é baseada nos pequenos desvios obtidos entre os parâmetros medidos com o wattímetro específico e os resultados adquiridos com o novo método aplicado.

Ao fim do trabalho, pode-se concluir que a pesquisa realizada ampliou tanto o conhecimento dos conceitos teóricos que circundam os reatores com núcleo de ar tipo seco além da comprovação da aplicabilidade do método calorimétrico na medição das perdas totais de reatores com núcleo de ar tipo seco com 1 cilindro.

É importante destacar em quais situações e ambientes em que o método calorimétrico, para a avaliação das perdas, é realmente eficiente. Identificando os quadros e condições onde o método pode ser aplicado, os resultados almejados se aproximam da realidade. Isto, aumenta a probabilidade de obter bons resultados e aumenta a confiabilidade. Os cenários em que o método proposto é mais satisfatório são:

- ❖ *Reatores com núcleo de ar tipo seco com um cilindro*: nos reatores com dois cilindros ou mais, torna-se impossível o acesso a todas as superfícies para a obtenção de imagens térmicas. Por este motivo, o procedimento exposto neste trabalho engloba reatores com um cilindro. Esta classe de reatores abrange aproximadamente 20% dos reatores fabricados.
- ❖ *Reatores com dimensões cilíndricas*: a abordagem do método descrito foi realizada em reatores cilíndricos. Os procedimentos aqui adotados na aquisição da matriz de pixel, assim com o cálculo da temperatura média, foram descritos para reatores neste formato. Para outras configurações de geometria, a técnica abordada necessita de adaptações.
- ❖ *Em áreas abrigadas*: modificações no meio ambiente em que o reator está inserido, como vento e radiação, podem alterar significativamente e em curto espaço de tempo a temperatura do reator, quando este se encontra em regime permanente. A fim de minimizar os efeitos ambientais nas imagens térmicas coletadas do equipamento, recomenda-se utilizar este método apenas em reatores abrigados onde os efeitos de alterações repentinas no meio ambiente são menos significativos.
- ❖ *Reatores localizados dentro de painéis*: nestas condições, o equipamento não fica sujeito a alterações do meio ambiente. Este é o local mais recomendado para a utilização do método proposto. Porém, a temperatura ambiente deve ser cuidadosamente medida já que existe diferença relevante entre a temperatura interna e externa no painel.
- ❖ *Aplicar o método na corrente nominal de projeto*: um meio de padronizar o método proposto é partir do princípio que as medições devem ser realizadas sempre na corrente de projeto do reator. Fora deste padrão, utilizar o método

em reatores que estão sujeitos a grandes variações de corrente pode prejudicar uma boa avaliação das perdas. Neste último caso, correções na temperatura medida em relação a corrente instantânea devem ser bem avaliadas. Equipamentos utilizados como filtro de harmônicos e reatores séries exigem cuidados específicos por estarem sujeitos à estas variações. As referências bibliográficas específicas neste assunto trazem mais clareza para esta abordagem (BORTONI e SANTOS, 2011) e (SANTOS, 2012).

- ❖ *Partes metálicas próximas ao reator devem ser evitadas:* devido a correntes eletromagnéticas induzidas em partes metálicas próximo ao reator, perdas extras podem ser adicionadas. Recomenda-se que as perdas devem ser avaliadas o mais próximo possível da configuração original do projeto. Partes metálicas adjacentes, além do projetado, devem ser evitadas durante a aplicação do método proposto.

A medição das perdas pelo método necessita que os equipamentos estejam com os certificados de aferição em ordem para evitar possíveis erros durante a medição. Além disso, deve-se tomar os cuidados necessários para os ajustes iniciais, como a emissividade, da câmera infravermelha durante a realização das imagens termográficas. Também é recomendado que a câmera seja operada por pessoas que possuam certificação para a utilização.

O emprego da termografia infravermelha permite realizar uma análise do reator sem a necessidade de paradas programadas, comprovando a praticidade da metodologia e dispensando montagens de equipamentos de medição provisórios. Dentro dos quadros apontados, a técnica apresentada serve como uma ótima ferramenta para manutenção preventiva e monitoramento de possíveis falhas e desgastes.

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, sugere-se desenvolver procedimentos de análises de perdas para reatores com núcleo de ar com mais de 1 cilindro utilizando técnicas com câmeras termográficas.

Capítulo 8 – REFERÊNCIAS

BARTKY, W. Numerical Calculation of Generalized Complete. **Modem Phys.**, v. 10, p. 266-284, 1938.

BORTONI, E. C.; SINISCALCHI, R. T.; JARDINI, J. A. . Determination of Hydro Generator Efficiency Using. **IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION**, December 2011.

BORTONI, E. D. C.; SANTOS, L. D. Extracting Load Current Influence From Infrared Thermal Inspections. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, v. 26, April 2011.

CASIMIR, H. B. G.; UBBINK, J. The skin effect - Introduction the current distribution for various configuration. **Philips technical review**, v. 28, n. 9, p. 271-283, 1967.

CHIPMAN, R. A. **Theory and problems of transimition lines**. New York: McGraw, 1968.

DWIGHT, H. B. **Electrical coils and conductors - Their Electrical Characteristics and Theory**. 1°. ed. New York: McGraw Hill, 1945.

FAWZI, T. H.; BURKE, P. E. THE ACCURATE COMPUTATION OF SELF AND MUTUAL INDUCTANCES OF CIRCULAR COILS. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-97, p. 464-468, March/April 1978.

FLIR, S. **Manual de instruções do termovisor InfraCAM SD**. fevereiro 2007.

GOTTER, G. **Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen**: Springer-Verlag, 1954.

GROVER, F. W. **Inductance Calculations – Working Formulas and Tables**". New York: Dover Publications, v. 1^a, 1946.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Física**. 3°. ed. Cleveland: LTC, v. 8, 2012.

HARLOW, J. H. **Electric Power Transformer Engineering**. 9. ed., CRC Press, 2004.

HOLMAN, J. P. **Transferência de Calor**. São Paulo: Mc Graw Hill do Brasil, 1983.

IEC-60076-1. **Power Transformers - Part 1- General**. International Electrotechnical Comission, 2011.

- IEC-60076-2. **Power Transformers - Part 2 - Temperature Rise For Liquid-Immersed Transformers**. International Electrotechnical Commission, 2011.
- IEC-60076-6. **Power Transformes Part 6 - Reactors**. International Electrotechnical Commission, 2007.
- INCROPERA, F. P. **Fundamental of Heat and Mass Transfer**. 6°. ed. USA: John Wiley & Sons, 2006.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6. ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2006.
- JACKSON, J. D. **Classical Electrodynamics**. 3°. ed. New York: John Wilwy & Sons, 1999.
- LACERDA, D. **Sistema abrangente de otimização de projeto de enrolamentos elétricos**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós- Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá. 2005.
- LACERDA, D.; ALVES, M. F. Cálculo de Distribuição de Tensões Transitórias. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Belo Horizonte, Abril 2008.
- LAMMERANER, J.; STAFL, M. **Eddy Currents**. Clevelend: CRC, 1966.
- LITWA, M. Influence of Angle of View on Temperature Measurements Using Thermovision Camera. **IEEE Sensors Journal**, v. 10, n. 10, p. 1552-1554, October 2010.
- MALDAGUE, X. P. V.; MOORE, P. O. **Infrared and Thermal Testing**. : ASNT, v. 3, 2001.
- MARTIN, B. W. Free Convection in a Vertical Cylinder with Internal Heat Generation. **The Royal Society Publishing**, Londres, v. 301, p. 327-341, Outubro 1967.
- MATICK, R. E. **Transmisstion lines for digital and communication**. New York: McGraw Hill, 1969.
- MCLACHLAN, N. W. **Bessel Functions**. 2°. ed. Oxford: Clarendon Press, 1955.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- MUNIZ, P. R.; CANI, S. P. N.; MAGALHÃES, R. D. S. Influence of Field of View of Thermal Imagers and Angle of View on Temperature Measurements by Infrared Thermovision. **IEEE Sensors Journal**, v. 14, n. 3, p. 729-733, March 2014.
- ROBERT, R. Efeito Pelicular. **Revista brasileira de ensino de física**, v. 22, n. 2, p. 285-289, Jun 2000.

SANTOS, L. D. **Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá. [S.l.]. 2006.

SANTOS, L. D. **Classificação e modelagem de fatores de influência sobreinspeções termográficas em ambientes desabrigados**. Tese de doutorado do Programa de Pós- Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá. 2012.

SINISCALCHI, R. T. **Determinação do Rendimento de Hidrogeradores Utilizando Técnicas de Termografia Infravermelha**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós- Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá. 2009.

SMYTHE, W. R. **Static and Dynamic Electricity**. : McGraw-Hill, 1968.

STOLL, R. L. **The analysis of eddy currents**. Oxford: Clarendon Press, 1974.

YAMACHITA, R. A. **Determinação de perdas e rendimento em motores elétricos empregando termografia infravermelha**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós- Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá. 2013.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física III: Eletromagnetismo**. 12^a. ed. São Paulo: Pearson, 2009.