



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

### DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA A APLICAÇÃO DE TRANSFORMADORES EFICIENTES COM BASE NOS PERFIS DE CARREGAMENTO

**ALESSANDRA FREITAS PICAÑO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de **Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.**

**Orientador:** Prof. Manuel Luis B. Martinez,  
Dr.

**Co-Orientador:** Prof. Paulo Cesar Rosa,  
Dr.

**Itajubá, Agosto de 2009.**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

P585d

Picanço, Alessandra Freitas

Desenvolvimento de uma metodologia para a aplicação de transformadores eficientes com base nos perfis de carregamento / Alessandra Freitas Picanço. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2009.

229 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez.

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo César Rosa.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Transformadores. 2. Custo. 3. Eficiência. 4. Projeto de transformadores de distribuição. I. Martinez, Manuel Luís Barreira, orient. II. Rosa, Paulo César, co-orient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

*“OS LIVROS NÃO RESSUCITAM OS MORTOS, NÃO METAMORFOSEIAM UM IDIOTA EM HOMEM SENSATO, NEM UMA PESSOA ESTÚPIDA EM ÍNDIVIDUO INTELIGENTE. ELES AGUÇAM O ESPÍRITO, DESPERTAM-NO, BURILAM-NO E MATAM A SUA SEDE DE CONHECIMENTO.*

*QUANTO AO QUE QUER CONHECER TUDO, É MELHOR QUE SUA FAMÍLLA O TRATE, PORQUE ISSO É UMA PERTURBAÇÃO PSÍQUICA.*

*(...) O LIVRO TE LIBERTA DO CONTATO COM PESSOAS ODIOSAS E DAS RELAÇÕES COM HOMENS INCAPAZES DE COMPREENDER.*

*(...) SE CAIS EM DESGRAÇA, NEM POR ISSO O LIVRO RENUNCIA A TE SERVIR. VENTOS CONTRÁRIOS PODEM SOPRAR CONTRA TI, MAS O LIVRO CONTRA TI NÃO SE VOLTA NUNCA.”*

*AL-KHUWARIZMI  
MATEMÁTICO E FILOSOFO  
SÉCULO IX*

*DEDICO ESTE TRABALHO A DEUS, AOS MEUS PAIS (SOCORRO E GERVÁZIO), A MINHA  
QUERIDA IRMÃ ANNUZA E FAMÍLIA.*

*DEDICO, TAMBÉM, AO PROF. MANUEL MARTINEZ*

*PROFESSOR E AMIGO SEMPRE PRESENTE*

## **AGRADECIMENTOS**

*A MINHA FAMÍLIA QUE SEMPRE ME APOIO, INCENTIVOU E ORIENTOU DURANTE TODA A MINHA VIDA. AOS MEUS AVÓS PATERNOS E MATERNOS (IN MEMORIAN).*

*AOS PROFESSORES E FUNCIONÁRIOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, PELA OPORTUNIDADE E FORMAÇÃO NO MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA. E A UFAM PELA MINHA GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA.*

*AOS MEUS COMPANHEIROS E AMIGOS DO LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO LAT-EFEI PELO CARINHO E COMPREENSÃO NOS MOMENTOS DIFÍCEIS.*

*A MINHA SEGUNDA FAMÍLIA, GORETE, TAYNARA E LUARA, QUE ME ACOMPANHAM E PELO CARINHO DEDICADO QUE ME FORTALECE.*

*AO SR. LUIZ FRANCHINI E A ITAIPU TRANSFORMADORES LTDA. PELA OPORTUNIDADE E COLABORAÇÃO NO PROJETO DE TRANSFORMADORES EFICIENTES NA COMUNIDADE DE PARAISÓPOLIS.*

*MEU SINCERO AGRADECIMENTO, ADMIRAÇÃO E RESPEITO AO PROFESSOR MANUEL B. MARTINEZ, QUE FOI UM PROFESSOR ATENCIOSO, UM GRANDE AMIGO E UM PAI, ACONSELHANDO E ORIENTANDO, EM TODOS OS MOMENTOS DESTA CAMINHADA. MUITO OBRIGADA PELOS SEUS ENSINAMENTOS, OPORTUNIDADES, SOLIDARIEDADE E CONFIANÇA.*

*AO APOIO FINANCEIRO DA AES-SUL DISTRIBUIDORA GAÚCHA DE ENERGIA S.A., PROCOBRE BRASIL (ICA) E CAPES.*

## *RESUMO*

Os transformadores são utilizados para ajustar o nível da tensão para consumo, distribuição, transmissão e geração no sistema elétrico. Estes atualmente são responsáveis por um terço das perdas na rede. Essas perdas são contabilizadas como custos para concessionária, sociedade e meio ambiente. O objetivo é estudar a relação entre o custo e as perdas. A metodologia desenvolvida para este propósito é a construção das superfícies de custo de fabricação e custo total. E a análise econômica dos projetos considera a variação dos parâmetros construtivos de um transformador padrão. Tais variações ocorrem, por exemplo, na dimensão do núcleo, como área circunscrita, diâmetro e culatra. Esta aproximação ajuda as concessionárias a especificar equipamentos de acordo com a demanda, reduzindo as perdas totais na rede. A proposta deste estudo é analisar um conjunto de projetos de transformadores com perdas reduzidas. Esta solução é a procura do projeto ótimo, considerando as restrições impostas pela impedância percentual, o carregamento diário, a taxa de juros e o custo da energia.

## *ABSTRACT*

Transformers are equipments applied to electrical systems to adjust voltage levels for consumption, distribution, transmission, and generation needs. Actual technology indicates that they are responsible for approximately one third of total network losses. These losses can be accounted as power utility costs, costs to society and to the environment itself. The aim is to study the relationship between the transformer costs and its losses. A method for collecting cost data and for building cost surfaces - the so called "Production and Total Cost Surfaces" is presented. The economic analysis of transformer designs considers a variation of the reference data of the main constructive parameters of a standard transformer. Therefore, changes are introduced, amongst others, in the core dimensions, such as the column circumscribed area, its diameter and the yoke area. This approach helps the power utilities to purchase equipment according to the forecast demand, decreasing the total network losses. The proposal of this study is to solve through the analysis a set of transformer designs presenting reduced losses. The solution is to search out an optimal transformer design, considering the restrictions imposed by the short circuit impedance, the daily load, the interest rate and the energy price.

---

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	IV
RESUMO.....	V
ABSTRACT .....	VI
SUMÁRIO.....	VII
LISTA DE FIGURAS .....	X
LISTA DE TABELAS .....	XXXII
LISTA DE NOMENCLATURAS.....	XXXIII
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 .....	5
DEFINIÇÃO DO PROBLEMA: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA INICIAL DAS SUPERFÍCIES.....	5
2.1.EQUACIONAMENTO: METODOLOGIA DAS SUPERFÍCIES.....	5
2.2 FORMAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE CUSTO DE FABRICAÇÃO E TOTAL.....	8
2.2.1 SUPERFÍCIE DE CUSTO DE FABRICAÇÃO – ESTUDO DE CASO .....	15
2.2.2 SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL – ESTUDO DE CASO.....	22
2.2 PONTO MÍNIMO E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO.....	26
2.2.3 ESCOLHA DE UM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO EFICIENTE ADEQUADO A UMA REGIÃO DA REDE DA ELETROPAULO EM SÃO PAULO .....	28
2.3 COMENTÁRIO .....	32
CAPÍTULO 3 .....	33
MODELAGEM TÉRMICA: AVALIAÇÃO E PROPOSTA .....	33
3.1 CÁLCULO DO PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO UTILIZANDO MÉTODO IEEE .....	33
3.2 SUPERFÍCIES TÉRMICAS SEGUNDO MÉTODO IEEE .....	37
3.3 COMENTÁRIO 1 .....	44
3.4 CIRCUITO TÉRMICO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR.....	44
3.5 APLICAÇÃO DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE.....	53
3.5.1 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DAS RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS EQUIVALENTES.....	53
3.5.2 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DAS CAPACITÂNCIAS ELÉTRICAS EQUIVALENTES.....	60
3.6 DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 100 kVA .....	61

---

3.7 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE .....	73
3.8 COMENTÁRIO 2 .....	79
CAPÍTULO 4 .....	80
RESTRIÇÃO DIELÉTRICA: COMPORTAMENTO DA ISOLAÇÃO FRENTE À SOLICITAÇÃO DIELÉTRICA .....	80
4.1 TENSÃO DE RUPTURA .....	80
4.2 ANÁLISE DA TENSÃO DISRUPTIVA .....	82
4.3 COMENTÁRIO .....	84
CAPÍTULO 5 .....	85
CONJUNTO DE SOLUÇÕES DE PROJETO .....	85
5.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS CONSTRUTIVOS PARA AS SUPERFÍCIES DE PROJETO	85
5.1.1 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS CONSTRUTIVOS NAS PERDAS .....	87
5.2 FORMAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE CUSTO .....	117
5.2.1 ANÁLISE DO PROJETO COM MENOR CUSTO TOTAL .....	132
5.3 ANÁLISE DOS PROJETOS .....	133
5.4 COMENTÁRIOS .....	165
CAPÍTULO 6 .....	168
PROJETO ÓTIMO BASEADO NAS SUPERFÍCIES DE PROJETO .....	168
6.1. PROCEDIMENTO PARA A OTIMIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES .....	169
6.2. OTIMIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL .....	174
6.2.1 CUSTO TOTAL MÍNIMO PARA FATOR DE ENERGIA CONSUMIDA IGUAL A 12,56 .	174
6.2.2 CUSTO TOTAL MÍNIMO PARA FATOR DE ENERGIA CONSUMIDA IGUAL A 8,7 .....	184
6.2.3 CUSTO TOTAL MÍNIMO PARA FATOR DE ENERGIA CONSUMIDA IGUAL A 4,5 .....	193
6.2.4 CUSTO TOTAL MÍNIMO PARA FATOR DE ENERGIA CONSUMIDA IGUAL A 2,5 .....	197
6.3 COMENTÁRIOS .....	200
CAPÍTULO 7 .....	201
CONCLUSÃO .....	201
ANEXO 1 .....	204
ANÁLISE DOS CONJUNTOS DE SOLUÇÃO DE PROJETOS .....	204
A1.1 SUPERFÍCIES DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL .....	204
A1.2 SUPERFÍCIES DE TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO .....	215
A1.3 SUPERFÍCIES DAS TEMPERATURAS DOS ENROLAMENTOS .....	218
A1.4 SUPERFÍCIES DE TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO .....	220

---

A1.5 SUPERFÍCIES DO FATOR DE ACELERAÇÃO DE ENVELHECIMENTO .....	222
BIBLIOGRAFIA.....	225
BIBLIOGRAFIA RELACIONADA.....	227
ARTIGOS PUBLICADOS .....	228

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – ESQUEMA DAS COMBINAÇÕES DOS PARÂMETROS CONSTRUTIVOS .....	9
FIGURA 2.2 – FLUXOGRAMA DO CÁLCULO DA ÁREA DO NÚCLEO .....	10
FIGURA 2.3 – FLUXOGRAMA DO CÁLCULO DO ENROLAMENTO BT .....	11
FIGURA 2.4 – SEÇÃO DO CONDUTOR RETANGULAR. ....	12
FIGURA 2.5 – CORTE TRANSVERSAL DE BOBINA COM CONDUTOR RETANGULAR EM PÉ.....	12
FIGURA 2.6 – CORTE TRANSVERSAL DE BOBINA COM CONDUTOR RETANGULAR DEITADO.	12
FIGURA 2.7 – FLUXOGRAMA DO CÁLCULO DO ENROLAMENTO AT .....	14
FIGURA 2.8 – FLUXOGRAMA DO CÁLCULO DA PERDA NO NÚCLEO .....	15
FIGURA 2.9 – SUPERFÍCIES DE CUSTO DE FABRICAÇÃO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT, MANTENDO A LARGURA E O DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTES.....	16
FIGURA 2.10 – SUPERFÍCIES INDIVIDUAIS DE CUSTO DE FABRICAÇÃO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT, MANTENDO A LARGURA E O DIÂMETRO DE AT CONSTANTES.....	17
FIGURA 2.11 – COMPORTAMENTO DA MASSA E DA PERDA DO NÚCLEO EM RELAÇÃO AO CUSTO DE FABRICAÇÃO. ....	18
FIGURA 2.12 – COMPORTAMENTO DA MASSA DO COBRE E DA PERDA EM CARGA EM RELAÇÃO AO CUSTO DE FABRICAÇÃO.....	18
FIGURA 2.13 – SUPERFÍCIES DE CUSTO DE FABRICAÇÃO COM ESPESSURA CONSTANTE E VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT, COM O DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT VARIÁVEL.....	19
FIGURA 2.14 – COMPORTAMENTO DA MASSA E DA PERDA DO NÚCLEO EM RELAÇÃO AO CUSTO DE FABRICAÇÃO. ....	19
FIGURA 2.15 – COMPORTAMENTO DA MASSA DO COBRE E DA PERDA EM CARGA EM RELAÇÃO AO CUSTO DE FABRICAÇÃO.....	20
FIGURA 2.16 – SUPERFÍCIES INDIVIDUAIS DO CUSTO DE FABRICAÇÃO DA FIGURA 2.13.....	20
FIGURA 2.17 – SUPERFÍCIES DE CUSTO DE FABRICAÇÃO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA, MANTENDO A LARGURA CONSTANTE DO CONDUTOR DE BT E DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT VARIÁVEL.....	21

---

FIGURA 2.18 – COMPORTAMENTO DA MASSA E DA PERDA DO NÚCLEO EM RELAÇÃO AO CUSTO DE FABRICAÇÃO. ....	21
FIGURA 2.19 – COMPORTAMENTO DA MASSA DO COBRE E DA PERDA EM CARGA EM RELAÇÃO AO CUSTO DE FABRICAÇÃO.....	22
FIGURA 2.20 – DEMANDA COMERCIAL.....	22
FIGURA 2.21 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL COM VARIAÇÃO DA LARGURA E ESPESSURA CONSTANTE DO CONDUTOR DE BT E DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE.....	23
FIGURA 2.22 – COMPORTAMENTO DA PERDA EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO AO CUSTO TOTAL.....	23
FIGURA 2.23 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA E LARGURA CONSTANTE DO CONDUTOR DE BT, COM O DIÂMETRO CONSTANTE DO CONDUTOR DE AT. ....	24
FIGURA 2.24 – COMPORTAMENTO DA PERDA EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO AO CUSTO TOTAL.....	24
FIGURA 2.25 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL COM VARIAÇÃO DA LARGURA E MANTENDO A ESPESSURA CONSTANTE DO CONDUTOR DE BT E COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	25
FIGURA 2.26 – COMPORTAMENTO DA PERDA EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO AO CUSTO TOTAL.....	25
FIGURA 2.27 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA E MANTENDO A LARGURA CONSTANTE DO CONDUTOR DE BT E COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	26
FIGURA 2.28 – COMPORTAMENTO DA PERDA EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO AO CUSTO TOTAL.....	26
FIGURA 2.29 – PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DO PONTO DE MÍNIMO DE CADA MATRIZ DE CUSTO TOTAL.....	27
FIGURA 2.30 – DEMANDA DA ÁREA A SER REGULARIZADA.....	29
FIGURA 2.31 – TRANSFORMADOR EFICIENTE INSTALADO NA ÁREA A SER REGULARIZADA	30
FIGURA 2.32 – EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO MUG ELO 2160 NA COMUNIDADE DE PARAISÓPOLIS.....	31
FIGURA 2.33 – CURVA MÉDIA NO LOCAL DO TRANSFORMADOR EFICIENTE.....	31
FIGURA 3.1 – DEMANDA COMERCIAL.....	37

---

FIGURA 3.2 – SUPERFÍCIE TÉRMICA PARA O PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO COM ESPESSURA CONSTANTE E LARGURA VARIÁVEL DO CONDUTOR DE BT, COM O DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	38
FIGURA 3.3 – TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO EM FUNÇÃO DAS PERDAS EM VAZIO. ....	38
FIGURA 3.4 – TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO EM FUNÇÃO DAS PERDAS EM CARGA.....	39
FIGURA 3.5 – SUPERFÍCIES TÉRMICAS PARA O PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO COM LARGURA CONSTANTE E ESPESSURA VARIÁVEL DO CONDUTOR DE BT, COM O DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	39
FIGURA 3.6 – SUPERFÍCIES TÉRMICAS PARA O PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO COM CONDUTOR DE BT COM ESPESSURA CONSTANTE, LARGURA E DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT VARIÁVEL. ....	40
FIGURA 3.7 – TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO EM FUNÇÃO DAS PERDAS EM VAZIO. ....	40
FIGURA 3.8 – TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO EM FUNÇÃO DAS PERDAS EM CARGA.....	41
FIGURA 3.9 – SUPERFÍCIES TÉRMICAS PARA O PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO COM CONDUTOR DE BT COM LARGURA CONSTANTE, ESPESSURA E DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT VARIÁVEL. ....	41
FIGURA 3.10 – TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO EM FUNÇÃO DAS PERDAS EM VAZIO. ....	42
FIGURA 3.11 – TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO EM FUNÇÃO DAS PERDAS EM CARGA.....	42
FIGURA 3.12 – SUPERFÍCIES TÉRMICAS PARA A TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO COM CONDUTOR DE BT COM ESPESSURA CONSTANTE, LARGURA VARIÁVEL E COM O DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	42
FIGURA 3.13 – SUPERFÍCIES TÉRMICAS PARA A TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO COM CONDUTOR DE BT COM LARGURA CONSTANTE, ESPESSURA VARIÁVEL, E COM O DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	43
FIGURA 3.14 – SUPERFÍCIES TÉRMICAS PARA A TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO COM CONDUTOR DE BT COM ESPESSURA CONSTANTE, LARGURA E DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT VARIÁVEL.....	43

---

FIGURA 3.15 – SUPERFÍCIES TÉRMICAS PARA A TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO COM CONDUTOR DE BT COM LARGURA CONSTANTE, ESPESSURA E DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT VARIÁVEL.....	43
FIGURA 3.16 – REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DA CHAPA DE AÇO-SILÍCIO.....	48
FIGURA 3.17 – REPRESENTAÇÃO DA CONDUÇÃO NO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE.	49
FIGURA 3.18 – CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE PARA O NÚCLEO.....	51
FIGURA 3.19 – REPRESENTAÇÃO DA BOBINA COM ISOLAÇÃO.....	52
FIGURA 3.20 – CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR. ....	53
FIGURA 3.21 – FIBRA COM O CONJUNTO DE SENSORES E PENETRADOR .....	63
FIGURA 3.22 – INSTALAÇÃO DOS SENSORES NO ENROLAMENTO DE BT.....	64
FIGURA 3.23 – POSICIONAMENTO DA FIBRA NO ENROLAMENTO DE BT .....	64
FIGURA 3.24 – ESPECTRO DOS CONJUNTOS DE SENSORES NO ENROLAMENTO DE BT APÓS A INSTALAÇÃO .....	65
FIGURA 3.25 – POSICIONAMENTO DOS SENSORES NO CANAL DE ÓLEO.....	65
FIGURA 3.26 – SENSOR NO CANAL DE ÓLEO.....	66
FIGURA 3.27 – ESPECTRO DOS CONJUNTOS DE SENSORES INSTALADOS NO CANAL DE ÓLEO .....	66
FIGURA 3.28 – POSICIONAMENTO DOS SENSORES NO ENROLAMENTO DE AT.....	66
FIGURA 3.29 – ESPECTRO DOS CONJUNTOS DE SENSORES INSTALADOS NO ENROLAMENTO DE AT .....	67
FIGURA 3.30 – POSICIONAMENTO DOS PENETRADORES NO TANQUE.....	67
FIGURA 3.31 – DETALHES DOS PENETRADORES NO ÓLEO MINERAL.....	67
FIGURA 3.32 – CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA.....	68
FIGURA 3.33 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DOS SENSORES DA 1ª CAMADA DO ENROLAMENTO DE BT.....	69
FIGURA 3.34 – GRÁFICO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DOS SENSORES DO CANAL DE ÓLEO. ....	69
FIGURA 3.35 – GRÁFICO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DOS SENSORES DA 7ª CAMADA DO ENROLAMENTO DE AT.....	70
FIGURA 3.36 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS DOS SENSORES LOCALIZADOS NO INÍCIO E A 1/3 DA BOBINA.....	70
FIGURA 3.37 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS DOS SENSORES LOCALIZADOS A 2/3 E NO FINAL DA BOBINA.....	71

---

FIGURA 3.38 – DEMANDA PREVISTA PARA A COMUNIDADE DE PARAISÓPOLIS.....	71
FIGURA 3.39 – GRÁFICO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DOS SENSORES DA 1ª CAMADA DO ENROLAMENTO DE BT.....	72
FIGURA 3.40 – GRÁFICO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DOS SENSORES DO CANAL DE ÓLEO. ....	72
FIGURA 3.41 – GRÁFICO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DOS SENSORES DA 7ª CAMADA DO ENROLAMENTO DE AT.....	73
FIGURA 3.42 – REPRESENTAÇÃO DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE.....	74
FIGURA 3.43 – CONVERGÊNCIA DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE SIMULAÇÃO.....	74
FIGURA 3.44 – DIAGRAMA DA TEMPERATURA – PROCESSO DAS COLUNAS DO ÓLEO QUENTE E FRIO <sup>[18]</sup> .....	75
FIGURA 3.45 – RESULTADOS PARA A TEMPERATURA INTERNA DO NÚCLEO, DOS ENROLAMENTOS DE BT E AT, E ÓLEO. ....	75
FIGURA 3.46 – RESULTADOS PARA A TEMPERATURA EXTERNA DO NÚCLEO, E NA SUPERFÍCIE INTERNA DOS ENROLAMENTOS DE BT E AT.....	76
FIGURA 3.47 – RESULTADOS PARA A TEMPERATURA EXTERNA DO ENROLAMENTO DE AT. ....	76
FIGURA 3.48 – COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA PARA A CURVA DE CARGA DA FIGURA 3.38.....	77
FIGURA 3.49 – CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE COM AS PERDAS EM VAZIO DISTRIBUÍDAS NOS ENROLAMENTOS DE BT E AT.....	78
FIGURA 3.50 – RESULTADOS PARA A TEMPERATURA INTERNA DOS ENROLAMENTOS DE BT E AT. ....	78
FIGURA 4.1 – VARIAÇÃO DA TENSÃO DE RUPTURA EM RELAÇÃO AO TEMPO <sup>[20]</sup> .....	80
FIGURA 4.2 – ISOLAMENTO DOS ENROLAMENTOS DE BT E AT POR PAPEL. ....	81
FIGURA 4.1 – COMPORTAMENTO DA TENSÃO DISRUPTIVA EM RELAÇÃO À ESPESSURA DO PAPEL ISOLANTE.....	82
FIGURA 4.2 – COMPORTAMENTO DAS PERDAS EM VAZIO E DAS PERDAS EM CARGA EM RELAÇÃO À TENSÃO DISRUPTIVA PARA UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 45 kVA. ....	83
FIGURA 4.3 – COMPORTAMENTO DAS PERDAS EM VAZIO E DAS PERDAS EM CARGA EM RELAÇÃO À TENSÃO DISRUPTIVA PARA UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 45 kVA. ....	83
FIGURA 5.1 – ESQUEMA DA MATRIZ TRIDIMENSIONAL 11x11x11. ....	86
FIGURA 5.2 – ESQUEMA DA MATRIZ TRIDIMENSIONAL 11x11x22. ....	87

---

FIGURA 5.3 – SUPERFÍCIE DA ALTURA DA JANELA EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE $B_T$ CONSTANTE E LARGURA VARIÁVEL, COM DENSIDADE DE CORRENTE DE $A_T$ CONSTANTE.....	88
FIGURA 5.4 – ALTURA DA JANELA VERSUS AS PERDAS NO NÚCLEO.....	88
FIGURA 5.5 – ALTURA DA JANELA VERSUS ÀS PERDAS NO COBRE.....	89
FIGURA 5.6 – ALTURA DA JANELA VERSUS AS PERDAS NO NÚCLEO COM VARIAÇÃO DA CABEÇA DA BOINA E CALÇO.....	89
FIGURA 5.7 – ALTURA DA JANELA VERSUS AS PERDAS NO COBRE COM VARIAÇÃO DA CABEÇA DA BOINA E CALÇO.....	90
FIGURA 5.8 – SUPERFÍCIE DA ALTURA DA JANELA EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA COM LARGURA DO CONDUTOR DE $B_T$ CONSTANTE E ESPESSURA VARIÁVEL, COM DIÂMETRO DE $A_T$ CONSTANTE.....	90
FIGURA 5.9 – SUPERFÍCIE DO DIÂMETRO EXTERNO DA BOBINA DE $B_T$ EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE $B_T$ CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM DIÂMETRO DE $A_T$ CONSTANTE. ....	91
FIGURA 5.10 – SUPERFÍCIE DO DIÂMETRO EXTERNO DA BOBINA DE $B_T$ EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE $B_T$ CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM DIÂMETRO DE $A_T$ CONSTANTE. ....	91
FIGURA 5.11 – DIÂMETRO EXTERNO DA BOBINA DE $B_T$ VERSUS AS PERDAS NO NÚCLEO ..	92
FIGURA 5.12 – DIÂMETRO EXTERNO DA BOBINA DE $B_T$ VERSUS AS PERDAS EM CARGA.....	92
FIGURA 5.13 – SUPERFÍCIE DA MASSA DE COBRE DO ENROLAMENTO DE $B_T$ EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE $B_T$ CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM DIÂMETRO DE $A_T$ CONSTANTE. ....	93
FIGURA 5.14 – SUPERFÍCIE DA MASSA DE COBRE DO ENROLAMENTO DE $B_T$ EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE $B_T$ CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM DIÂMETRO DE $A_T$ CONSTANTE. ....	93
FIGURA 5.15 – SUPERFÍCIE DO DIÂMETRO INTERNO DO ENROLAMENTO DE $A_T$ EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E NO COBRE CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE $B_T$ CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM DIÂMETRO DE $A_T$ CONSTANTE.....	94
FIGURA 5.16 – DIÂMETRO INTERNO DO ENROLAMENTO DE $A_T$ EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO VARIANDO O DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	95
FIGURA 5.17 – DIÂMETRO INTERNO DO ENROLAMENTO DE $A_T$ EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO VARIANDO A DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS. ....	95

---

FIGURA 5.18 – SUPERFÍCIE DO DIÂMETRO INTERNO DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM DIÂMETRO DE AT CONSTANTE.	96
FIGURA 5.19 – DIÂMETRO INTERNO DA BOBINA DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO, CONSIDERANDO A DISTÂNCIA ENTRE OS ENROLAMENTOS CONSTANTE.....	96
FIGURA 5.20 – DIÂMETRO INTERNO DA BOBINA DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO, CONSIDERANDO O DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO CONSTANTE.....	97
FIGURA 5.21 – DIÂMETRO INTERNO DA BOBINA DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, CONSIDERANDO A DISTÂNCIA ENTRE OS ENROLAMENTOS CONSTANTE.....	97
FIGURA 5.22 – SUPERFÍCIE DO DIÂMETRO EXTERNO DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM DIÂMETRO DE AT CONSTANTE.....	98
FIGURA 5.23 – DIÂMETRO EXTERNO DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO, COM VARIAÇÃO DO ENROLAMENTO DE BT, ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	98
FIGURA 5.24 – DIÂMETRO EXTERNO DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE, VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA. ....	99
FIGURA 5.25 – DIÂMETRO EXTERNO DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, COM VARIAÇÃO DO ENROLAMENTO DE BT, ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	99
FIGURA 5.26 – DIÂMETRO EXTERNO DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE, VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA. ....	100
FIGURA 5.27 – SUPERFÍCIE DO DIÂMETRO EXTERNO DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DE AT. ....	100
FIGURA 5.28 – SUPERFÍCIE DO DIÂMETRO EXTERNO DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DE AT. ....	101

---

FIGURA 5.29 – DIÂMETRO EXTERNO DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, COM VARIAÇÃO DO ENROLAMENTO DE BT, ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	102
FIGURA 5.30 – DIÂMETRO EXTERNO DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA. ....	102
FIGURA 5.31 – SUPERFÍCIE DO DIÂMETRO EXTERNO DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DE AT. ....	103
FIGURA 5.32 – SUPERFÍCIE DA MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM DIÂMETRO DE AT CONSTANTE. ....	103
FIGURA 5.33 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO, COM VARIAÇÃO DO ENROLAMENTO DE BT, ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	104
FIGURA 5.34 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE, VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA. ....	104
FIGURA 5.35 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, COM VARIAÇÃO DO ENROLAMENTO DE BT, ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	104
FIGURA 5.36 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE, VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA. ....	105
FIGURA 5.37 – SUPERFÍCIE DA MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM DIÂMETRO DE AT CONSTANTE. ....	105
FIGURA 5.38 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO, COM VARIAÇÃO DO ENROLAMENTO DE BT, ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	106
FIGURA 5.39 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE, VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA. ....	106

---

FIGURA 5.40 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, COM VARIÇÃO DO ENROLAMENTO DE BT, ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	107
FIGURA 5.41 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE, VARIÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA. ....	107
FIGURA 5.42 – SUPERFÍCIE DA MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIÇÃO DA SUA LARGURA, COM VARIÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT....	108
FIGURA 5.43 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO, COM VARIÇÃO DO ENROLAMENTO DE BT, ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	108
FIGURA 5.44 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO, COM VARIÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, DA DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA. ....	109
FIGURA 5.45 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, COM VARIÇÃO DO ENROLAMENTO DE BT, ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	109
FIGURA 5.46 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, COM VARIÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, DA DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA. ....	109
FIGURA 5.47 – SUPERFÍCIE DA MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS NO NÚCLEO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM VARIÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	110
FIGURA 5.48 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO, COM VARIÇÃO DO ENROLAMENTO DE BT, ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	110
FIGURA 5.49 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO, COM VARIÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, DA DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA. ....	111
FIGURA 5.50 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, COM VARIÇÃO DO ENROLAMENTO DE BT, ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	111

---

FIGURA 5.51 – MASSA DO ENROLAMENTO DE AT EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM CARGA, COM VARIÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, DA DISTÂNCIA ENTRE BOBINAS E CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA. ....	111
FIGURA 5.52 – SUPERFÍCIE DA MASSA DO NÚCLEO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIÇÃO DA SUA LARGURA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE.....	112
FIGURA 5.53 – SUPERFÍCIE DA MASSA DO NÚCLEO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	112
FIGURA 5.54 – SUPERFÍCIE DA MASSA DO NÚCLEO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIÇÃO DA SUA LARGURA, COM VARIÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	113
FIGURA 5.55 – SUPERFÍCIE DA MASSA DO NÚCLEO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM VARIÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	113
FIGURA 5.56 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIÇÃO DA SUA LARGURA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	114
FIGURA 5.57 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	114
FIGURA 5.58 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIÇÃO DA SUA LARGURA, COM VARIÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	115
FIGURA 5.59 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIÇÃO DA SUA LARGURA, COM VARIÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	115
FIGURA 5.60 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM VARIÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	116
FIGURA 5.61 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM VARIÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	116

---

FIGURA 5.62 – SUPERFÍCIE DO CUSTO DE FABRICAÇÃO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE.....	117
FIGURA 5.63 – SUPERFÍCIE DO CUSTO DE FABRICAÇÃO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	118
FIGURA 5.64 – SUPERFÍCIE DO CUSTO DE FABRICAÇÃO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	118
FIGURA 5.65 – SUPERFÍCIE DO CUSTO DE FABRICAÇÃO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	119
FIGURA 5.66 – DEMANDA COMERCIAL PARA UM TRANSFORMADOR DE 45 KVA .....	119
FIGURA 5.67 – SUPERFÍCIE DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE.....	120
FIGURA 5.68 – COMPORTAMENTO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT, ISOLAÇÃO E DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO EM 50% ACIMA DO VALOR DE REFERÊNCIA. ....	120
FIGURA 5.69 – COMPORTAMENTO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO O DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE, VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E CALÇO EM 50% ACIMA DO VALOR DE REFERÊNCIA. ....	121
FIGURA 5.70 – SUPERFÍCIE DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	121
FIGURA 5.71 – COMPORTAMENTO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT, ISOLAÇÃO E DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO EM 50% ACIMA DO VALOR DE REFERÊNCIA. ....	122
FIGURA 5.72 – COMPORTAMENTO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO O DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE, VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E CALÇO EM 50% ACIMA DO VALOR DE REFERÊNCIA. ....	122

---

FIGURA 5.73 – SUPERFÍCIE DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	123
FIGURA 5.74 – COMPORTAMENTO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT, ISOLAÇÃO E DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO EM 50% ACIMA DO VALOR DE REFERÊNCIA. ....	123
FIGURA 5.75 – COMPORTAMENTO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E CALÇO EM 50% ACIMA DO VALOR DE REFERÊNCIA. ....	124
FIGURA 5.76 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, NA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E NO CALÇO MAIS A CABEÇA DA BOBINA. ....	124
FIGURA 5.77 – COMPORTAMENTO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT, ISOLAÇÃO E DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO EM 50% ACIMA DO VALOR DE REFERÊNCIA. ....	125
FIGURA 5.78 – COMPORTAMENTO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, NA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E NO CALÇO EM 50% ACIMA DO VALOR DE REFERÊNCIA. ....	125
FIGURA 5.79 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO, MANTENDO O CONDUTOR DE AT CONSTANTE.....	126
FIGURA 5.80 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT, DO CONDUTOR DE AT E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	126
FIGURA 5.81 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO, MANTENDO O CONDUTOR DE AT CONSTANTE.....	127
FIGURA 5.82 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO.....	127

---

FIGURA 5.83 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT E DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO, MANTENDO O CONDUTOR DE AT CONSTANTE.....	128
FIGURA 5.84 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	128
FIGURA 5.85 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO, MANTENDO O CONDUTOR DE AT CONSTANTE.....	129
FIGURA 5.86 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT, DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO.....	129
FIGURA 5.87 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DO CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	130
FIGURA 5.88 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	130
FIGURA 5.89 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA.....	131
FIGURA 5.90 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS, MANTENDO O CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	131
FIGURA 5.91 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS.....	132
FIGURA 5.92 – SUPERFÍCIE DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT. ....	134
FIGURA 5.93 – RELAÇÃO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO AO TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT. ....	134
FIGURA 5.94 – RELAÇÃO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO AO TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT. ....	134

---

FIGURA 5.95 – SUPERFÍCIE DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT. ....	135
FIGURA 5.96 – RELAÇÃO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO AO TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT... ..	135
FIGURA 5.97 – COMPORTAMENTO DO TRI PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT.....	135
FIGURA 5.98 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM VAZIO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT. ....	136
FIGURA 5.99 – RELAÇÃO DAS PERDAS EM VAZIO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT. ....	136
FIGURA 5.100 – RELAÇÃO DAS PERDAS EM VAZIO EM RELAÇÃO AO TRI PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT.....	136
FIGURA 5.101 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM VAZIO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT.....	137
FIGURA 5.102– SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT. ....	137
FIGURA 5.103 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT.....	138
FIGURA 5.104 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO ENROLAMENTO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT.....	138
FIGURA 5.105 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO ENROLAMENTO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT. ....	139
FIGURA 5.106 – RELAÇÃO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO AO TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DA JANELA DO NÚCLEO. ..	140
FIGURA 5.107 – SUPERFÍCIE DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT E ALTURA DA JANELA DO NÚCLEO.....	140

---

FIGURA 5.108 – RELAÇÃO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT COM A ALTURA DA JANELA.....	141
FIGURA 5.109 – RELAÇÃO DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO AO TRI PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT COM A ALTURA DA JANELA.....	141
FIGURA 5.110 – SUPERFÍCIE DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT E COMPRIMENTO DA CULATRA DO NÚCLEO.....	141
FIGURA 5.111 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT E ALTURA DA JANELA DO NÚCLEO.....	143
FIGURA 5.112 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT E COMPRIMENTO DA CULATRA DO NÚCLEO.....	144
FIGURA 5.113 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DOS ENROLAMENTOS EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT E ALTURA DA JANELA DO NÚCLEO.....	145
FIGURA 5.114 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DOS ENROLAMENTOS EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT E COMPRIMENTO DA CULATRA DO NÚCLEO.....	145
FIGURA 5.115 – SUPERFÍCIE DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT, MANTENDO O CONDUTOR DE AT CONSTANTE, E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO.....	146
FIGURA 5.116 – SUPERFÍCIE DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT, DO CONDUTOR DE AT E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO.....	147
FIGURA 5.117 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM VAZIO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT, MANTENDO O CONDUTOR DE AT CONSTANTE, E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO.....	148
FIGURA 5.118 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM VAZIO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT, DO CONDUTOR DE AT E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO.....	148

---

FIGURA 5.119 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT, MANTENDO O CONDUTOR DE AT CONSTANTE, E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	149
FIGURA 5.120 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT, DO CONDUTOR DE AT E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	150
FIGURA 5.122 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO ENROLAMENTO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT, COM O CONDUTOR DE AT CONSTANTE, E DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO VARIÁVEL.....	150
FIGURA 5.123 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO ENROLAMENTO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE BT, DO CONDUTOR DE AT E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO.....	151
FIGURA 5.124 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	152
FIGURA 5.125 – SUPERFÍCIE DE PERDA EM VAZIO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	152
FIGURA 5.126 – SUPERFÍCIE DE PERDA EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO.....	153
FIGURA 5.127 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO ENROLAMENTO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	153
FIGURA 5.128 – SUPERFÍCIE DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	154

---

FIGURA 5.129 – SUPERFÍCIE DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	155
FIGURA 5.130 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM VAZIO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	156
FIGURA 5.131 – SUPERFÍCIE DA PERDA EM VAZIO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	156
FIGURA 5.132 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	157
FIGURA 5.133 – SUPERFÍCIE DA PERDA EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	158
FIGURA 5.134 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO ENROLAMENTO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	159
FIGURA 5.135 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO ENROLAMENTO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	159
FIGURA 5.136 – SUPERFÍCIE DO CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO. ....	160
FIGURA 5.137 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM VAZIO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO	

---

DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO.....	161
FIGURA 5.138 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO.....	161
FIGURA 5.139 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO ENROLAMENTO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO.....	162
FIGURA 5.140 – SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS. ....	162
FIGURA 5.141 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM VAZIO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS.....	163
FIGURA 5.142 – SUPERFÍCIE DAS PERDAS EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS.....	164
FIGURA 5.143 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO ENROLAMENTO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA PROJETOS COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT, DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS.....	164
FIGURA 6.1 – FLUXOGRAMA DE PESQUISA DO PONTO MÍNIMO LOCAL NAS SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL.....	172
FIGURA 6.2 – FLUXOGRAMA DE PESQUISA DE CUSTO TOTAL MENOR QUE O VALOR PADRÃO NAS SUPERFÍCIES.....	174
FIGURA 6.3 – DEMANDA COMERCIAL NA REGIÃO DE CONCESSÃO DA AES-SUL EXTRAPOLADA PARA 1,2 P.U. ....	175
FIGURA 6.4 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DA ALTURA DA JANELA. ....	176

---

FIGURA 6.5 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA CULATRA. ....	178
FIGURA 6.6 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DA ALTURA DA JANELA. ....	179
FIGURA 6.7 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DA ALTURA DA JANELA. ....	180
FIGURA 6.8 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA CULATRA. ....	181
FIGURA 6.9 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DA ALTURA DA JANELA. ....	182
FIGURA 6.10 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA CULATRA. ....	183
FIGURA 6.11 – DEMANDA COMERCIAL NA REGIÃO DE CONCESSÃO DA AES-SUL PARA 1,0 P.U. ....	185
FIGURA 6.12 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DA ALTURA DA JANELA. ..	185
FIGURA 6.13 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DA ALTURA DA JANELA. ..	188
FIGURA 6.14 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DA ALTURA DA JANELA. ..	189
FIGURA 6.15 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DA ALTURA DA JANELA. ..	190
FIGURA 6.16 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA CULATRA. ....	192
FIGURA 6.17 – DEMANDA RESIDENCIAL NA REGIÃO DE CONCESSÃO DA AES-SUL PARA PICO MÁXIMO DE 0,8 P.U. ....	193
FIGURA 6.18 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DA ALTURA DA JANELA. ..	194
FIGURA 6.19 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA CULATRA. ....	195
FIGURA 6.20 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA VARIAÇÃO DA ALTURA DA JANELA. ..	196
FIGURA 6.21 – DEMANDA RESIDENCIAL NA REGIÃO DE CONCESSÃO DA AES-SUL PARA PICO MÁXIMO DE 0,6 P.U. ....	197
FIGURA 6.22 – SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL PARA O FATOR DE ENERGIA IGUAL A 2,5... 199	199
FIGURA A1.1 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	204
FIGURA A1.2 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	205

---

FIGURA A1.4 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT CONSTANTE. ....	205
FIGURA A1.5 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	206
FIGURA A1.6 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO A ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA LARGURA, COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	206
FIGURA A1.7 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	206
FIGURA A1.8 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO A LARGURA DO CONDUTOR DE BT CONSTANTE E VARIAÇÃO DA SUA ESPESSURA, COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	207
FIGURA A1.9 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO O CONDUTOR DE BT CONSTANTE E COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	207
FIGURA A1.10 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO O CONDUTOR DE BT CONSTANTE E COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	208
FIGURA A1.11 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO O CONDUTOR DE BT CONSTANTE E COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	208
FIGURA A1.12 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO O CONDUTOR DE BT CONSTANTE E COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT. ....	208
FIGURA A1.13 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT E COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	209
FIGURA A1.14 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA LARGURA DO CONDUTOR DE BT E COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	210

---

FIGURA A1.15 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT E COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	210
FIGURA A1.16 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO CONDUTOR DE BT E COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	211
FIGURA A1.17 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO O CONDUTOR DE BT CONSTANTE E COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	211
FIGURA A1.18 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO O CONDUTOR DE BT CONSTANTE E COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	212
FIGURA A1.19 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO O CONDUTOR DE BT CONSTANTE E COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	212
FIGURA A1.20 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO O CONDUTOR DE BT CONSTANTE E COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	213
FIGURA A1.21 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO O CONDUTOR DE BT CONSTANTE E COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	214
FIGURA A1.22 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO O CONDUTOR DE BT CONSTANTE E COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	214
FIGURA A1.23 – SUPERFÍCIE DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA CONSIDERANDO O CONDUTOR DE BT CONSTANTE E COM VARIAÇÃO NO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	215
FIGURA A1.24 – PERDAS EM VAZIO E EM CARGA EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA PERCENTUAL CONSIDERANDO O CONDUTOR DE BT CONSTANTE E COM VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CONDUTOR DE AT.....	215
FIGURA A1.25 – SUPERFÍCIE DE TRI CONSIDERANDO OS CONDUTORES DE BT E AT CONSTANTE, COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO.....	216

---

FIGURA A1.26 – SUPERFÍCIE DE TRI CONSIDERANDO OS CONDUTORES DE BT E AT CONSTANTE, COM VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTO E DO CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA.....	217
FIGURA A1.27 – SUPERFÍCIE DE TRI CONSIDERANDO O PROJETO COM OS CONDUTORES DE BT E AT CONSTANTE, COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO E DO DIÂMETRO DA COLUNA DO NÚCLEO E O PROJETO COM VARIAÇÃO DO CONDUTOR DE AT, DISTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTO E DO CALÇO MAIS CABEÇA DA BOBINA.....	218
FIGURA A1.28 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA.....	218
FIGURA A1.29 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA.....	219
FIGURA A1.30 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA.....	220
FIGURA A1.31 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA.....	220
FIGURA A1.32 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA.....	221
FIGURA A1.33 – SUPERFÍCIE DA TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA.....	222
FIGURA A1.34 – SUPERFÍCIE DO FATOR DE ACELERAÇÃO DE ENVELHECIMENTO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA.....	222
FIGURA A1.35 – SUPERFÍCIE DO FATOR DE ACELERAÇÃO DE ENVELHECIMENTO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA.....	223
FIGURA A1.36 – SUPERFÍCIE DO FATOR DE ACELERAÇÃO DE ENVELHECIMENTO EM RELAÇÃO ÀS PERDAS EM VAZIO E EM CARGA.....	224

---

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – QUANTIDADES DE MATRIZES POR COMBINAÇÃO DOS PARÂMETROS CONSTRUTIVOS.....	16
TABELA 6.1 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	177
TABELA 6.2 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	177
TABELA 6.3 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	178
TABELA 6.4 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	179
TABELA 6.5 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	180
TABELA 6.6 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	180
TABELA 6.7 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	181
TABELA 6.8 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	181
TABELA 6.9 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	183
TABELA 6.10 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	183
TABELA 6.11 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	184
TABELA 6.12 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	184
TABELA 6.13 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	186
TABELA 6.14 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	186
TABELA 6.15 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	187
TABELA 6.16 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	187
TABELA 6.17 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	188
TABELA 6.18 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	188
TABELA 6.19 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	189
TABELA 6.20 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	190
TABELA 6.21 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	191
TABELA 6.22 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	191
TABELA 6.23 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	192
TABELA 6.24 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	192
TABELA 6.25 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	194
TABELA 6.26 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	194
TABELA 6.27 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	195
TABELA 6.28 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	195
TABELA 6.29 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	196
TABELA 6.30 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	197
TABELA 6.31 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	198
TABELA 6.32 – PONTOS DE CUSTO TOTAL MENORES QUE O VALOR PADRÃO.....	198

## LISTA DE NOMENCLATURAS

$\rho$	Densidade do material.
$\alpha$	Difusão térmica.
$\varepsilon$	Emissividade.
$\beta$	Coeficiente de expansão térmica.
$\mu$	Viscosidade.
$\delta_{AT}$	Densidade da corrente no enrolamento de AT.
$\delta_{BT}$	Densidade da corrente no enrolamento de BT.
$\tau_e$	Constante de tempo do enrolamento.
$\Delta T_e$	Elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento.
$\Delta T_{e,i}$	Elevação da temperatura inicial do ponto mais quente do enrolamento.
$\Delta T_{e,R}$	Elevação da temperatura do ponto mais quente em carga nominal.
$\Delta T_{e,u}$	Elevação da temperatura final do ponto mais quente do enrolamento.
$\Delta T_{ea,R}$	Elevação da temperatura do ponto mais quente sobre o ambiente.
$\tau_{TO}$	Constante de tempo do topo do óleo.
$\Delta T_{TO}$	Elevação da temperatura do topo do óleo.
$\Delta T_{TO,i}$	Elevação da temperatura inicial do topo do óleo.
$\Delta T_{TO,R}$	Elevação da temperatura do topo do óleo em carga nominal.
$\Delta T_{TO,u}$	Elevação da temperatura final do topo do óleo.
$\Delta x$	Espessura.
$A$	Área transversal.
$AT$	Alta Tensão.
$B_n$	Indução magnética.
$BT$	Baixa tensão.
$C$	Capacidade térmica.
$C_{Amortização}$	Custo de amortização.
$C_{Cobre}$	Custo do cobre.
$C_E$	Custo da energia.
$C_e'$	Capacitância por unidade de comprimento.

---

$C_{fabricação}$	Custo de fabricação.
$C_{Ferro}$	Custo do material do núcleo.
$C_{Fixo}$	Custo fixo.
$c_p$	Calor específico.
$C_{Total}$	Custo total do transformador.
$C_{TR/Análise}$	Custo do transformador no tempo de análise.
$C_{W0}$	Custo das perdas em vazio.
$C_{WL}$	Custo das perdas sob carga.
$DeAT$	Diâmetro externo do enrolamento de AT.
$DeBT$	Diâmetro externo do enrolamento de BT.
$DiAT$	Diâmetro interno do enrolamento de AT.
$DiBT$	Diâmetro interno do enrolamento de BT.
$D_{nucleo}$	Diâmetro do núcleo.
$D_{TNK}$	Diâmetro do tanque.
$FE$	Fator de energia.
$G$	Gauss.
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção.
$H_{AT}$	Altura da bobina de AT.
$H_{BT}$	Altura da bobina de BT.
$H_j$	Altura da janela.
$h_r$	Coefficiente de radiação.
$H_{TNK}$	Altura do tanque.
$I$	Fluxo de corrente.
$j$	Taxa de juros.
$k$	Condutividade térmica.
$K$	Constante de Boltzman.
$k_{aço}$	Condutividade térmica do aço-silício.
$K_i$	Relação da carga inicial pela carga nominal.
$k_{oleo}$	Condutividade térmica do óleo.
$K_u$	Relação da carga final pela carga nominal.
$kVA_i$	Potência transformada.

---

$kVA_N$	Potência nominal do transformador.
$L_e'$	Indutância por unidade de comprimento.
$m$	Constante que depende da classe de resfriamento do transformador.
$M_{AT}$	Massa do enrolamento de AT.
$M_{BT}$	Massa do enrolamento de BT.
$M_{Cobre}$	Massa total do cobre nos enrolamentos.
$mm^2$	Milímetros quadrados, unidade de área.
$M_{Nucleo}$	Massa total do núcleo.
$M_{Nucleo}$	Massa do núcleo.
$M_{Tanque}$	Massa do tanque e acessórios.
$n$	Período de análise.
$N_{Gr}$	Número de Grashof.
$N_{Nu}$	Número de Nusselt.
$N_{Pr}$	Número de Prandtl.
$P$	Potência.
$pe$	Perda específica do núcleo.
$PL$	Parcela do lucro na manufatura.
$P_{T,R}$	Perda total em carga nominal.
$PV$	Período de vida útil econômica do transformador.
$q$	Fluxo de calor.
$Q_t$	Energia térmica armazenada.
$R$	Relação das perdas em carga pelas perdas em vazio.
$R_e'$	Resistência por unidade de comprimento.
$S_e'$	Condutância de dispersão por unidade de comprimento.
$S_n$	Área da coluna do núcleo.
$t$	Tempo.
$T$	Temperatura.
$t_1$	Temperatura interna.
$t_2$	Temperatura externa.
$T_a$	Temperatura ambiente.
$T_{amb}$	Temperatura ambiente.

$T_{DeAT}$	Temperatura do diâmetro externo de AT.
$T_{DeBT}$	Temperatura do diâmetro externo de BT.
$T_{DiBT}$	Temperatura do diâmetro interno.
$T_{DiBT}$	Temperatura do diâmetro interno de BT.
$T_e$	Temperatura do ponto mais quente do enrolamento.
$t_f$	Temperatura do fluido.
$T_{nucleo}$	Temperatura do núcleo.
$T_{oleo}$	Temperatura do óleo.
$TRI$	Tempo de retorno do investimento.
$t_s$	Temperatura da superfície.
$T_{TNK}$	Temperatura do tanque.
$T_{W0}$	Tarifa das perdas em vazio.
$T_{WL}$	Tarifa das perdas sob carga.
$V_{Oleo}$	Volume do óleo.
$W_{Cu}$	Perdas no cobre.
$W_N$	Perdas no núcleo.
$W_{Total}$	Perdas totais.
$x_e$	Posição nas coordenadas retangulares.
$Z\%$	Impedância percentual.

# *CAPÍTULO 1*

## *INTRODUÇÃO*

Transformadores são equipamentos utilizados nos sistemas de potência capaz de alterar o nível da tensão e da corrente, através de dois enrolamentos, um núcleo magnético e dois circuitos: primário e secundário.

As potências nominais padronizadas para transformadores de distribuição em redes aéreas, segundo NBR 5440 [1], para uma elevação de temperatura do enrolamento sobre o ambiente de 55 °C são:

- a) Transformadores monofásicos: 3; 5; 10; 15; 25; 37,5; 50; 75 e 100 kVA;
- b) Transformadores trifásicos: 15; 30; 45; 75; 112,5; 150; 225 e 300 kVA.

A operação do transformador é acompanhada por perdas nos seus enrolamentos, denominada por perdas em carga ou no cobre, que são dependentes do quadrado da corrente de carga. E, também, por perdas no núcleo, denominada perdas em vazio ou no ferro, são devido à magnetização do núcleo e são constantes durante o seu funcionamento em carga.

Durante a operação diária de um transformador, seja na maior parte do tempo em vazio ou em sobrecarga, as perdas capitalizadas podem acarretar custos para a concessionária e sociedade. A motivação para a redução das perdas capitalizadas deve-se ao fato de que o transformador é responsável por um terço das perdas no sistema de distribuição. A União Européia, através dos documentos de harmonização HD 428 e 538 [2], e os Estados Unidos, com a NEMA TP-1 [3] e do documento de suporte técnico (*TSD – technical support document*) [4], tem como objetivo reduzir estes custos operacionais e, conseqüentemente, as perdas na rede. Estes documentos avaliam o custo total da operação do transformador utilizando as equações de capitalização e a eficiência em determinado ponto da carga.

Uma alternativa para aumentar a eficiência de um transformador é adequar o projeto em termos de massa. A adequação do núcleo, onde ocorre a perda em vazio, depende da qualidade e disponibilidade do aço-silício, que impacta no custo e no

processo produtivo. A utilização das lâminas de aço-silício de grão orientado, M2 ou M3, ou de material amorfo reduz as perdas no núcleo. As variações na baixa densidade do fluxo magnético do núcleo devem ser compensadas pela área transversal, o que resulta em alterações nas perdas nos enrolamentos. Métodos para controlar as perdas nos enrolamentos, tal como o aumento da massa de cobre, resulta em maiores perdas em vazio devido ao redimensionamento da janela.

Para solucionar este impasse técnico-econômico a proposta deste estudo é analisar as opções de projeto de transformadores de distribuição que possuem funcionamento eficiente, ou seja, com redução de perdas. A premissa para esta construção é usar uma tecnologia acessível com praticidade na montagem e sem incremento de custos, tais como a aquisição de novos tipos de máquinas de corte ou de enrolamento.

A caracterização da carga é o primeiro passo para o cálculo do transformador eficiente devido a sua influência nas perdas nos enrolamentos. Os parâmetros que ajudam a definir o comportamento da carga são o pico de carga, o fator de carregamento e o crescimento da carga.

As opções de projeto dos enrolamentos apresentam a utilização de condutores em cobre ou em alumínio. O cobre quando comparado ao alumínio possui maior condutividade elétrica e perdas 40% menores. Porém, para baixas densidades de corrente é possível a utilização do alumínio obtendo-se níveis de perdas equivalentes ao uso do cobre para as mesmas condições. É comum a utilização de cobre nos enrolamentos de alta tensão e de alumínio nos de baixa tensão em forma de folhas de alumínio, de modo a reduzir as perdas por correntes parasitas.

Algumas concessionárias no Brasil e todas no caso dos EUA, compram transformadores de distribuição pelo resultado mais atrativo da equação de capitalização do custo total, incluindo o custo de compra e as perdas capitalizadas. Nos EUA os transformadores de distribuição eficiente são definidos segundo proposta do TSD, utilizando-se, junto com a equação do custo total, o cálculo do custo do ciclo de vida (*LCC – Life Cycle Cost*). O LCC é o custo total pago pelo consumidor sobre o tempo de vida do equipamento, incluindo os custos de compra, de instalação e operacionais. Simulações de Monte Carlo são utilizadas para calcular, entre todas as combinações, os resultados do LCC. Vale ressaltar que as tarifas para as perdas em vazio e em carga são as variáveis do sistema para a simulação, juntamente com o carregamento ao qual o transformador é submetido.

A técnica do *Pay-Back*, ou tempo de retorno do investimento, é indicada também nos documentos de compra nos EUA e Europa. O tempo de retorno do investimento é o período em anos para recuperar o custo adicional devido à aquisição de equipamento com melhor eficiência. O cálculo é simplificado considerando-se os custos operacionais constantes.

O impacto ambiental da redução das perdas, ou seja, na economia no consumo de energia, como, para geração térmica é a redução de emissão de gases, tais como óxido de nitrogênio e dióxido de carbono.

A abordagem de projetos ótimos de transformadores tem sido realizada desde a década de 60 com o aprimoramento das técnicas de otimização ocorridas nos anos 40 e 50. Na pesquisa realizada sobre este tema, os projetos ótimos são aqueles que possuem menores perdas em carga ou que utilizam matéria prima de forma racionada. As técnicas de pesquisa mais utilizadas são a otimização não linear, programação geométrica, redes neurais e algoritmos genéticos.

A proposta da tese é o estudo dos projetos do transformador de distribuição eficiente considerando o projeto ótimo aquele que satisfaz as necessidades técnicas e minimizam as perdas capitalizadas na rede. Os capítulos a seguir mostram a análise, construção e determinação do projeto de distribuição eficiente.

A fundamentação teórica do projeto de transformadores eficientes foi tratada em [5]. A continuação deste estudo e metodologia de construção das superfícies de custo de fabricação e total é abordada no Capítulo 2. Na análise, as matrizes, que formam as superfícies, são tridimensionais e trabalham com os parâmetros do núcleo e dos enrolamentos para a composição da parte ativa. O objetivo é calcular os projetos com perdas garantidas menores que as normalizadas [1], resultando em menor tempo de retorno do investimento.

As alterações na parte ativa do transformador modificam os valores para o ponto mais quente do enrolamento e definem o tempo de vida útil do equipamento. O Capítulo 3 apresenta as temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento para os projetos desenvolvidos no capítulo 2, segundo normalização IEEE [6]. As normalizações não definem a localização do ponto mais quente e seu valor é determinado teoricamente. Portanto, esse capítulo mostra a utilização inédita de sensores com tecnologia Bragg distribuídos ao longo dos enrolamentos de cobre. A proposta é definir com exatidão o valor e a localização do ponto mais quente e realizar uma modelagem térmica com um circuito elétrico equivalente. Com os dados da medição dos sensores é possível mapear a distribuição da temperatura no

transformador.

O conhecimento do comportamento dielétrico no equipamento permite administrar as distâncias do isolamento e da espessura da isolação no cálculo do transformador eficiente. O Capítulo 4 aborda, conceitualmente, o comportamento da variação da isolação em relação ao custo e impedância percentual.

A variação de todos os parâmetros construtivos da parte ativa, tais como, núcleo, enrolamentos, espessura da isolação, distância entre enrolamentos, calço e cabeça da bobina, é apresentada no Capítulo 5. Isto resulta em oito combinações desses parâmetros em matrizes tridimensionais. As superfícies dos projetos permitem o estudo da combinação de parâmetros construtivos para obtenção das perdas e o seu relacionamento com as restrições técnicas e econômicas.

A aplicação da técnica de otimização nas superfícies é utilizada para a procura de projetos ótimos de transformadores pelo ponto mínimo das perdas capitalizadas. O Capítulo 6 tem o objetivo de adequar a ferramenta de otimização com a metodologia da construção das superfícies de custo total. A proposta evidencia menores custos na rede sem penalizar o custo de fabricação através de uma análise matemática simplificada.

Em resumo, a tese está dividida em:

- a) Construção das superfícies: Definição do problema – Capítulo 2;
- b) Restrição térmica dos projetos – Capítulo 3;
- c) Restrição dielétrica – Capítulo 4;
- d) Complemento e análise das restrições técnicas e econômicas com a formação do conjunto de soluções – Capítulo 5;
- e) Simplificação e otimização do conjunto de soluções – Capítulo 6.

## CAPÍTULO 2

# DEFINIÇÃO DO PROBLEMA: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA INICIAL DAS SUPERFÍCIES

As superfícies de custo de fabricação e de custo total indicam as possibilidades de projetos de transformadores. Cada ponto nas superfícies indica um determinado projeto, associando custos de fabricação, custo total e perdas. O conhecimento do comportamento dessas superfícies é fundamental para a definição de um projeto de transformador de distribuição adequado às perdas e a uma determinada eficiência e viabilidade econômica.

O equacionamento e os métodos desenvolvidos a seguir definem guias para projeto, que devem ser submetidos à análise dos fabricantes para posterior manufatura. Isto se deve ao fato de que este procedimento não tem por objetivo substituir procedimentos e análises específicas por mais completo que possa ser considerado.

As superfícies de custo de fabricação e de custo total são construídas a partir do equacionamento da quantidade da matéria prima utilizada no projeto e seus valores de mercado, e das perdas em operação do transformador submetidas a parâmetros econômicos.

### 2.1. EQUACIONAMENTO: METODOLOGIA DAS SUPERFÍCIES

O custo de fabricação [5] expressa os montantes necessários para produzir um determinado projeto de transformador conforme Equação (2.1).

$$C_{Fabricação} = C_{Fixo} + C_{Ferro} \cdot M_{Núcleo} + C_{Cobre} \cdot M_{Cobre} \cdot \quad (2.1)$$

Onde:

$C_{Fabricação}$  é o custo de fabricação em R\$;

$C_{Fixo}$  é o custo fixo em R\$;

$C_{Ferro}$  é o custo do material do núcleo em R\$/kg;

$C_{Cobre}$  é o custo médio do cobre (esmaltado e retangular) em R\$/kg;

$M_{Nucleo}$  é a massa total do núcleo em kg;

$M_{Cobre}$  é a massa total do cobre nos enrolamentos em kg.

O custo fixo é composto pelos custos das chapas de aço, para a construção do tanque, do óleo e do material para isolamento. Estes itens não dependem do funcionamento do transformador e são considerados, para efeito deste estudo, como fixos para cada valor de potência nominal e classe de tensão.

A segunda parcela da Equação (2.1) representa o custo do material consumido na manufatura do núcleo. A terceira parcela representa o custo do material utilizado na manufatura dos enrolamentos. As massas do ferro e do cobre, em função das suas perdas, são dadas conforme Equação (2.2) e (2.3) [6]. Portanto, através da superfície de custo de fabricação é possível verificar o custo do consumo de material versus as perdas no transformador.

$$M_{Nucleo} = \frac{W_N}{pe} \quad (2.2)$$

$$W_{Cu} = 2,65 \cdot (\delta_{AT}^2 \cdot M_{AT} + \delta_{BT}^2 \cdot M_{BT}) \quad (2.3)$$

Onde:

$pe$  é a perda específica no núcleo em W/kg;

$W_N$  são as perdas no núcleo em W;

$W_{Cu}$  são as perdas no cobre em W;

$M_{Nucleo}$  é a massa do núcleo em kg;

$M_{AT}$  é a massa de cobre do enrolamento de A.T. em kg;

$M_{BT}$  é a massa de cobre do enrolamento de B.T. em kg;

$\delta_{AT}$  é a densidade de corrente no enrolamento de A.T. em A/mm<sup>2</sup>;

$\delta_{BT}$  é a densidade de corrente no enrolamento de B.T. em A/mm<sup>2</sup>.

O custo total do transformador de distribuição [5] é dado pela soma dos custos das perdas em vazio e das perdas em carga de acordo com a demanda, conforme Equação (2.4).

$$C_{Total} = C_{TR/Análise} + C_{W0} + C_{WL} . \quad (2.4)$$

Onde:

$C_{Total}$  é o custo total do transformador em R\$;

$C_{TR/Análise}$  é o custo do transformador no período de análise em R\$;

$C_{W0}$  é o custo das perdas em vazio em R\$;

$C_{WL}$  é o custo das perdas em carga em R\$.

O custo do transformador dado na Equação (2.5) é o valor de compra do equipamento distribuído ao longo de sua vida útil contabilizado no período de análise.

$$C_{TR/Análise} = C_{Amortização} \cdot \frac{(1+j)^n - 1}{(1+j)^n \cdot j} . \quad (2.5)$$

Os custos das perdas em vazio dependem da tarifa cobrada pela perda, da magnitude desta perda e do valor atual de acordo com a Equação (2.6). A Equação (2.7) mostra o custo das perdas em carga. Esta depende da tarifa, da magnitude da perda, e da demanda diária ao qual o transformador está submetido.

Sendo,

$$C_{W0} = T_{W0} \cdot W_N \cdot \frac{(1+j)^n - 1}{(1+j)^n \cdot j} . \quad (2.6)$$

$$C_{WL} = T_{WL} \cdot W_{Cu} \cdot \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{KVA_i}{KVA_N} \right)^2 \cdot \left( \frac{(1+j)^n - 1}{(1+j)^n \cdot j} \right) . \quad (2.7)$$

Onde:

$C_{Amortização}$  é o custo de amortização do transformador no período de análise em R\$;

$T_{W0}$  é a tarifa para as perdas em vazio em R\$/kW;

$T_{WL}$  é a tarifa para as perdas em carga em R\$/kW;

$i$  é a indicação da hora correspondente;

$j$  é a taxa de juros ao ano;

$n$  é o período de análise em anos;

$KVA_i$  é a potência transformada;

$KVA_N$  é a potência nominal do transformador.

A Equação (2.8) apresenta o custo de amortização durante o período de vida útil do transformador.

$$C_{Amortização} = C_{Fabricação} \cdot \left(1 + \frac{PL}{100}\right) \cdot \frac{(1+j)^{PV} \cdot j}{(1+j)^{PV} - 1}. \quad (2.8)$$

Onde:

$PV$  é o período de vida útil econômica do transformador em anos, definido pela concessionária;

$PL$  é a parcela do lucro na manufatura, assumida neste estudo como nula.

Se o período de análise  $n$  for igual ao período de vida útil,  $PV$ , do transformador, o custo do transformador para análise é igual ao seu custo de venda dado por (2.9).

$$C_{TR/Análise} = C_{Fabricação} \cdot \left(1 + \frac{PL}{100}\right). \quad (2.9)$$

As tarifas para as perdas em vazio e sob carga, considerando um período anual, são dadas por (2.10) e (2.11). Estas são utilizadas pelas concessionárias e o custo da energia é geralmente considerado o custo de compra [5].

$$T_{W0} = 8,760 \cdot C_E. \quad (2.10)$$

$$T_{WL} = 0,365 \cdot C_E. \quad (2.11)$$

Onde  $C_E$  é o custo da energia em R\$/kWh.

## 2.2 FORMAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE CUSTO DE FABRICAÇÃO E TOTAL

A metodologia da construção das superfícies desenvolvida primeiramente em [5] é expandida para matrizes tridimensionais. Portanto, os projetos de transformadores são organizados em matrizes formando as superfícies que permitem uma análise do comportamento do custo versus perdas.

As superfícies do custo de fabricação (ou venda) e do custo total relacionam estes valores com as perdas em vazio e em carga do projeto. Portanto, cada ponto dessas superfícies indica um projeto de transformador a partir de uma demanda específica.

A metodologia para os cálculos dos projetos de transformadores considera a variação – em 50% acima e abaixo do valor de referência – dos parâmetros

construtivos, tais como:

- área da coluna do núcleo ou indução magnética;
- espessura do condutor de baixa tensão (BT);
- largura do condutor de baixa tensão (BT);
- diâmetro do condutor de alta tensão (AT) ou densidade da corrente de AT.

Cada projeto é o resultado da combinação destes parâmetros. E os valores chamados de referência são aqueles utilizados em um projeto para o transformador padrão que possui as perdas em vazio e em carga de acordo com o estabelecido pela norma NBR 5440 [1].

A análise da influência da área da coluna do núcleo, ou seja, da indução magnética, apresenta duas possibilidades:

- indução magnética constante;
- indução magnética variável.

O condutor do enrolamento de BT, geralmente possui seção retangular – espessura e largura – e, portanto, as variações de suas dimensões ocorrem de duas maneiras:

- espessura constante e largura variável;
- largura constante e espessura variável.

O condutor do enrolamento de AT, geralmente possui seção circular, logo é possível considerar as seguintes combinações:

- densidade da corrente de AT constante;
- densidade da corrente de AT variável.

A Figura 2.1 apresenta um diagrama com as combinações de projeto.

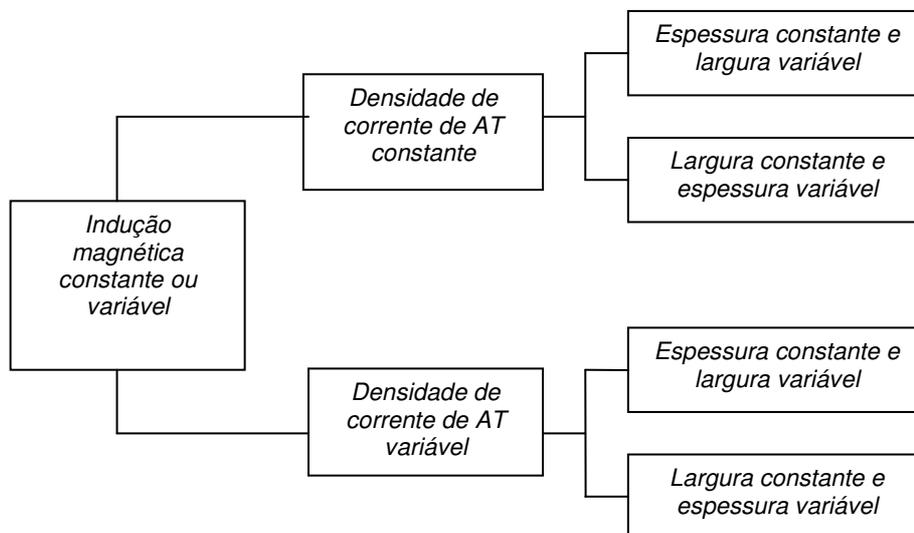


Figura 2.1 – Esquema das combinações dos parâmetros construtivos.

O cálculo da coluna do núcleo dos projetos de transformadores de distribuição consiste de uma matriz 11x1, com valores que se encontram 50% acima e abaixo, inclusive no valor de referência deste parâmetro.

A coluna do núcleo é calculada de acordo com o fluxograma da Figura 2.2.

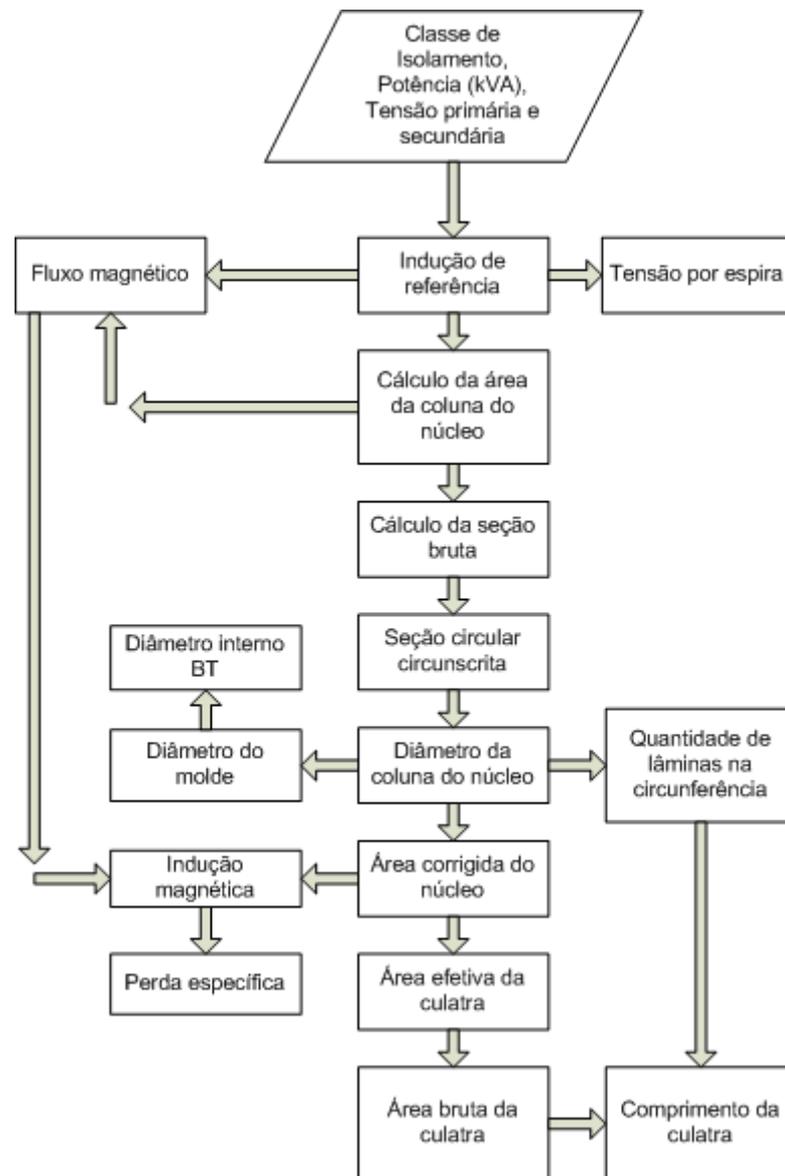


Figura 2.2 – Fluxograma do cálculo da área do núcleo.

Com o diâmetro da coluna do núcleo definido, obtém-se o diâmetro interno da bobina de BT. A altura da janela é estabelecida a partir das dimensões do condutor desta bobina e do seu número de espiras, portanto, a massa do núcleo total depende do cálculo do enrolamento de BT conforme Figura 2.3.

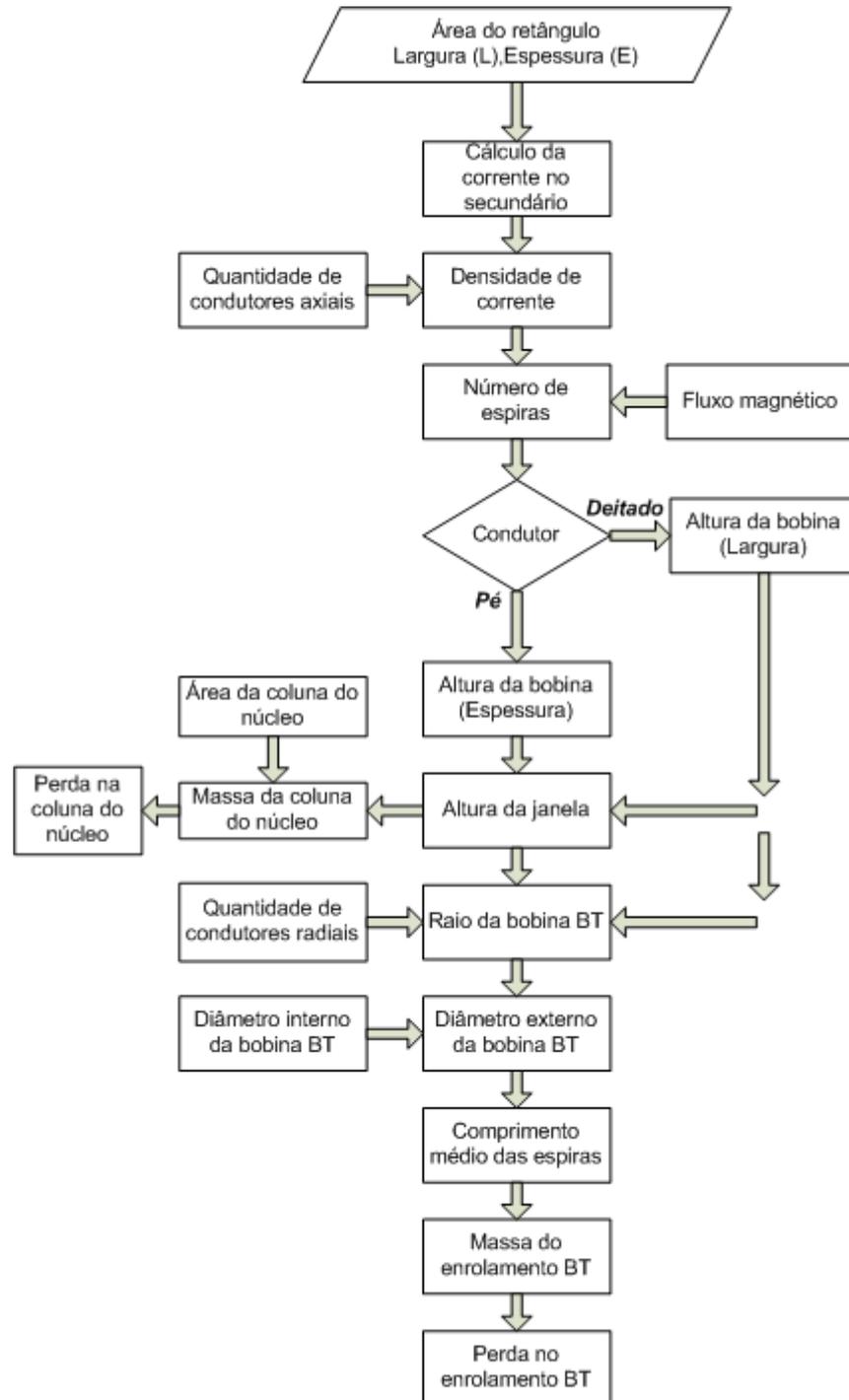


Figura 2.3 – Fluxograma do cálculo do enrolamento BT.

Os condutores do enrolamento de BT utilizados nos cálculos estão organizados em duas matrizes com dimensão 11x2. A matriz largura do condutor apresenta a primeira coluna contendo a variação da largura do condutor de BT e a segunda coluna contendo os valores da largura igual ao valor de referência. A matriz espessura apresenta a primeira coluna contendo os valores de espessura de referência constante

e a segunda coluna com a variação destes valores. A combinação da variação da largura com a espessura constante e a variação da espessura com a largura constante produz um total de 22 possibilidades de condutores para o enrolamento de BT.

A disposição do condutor retangular, devido as suas dimensões – largura e espessura – influenciam a altura da janela e a distância entre o centro das colunas. São duas as denominações da disposição do condutor retangular conforme Figura 2.4: deitada, conforme Figura 2.5, e em pé, conforme Figura 2.6.

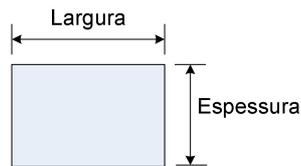


Figura 2.4 – Seção do condutor retangular.

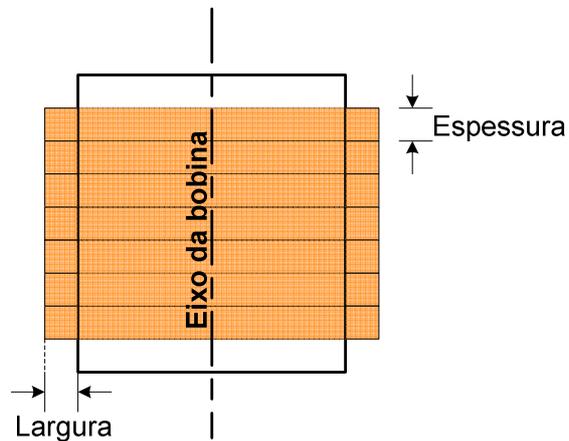


Figura 2.5 – Corte transversal de bobina com condutor retangular em pé.

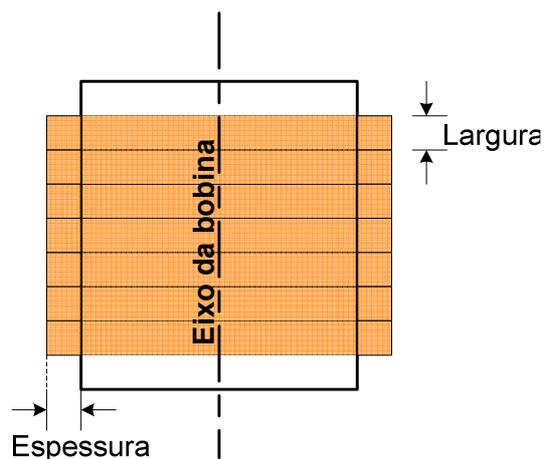


Figura 2.6 – Corte transversal de bobina com condutor retangular deitado.

O diâmetro interno do enrolamento de BT é dependente do diâmetro da coluna do núcleo. Logo, para um valor de indução constante é formada uma matriz com dimensão 11x1. O diâmetro externo do enrolamento de BT é dependente das dimensões do condutor e do diâmetro interno dessa bobina. Portanto, mantendo o diâmetro da coluna do núcleo constante e variando o raio da bobina de BT obtêm-se duas matrizes para o diâmetro externo com dimensão 11x1. Uma matriz é referente ao condutor de BT com variação da largura e mantendo a espessura constante. A outra, apresenta a variação da espessura do condutor de BT, mantendo a largura constante.

Os parâmetros construtivos dependentes do diâmetro externo tais como o comprimento médio das espiras, a massa do enrolamento de BT e a perda, são expressos por duas matrizes de dimensão 11x1, da mesma forma como as matrizes do diâmetro interno do enrolamento de BT. A dimensão da coluna do núcleo com a variação dos parâmetros do condutor tem valor distinto para cada matriz.

Os condutores do enrolamento de AT estão organizados em duas matrizes 11x1: uma com o diâmetro do condutor constante e a outra com a sua variação.

O cálculo do enrolamento de AT produz 11 matrizes de dimensão 11x1 gerando um total de 121 projetos por matriz. A determinação do enrolamento de AT é indicada no fluxograma da Figura 2.7.

O cálculo das perdas totais do núcleo é a última etapa do projeto de transformador [6], pois a partir do cálculo do enrolamento de AT é possível determinar o raio total da bobina e definir a distância entre centro de colunas conforme Figura 2.8. Vale ressaltar que, a distância entre o centro da coluna define o comprimento da culatra. O núcleo possui duas culatras e estas unem os pontos superiores e inferiores da coluna.

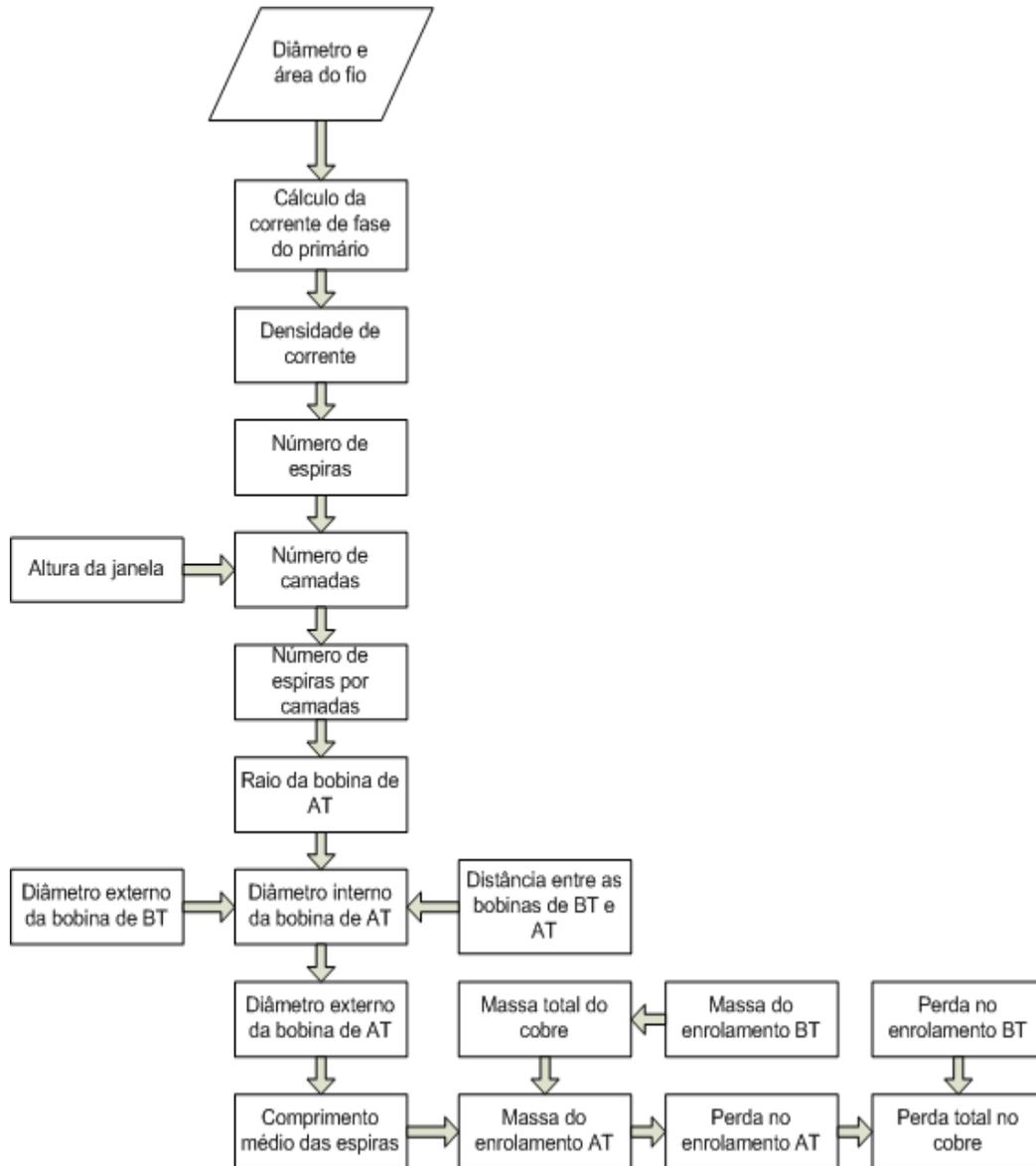


Figura 2.7 – Fluxograma do cálculo do enrolamento AT.

Os projetos de transformadores gerados são apresentados de forma matricial. Cada matriz representa a combinação da variação dos parâmetros dos enrolamentos em relação a uma determinada dimensão da coluna do núcleo. As linhas da matriz apresentam a variação do condutor de BT, enquanto que as colunas representam a variação do condutor de AT. Dessa maneira, a combinação desses parâmetros apresenta opções de projetos de transformadores de distribuição.

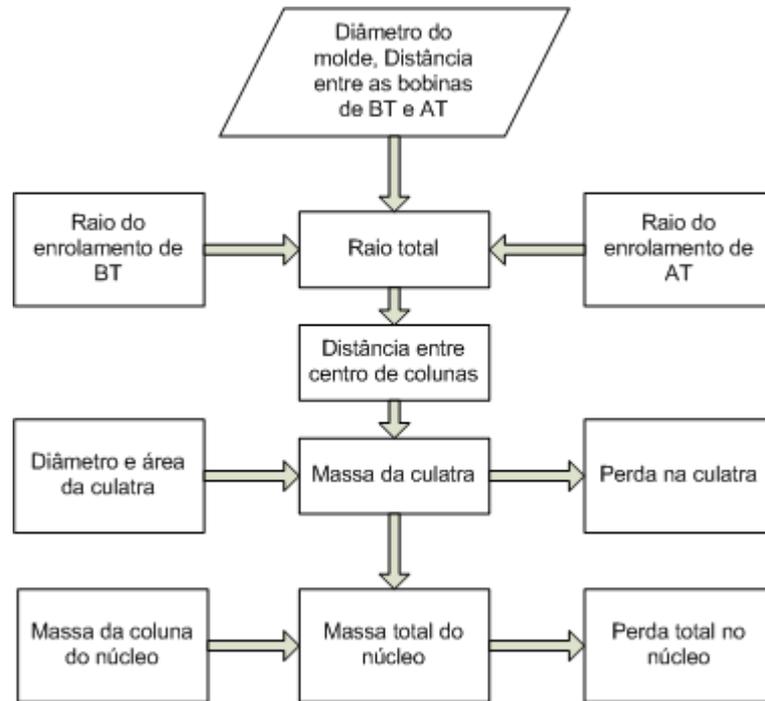


Figura 2.8 – Fluxograma do cálculo da perda no núcleo.

### 2.2.1 SUPERFÍCIE DE CUSTO DE FABRICAÇÃO – ESTUDO DE CASO

A superfície de custo de fabricação combina os parâmetros construtivos do transformador e cada projeto com os custos de fabricação em relação às perdas em vazio e em carga. Para traçar essas superfícies, apresentada neste estudo, foi considerado um transformador monofásico 100 kVA padrão, classe 15 kV, utilizado no *Projeto de Regularização de Consumidores de Baixa Renda* (comunidade de Paraisópolis) na Cidade de São Paulo patrocinado pela USAID e ICA – Procobre Brasil em parceria com AES – Eletropaulo.

Para as superfícies de custo de fabricação as combinações são realizadas em função da massa do núcleo e do cobre, de acordo com o equacionamento do item 2.1. São obtidas 11 matrizes sendo que cada matriz representa a variação das dimensões dos condutores de BT e AT para uma dimensão distinta da coluna do núcleo (indução magnética), conforme Tabela 2.1.

O projeto deste transformador utiliza o condutor retangular na posição em pé no enrolamento de BT. Isto significa que, o aumento da largura resulta em um aumento do comprimento da culatra e do raio da bobina. Para este caso, o aumento da espessura proporciona um aumento na altura da janela, ou seja, a variação ocorre no sentido axial, enquanto que a variação da largura ocorre no sentido radial.

Tabela 2.1 – Quantidades de matrizes por combinação dos parâmetros construtivos.

<b>CONDUTOR DE AT</b>	<b>CONDUTOR DE BT</b>	<b>QUANTIDADE DE MATRIZES</b>	<b>DIMENSÃO DA MATRIZ</b>
<i>Diâmetro constante</i>	<i>Espessura constante e variação da largura</i>	11	11x1
	<i>Largura constante e variação da espessura</i>	11	11x1
<i>Variação no diâmetro</i>	<i>Espessura constante e variação da largura</i>	11	11x11
	<i>Largura constante e variação da espessura</i>	11	11x11

A Figura 2.9 apresenta as superfícies de custo de fabricação considerando os projetos com variação da espessura do condutor de BT, mantendo sua largura e a densidade da corrente de AT constantes.

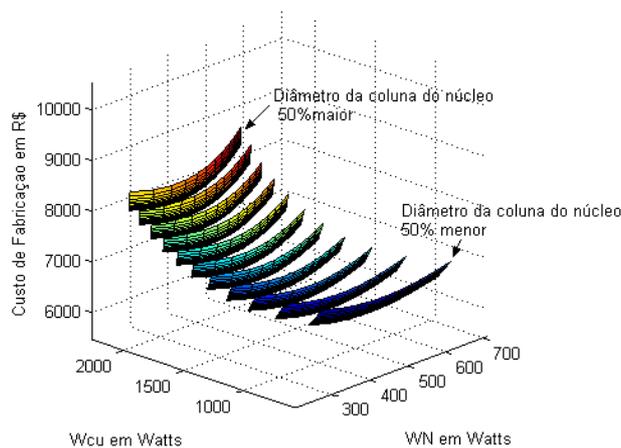


Figura 2.9 – Superfícies de custo de fabricação com variação da espessura do condutor de BT, mantendo a largura e o diâmetro do condutor de AT constantes.

Observa-se na Figura 2.9 que são 11 superfícies de custo de fabricação, onde cada superfície representa uma matriz com 121 elementos. O diâmetro da coluna do núcleo permanece inalterado para cada superfície, ou seja, para cada matriz ocorrem alterações na altura da janela e comprimento da culatra. Estas variáveis são dependentes das dimensões dos condutores.

A Figura 2.10 apresenta as superfícies individuais de custo de fabricação para cada variação da coluna do núcleo, ou seja, para cada indução magnética.

Observa-se, nesta figura, que quanto maior o diâmetro da coluna, maior é o custo de fabricação. Isto se deve à utilização de uma quantidade maior de lâminas de aço silício. A densidade da corrente de AT é constante e apenas a variação da espessura do condutor de BT ocasiona variação na altura da janela.

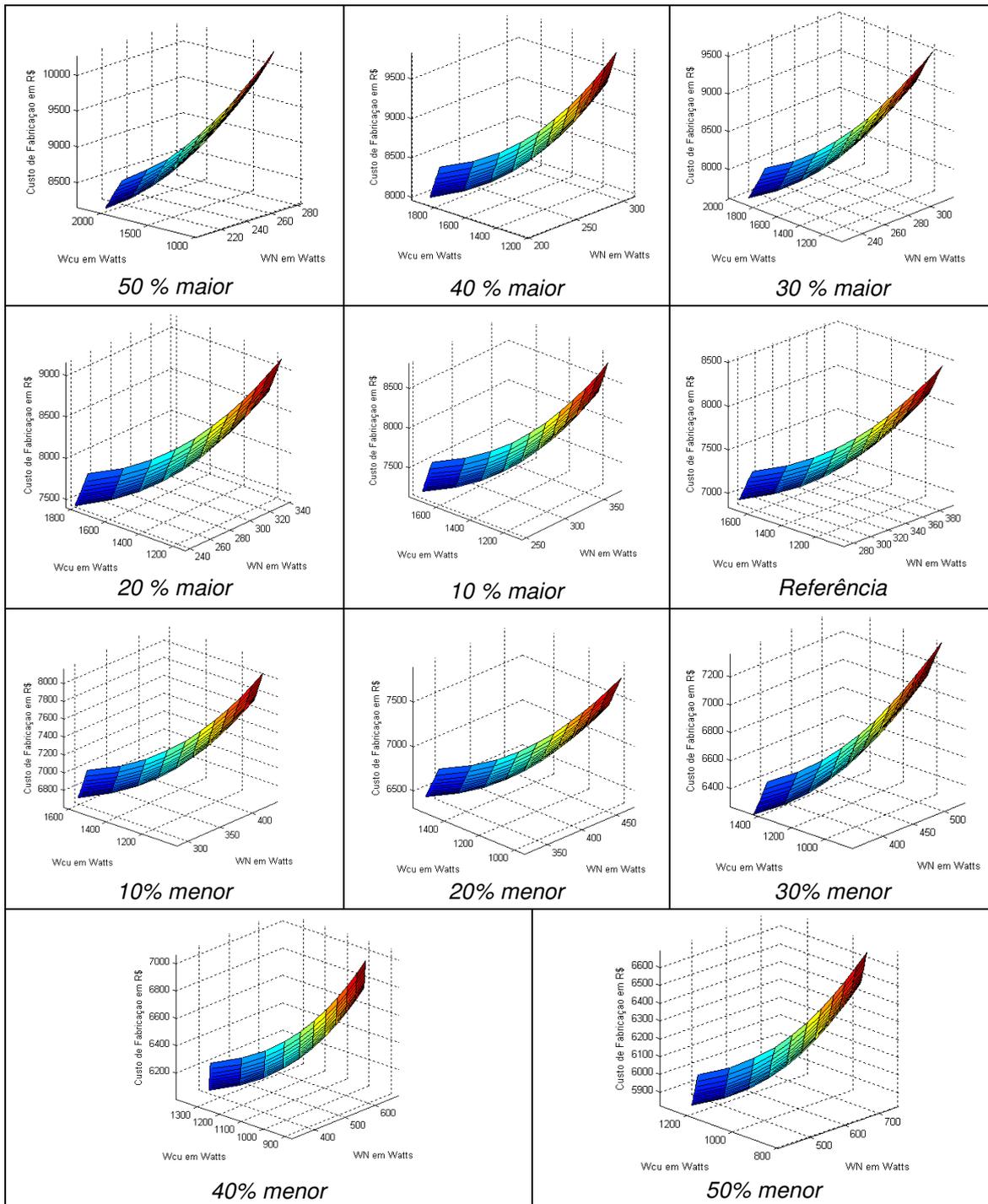


Figura 2.10 – Superfícies individuais de custo de fabricação com variação da espessura do condutor de BT, mantendo a largura e o diâmetro de AT constantes.

O comportamento do custo de fabricação deste tipo de projeto em relação à massa do núcleo e das perdas em vazio é apresentado na Figura 2.11. Como exemplo, a superfície que possui o diâmetro do núcleo 50% maior do que o valor de referência.

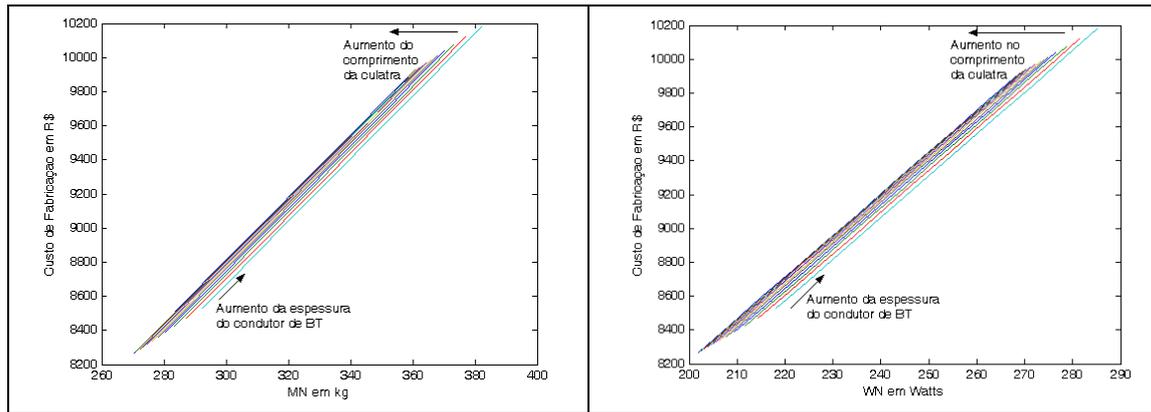


Figura 2.11 – Comportamento da massa e da perda do núcleo em relação ao custo de fabricação.

A primeira coluna da matriz da massa do núcleo apresenta o diâmetro do condutor de AT 50% maior que o diâmetro de referência e as linhas apresentam a variação da espessura do condutor de BT. Observa-se que, quanto maior é a massa do núcleo maior é o custo de fabricação. O aumento na altura da janela proporciona maiores perdas em vazio.

O comportamento do custo de fabricação em relação à massa do cobre e às perdas em carga, Figura 2.12, tem como exemplo a superfície que possui o diâmetro do núcleo 50% maior que o valor de referência. O projeto possui a variação da espessura do condutor de BT, e a largura e o diâmetro do condutor de AT constantes. Quanto maior for a massa do cobre, maior será o custo de fabricação e as perdas em carga serão menores como previsto.

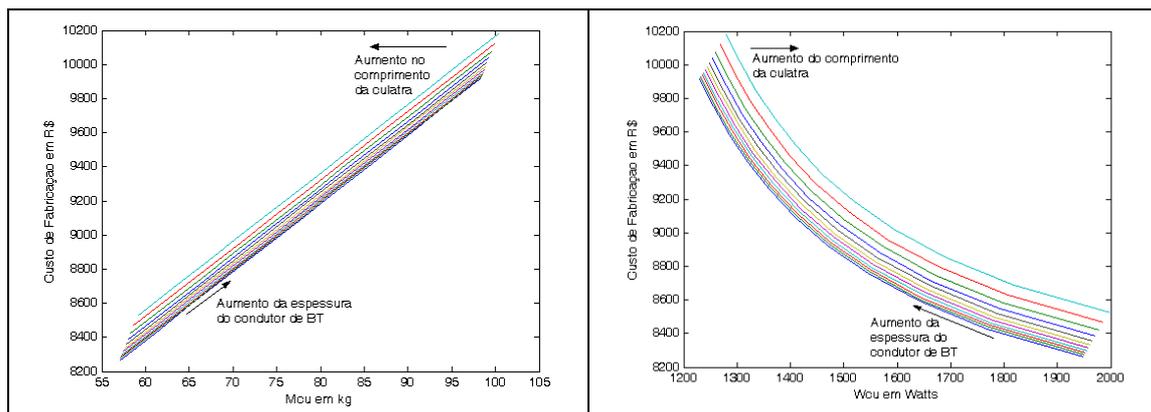


Figura 2.12 – Comportamento da massa do cobre e da perda em carga em relação ao custo de fabricação.

A Figura 2.13 apresenta as superfícies de custo de fabricação considerando os projetos com espessura constante e variação da largura do condutor de BT, sendo o diâmetro do condutor de AT variável.

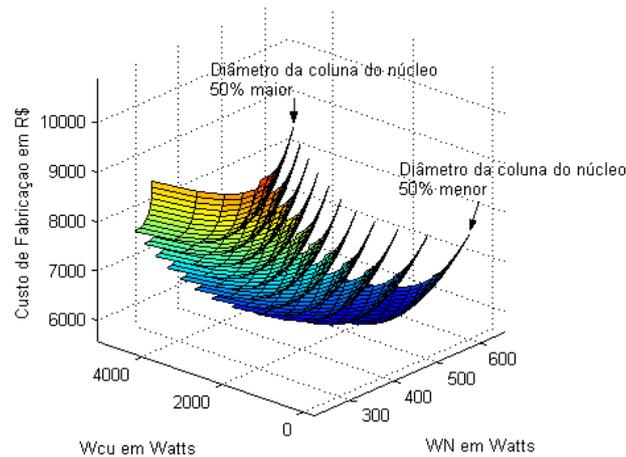


Figura 2.13 – Superfícies de custo de fabricação com espessura constante e variação da largura do condutor de BT, com o diâmetro do condutor de AT variável.

A Figura 2.14 apresenta o comportamento da massa e das perdas no núcleo em relação ao custo de fabricação. Este tipo de projeto resulta em um aumento no comprimento da culatra, devido a variações na largura do condutor de BT e no diâmetro do condutor de AT. Como a espessura do condutor de BT permanece constante, a altura da janela não se altera. O aumento do comprimento da culatra contribui com um aumento na massa do núcleo.

A Figura 2.15 apresenta o comportamento da massa do cobre e das perdas em carga em relação ao custo de fabricação. Observa-se que este caso apresenta um aumento da massa do cobre em relação ao projeto representado na Figura 2.12, o que é compreensível, pois estes resultados são devidos apenas à variação do condutor de BT. Quanto menor for a perda em carga, maior é o custo de fabricação, uma vez que maior massa de cobre é utilizado.

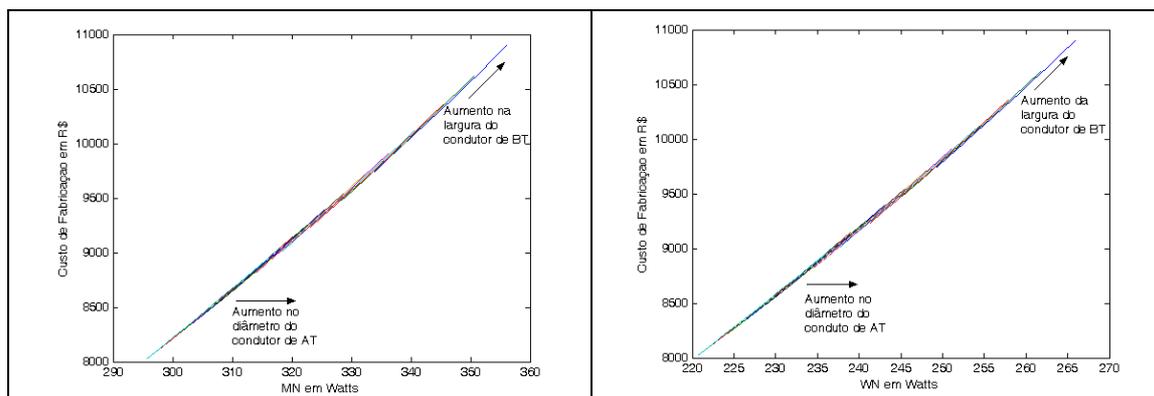


Figura 2.14 – Comportamento da massa e da perda do núcleo em relação ao custo de fabricação.

A Figura 2.16 apresenta as superfícies individuais de custo de fabricação para cada variação da coluna do núcleo.

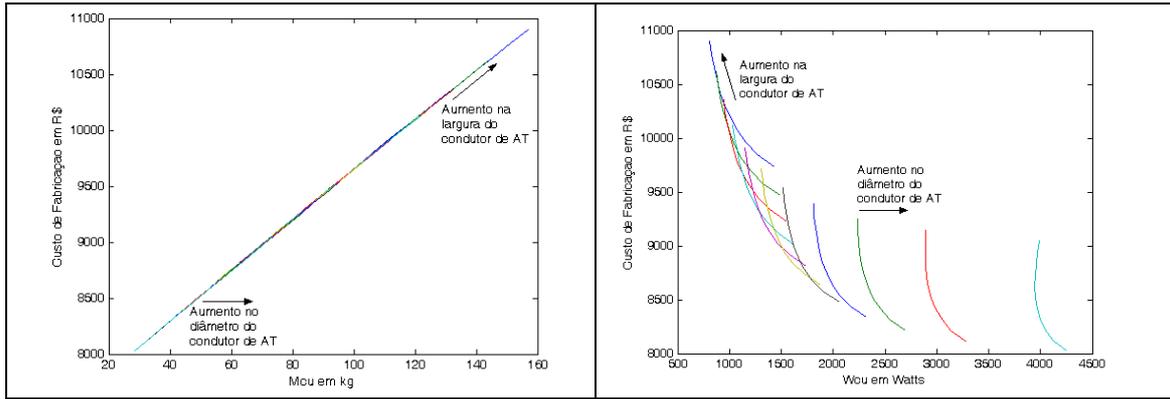


Figura 2.15 – Comportamento da massa do cobre e da perda em carga em relação ao custo de fabricação.

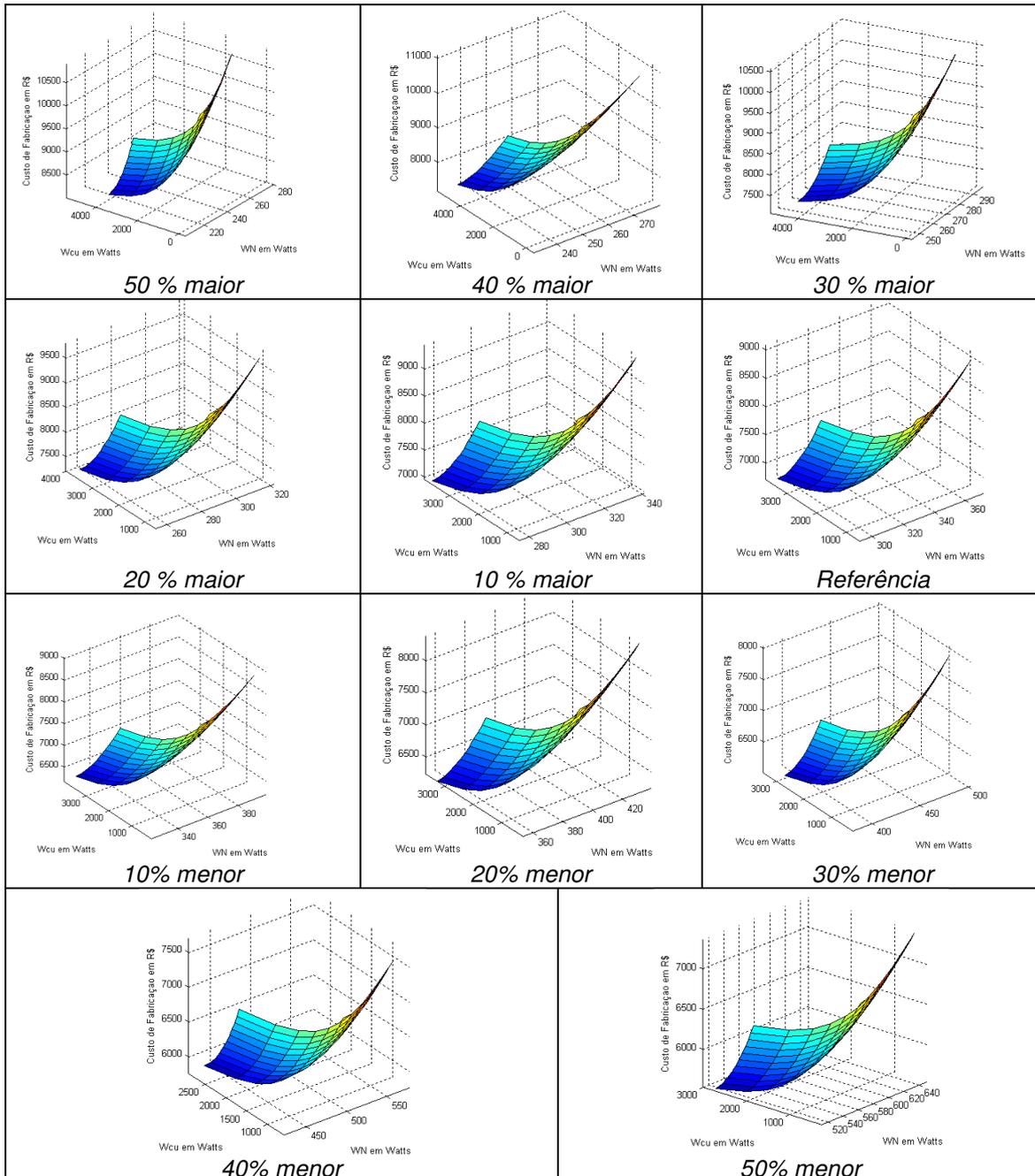


Figura 2.16 – Superfícies individuais do custo de fabricação da Figura 2.13.

Na Figura 2.16 é possível avaliar o efeito de cada indução nos projetos dos enrolamentos e dimensões da janela. Neste projeto, a inclinação das curvas e as perdas são diferentes das apresentadas na Figura 2.10 para cada diâmetro da coluna do núcleo.

A Figura 2.17 apresenta as superfícies de custo de fabricação considerando os projetos com variação da espessura e largura constante do condutor de BT, sendo o diâmetro do condutor de AT variável.

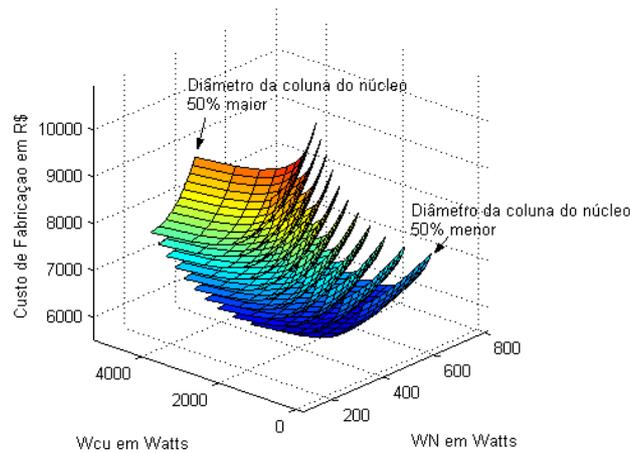


Figura 2.17 – Superfícies de custo de fabricação com variação da espessura, mantendo a largura constante do condutor de BT e diâmetro do condutor de AT variável.

A Figura 2.18 apresenta o comportamento da massa e da perda no núcleo em relação ao custo de fabricação. A Figura 2.19 mostra o comportamento da massa do cobre e da perda em carga em relação ao custo de fabricação.

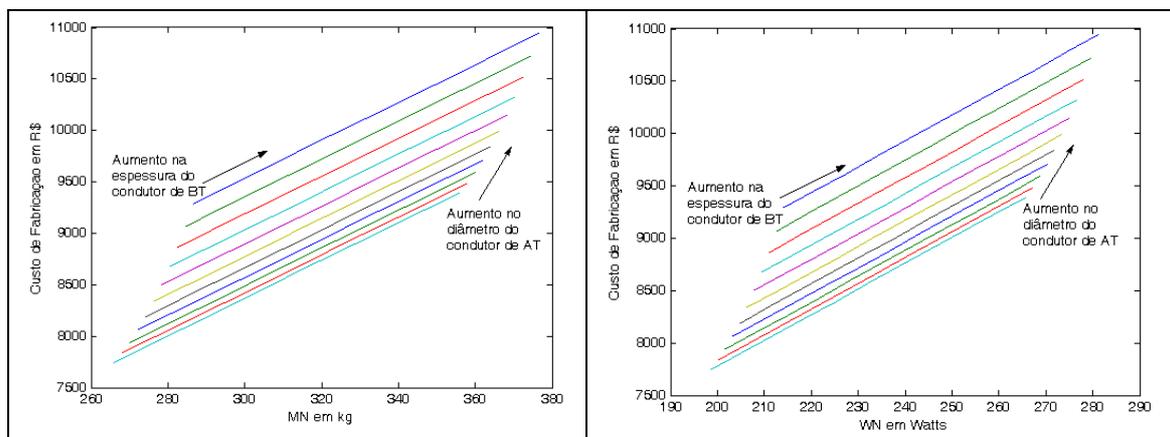


Figura 2.18 – Comportamento da massa e da perda do núcleo em relação ao custo de fabricação.

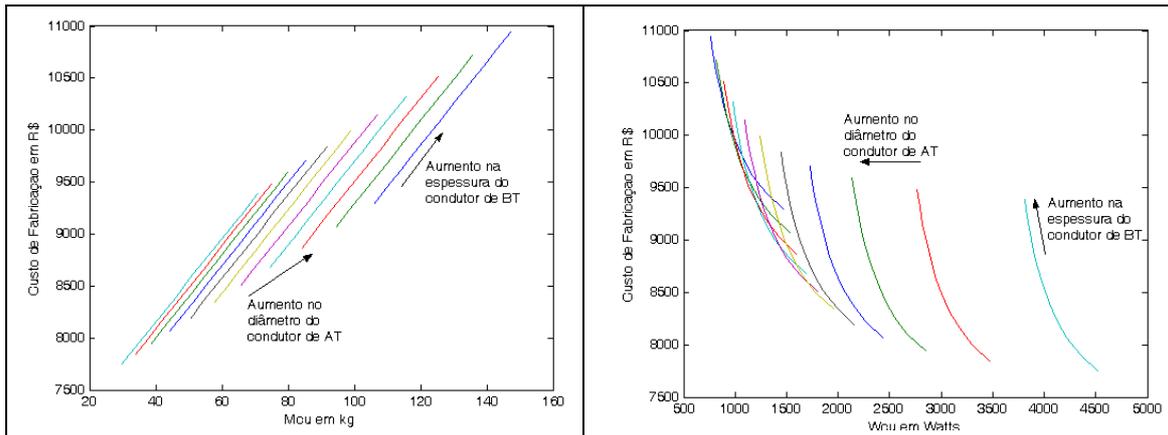


Figura 2.19 – Comportamento da massa do cobre e da perda em carga em relação ao custo de fabricação.

Neste caso as variações na altura da janela e no comprimento da culatra ocorrem com o diâmetro do condutor de AT. Quanto menor for a perda em carga, maior é o custo de fabricação, uma vez que é utilizado maior massa de cobre.

### 2.2.2 SUPERFÍCIE DE CUSTO TOTAL – ESTUDO DE CASO

A superfície de custo total relaciona as combinações dos parâmetros construtivos dos projetos de transformadores, com as perdas em vazio e em carga indicando o custo total de cada projeto de acordo com a demanda. O equacionamento do custo total considera a taxa de juros, o tempo de análise, e a demanda. Para a análise do desempenho econômico do transformador de distribuição monofásico de 100 kVA da comunidade de Paraisópolis foi considerada uma taxa de juros de 10% ao ano e um tempo de análise de 10 anos. A Figura 2.20 apresenta como exemplo a demanda comercial típica para traçar as superfícies de custo total.

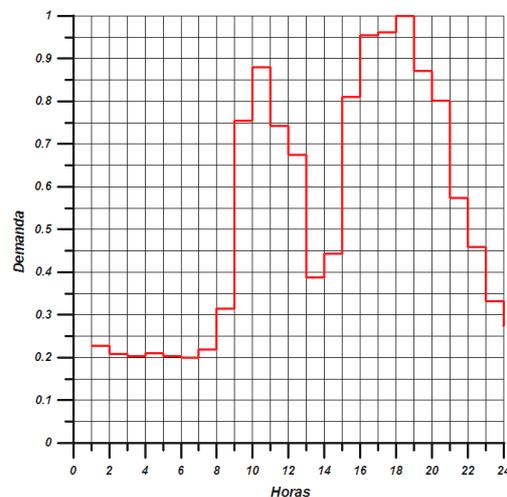


Figura 2.20 – Demanda comercial.

A construção das superfícies de custo total começa a partir do equacionamento do custo total para cada projeto do transformador. A Figura 2.21 apresenta as curvas do custo total para projetos que apresentam espessura constante e largura variável do condutor de BT, com densidade da corrente de AT constante. Os resultados do projeto para cada variação da indução magnética são apresentados por curvas distintas.

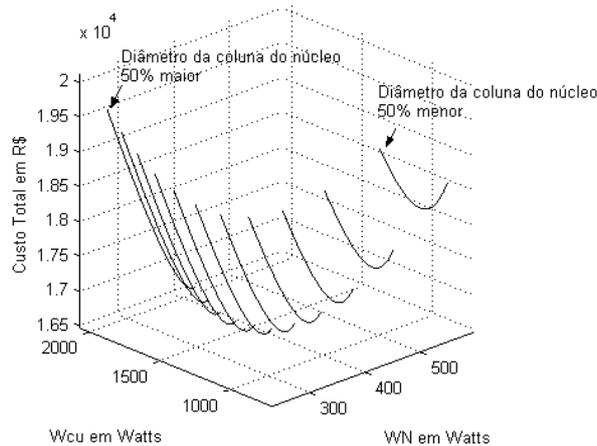


Figura 2.21 – Superfícies de custo total com variação da largura e espessura constante do condutor de BT e diâmetro do condutor de AT constante.

A Figura 2.22 apresenta o comportamento das perdas em vazio e em carga em relação ao custo total. Neste exemplo, o diâmetro da coluna do núcleo é 50% maior. Para perdas em vazio menores que 236 Watts ocorre um aumento de aproximadamente de 8,9% no custo total. E para as menores perdas em carga, menor é o custo total.

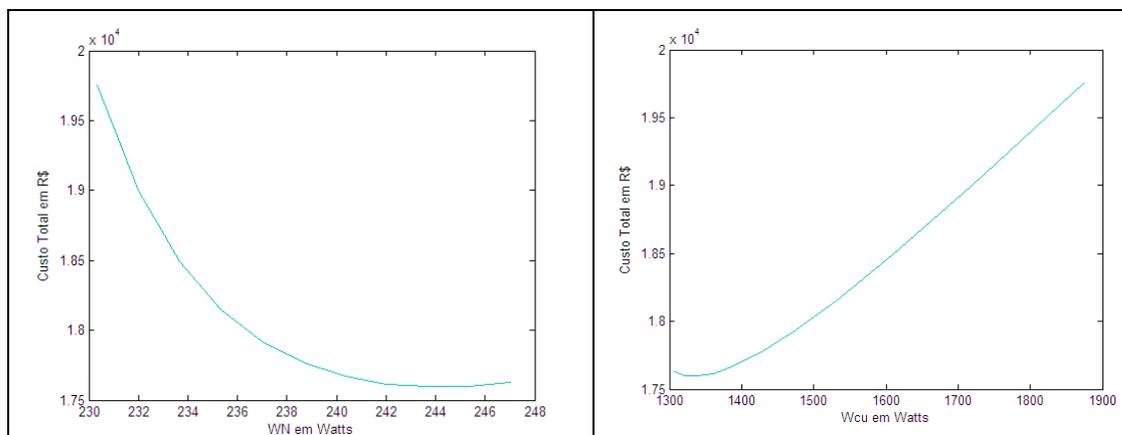


Figura 2.22 – Comportamento da perda em vazio e em carga em relação ao custo total.

A Figura 2.23 apresenta as superfícies de custo total para projetos que possuem largura constante e espessura variável do condutor de BT, com a densidade da corrente de AT constante.

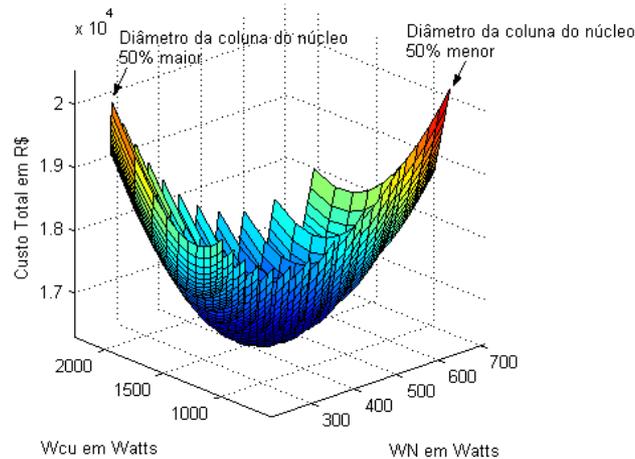


Figura 2.23 – Superfícies de custo total com variação da espessura e largura constante do condutor de BT, com o diâmetro constante do condutor de AT.

A Figura 2.24 apresenta o comportamento das perdas em vazio e em carga, em relação ao custo total de projetos que possuem a variação no diâmetro da coluna do núcleo 50% maior que o valor de referência.

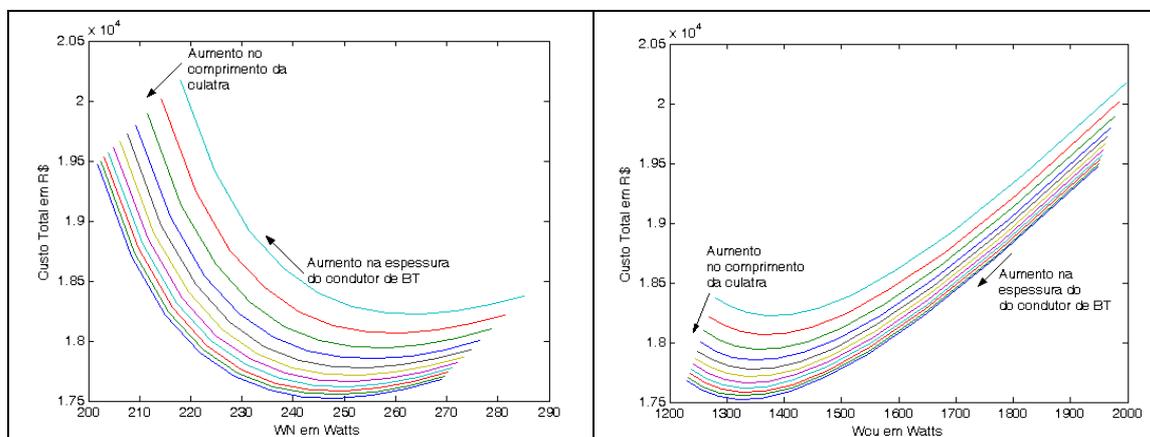


Figura 2.24 – Comportamento da perda em vazio e em carga em relação ao custo total.

A Figura 2.25 apresenta as superfícies de custo total dos projetos que apresentam espessura constante e largura variável do condutor de BT, com densidade da corrente de AT variável. Cada superfície apresenta os resultados do projeto para cada variação no diâmetro da coluna do núcleo.

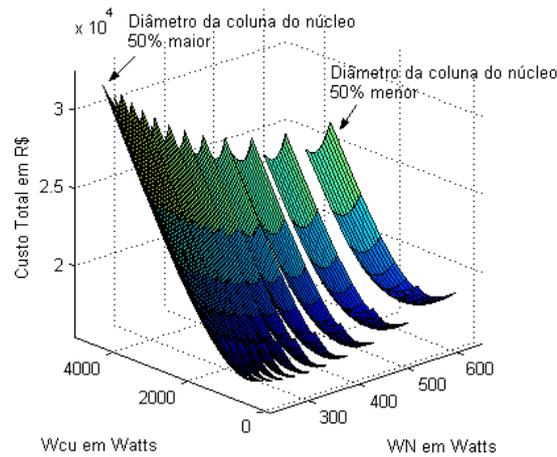


Figura 2.25 – Superfícies de custo total com variação da largura e mantendo a espessura constante do condutor de BT e com variação no diâmetro do condutor de AT.

O comportamento das perdas em vazio e em carga, em relação ao custo total é apresentado na Figura 2.26. Este tipo de transformador possui o diâmetro da coluna do núcleo 50% acima do valor de referência.

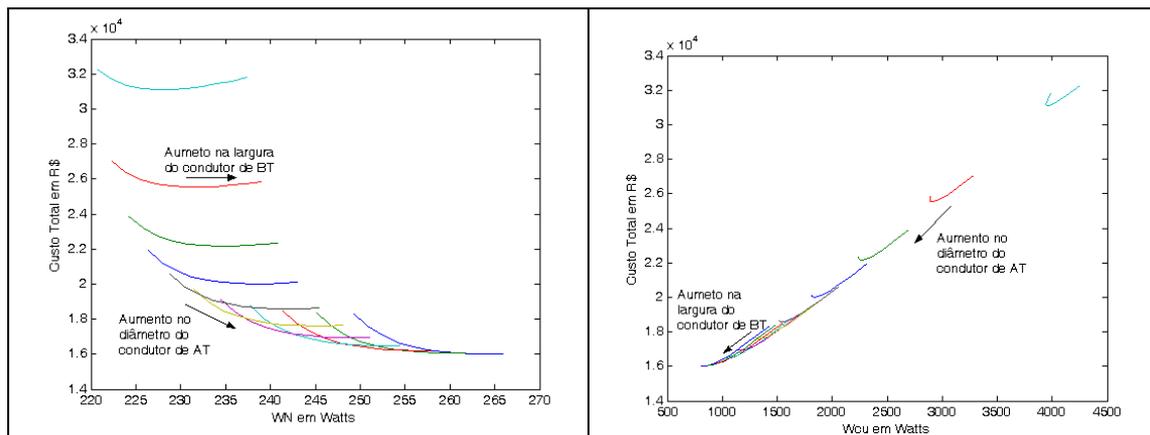


Figura 2.26 – Comportamento da perda em vazio e em carga em relação ao custo total.

O projeto apresenta um aumento no comprimento da culatra. Para cada combinação de condutores de BT e AT, representados pelas linhas (BT) e colunas (AT) desta matriz, a faixa dos valores de perdas em vazio para um baixo valor de custo total é de aproximadamente 10 Watts. A primeira coluna é o resultado da combinação do condutor de AT 50% acima do valor de referência para cada variação do condutor de BT. Os valores das perdas em vazio que estão entre 255 a 265 Watts apresentam menor custo total. Quanto às perdas em carga, o custo total é baixo, aproximadamente 200 Watts. Isto decorre por haver uma massa maior de cobre.

Se aumentarmos a massa de cobre as perdas em carga serão também menores, reduzindo o custo total. Para o núcleo, as perdas não dependem somente do

aumento da massa, mas também da combinação das suas dimensões: altura da janela e comprimento da culatra.

A Figura 2.27 apresenta as superfícies do custo total dos projetos que apresentam largura constante e espessura variável para o condutor de BT, com densidade da corrente de AT variável.

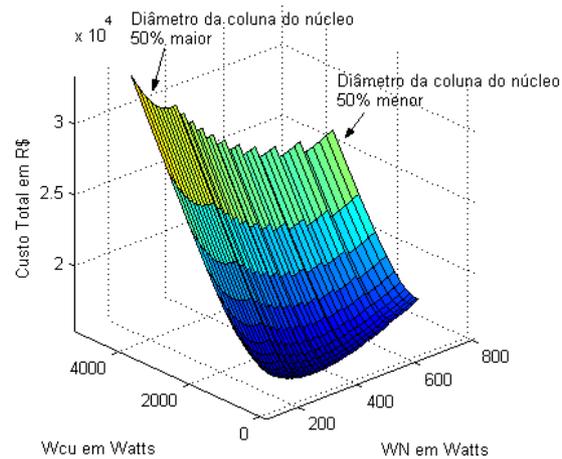


Figura 2.27 – Superfícies de custo total com variação da espessura e mantendo a largura constante do condutor de BT e com variação no diâmetro do condutor de AT.

A Figura 2.28 apresenta o comportamento das perdas em vazio e em carga, em relação ao custo total com o diâmetro da coluna do núcleo em 50% acima do valor de referência.

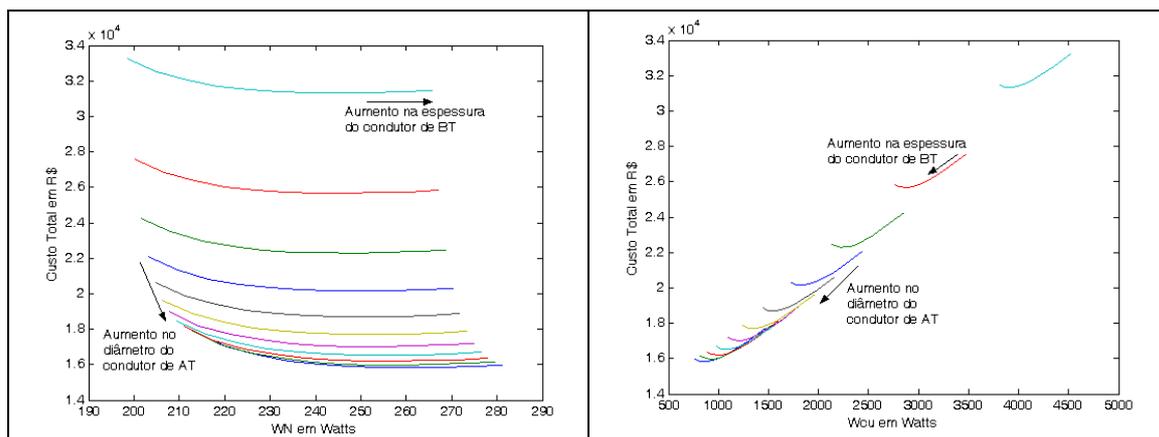


Figura 2.28 – Comportamento da perda em vazio e em carga em relação ao custo total.

## 2.2 PONTO MÍNIMO E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO

O ponto mínimo na superfície de custo total indica o projeto com menor custo total de acordo com a demanda. Para a sua determinação são utilizadas diversas técnicas de otimização não-linear.

Os projetos dos transformadores de distribuição desse estudo foram calculados com o auxílio da ferramenta MATLAB®. Para cada combinação das perdas em vazio e das perdas em carga, os projetos são apresentados por matrizes tridimensionais.

O ponto mínimo das superfícies de custo total foi determinado a partir da comparação de todos os elementos de cada matriz para determinada variação no diâmetro da coluna do núcleo,  $z$ , como mostra o fluxograma do processo na Figura 2.29.

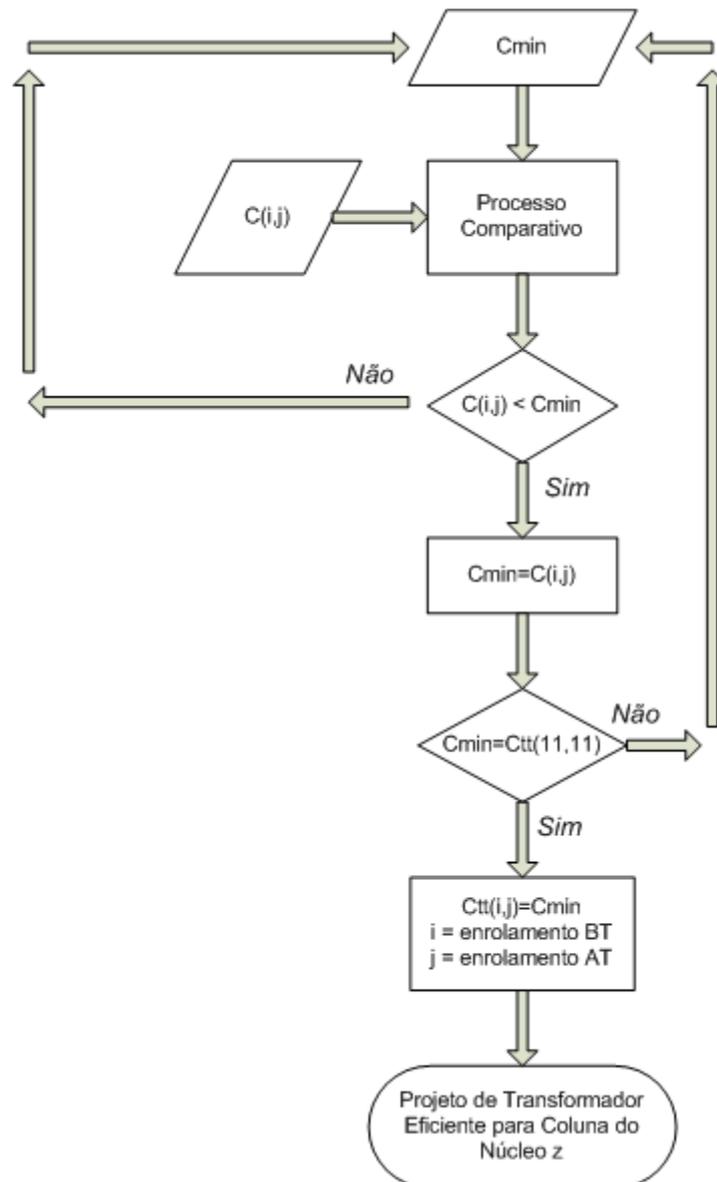


Figura 2.29 – Processo de determinação do ponto de mínimo de cada matriz de custo total.

O tempo de retorno de investimento indica o tempo necessário para obter um valor presente igual a zero, segundo Equação (2.24), utilizando a técnica de *pay-back* simplificada.

$$0 = C_{Fabricação}(e) - C_{Fabricação}(p) - T_{W_0}(W_0(e) - W_0(p)) \frac{(1+j)^n - 1}{(1+j)^n \cdot j} + T_{WL} \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{kVA_i}{kVA_N} \right)^2 (W_{cu}(e) - W_{cu}(p)) \frac{(1+j)^n - 1}{(1+j)^n \cdot j}. \quad (2.24)$$

Onde  $e$  indica o transformador eficiente e  $p$  indica o transformador padrão.

A Equação (2.25) indica o tempo de retorno de investimento.

$$n = \frac{\log\left(\frac{1}{1-xj}\right)}{\log(1+j)}. \quad (2.25)$$

Onde:

$$x = \frac{C_{fabricação}(e) - C_{fabricação}(p)}{T_{W_0}(W_0(p) - W_0(e)) + T_{WL} \cdot \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{MVA_i}{MVA_N} \right)^2 \cdot (W_{cu}(p) - W_{cu}(e))}. \quad (2.26)$$

### 2.2.3 ESCOLHA DE UM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO EFICIENTE ADEQUADO A UMA REGIÃO DA REDE DA ELETROPAULO EM SÃO PAULO

Para o projeto de transformador monofásico de 100 kVA foram considerados custo de energia de 281,72 R\$/MWh, taxa de juros de 10% ao ano e tempo de análise de 10 anos.

A curva de carga da região cedida pela concessionária é mostrada na Figura 2.30. O Fator de Energia Consumida,  $FE$ , para esta curva de carga é igual a 22,66. Este fator pode ser interpretado como o tempo de operação do transformador sob carga nominal, Equação (2.27).

$$FE = \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{kVA_i}{kVA_N} \right)^2. \quad (2.27)$$

A NBR 5440 [1] estabelece, para o transformador padrão de 100 kVA, o limite para as perdas em vazio de 280 W e para as perdas totais de 1500 W.

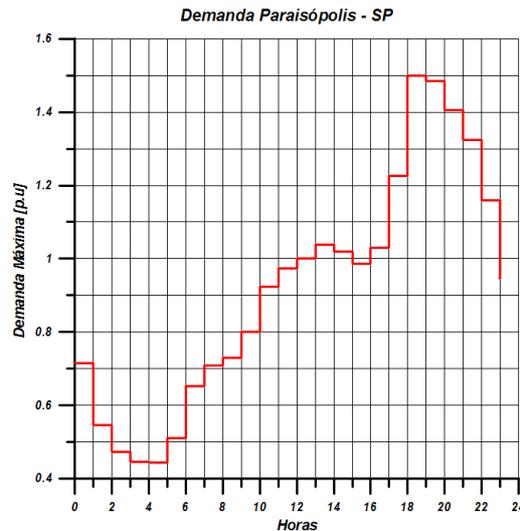


Figura 2.30 – Demanda da área a ser regularizada.

As dimensões do transformador padrão são diferentes do transformador de distribuição eficiente. Portanto, o primeiro passo para o projeto de transformador eficiente é definir o transformador padrão.

A primeira etapa do projeto padrão é definir a indução magnética de referência e calcular a área da coluna do núcleo [6] conforme Equação (2.28).

$$S_n = \frac{1,2 \cdot 97,8 \cdot \sqrt{P}}{(B_n/1000)^{0,75}} \quad (2.28)$$

Onde:

$S_n$  é a área da coluna do núcleo em  $\text{cm}^2$ ;

$P$  é a potência do transformador em kVA;

$B_n$  é a indução magnética em T.

Os parâmetros construtivos que influenciam as perdas em vazio são a distância entre enrolamentos, que interfere no comprimento da culatra, e a altura da janela, que pode ser alterada através da dimensão da cabeça e do calço da bobina.

O transformador de distribuição padrão de 100 kVA possui perdas em vazio de 278 W, perdas no cobre de 1.155,50 W e perdas totais de 1.433,50 W. O custo de fabricação é de R\$ 7.284,00 e o custo total é R\$ 15.844,28.

O transformador de distribuição eficiente com menor custo total para a demanda da Figura 2.30 possui perdas em vazio de 274,33 W, perdas no cobre de 628 W e perdas totais de 902,33 W.

A massa do núcleo é de 163,66 kg com uma redução de 1,19% em relação à massa do transformador padrão. A massa do cobre é de 121,12 kg, com um aumento de 92,25%.

O custo de fabricação do transformador eficiente é de R\$ 8.281,00, um aumento de 13,6% em relação ao transformador padrão. O custo total é de R\$ 13.604,38, uma redução de 14,13%, com um tempo de retorno do investimento de 1 ano. A economia de energia gerada pela substituição de cada transformador eficiente é de 1,71 MWh/ano, significando R\$ 481,50 por ano.

Os dados do projeto desenvolvido foram entregues a um fabricante nacional que os adaptou ao seu processo de manufatura. Deste modo, foram fabricadas doze unidades e instaladas na comunidade de Paraisópolis em novembro de 2006, área de concessão da AES Eletropaulo, Figura 2.31.



Figura 2.31 – Transformador eficiente instalado na área a ser regularizada.

As medições nos transformadores eficientes foram realizadas no período de maio a julho de 2008. O equipamento utilizado foi um medidor de grandezas universais MUG ELO 2160, Figura 2.32.

Devido à modificação dos locais de instalação dos transformadores previamente estabelecidos, a unidade ET-67469 manteve-se sem alterações. Isto possibilitou a comparação entre o transformador padrão e eficiente nesta comunidade.



Figura 2.32 – Equipamento de medição MUG ELO 2160 instalado na comunidade de Paraisópolis.

O fator de energia consumida reduziu para 21,83 devido às alterações no circuito de distribuição local. O resultado apresentou uma economia de 552,28 R\$/ano com TRI de 1,42 anos. A Figura 2.33 apresenta a curva média a partir dos dados de medição para este transformador.

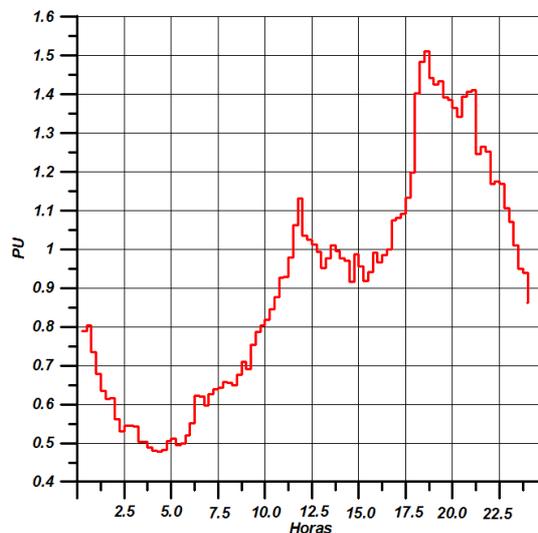


Figura 2.33 – Curva média no local do transformador eficiente.

A especificação inadequada da carga pode ocasionar um sobredimensionamento do transformador. Portanto, o primeiro passo para a aplicação do transformador de distribuição eficiente é realizar um estudo estatístico da carga, de modo, a representar com mais fidelidade a carga típica da região determinada. Isto evitará perdas técnicas e econômicas.

### *2.3 COMENTÁRIO*

A curva de carga típica para cada potência de transformador de distribuição permite uma avaliação econômica com a utilização das superfícies de perdas e custo.

As superfícies são geradas a partir da carga e da potência resultando em projetos que podem produzir um menor custo total para a concessionária. Com a utilização da curva de carga típica para cada potência a concessionária terá pontos (locais) com perdas capitalizadas menores e pontos que não produzem uma capitalização adequada. Porém, esta é uma prática que não interfere no gerenciamento do estoque da empresa.

A redução das perdas capitalizadas com o uso do transformador de distribuição eficiente resulta em economia de energia e melhor administração na remuneração do ativo da concessionária.

# CAPÍTULO 3

## MODELAGEM TÉRMICA: AVALIAÇÃO E PROPOSTA

A análise das perdas em relação à temperatura do ponto mais quente do enrolamento e do topo do óleo é realizada através das superfícies térmicas e modelagem de circuito elétrico equivalente.

A metodologia para construção das superfícies utiliza o cálculo regulamentado pelo IEEE [7]. Os dados de monitoração em tempo real da temperatura interna do transformador, juntamente com os parâmetros construtivos, são necessários para a construção do circuito elétrico equivalente.

O monitoramento dos enrolamentos é realizado através de sensores ópticos inseridos ao longo das bobinas de BT e AT. O objetivo é avaliar o comportamento térmico preciso em função das perdas e da sua localização no transformador. Estes resultados podem gerar dados sobre a vida útil do equipamento em função das perdas e dos parâmetros construtivos.

### 3.1 CÁLCULO DO PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO UTILIZANDO MÉTODO IEEE

O cálculo da temperatura do ponto mais quente do enrolamento é determinado segundo a padronização IEEE [7]. A temperatura do ponto mais quente determina a perda de vida do transformador e tem efeito cumulativo [8]. E a classe de isolamento, definida segundo NBR 5356 [9] para transformadores de distribuição, é de 55°C e 65°C. Dessa forma, o nível do isolamento determina a capacidade térmica dos transformadores segundo a Equação (3.1).

$$T_e = T_a + \Delta T_{TO} + \Delta T_e. \quad (3.1)$$

Onde:

$T_e$  é a temperatura do ponto mais quente do enrolamento em °C;

$T_a$  é a temperatura ambiente em °C;

$\Delta T_{TO}$  é a elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente em °C;

$\Delta T_e$  é a elevação da temperatura do ponto mais quente sobre a temperatura do topo do óleo em °C.

A temperatura do topo do óleo,  $T_{TO}$ , é calculada de acordo com a Equação (3.2).

$$T_{TO} = T_a + \Delta T_{TO} . \quad (3.2)$$

A Equação (3.3) descreve o gradiente da temperatura do topo do óleo sobre a ambiente para alterações no ciclo de carga.

$$\Delta T_{TO} = (\Delta T_{TO,u} - \Delta T_{TO,i}) \cdot (1 - e^{-t/\tau_{TO}}) + \Delta T_{TO,i} . \quad (3.3)$$

Onde:

$\Delta T_{TO,u}$  é a elevação da temperatura final do topo do óleo sobre a temperatura ambiente em °C;

$\Delta T_{TO,i}$  é a elevação da temperatura inicial do topo do óleo sobre a temperatura ambiente em °C;

$t$  é a duração da carga analisada em h;

$\tau_{TO}$  é a constante de tempo do óleo em h.

A elevação da temperatura do topo do óleo inicial e final sobre a ambiente é calculada conforme as Equações (3.4) e (3.5), respectivamente.

$$\Delta T_{TO,i} = \Delta T_{TO,R} \left( \frac{K_i^2 \cdot R + 1}{R + 1} \right)^n . \quad (3.4)$$

$$\Delta T_{TO,u} = \Delta T_{TO,R} \left( \frac{K_u^2 \cdot R + 1}{R + 1} \right)^n . \quad (3.5)$$

Onde

$R$  é a relação das perdas em carga pelas perdas em vazio;

$K_i$  é a relação da carga inicial pela carga nominal;

$K_u$  é a relação da carga final pela carga nominal;

$\Delta T_{TO,R}$  é a elevação da temperatura do topo do óleo em carga nominal;  
 $n$  é uma constante empírica do óleo dependente da classe de resfriamento do transformador. Para os transformadores imersos em óleo com circulação natural adota-se  $n=0,8$ .

O parâmetro  $R$  depende das perdas do transformador com valor definido de acordo com o projeto. A elevação da temperatura do topo do óleo em carga nominal é definida segundo NBR 5416 [10] para cada classe do isolamento. Para um transformador com método de resfriamento ONAN<sup>1</sup> e classe do isolamento 65°C,  $\Delta T_{TO,R}$  é igual a 55°C, e para classe do isolamento de 55°C é de 40°C.

A constante de tempo do topo do óleo sob carga nominal,  $\tau_{TO,R}$ , é proporcional a capacidade térmica do transformador, da elevação da temperatura do topo do óleo e do inverso da perda total segundo Equação (3.6).

$$\tau_{TO,R} = C \cdot \frac{\Delta T_{TO,R}}{P_{T,R}}. \quad (3.6)$$

Onde:

$C$  é a capacidade térmica;

$P_{T,R}$  é a perda total em carga nominal em W.

A capacidade térmica varia com o projeto, ou seja, depende das alterações da massa da parte ativa, do tanque e do volume de óleo, segundo Equação (3.7).

$$C = 0,1323 \cdot (M_{Nucleo} + M_{Cobre}) + 0,0882 \cdot (M_{Tanque}) + 0,3513 \cdot (V_{Oleo}). \quad (3.7)$$

Onde:

$M_{Nucleo}$  é a massa do núcleo em kg;

$M_{Cobre}$  é a massa de cobre dos enrolamentos em kg;

$M_{Tanque}$  é a massa do tanque e acessórios em kg;

$V_{Oleo}$  é o volume do óleo em l.

A constante de tempo do topo do óleo,  $\tau_{TO}$ , é calculada conforme Equação (3.8).

<sup>1</sup>ONAN: Resfriamento interno a óleo com circulação natural e a ar com o meio externo e circulação natural

$$\tau_{TO} = \tau_{TO,R} \cdot \frac{\left(\frac{\Delta T_{TO,u}}{\Delta T_{TO,R}}\right) - \left(\frac{\Delta T_{TO,i}}{\Delta T_{TO,R}}\right)}{\left(\frac{\Delta T_{TO,u}}{\Delta T_{TO,R}}\right)^{1/n} - \left(\frac{\Delta T_{TO,i}}{\Delta T_{TO,R}}\right)^{1/n}} \quad (3.8)$$

O cálculo da elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento em relação à variação da carga é descrita pela Equação (3.9).

$$\Delta T_e = (\Delta T_{e,u} - \Delta T_{e,i}) \cdot (1 - e^{-t/\tau_e}) + \Delta T_{e,i} \quad (3.9)$$

Onde:

$\Delta T_{e,u}$  é a elevação da temperatura final do ponto mais quente em °C;

$\Delta T_{e,i}$  é a elevação da temperatura inicial do ponto mais quente em °C;

$t$  é a duração da carga analisada em h;

$\tau_e$  é a constante de tempo do enrolamento em h.

A constante de tempo do enrolamento é definida como o tempo necessário para que a elevação da temperatura do enrolamento sobre a temperatura ambiente alcance 63,2% da diferença entre a elevação da temperatura final pela inicial durante a mudança da carga. Este parâmetro possui o valor de 0,08 para todos os métodos de resfriamento e classe do isolamento segundo a NBR 5416 [10].

A elevação da temperatura inicial e final do ponto mais quente do enrolamento sobre a do topo do óleo é definida pelas Equações (3.10) e (3.11).

$$\Delta T_{e,i} = \Delta T_{e,R} \cdot K_i^{2m} \quad (3.10)$$

$$\Delta T_{e,u} = \Delta T_{e,R} \cdot K_u^{2m} \quad (3.11)$$

Onde:

$\Delta T_{e,R}$  é a elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento sob carga nominal em °C;

$m$  é uma constante empírica para o enrolamento de cobre dependente da classe de resfriamento do transformador. Para os transformadores imersos em óleo com circulação natural adota-se  $m=0,8$ .

A Equação (3.12) indica o valor nominal da elevação da temperatura do ponto mais quente sobre o topo do óleo.

$$\Delta T_{e,R} = \Delta T_{ea,R} - \Delta T_{TO,R} \quad (3.12)$$

Onde  $\Delta T_{ea,R}$  é a elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre a ambiente em °C.

A elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre à ambiente é de 80°C para transformadores com classe do isolamento de 65°C. Os que possuem classe do isolamento igual a 55°C a temperatura é de 65°C.

### 3.2 SUPERFÍCIES TÉRMICAS SEGUNDO MÉTODO IEEE

As superfícies térmicas apresentam o comportamento da temperatura do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento para cada projeto de transformador de distribuição. A metodologia para o cálculo da temperatura é a estabelecida pelo IEEE [7] para os projetos apresentados no Capítulo 2.

Para uma demanda comercial - Figura 3.1 – considera-se o projeto de transformador trifásico de 45 kVA com classe do isolamento de 65°C e método de resfriamento ONAN.

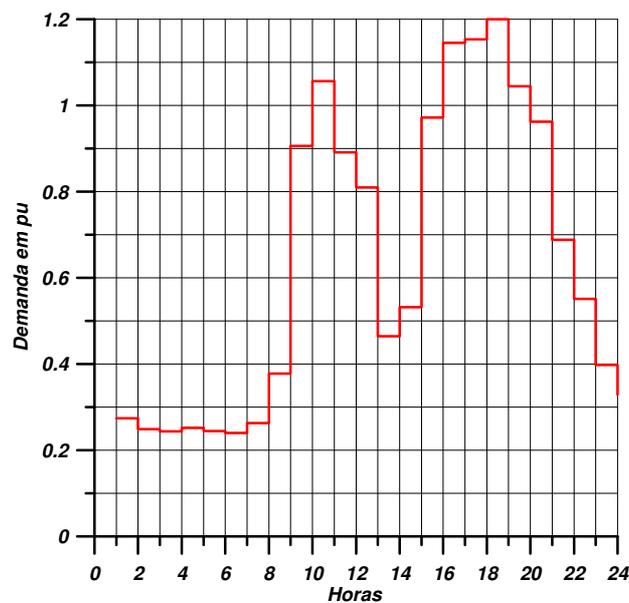


Figura 3.1 – Demanda comercial.

Para o cálculo do ponto mais quente do enrolamento é considerado o patamar de carga entre as 17 e 18 horas. A massa do tanque e o volume do óleo possuem valores constantes e iguais ao padrão para o cálculo da capacidade térmica, Equação (3.7).

A Figura 3.2 apresenta as superfícies térmicas relacionadas à temperatura do ponto mais quente dos enrolamentos em função das perdas em vazio e em carga. Os projetos de transformadores nestas superfícies possuem o condutor de BT com espessura constante e largura variável. A densidade da corrente de AT é constante. O parâmetro  $R$  das Equações (3.4) e (3.5) assume um valor distinto para cada projeto de transformador que é representado por pontos nas superfícies.

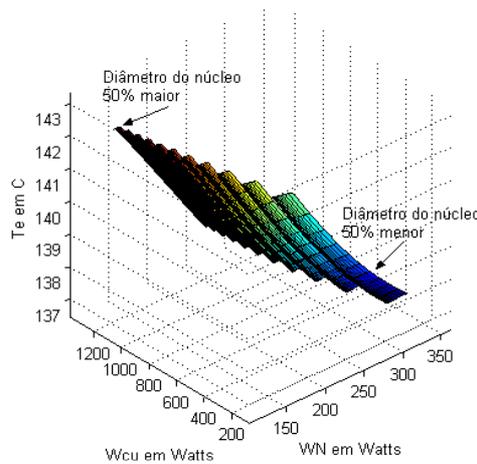


Figura 3.2 – Superfície térmica para o ponto mais quente do enrolamento com espessura constante e largura variável do condutor de BT, com o diâmetro do condutor de AT constante.

A matriz da temperatura do ponto mais quente do enrolamento segue os mesmos princípios da Tabela 2.1. O comportamento do ponto mais quente do enrolamento em função das perdas em vazio é mostrado na Figura 3.3. Nesta figura são considerados os projetos com o valor da indução magnética 50% menor em relação ao valor padrão. Para o condutor de BT a espessura é constante e a largura é variável. A densidade da corrente é constante para o condutor de AT.

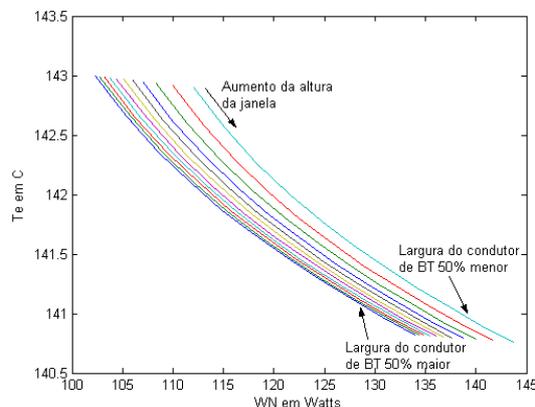


Figura 3.3 – Temperatura do ponto mais quente do enrolamento em função das perdas em vazio.

Na Figura 3.3, a uma mesma temperatura, obtêm-se maiores perdas em vazio quando ocorrem reduções na largura do condutor de BT.

A temperatura do ponto mais quente em função das perdas em carga é apresentada na Figura 3.4. A menor temperatura é alcançada quanto menor for a largura do condutor de BT e altura da janela.

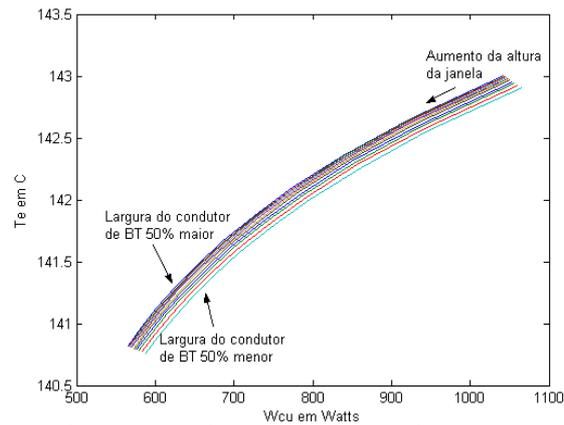


Figura 3.4 – Temperatura do ponto mais quente do enrolamento em função das perdas em carga.

Os projetos de transformadores que utilizam a largura constante e espessura variável do condutor de BT, e densidade da corrente constante no condutor de AT, resultam nas superfícies mostradas na Figura 3.5.

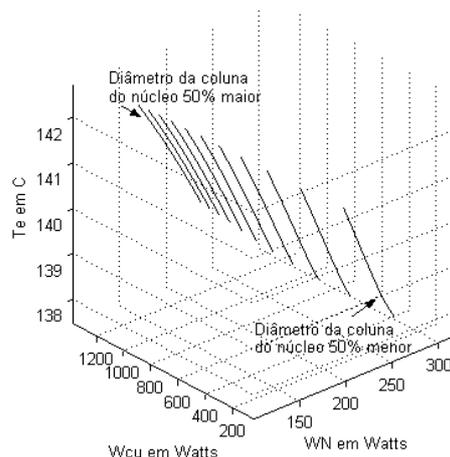


Figura 3.5 – Superfícies térmicas para o ponto mais quente do enrolamento com largura constante e espessura variável do condutor de BT, com o diâmetro do condutor de AT constante.

A Figura 3.6 apresenta as superfícies térmicas que incluem os projetos com espessura constante e largura variável do condutor de BT e densidade da corrente

variável para o de AT. As superfícies térmicas apresentam o comportamento das perdas em relação à temperatura do ponto mais quente do enrolamento.

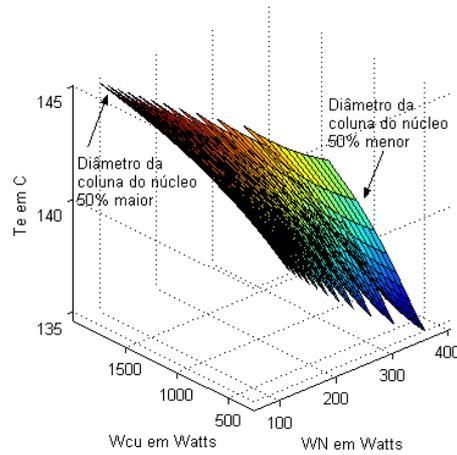


Figura 3.6 – Superfícies térmicas para o ponto mais quente do enrolamento com condutor de BT com espessura constante, largura e diâmetro do condutor de AT variável.

As curvas da Figura 3.7 apresentam o comportamento da temperatura do ponto mais quente do enrolamento em função das perdas em vazio. Os projetos possuem uma indução magnética do núcleo 50% menor que o valor de referência. No condutor de BT, a espessura é constante e a largura é variável.

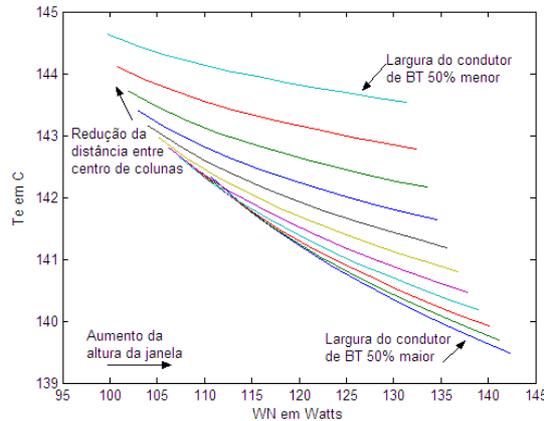


Figura 3.7 – Temperatura do ponto mais quente do enrolamento em função das perdas em vazio.

Considerando as perdas em vazio, para um núcleo 50% maior do que a área transversal padrão, a temperatura do ponto mais quente do enrolamento aumenta com a redução da largura do condutor de BT.

A temperatura do ponto mais quente do enrolamento em função das perdas em carga é apresentada na Figura 3.8. O aumento da massa do cobre nos enrolamentos resulta em uma temperatura do ponto mais quente menor em relação às perdas em carga.

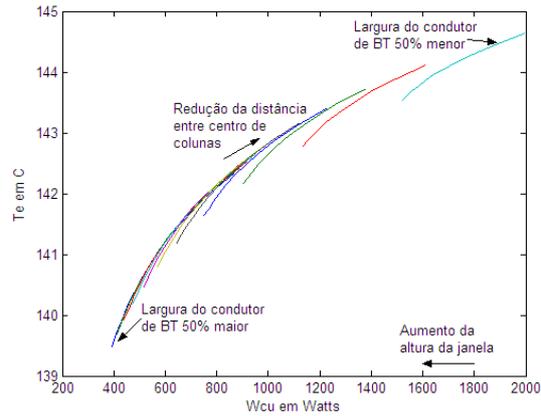


Figura 3.8 – Temperatura do ponto mais quente do enrolamento em função das perdas em carga.

As superfícies térmicas do ponto mais quente do enrolamento são mostradas na Figura 3.9 para os projetos com largura constante e espessura variável do condutor de BT e diâmetro variável do condutor de AT.

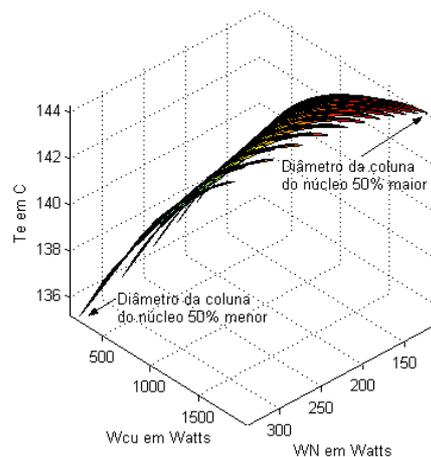


Figura 3.9 – Superfícies térmicas para o ponto mais quente do enrolamento com condutor de BT com largura constante, espessura e diâmetro do condutor de AT variável.

A Figura 3.10 mostra que as perdas em vazio aumentam com a redução da temperatura do ponto mais quente do enrolamento. Este efeito deve-se ao incremento da massa de cobre resultando em um maior comprimento da culatra. Isto se aplica aos projetos com indução magnética do núcleo 50% menor em relação a padrão.

A Figura 3.11 apresenta a relação das perdas em carga com a temperatura do ponto mais quente para as mesmas condições de projeto.

As superfícies térmicas da temperatura do topo do óleo em função das perdas em vazio e em carga são observadas pelas Figuras 3.12 a 3.15.

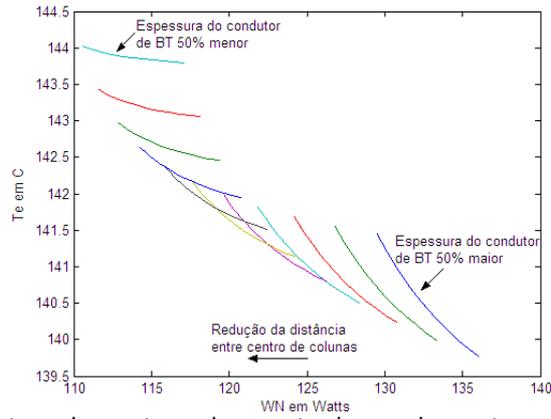


Figura 3.10 – Temperatura do ponto mais quente do enrolamento em função das perdas em vazio.

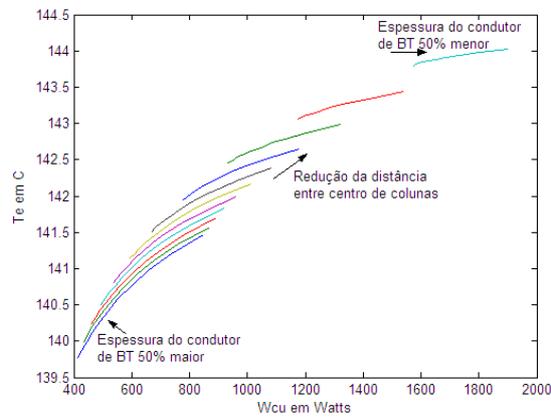


Figura 3.11 – Temperatura do ponto mais quente do enrolamento em função das perdas em carga.

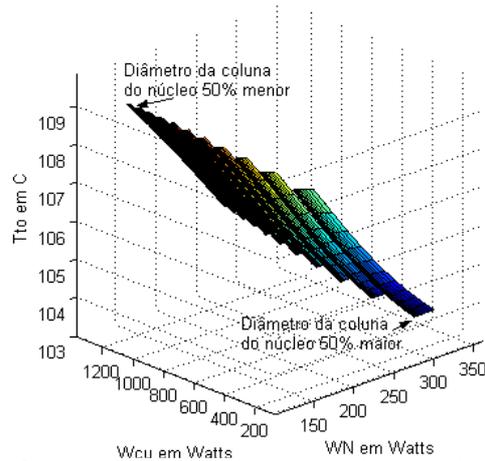


Figura 3.12 – Superfícies térmicas para a temperatura do topo do óleo com condutor de BT com espessura constante, largura variável e com o diâmetro do condutor de AT constante.

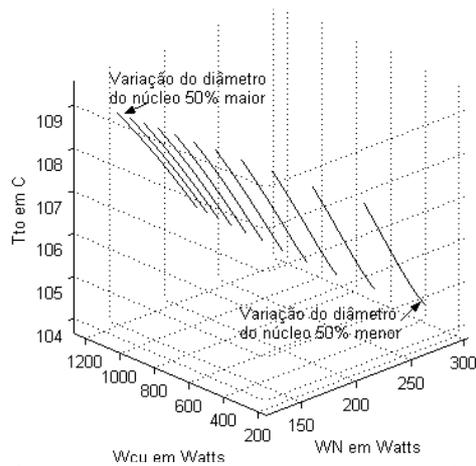


Figura 3.13 – Superfícies térmicas para a temperatura do topo do óleo com condutor de BT com largura constante, espessura variável, e com o diâmetro do condutor de AT constante.

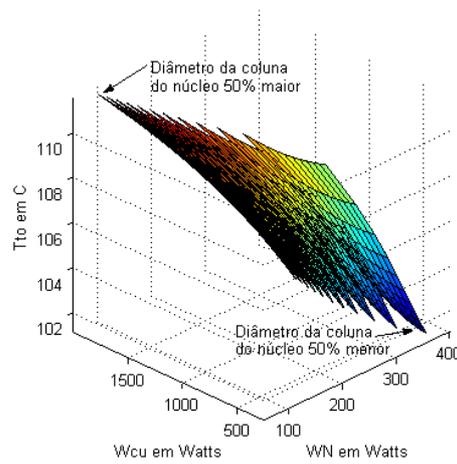


Figura 3.14 – Superfícies térmicas para a temperatura do topo do óleo com condutor de BT com espessura constante, largura e diâmetro do condutor de AT variável.

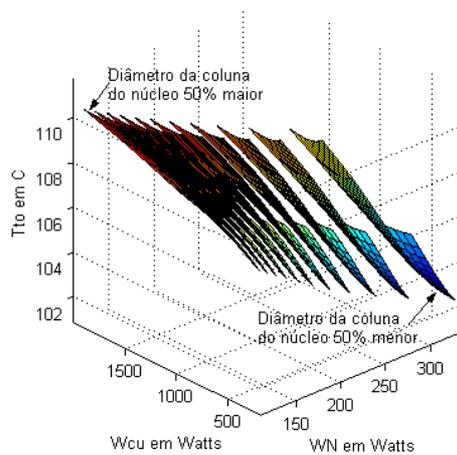


Figura 3.15 – Superfícies térmicas para a temperatura do topo do óleo com condutor de BT com largura constante, espessura e diâmetro do condutor de AT variável.

### 3.3 COMENTÁRIO 1

A temperatura do ponto mais quente aumenta com a redução das perdas no núcleo. O efeito deve-se à redução da espessura do condutor de BT e do diâmetro de AT que resultam na diminuição do comprimento da culatra do núcleo.

O aumento da janela tende a aumentar as perdas em vazio e diminuir as perdas em carga reduzindo a temperatura do ponto mais quente devido ao aumento da massa de cobre. Neste caso, o aumento da massa de cobre ocorre devido à variação da largura do condutor de BT e do diâmetro de AT.

Os cálculos segundo a metodologia IEEE não consideram a temperatura do núcleo, devido às suas perdas, e a sua influência no processo de transferência de calor.

### 3.4 CIRCUITO TÉRMICO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR

O circuito térmico equivalente do transformador tem como objetivo a análise do comportamento da transferência do calor no equipamento. A construção deste é baseada na analogia com o circuito elétrico equivalente.

O conhecimento da distribuição da temperatura em um corpo sólido é a primeira etapa para a análise do circuito elétrico equivalente. A equação diferencial parcial, para este caso, é expressa pela Equação (3.13) [11].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_t^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y_t^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z_t^2} = \frac{\rho \cdot c_p}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (3.13)$$

Onde:

$t$  é o subscrito referente às coordenadas de posição no sistema térmico;

$T$  é a temperatura;

$\rho$  é a densidade do material;

$c_p$  é o calor específico;

$k$  é a condutividade térmica;

$\alpha$  é a difusão térmica.

Considerando o fluxo de calor somente na direção horizontal  $x$ , a Equação (3.13) é simplificada conforme Equação (3.14).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_t^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (3.14)$$

A Equação (3.15) descreve a queda de tensão resultante do fluxo de corrente através de um condutor. Esta equação pode ser utilizada para representar o circuito térmico equivalente.

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x_e^2} = C_e' \cdot L_e' \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + (R_e' \cdot C_e' + S_e' \cdot L_e') \frac{\partial E}{\partial t} + R_e' \cdot S_e' \cdot E. \quad (3.15)$$

Onde:

$E$  é a tensão;

$t$  é o tempo no circuito elétrico;

$C_e'$  é a capacitância por unidade de comprimento;

$R_e'$  é a resistência por unidade de comprimento;

$L_e'$  é a indutância própria por unidade de comprimento;

$S_e'$  é a condutância de dispersão por unidade de comprimento;

$x_e$  é a posição em coordenadas retangulares.

O subscrito  $e$  é usado para referenciar os parâmetros do circuito elétrico equivalente.

Supondo-se que a indutância própria e a condutância de dispersão são desprezíveis, o resultado é a Equação (3.16).

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x_e^2} = (R_e' \cdot C_e') \frac{\partial E}{\partial t}. \quad (3.16)$$

Para transformar um circuito térmico em elétrico equivalente é necessário estabelecer um conjunto de relações entre as quantidades térmicas e elétricas. As Equações (3.17) a (3.19) definem as relações de potencial, de distância e de tempo, respectivamente.

$$m_1 = \frac{\Delta T}{\Delta E}. \quad (3.17)$$

$$\sqrt{m_2} = \frac{\Delta x_t}{\Delta x_e}. \quad (3.18)$$

$$m_3 = \frac{\Delta \tau}{\Delta t}. \quad (3.19)$$

O resultado da substituição dessas unidades adimensionais na Equação (3.14) é a Equação (3.20), que representa a relação entre os parâmetros térmicos e elétricos.

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x_e^2} = \frac{m_2}{m_3} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial E}{\partial t}. \quad (3.20)$$

Comparando a Equação (3.20) com a (3.16) obtém-se a difusão térmica,  $\alpha$ , em função dos parâmetros elétricos na Equação (3.21).

$$\alpha = \frac{m_2}{R_e' \cdot C_e' \cdot m_3}. \quad (3.21)$$

A difusão térmica em relação à área transversal da parede,  $A$ , é apresentada na Equação (3.22).

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} = \frac{1}{\frac{\rho \cdot c_p \cdot A}{k \cdot A}}. \quad (3.22)$$

Com a inserção da área da parede na Equação (3.22) é possível obter outros parâmetros do circuito térmico, tal como, capacitância - Equação (3.23) - e resistência térmica por comprimento - Equação (3.24) - resultando em (3.25).

$$C_t' = \rho \cdot c_p \cdot A. \quad (3.23)$$

$$R_t' = \frac{1}{k \cdot A}. \quad (3.24)$$

$$\alpha = \frac{1}{C_t' \cdot R_t'}. \quad (3.25)$$

A Equação (3.26) relaciona o produto da resistência e da capacitância dos circuitos térmico e elétrico. Inserindo na Equação (3.26) a definição para  $m_2$  obtém-se a Equação (3.27).

$$\frac{1}{R_t' \cdot C_t'} = \frac{m_2}{m_3} \cdot \frac{1}{R_e' \cdot C_e'}. \quad (3.26)$$

$$\frac{1}{(R'_t \cdot \Delta x_t) \cdot (C'_t \cdot \Delta x_t)} = \frac{1}{m_3} \cdot \frac{1}{(R'_e \cdot \Delta x_e) \cdot (C'_e \cdot \Delta x_e)} \quad (3.27)$$

A Equação (3.28) apresenta a forma simplificada da Equação (3.27) conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Definição das resistências e capacitâncias equivalentes.

<i>Resistência Elétrica Equivalente</i>	$R_{ee} = R'_e \cdot \Delta x_e$
<i>Capacitância Elétrica Equivalente</i>	$C_{ee} = C'_e \cdot \Delta x_e$
<i>Resistência Térmica</i>	$R_t = R'_t \cdot \Delta x_t$
<i>Capacitância Térmica</i>	$C_t = C'_t \cdot \Delta x_t$

$$\frac{1}{R_t \cdot C_t} = \frac{1}{m_3} \cdot \frac{1}{R_{ee} \cdot C_{ee}} \quad (3.28)$$

A quarta relação,  $m_4$ , é definida pela razão entre as capacitâncias dos circuitos térmico e elétrico conforme Equação (3.29). E a Equação (3.30) apresenta a relação das resistências térmica e elétrica.

$$m_4 = \frac{C_t}{C_{ee}} \quad (3.29)$$

$$\frac{R_t}{R_{ee}} = \frac{m_3}{m_4} \quad (3.30)$$

As Equações (3.31) e (3.32) apresentam a energia térmica armazenada em um sólido homogêneo e a energia elétrica em um condutor.

$$Q_t = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot \Delta T = c_t \cdot \Delta T \quad (3.31)$$

$$Q_e = c_{ee} \cdot \Delta E \quad (3.32)$$

Substituindo-se as capacitâncias na Equação (3.28) resulta em (3.33) que é a relação das energias térmica e elétrica armazenadas.

$$\frac{Q_t}{Q_e} = m_1 \cdot m_4 \quad (3.33)$$

A diferenciação em relação ao tempo da Equação (3.33) é obtida a Equação (3.34), que representa o fluxo da corrente,  $I$ , em função do fluxo do calor,  $q$ . A relação dos fluxos nos circuitos térmico e elétrico é representada pela Equação (3.35).

$$\frac{dQ_t}{d\tau} = m_1 \cdot m_4 \cdot \frac{dQ_e}{d(m_3 t)} = \frac{m_1 \cdot m_4}{m_3} \cdot \frac{dQ_e}{dt} \quad (3.34)$$

$$\frac{q}{I} = \frac{m_1 \cdot m_4}{m_3} \quad (3.35)$$

Com as relações entre os circuitos térmico e elétrico é possível determinar o elemento elétrico equivalente, que representa o processo da condução de calor no núcleo.

A representação da condução de calor entre as lâminas de aço-silício de espessura  $\Delta x$  pode ser visualizada na Figura 3.16. A condutividade térmica da lâmina é considerada constante em relação à temperatura.

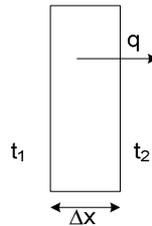


Figura 3.16 – Representação do processo de transferência de calor através da chapa de aço-silício.

O fluxo do calor pelo processo de condução nas lâminas de aço-silício é dado pela Equação (3.36).

$$q_{cond} = \frac{A \cdot k \cdot (t_1 - t_2)}{\Delta x} = \frac{(t_1 - t_2)}{\frac{\Delta x}{A \cdot k}} \quad (3.36)$$

Onde:

$A$  é a área transversal no caminho do fluxo do calor;

$\Delta x$  é a espessura;

$t_1$  é a temperatura interna de acordo com a direção do fluxo do calor;

$t_2$  é a temperatura externa de acordo com a direção do fluxo do calor.

A Equação (3.37) é expressa segundo a (3.24), e representada através de uma resistência conforme Figura 3.17.

$$q_{cond} = \frac{(t_1 - t_2)}{R_t \cdot \Delta x} = \frac{t_1 - t_2}{R_{cond}} \quad (3.37)$$



Figura 3.17 – Representação da condução no circuito elétrico equivalente.

A segunda parte da análise é baseada nas condições da variação do fluxo do calor conforme Equação (3.38).

$$q_{cond} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\Delta x}{A \cdot k}} + \rho \cdot c_p \cdot A \cdot \Delta x \cdot \frac{dt}{d\tau} = \frac{\Delta T}{R_t} + C_t \cdot \frac{dt}{d\tau} \quad (3.38)$$

Sabendo-se que,

$$T_1 = m_1 E_1 \cdot$$

$$T_2 = m_1 E_2 \cdot$$

$$R_t = \frac{\Delta x}{A \cdot k} = \frac{m_3}{m_4} \cdot R_{ee} \cdot$$

$$C_t = \rho \cdot c_p \cdot A \cdot \Delta x = m_4 \cdot C_{ee} \cdot$$

As Equações (3.39) e (3.40) descrevem a analogia do circuito elétrico em relação ao circuito térmico equivalente.

$$q = \frac{m_1 (E_1 - E_2)}{\frac{m_3}{m_4} \cdot R_{ee}} + m_4 \cdot C_{ee} \cdot m_1 \cdot \frac{dE}{d\tau} \quad (3.39)$$

$$\frac{m_3}{m_1 \cdot m_4} \cdot I = \frac{m_1 \cdot m_4}{m_3} \cdot \frac{\Delta E}{R_{ee}} + m_1 \cdot m_4 \cdot C_{ee} \cdot \frac{dE}{d\tau} \quad (3.40)$$

A representação equivalente do fluxo do calor pelo processo de convecção nas superfícies das lâminas de aço-silício em contato com o óleo é mostrada na Equação (3.41). A resistência elétrica representa o processo de convecção, conforme Figura 3.17.

$$q_{conv} = A \cdot h \cdot (t_f - t_s) = \frac{t_f - t_s}{\frac{1}{A \cdot h}} = \frac{\Delta T}{R_{conv}} \quad (3.41)$$

Onde:

$h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção;

$t_f$  é a temperatura do fluido;

$t_s$  é a temperatura da superfície.

A transferência do calor por radiação de uma superfície aquecida de área  $A_1$  e temperatura absoluta  $T_1$  para uma superfície de temperatura  $T_2$  é apresentada na Equação (3.42). O processo da radiação no núcleo ocorre na sua superfície em contato com o óleo.

$$q_{12} = \sigma \cdot A_1 \cdot F_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4). \quad (3.42)$$

$F_{12}$  representa o fator que considera o arranjo geométrico das duas superfícies.

Devido à dificuldade em estabelecer o arranjo geométrico das superfícies é possível substituir a equação tradicional da radiação por outra equivalente, a Equação (3.43).

$$q_{rad} = h_r \cdot A_2 \cdot (t_2 - t_3) = \frac{t_2 - t_3}{\frac{1}{h_r \cdot A_2}} = \frac{t_2 - t_3}{R_{rad}}. \quad (3.43)$$

Onde

$t_2$  é a temperatura da superfície;

$t_3$  é a temperatura do meio;

$h_r$  é definido como o coeficiente de radiação conforme Equação (3.44).

$$h_r = \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot (T_2^2 + T_3^2) \cdot (T_2 + T_3). \quad (3.44)$$

Os processos da transferência do calor por condução, convecção e radiação, respectivamente, são mostrados nas Equações (3.45), (3.46) e (3.47).

$$q_{cond} = \frac{t_1 - t_2}{R_{cond}}. \quad (3.45)$$

$$q_{conv} = \frac{t_1 - t_2}{R_{conv}}. \quad (3.46)$$

$$q_{rad} = \frac{t_1 - t_2}{R_{rad}}. \quad (3.47)$$

Portanto, a transferência do calor total no núcleo é expressa pela soma de cada mecanismo conforme Equação (3.48).

$$q_{nucleo} = q_{cond} + q_{conv} + q_{rad} . \quad (3.48)$$

O modelo para a representação elétrica equivalente do núcleo é visualizado na Figura 3.18.

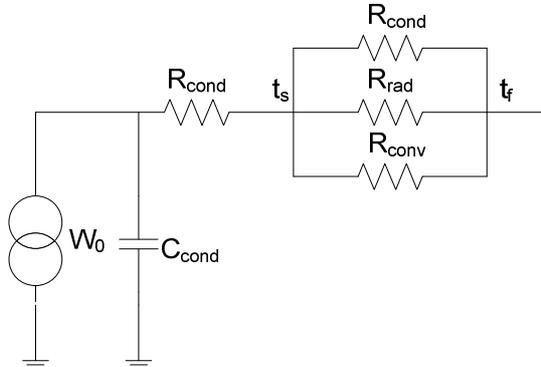


Figura 3.18 – Circuito elétrico equivalente para o núcleo.

A transferência do calor é considerada no sentido radial no caso das bobinas, e cada processo é tratado separadamente.

O processo da condução do calor em um cilindro de altura  $L$  com  $n-1$  camadas simula as bobinas de BT e AT, conforme as Equações (3.49) e (3.50).

$$q_{cond} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L \cdot (t_1 - t_2)}{\sum_{m=1}^{n-1} \ln\left(\frac{r_{m+1}}{r_m}\right)} . \quad (3.49)$$

$$q_{cond} = \frac{(t_1 - t_2)}{\frac{\sum_{m=1}^{n-1} \ln\left(\frac{r_{m+1}}{r_m}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L}} = \frac{t_1 - t_2}{R_t} . \quad (3.50)$$

A Equação (3.51) apresenta o estado transitório da transferência do calor pelo processo da condução em um cilindro.

$$q_{cond} = \frac{(t_1 - t_2)}{\frac{\sum_{m=1}^{n-1} \ln\left(\frac{r_{m+1}}{r_m}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L}} + \rho \cdot c_p \cdot \pi \cdot \sum_{m=1}^{n-1} (r_{m+1}^2 - r_m^2) \cdot L \cdot \frac{dt}{d\tau} = \frac{\Delta T}{R_{cond}} + C_{cond} \cdot \frac{dt}{d\tau} . \quad (3.51)$$

As relações dos parâmetros térmicos e elétricos são resumidas da seguinte maneira.

$$T_1 = m_1 E_1 .$$

$$T_2 = m_1 E_2 .$$

$$R_t = \frac{\sum_{m=1}^{n-1} \ln\left(\frac{r_{m+1}}{r_m}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} = \frac{m_3}{m_4} \cdot R_e .$$

$$C_t = \rho \cdot c_p \cdot \pi \cdot \sum_{m=1}^{n-1} (r_{m+1}^2 - r_m^2) \cdot L = m_4 \cdot C_e .$$

A vista superior da bobina é representada pela Figura 3.19, onde o papel *kraft* neutro é o isolamento para cada camada do enrolamento de BT. Nas camadas de cobre ocorre a transferência do calor radialmente por condução.

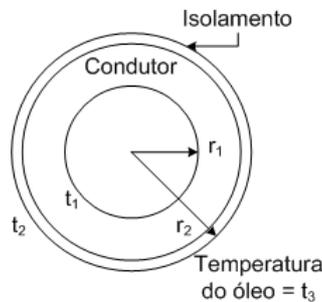


Figura 3.19 – Representação da bobina com isolamento.

A última camada do enrolamento de BT encontra-se em contato com óleo, pela existência do canal entre as bobinas de BT e AT. A Equação (3.52) apresenta a transferência do calor por convecção e radiação em um fluido.

$$q_{conv+rad} = h_c \cdot A \cdot (t_2 - t_3) + \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_2^4 - T_3^4)$$

$$q_{conv+rad} = h_c \cdot A \cdot (t_2 - t_3) + h_r \cdot A \cdot (t_2 - t_3) \quad (3.52)$$

$$q_{conv+rad} = (h_c + h_r) \cdot \pi \sum_{m=1}^{n-1} (r_{m+1}^2 + r_m^2) \cdot (t_2 - t_3).$$

A transferência do calor total no enrolamento é determinada pela soma de cada mecanismo conforme Equações (3.53) e (3.54).

$$q_{enr} = q_{cond} + q_{conv} + q_{rad} . \quad (3.53)$$

$$q_{enr} = \frac{t_1 - t_2}{R_{cond}} + C_{cond} \cdot \frac{dT}{d\tau} + \frac{t_2 - t_3}{R_{conv}} + \frac{t_2 - t_3}{R_{rad}} . \quad (3.54)$$

A Figura 3.20 mostra o modelo do núcleo e dos enrolamentos no circuito elétrico equivalente.

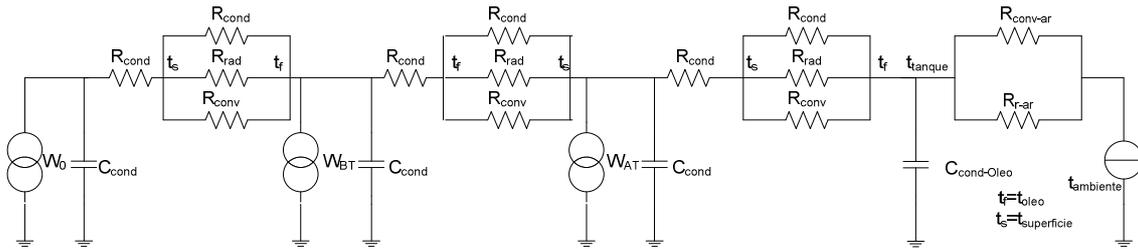


Figura 3.20 – Circuito elétrico equivalente do transformador.

### 3.5 APLICAÇÃO DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

A aplicação do circuito elétrico equivalente foi realizada para o transformador monofásico de 100 kVA/15 kV do projeto de *Eletrificação da Comunidade de Paraisópolis* na área de concessão da AES Eletropaulo, com o apoio do PROCOPRE Brasil - ICA e USAID.

#### 3.5.1 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DAS RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS EQUIVALENTES

##### a) Núcleo

O núcleo deste transformador é composto de duas colunas e duas culatras. A resistência de condução de uma coluna do núcleo monofásico é obtida de acordo com a Equação (3.55).

$$R_{cond\_nuc1} = \frac{D_{nucleo}}{k_{aço} \cdot A_{nucleo}} = 0,076 \text{ K/W} . \quad (3.55)$$

Onde:

$D_{nucleo}$  é o diâmetro do núcleo igual a 14,8 cm;

$k_{aço}$  é a condutividade térmica do aço silício igual a 19 W/m.K.

A superfície da coluna do núcleo em contato com o óleo apresenta os três modos de transferência do calor. A resistência de condução na superfície da coluna do núcleo é obtida segundo a Equação (3.56). O calor propaga-se na direção do diâmetro interno do enrolamento de BT, ou seja, de forma radial. O processo da condução no óleo é significativamente menor quando comparado com a convecção.

$$R_{cond\_nuc2} = \frac{\ln\left(\frac{DiBT}{D_{nucleo}}\right)}{2\pi \cdot k_{oleo} \cdot H_j} = 0,081 \text{ K/W} . \quad (3.56)$$

Onde:

$D_{iBT}$  é o diâmetro interno de BT igual a 15,10 cm;

$k_{oleo}$  é a condutividade térmica do óleo igual a 0,11 W/m.K;

$H_j$  é a altura da janela igual a 35,5 cm.

A resistência de radiação na superfície de uma coluna do núcleo em direção a superfícies interna do enrolamento de BT é dada pela Equação (3.57).

$$R_{rad\_nuc} = \frac{T_{nucleo} - T_{DiBT}}{\varepsilon \cdot K \cdot (T_{nucleo}^4 - T_{DiBT}^4) \cdot \pi \cdot D_{nucleo} \cdot H_j} = 18,69 \text{ K/W} . \quad (3.57)$$

Onde:

$D_{nucleo}$  é o diâmetro do núcleo igual a 14,8 cm;

$K$  é a constante de Boltzman igual a  $5,72 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>;

$H_j$  é a altura da janela igual a 35,5 cm;

$T_{nucleo}$  é a temperatura do núcleo igual a 90,0°C ou 363,15 K;

$T_{DiBT}$  é a temperatura do diâmetro interno de BT igual a 87,3°C ou 360,45 K;

$\varepsilon$  é a emissividade igual a  $\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{cobre}} + \frac{1}{\varepsilon_{aço}} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,03} + \frac{1}{0,94} - 1} = 0,03$ .

A constante de convecção,  $h$ , é dada pelo número de *Nusselt* segundo Equação (3.58) para fluxos turbulentos, e pela Equação (3.59) para fluxos laminares [11,12].

$$N_{Nu} = \frac{h \cdot D}{k} = 0,13 \cdot (N_{Gr} \cdot N_{Pr})^{1/2} . \quad (3.58)$$

$$N_{Nu} = \frac{h \cdot D}{k} = 0,59 \cdot (N_{Gr} \cdot N_{Pr})^{1/4} . \quad (3.59)$$

Onde:

$N_{Nu}$  é o número de *Nusselt*;

$D$  é o diâmetro do meio;

$k$  é a condutividade térmica do meio;

$N_{Gr}$  é o número de *Grashof*;

$N_{Pr}$  é o número de *Prandtl*.

Um fluxo é considerado turbulento quando o produto dos números de *Grashof* e de *Prandtl* está no intervalo de  $10^9$  a  $10^{12}$ . E laminar, quando o valor do produto encontrar-se entre  $10^4$  a  $10^9$ .

A Equação (3.60) apresenta o número de *Grashof* para o óleo do transformador, de acordo com os dados obtidos em [12].

$$N_{Gr} = \frac{D^3 \rho^2 \beta g}{\mu^2} \cdot \Delta T = 11,90 \cdot D^3 \cdot \Delta T . \quad (3.60)$$

Onde:

$D$  é o diâmetro em m;

$\rho$  é a densidade do óleo igual a  $879 \text{ kg/m}^3$ ;

$\beta$  é o coeficiente de expansão térmica do óleo igual a  $0,70 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ;

$g$  é a aceleração da gravidade dada em  $9,8 \text{ m/s}^2$ ;

$\mu$  é a viscosidade do óleo igual a  $21,10 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$ .

O número de *Prandtl* para o óleo é dado pela Equação (3.61).

$$N_{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{k_{oleo}} = 3,25 \cdot 10^8 . \quad (3.61)$$

Onde:

$c_p$  é o calor específico do óleo igual a  $1710 \text{ J/Kg.K}$ ;

$k_{oleo}$  é a condutividade térmica do óleo igual a  $0,11 \text{ W/m.K}$ .

O canal da convecção do óleo entre a coluna do núcleo e a bobina de BT possui espessura igual a 3 mm. O produto dos números de *Grashof* e *Prandtl* encontra-se na ordem de  $10^8$ , que representa um fluxo laminar para o óleo do transformador no sistema de resfriamento ONAN.

A Equação (3.62) apresenta a constante de convecção do óleo.

$$h = 69,79 \cdot \Delta T^{0,25} . \quad (3.62)$$

A resistência de convecção entre as superfícies do núcleo e do diâmetro interno do enrolamento de BT é mostrada na Equação (3.63).

$$R_{conv\_nuc} = \frac{1}{69,7938 \cdot (T_{nucleo} - T_{DiBT})^{0,25} \cdot \pi \cdot D_{nucleo} \cdot H_j} = 0,039 \text{ K/W} . \quad (3.63)$$

b) Enrolamento de BT

A resistência de condução térmica de um dos enrolamentos de BT do transformador monofásico é dada pela Equação (3.64). Vale ressaltar que, os dados utilizados para o cálculo das resistências são as dimensões do transformador monofásico de 100 kVA/15 kV.

$$R_{cond\_BT1} = \frac{\ln\left(\frac{DeBT}{DiBT}\right)}{2 \cdot k_{cu} \cdot \pi \cdot H_{esp}} = 2,24 \cdot 10^{-4} \text{ K/W} . \quad (3.64)$$

Onde:

$DeBT$  é o diâmetro externo do enrolamento de BT igual a 18,20 cm;

$DiBT$  é o diâmetro interno do enrolamento de BT igual a 15,10 cm;

$k_{cu}$  é a condutividade térmica do cobre igual a 399 W/m.K;

$H_{esp}$  é a altura das espiras igual a 33,20 cm.

A Equação (3.65) apresenta a resistência de condução entre as superfícies das bobinas de BT e de AT.

$$R_{cond\_BT2} = \frac{\ln\left(\frac{DiAT}{DeBT}\right)}{2 \cdot k_{cu} \cdot \pi \cdot H_{esp}} = 0,32 \text{ K/W} . \quad (3.65)$$

Onde  $DiAT$  é o diâmetro externo do enrolamento de AT igual a 19,60 cm.

A resistência de radiação na superfície do enrolamento de BT é calculada segundo Equação (3.66).

$$R_{rad\_BT} = \frac{T_{DeBT} - T_{DiBT}}{\epsilon_{cu} \cdot K \cdot (T_{DeBT}^4 - T_{DiBT}^4) \cdot \pi \cdot DeBT \cdot H_{esp}} = 34,98 \text{ K/W} . \quad (3.66)$$

Onde:

$T_{DeBT}$  é a temperatura do diâmetro externo de BT, tomada por 73,09°C ou 346,24 K;

$T_{DiBT}$  é a temperatura do diâmetro interno de BT, tomada por 70,0°C ou 343,15 K;

$$\varepsilon_{cu} \text{ é a emissividade igual a } \varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{cobre}} + \frac{1}{\varepsilon_{cobre}} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,03} + \frac{1}{0,03} - 1} = 0,015.$$

A Equação (3.67) apresenta a constante de convecção,  $h$ , para o óleo do canal entre os enrolamentos de BT e AT.

$$h = 47,48 \cdot \Delta T^{0,25}. \quad (3.67)$$

A resistência de convecção entre as superfícies do diâmetro externo do enrolamento de BT e o diâmetro interno de AT é dada pela Equação (3.68).

$$R_{conv\_BT} = \frac{1}{47,4862 \cdot (T_{DiAT} - T_{DeBT})^{0,25} \cdot \pi \cdot DeBT \cdot H_{esp}} = 0,078 \text{ K/W}. \quad (3.68)$$

A temperatura considerada para o diâmetro interno de AT é de 76 °C (349,15K), e para o diâmetro externo de BT é de 80 °C (353,15K).

c) Enrolamento de AT

A Equação (3.69) apresenta a resistência de condução do enrolamento de AT.

$$R_{cond\_AT1} = \frac{\ln\left(\frac{DeAT}{DiAT}\right)}{2 \cdot k_{cu} \cdot \pi \cdot H_{esp}} = 3,10 \cdot 10^{-4} \text{ K/W}. \quad (3.69)$$

Onde:

$DeAT$  é o diâmetro externo do enrolamento de AT igual a 25,00 cm;

$DiAT$  é o diâmetro interno do enrolamento de AT igual a 19,60 cm;

$k_{cu}$  é a condutividade térmica do cobre igual a 399 W/m.K;

$H_{esp}$  é a altura das espiras igual a 31,30 cm.

A resistência de condução entre as superfícies do enrolamento de AT e do tanque é dada pela Equação (3.70).

$$R_{cond\_AT2} = \frac{\ln\left(\frac{D_{TNK}}{DeAT}\right)}{2 \cdot k_{cu} \cdot \pi \cdot H_{esp}} = 2,69 \text{ K/W}. \quad (3.70)$$

Onde  $D_{TNK}$  é o diâmetro do tanque igual a 90,00 cm.

A Equação (3.71) calcula a resistência de radiação na superfície externa do enrolamento de AT.

$$R_{rad\_AT} = \frac{T_{Oleo} - T_{DeAT}}{\varepsilon_{cu} \cdot K \cdot (T_{Oleo}^4 - T_{DeAT}^4) \cdot \pi \cdot DeAT \cdot H_{esp}} = 10,52 \text{ K/W} . \quad (3.71)$$

Onde:

$K$  é a constante de Boltzman igual a  $5,72 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ;

$T_{Oleo}$  é a temperatura do tanque tomada por  $150^\circ\text{C}$  ou  $423,15 \text{ K}$ ;

$T_{DeAT}$  é a temperatura do diâmetro externo de AT tomada por  $68,48^\circ\text{C}$  ou  $341,63 \text{ K}$ .

A constante de convecção entre as superfície externa do enrolamento de AT e do tanque é dada segundo Equação (3.72). E a Equação (3.73) apresenta a resistência de convecção.

$$h = 24,43 \cdot \Delta T^{0,25} . \quad (3.72)$$

$$R_{conv\_AT} = \frac{1}{24,43 \cdot (T_{Oleo} - T_{DeAT})^{0,25} \cdot \pi \cdot DeAT \cdot H_{esp}} = 0,055 \text{ K/W} . \quad (3.73)$$

#### d) Tanque

Os mecanismos de transferência do calor no tanque em contato com a temperatura ambiente são a radiação e a convecção. A resistência de radiação é dada pela Equação (3.74) e o primeiro valor para a temperatura do tanque é arbitrário, sendo corrigido no processo de iteração.

$$R_{rad\_TNK} = \frac{T_{TNK} - T_{amb}}{\varepsilon \cdot K \cdot (T_{TNK}^4 - T_{amb}^4) \cdot \pi \cdot D_{TNK} \cdot H_{TNK}} = 0,052 \text{ K/W} . \quad (3.74)$$

Onde:

$\varepsilon$  é a emissividade para a pintura cinza do tanque igual a 0,94.

$T_{TNK}$  é a temperatura do tanque tomada por  $120,00^\circ\text{C}$  ou  $393,15 \text{ K}$ ;

$T_{amb}$  é a temperatura ambiente considerada  $34,00^\circ\text{C}$  ou  $307,15 \text{ K}$ .

A constante de convecção para o ar é definida pelo cálculo do número de *Nusselt* conforme realizado para o óleo. O número de *Grashof* para o ar é dado pela Equação (3.75).

$$N_{Gr} = \frac{D^3 \rho^2 \beta g}{\mu^2} \cdot \Delta T = 1,36 \cdot 10^{-9} \cdot D^3 \cdot \Delta T . \quad (3.75)$$

Onde:

$D$  é o diâmetro em m;

$\rho$  é a densidade do ar igual a  $1,164 \text{ kg/m}^3$ ;

$\beta$  é o coeficiente de expansão térmica do ar igual a  $3,41 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ;

$g$  é a aceleração da gravidade dada em  $9,8 \text{ m/s}^2$ ;

$\mu$  é a viscosidade do ar igual a  $18,24 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$ .

A Equação (3.76) apresenta o número de *Prandtl* para o ar.

$$N_{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{k_{Ar}} = 7,35 \cdot 10^{11} . \quad (3.76)$$

Onde:

$c_p$  é a calor específico do ar igual a  $1012 \text{ J/Kg.K}$ ;

$k_{Ar}$  é a condutividade térmica do ar igual a  $0,025 \text{ W/m.K}$ .

A constante de convecção para o ar é dada pela Equação (3.77), e a resistência de convecção pela (3.78).

$$h = 0,048 \cdot \Delta T^{0,25} . \quad (3.77)$$

$$R_{conv\_TNK} = \frac{1}{0,0481 \cdot (T_{TNK} - T_{amb})^{0,25} \cdot \pi \cdot D_{TNK} \cdot H_{TNK} \cdot \Phi} = 0,24 \text{ K/W} . \quad (3.78)$$

Onde  $\Phi$  é o fator, que relaciona o comprimento e distância entre as aletas, igual a 10.

### 3.5.2 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DAS CAPACITÂNCIAS ELÉTRICAS EQUIVALENTES

As capacitâncias elétricas equivalentes estão descritas nas Equações (3.79) a (3.82). Os valores dos parâmetros para o cálculo são as dimensões do projeto do transformador de 100 kVA e os dados padronizados do material obtidos em [12].

a) Núcleo

$$C_{nucleo} = \rho_{aço} \cdot c_{aço} \cdot A \cdot H_j = 63034,27 \text{ W.s / K} . \quad (3.79)$$

Onde:

$\rho_{aço}$  é a densidade da lâmina de aço silício igual a 7417 kg/m<sup>3</sup>;

$c_{aço}$  é o calor específico da lâmina igual a 460 J. kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>;

$A$  é a área da coluna do núcleo igual a 0,052 m<sup>2</sup>;

$H_j$  é a altura da janela igual a 0,355 m.

b) Enrolamento de BT

$$C_{BT} = \rho_{cu} \cdot c_{cu} \cdot \pi \cdot \left[ \left( \frac{DeBT}{2} \right)^2 - \left( \frac{DiBT}{2} \right)^2 \right] \cdot H_{BT} = 9209,37 \text{ W.s / K} . \quad (3.80)$$

Onde:

$\rho_{cu}$  é a densidade do cobre igual a 8933 kg/m<sup>3</sup>;

$c_{cu}$  é o calor específico do cobre igual a 383 J. kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

$DeBT$  é o diâmetro externo do enrolamento de BT igual a 0,182 m;

$DiBT$  é o diâmetro interno do enrolamento de BT igual a 0,151m;

$H_{BT}$  é a altura da bobina de BT igual a 0,332 m.

c) Enrolamento de AT

$$C_{AT} = \rho_{cu} \cdot c_{cu} \cdot \pi \cdot \left[ \left( \frac{DeAT}{2} \right)^2 - \left( \frac{DiAT}{2} \right)^2 \right] \cdot H_{AT} = 20256,24 \text{ W.s / K} . \quad (3.81)$$

Onde:

$\rho_{cu}$  é a densidade do cobre igual a 8933 kg/m<sup>3</sup>;

$c_{cu}$  é o calor específico do cobre igual a 383 J. kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

$DeAT$  é o diâmetro externo do enrolamento de AT igual a 0,250 m;

$D_{iAT}$  é o diâmetro interno do enrolamento de AT igual a 0,196m;

$H_{AT}$  é a altura da bobina de AT igual a 0,313 m.

d) Óleo

$$C_{\text{Óleo}} = \rho_{\text{oleo}} \cdot c_{\text{oleo}} \cdot \pi \cdot \left[ \left( \frac{D_{T\text{NK}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_{eAT}}{2} \right)^2 \right] \cdot H_{T\text{NK}} = 1235418,49 \text{ W.s / K} . \quad (3.82)$$

Onde:

$\rho_{\text{oleo}}$  é a densidade do óleo igual a 879 kg/m<sup>3</sup>;

$c_{\text{oleo}}$  é o calor específico do óleo igual a 1710 J. kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

$D_{T\text{NK}}$  é o diâmetro do tanque igual a 0,90 m;

$D_{eAT}$  é o diâmetro externo do enrolamento de AT igual a 0,25m;

$H_{T\text{NK}}$  é a altura do tanque igual a 1,40 m.

### 3.6 DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 100 kVA

A EPRI (*Electric Power Research Institute*) realizou pesquisas com o termômetro óptico chamado *Fluoroptic* desenvolvido pela Luxtron Corporation em 1982 [13,14]. O objetivo foi monitorar o ponto mais quente do enrolamento do transformador inserindo um sensor óptico por fibra. A tecnologia é baseada na transmissão fluorescente para a detecção da temperatura, sendo a fibra óptica revestida de material dielétrico e com comportamento adequado às exigências térmicas e mecânicas impostas pelo transformador em sua operação. Porém, o sinal transmitido sofre atenuação ao longo de sua vida útil, em razão da qualidade do óleo, que se altera com o decorrer do tempo, e da exposição à temperatura elevada.

O projeto da monitoração da temperatura do transformador em tempo real consiste na utilização dos sensores em fibra óptica utilizando a tecnologia das Redes de Bragg (FBG – Fiber Bragg Grating). Estes apresentam a possibilidade de serem multiplexados em vários pontos de medição em uma mesma fibra.

As redes de Bragg utilizam o índice de refração que permite uma modulação do sinal através dos planos transversais inseridos no núcleo da fibra óptica. A luz incidente no núcleo da fibra óptica é espalhada por cada plano, e caso a condição de Bragg não seja satisfeita, a luz refletida fica fora de fase e é cancelada. Isto significa que, se a luz não coincidir com o comprimento da onda ressonante de Bragg, cada plano da rede injeta uma fraca reflexão. Quando a condição de Bragg ocorre, as

contribuições da luz refletida de cada plano adicionam-se construtivamente no retorno do sinal, formando um pico refletido no centro do comprimento de onda definido pelos parâmetros da rede.

A ressonância da rede de Bragg, ou o centro da onda refletida, que depende do índice efetivo da refração e do espaçamento periódico entre os planos da rede, varia com temperatura e deformação. Neste contexto, uma alteração no índice de refração, devido à expansão térmica e deslocamentos nos espaçamentos dos planos transversais, é obter temperatura ou deformação mecânica.

A técnica de interpretação dos sensores converte a alteração do comprimento da onda de Bragg em parâmetro mensurável, tal como, a temperatura. Esta técnica pode ser baseada em lasers sintonizáveis que permitem interrogar até 30 FBGs em uma mesma fibra.

O projeto da monitoração da temperatura em transformadores de distribuição, aplicado neste estudo, consiste na instalação das fibras ópticas com redes de Bragg em dois transformadores monofásicos de 100 kVA. Sendo um deles imerso em óleo mineral e o outro em óleo vegetal.

Para a monitoração da temperatura foram utilizados 12 (doze) sensores que estão igualmente distribuídos em 3 (três) fibras ópticas. A primeira fibra possui 4 (quatro) sensores térmicos e foi instalada em forma helicoidal na primeira camada do enrolamento de baixa tensão (BT) para as seguintes posições dos termômetros:

- 1º Termômetro (início do enrolamento): 0 (m);
- 2º Termômetro (1/3 do enrolamento): 1,42 (m);
- 3º Termômetro (2/3 do enrolamento): 2,84 (m);
- 4º Termômetro (fim do enrolamento): 4,26 (m).

A segunda fibra encontra-se disposta de maneira axial no canal de óleo entre os enrolamentos da baixa tensão (BT) e da alta tensão (AT):

- 1º Termômetro (início do enrolamento): 0 (mm);
- 2º Termômetro (1/3 do enrolamento): 115 (mm);
- 3º Termômetro (2/3 do enrolamento): 230 (mm);
- 4º Termômetro (fim do enrolamento): 345 (mm).

E a terceira fibra foi instalada de maneira axial na parte externa do enrolamento de AT, ou seja, na 7ª camada do enrolamento:

- 1º Termômetro (início do enrolamento): 0 (mm);
- 2º Termômetro (1/3 do enrolamento): 115 (mm);
- 3º Termômetro (2/3 do enrolamento): 230 (mm);
- 4º Termômetro (fim do enrolamento): 345 (mm).

Nos transformadores monitorados, a bobina de BT é formada por duas camadas de enrolamento de cobre com diâmetro interno de 151 mm, diâmetro externo de 182 mm e altura de 345 mm. A bobina de AT é formada por sete camadas, resultando no diâmetro interno de 193 mm, diâmetro externo de 252 mm e altura de 345 mm.

Os sensores ópticos são constituídos de material dielétrico e, foram projetados para operar a uma temperatura máxima de 250°C por um curto período de tempo e de 0°C a 150°C de forma contínua. A fibra é protegida por um tubo constituído por teflon, onde a espessura do material é de 1 mm.

A Figura 3.21 apresenta a fibra com o conjunto dos termômetros óptico e conector externo, também conhecido por penetrador. O conector externo é um dispositivo que permite a transmissão da luz (sinal óptico) entre ambientes com diferentes níveis de pressão.

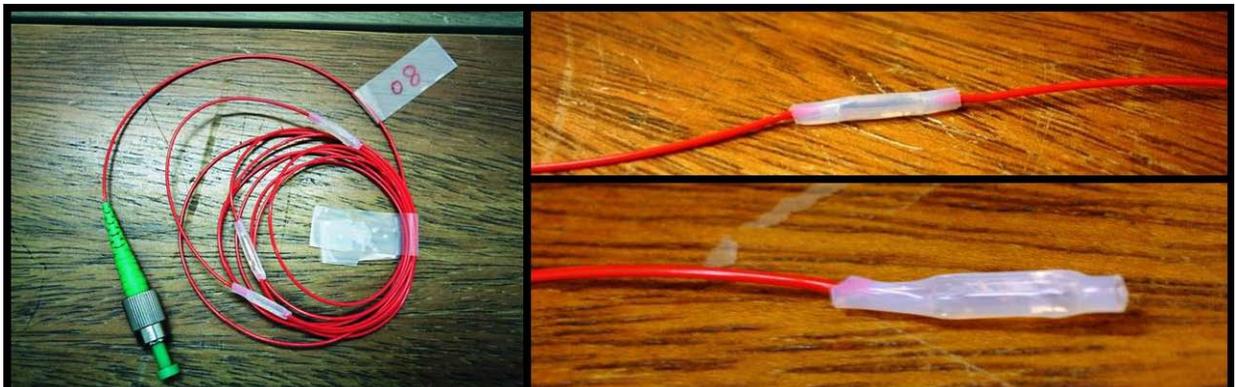


Figura 3.21 – Fibra com o conjunto de sensores e penetrador.

Os sensores foram inseridos ao longo da primeira camada do enrolamento de BT, de forma helicoidal, conforme apresentado nas Figuras 3.22 e 3.23.



Figura 3.22 – Instalação dos sensores no enrolamento de BT.

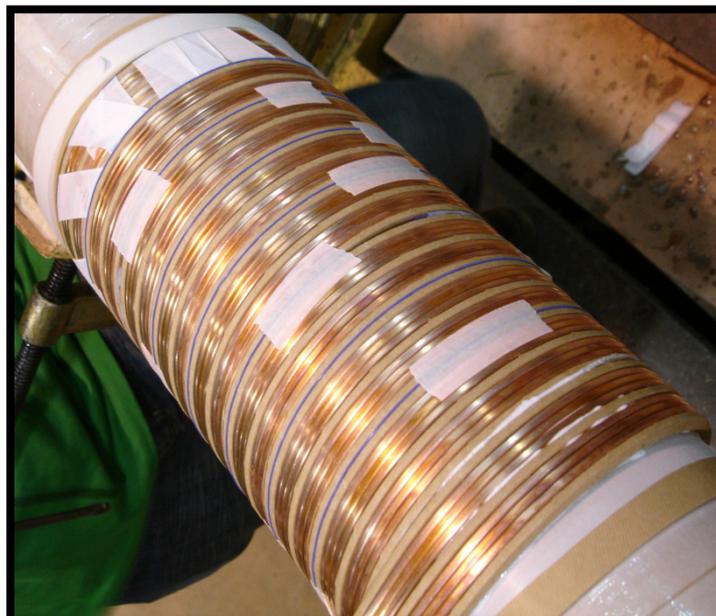


Figura 3.23 – Posicionamento da fibra no enrolamento de BT.

A Figura 3.24 apresenta os espectros dos comprimentos de onda resultantes dos termômetros nas bobinas de BT dos dois transformadores de 100 kVA. As fibras ópticas e seus conjuntos de sensores, ou seja, com quatro termômetros cada, são representados pelos comprimentos de onda A02 e A03.

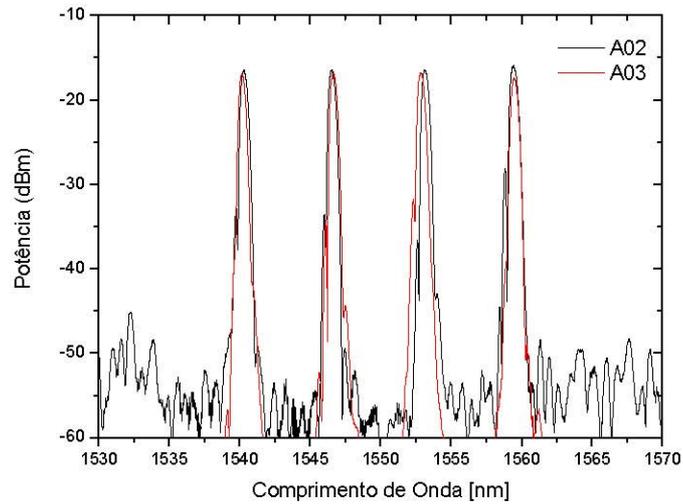


Figura 3.24 – Espectro dos conjuntos de sensores no enrolamento de BT após a instalação.

A fibra foi instalada de forma axial na parte externa da bobina de BT, conforme Figura 3.25, onde o canal de óleo possui espessura de 7 mm. E a Figura 3.26 mostra o sensor do canal de óleo no final das bobinas de BT e AT.

O espectro dos termômetros instalados no canal de óleo é mostrado na Figura 3.27 pelos comprimentos de onda A04 e A07.

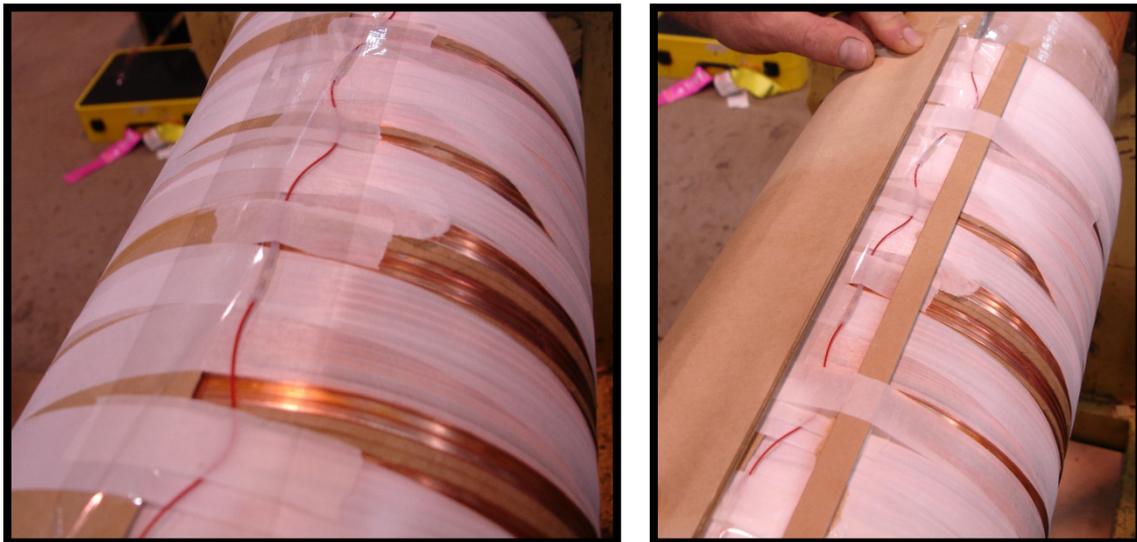


Figura 3.25 – Posicionamento dos sensores no canal de óleo.

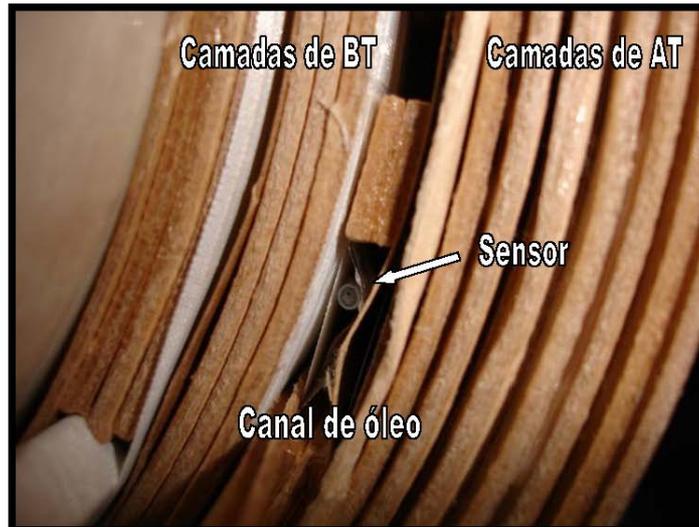


Figura 3.26 – Sensor no canal de óleo.

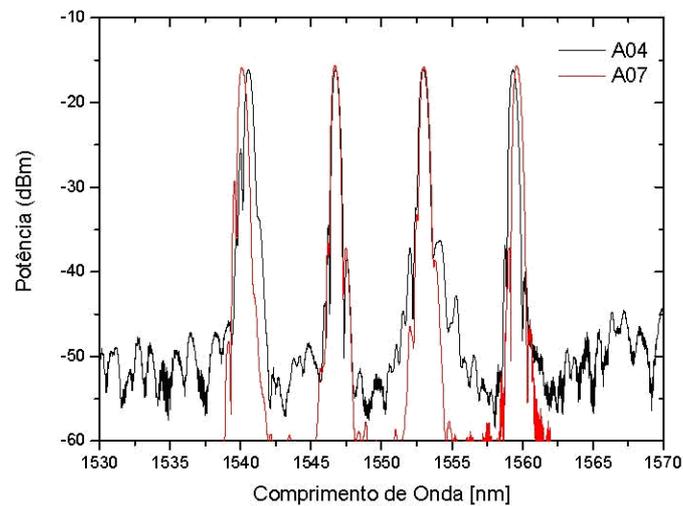


Figura 3.27 – Espectro dos conjuntos de sensores instalados no canal de óleo.

A fibra óptica e seus sensores foram instalados de forma axial na face externa da 7ª camada do enrolamento de AT, em contato direto com o óleo. A Figura 3.28 apresenta o posicionamento dos quatro sensores neste enrolamento. E a Figura 3.29, os espectros dos conjuntos de sensores A05 e A06 instalados no enrolamento de AT.



Figura 3.28 – Posicionamento dos sensores no enrolamento de AT.

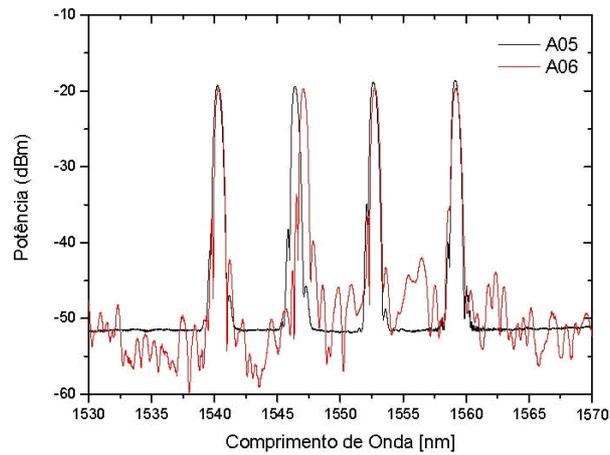


Figura 3.29 – Espectro dos conjuntos de sensores instalados no enrolamento de AT.

As fibras foram conectadas no tanque através dos penetradores para a monitoração da temperatura. Os penetradores são peças mecânicas que permitem o acoplamento da fibra com o equipamento de aquisição de dados. A Figura 3.30 apresenta a posição dos penetradores no tanque e a Figura 3.31, imersos no óleo mineral. Os penetradores resistiram satisfatoriamente ao ensaio de estanqueidade do transformador.



Figura 3.30 – Posicionamento dos penetradores no tanque.

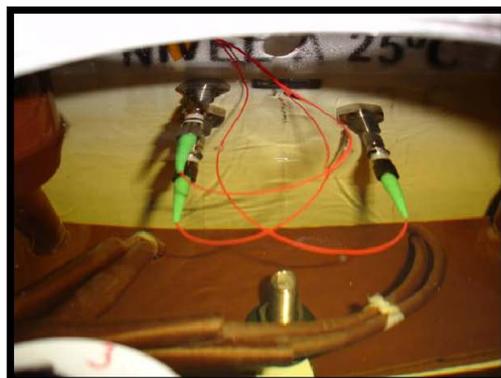


Figura 3.31 – Detalhes dos penetradores no óleo mineral.

A Figura 3.32 apresenta a configuração do ensaio de aquecimento do transformador realizado na fábrica Itaipu Transformadores Ltda.

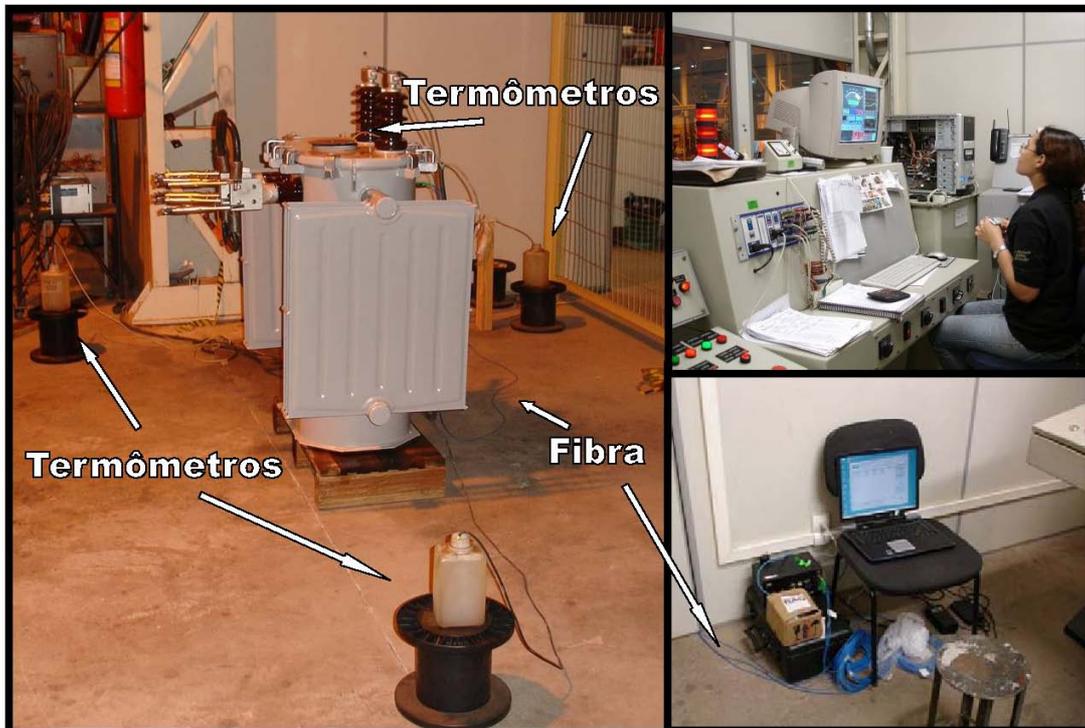


Figura 3.32 – Configuração do ensaio de elevação de temperatura.

As leituras dos sensores de temperatura nos transformadores foram obtidas a partir dos ensaios de elevação da temperatura conforme determinado pela NBR 5380 [15]. O primeiro ensaio foi realizado com o aquecimento pelas perdas totais. E o segundo ensaio, de acordo com um perfil de carregamento específico.

a) Ensaio da Elevação da Temperatura de acordo com as Perdas Totais.

As Figuras 3.33, 3.34 e 3.35 apresentam as temperaturas dos quatro termômetros (sensores) das fibras instaladas na 1ª camada do enrolamento de BT, no canal de óleo e na 7ª camada do enrolamento de AT. O termômetro T1 encontra-se no começo do enrolamento e o termômetro T4 no final da bobina. Nas figuras, observa-se a comparação dos resultados da medição da temperatura dos sensores e do termômetro elétrico. Este obtém a leitura no topo do óleo, indicado por T5.

O ponto mais quente da 1ª camada do enrolamento de BT é de aproximadamente 83,5°C, e encontra-se a 1/3 do enrolamento conforme os resultados mostrados na Figura 3.33. No ensaio da elevação da temperatura em relação às perdas totais, a temperatura máxima foi de 65,6°C, ou seja, uma diferença de 17,9°C

em relação à medição do sensor.

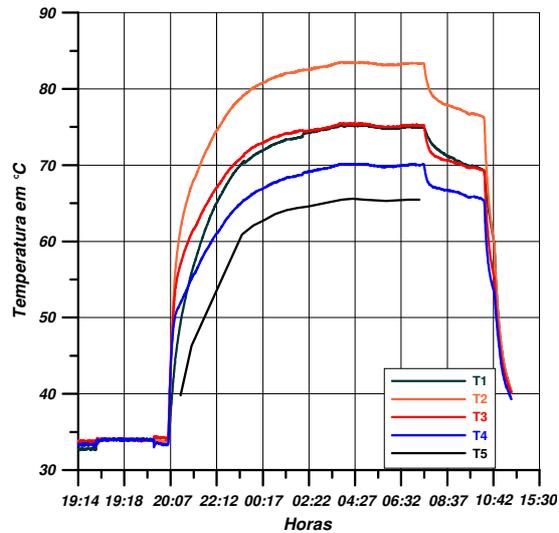


Figura 3.33 – Gráfico da variação de temperatura dos sensores da 1ª camada do enrolamento de BT.

O ponto mais quente no canal de óleo encontra-se no começo da bobina, e é de aproximadamente 75,4°C. A Figura 3.34 apresenta os resultados do comportamento da temperatura no canal de óleo.

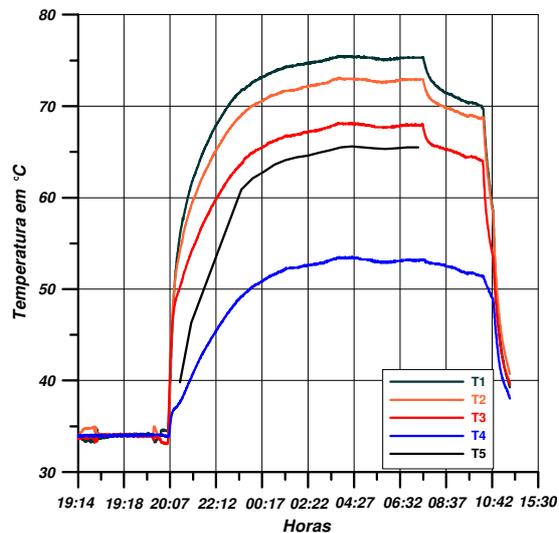


Figura 3.34 – Gráfico de variação de temperatura dos sensores do canal de óleo.

A maior temperatura na última camada de AT foi registrada pelo sensor T2 igual a 68,4°C e localizada a 1/3 do enrolamento. Em relação ao método normalizado, a diferença foi de 3°C, conforme os resultados mostrados na Figura 3.35.

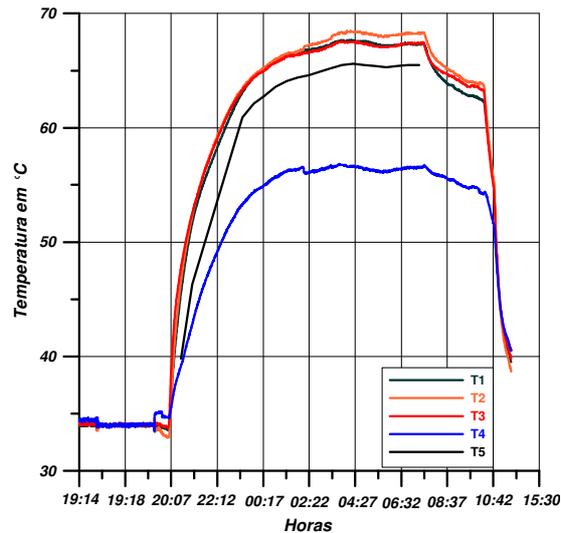


Figura 3.35 – Gráfico de variação de temperatura dos sensores da 7ª camada do enrolamento de AT.

Portanto, a temperatura máxima registrada foi indicada pelo sensor óptico T2, que se encontra na 1ª camada do enrolamento de BT, a 1/3 do enrolamento. O segundo ponto mais quente está a 2/3 do mesmo enrolamento.

A comparação entre os sensores instalados no início e à 1/3 da bobina para a 1ª camada de BT, canal de óleo e 7ª camada de AT é apresentada pela Figura 3.36. Na Figura 3.37 tem-se a comparação entre os sensores localizados à 2/3 e no final da bobina para a 1ª camada de BT, canal de óleo e 7ª camada de AT.

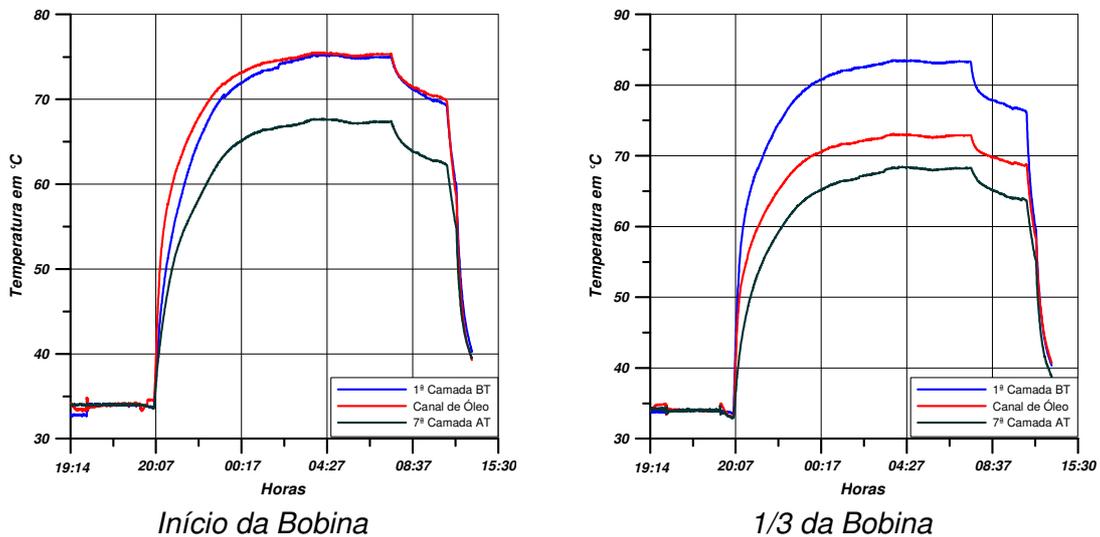


Figura 3.36 – Comparação entre as temperaturas dos sensores localizados no início e a 1/3 da bobina.

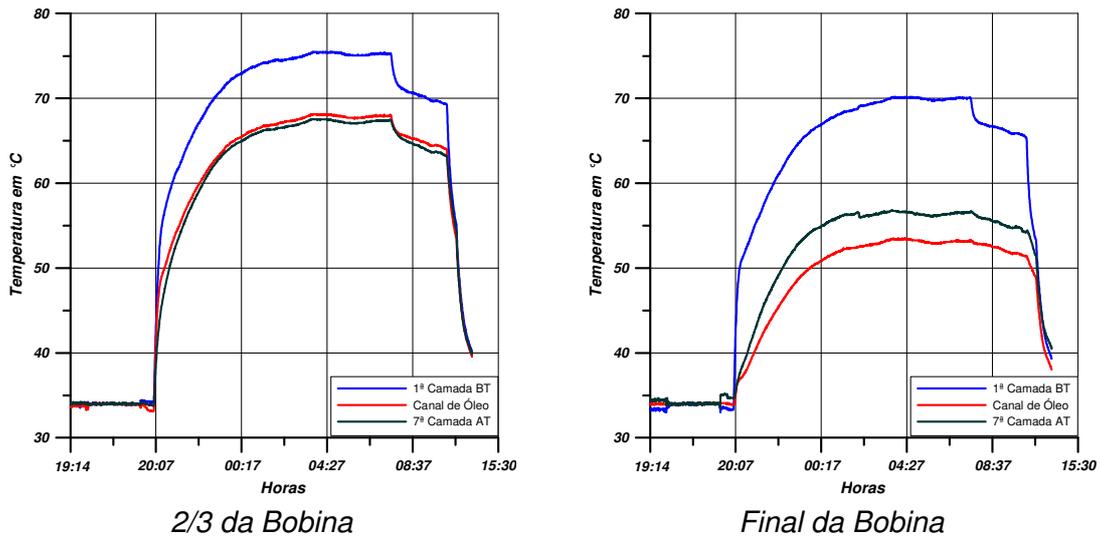


Figura 3.37 – Comparação entre as temperaturas dos sensores localizados a 2/3 e no final da bobina.

b) Ensaio da Elevação da Temperatura de acordo com uma Carga Específica.

Considerando a curva de carga da Figura 3.38 foi realizado o ensaio da elevação da temperatura.

As Figuras 3.39, 3.40 e 3.41 apresentam as temperaturas dos quatro termômetros ópticos das três fibras (da 1ª camada do enrolamento de BT, do canal de óleo entre os enrolamentos de BT e AT, e da 7ª camada do enrolamento de AT). O termômetro óptico T1 está no começo do enrolamento e o termômetro T4 no final da bobina. O termômetro T5 representa a medição do topo do óleo realizada pelo termômetro elétrico.

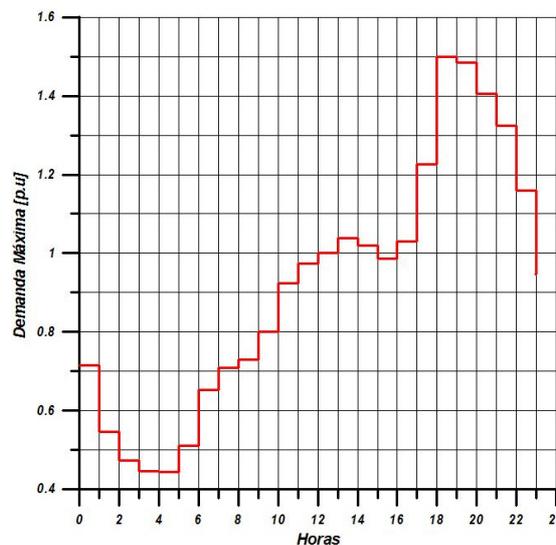


Figura 3.38 – Demanda prevista para a comunidade de Paraisópolis.

O ponto mais quente durante a sobrecarga está a 1/3 da primeira camada de BT com valor de 101,0°C conforme mostrado na Figura 3.39. O termômetro elétrico indica uma temperatura máxima no topo do óleo de 78,24°C. A medição da temperatura foi realizada em apenas um ciclo de carga.

O ponto mais quente do canal de óleo encontra-se no início da bobina conforme os resultados da Figura 3.40.

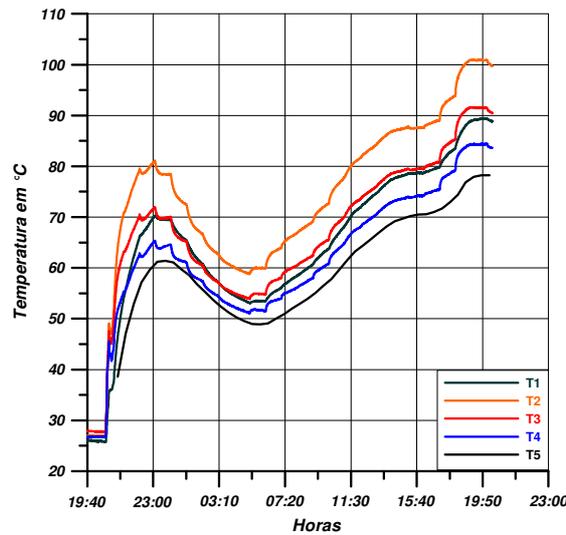


Figura 3.39 – Gráfico de variação de temperatura dos sensores da 1ª camada do enrolamento de BT.

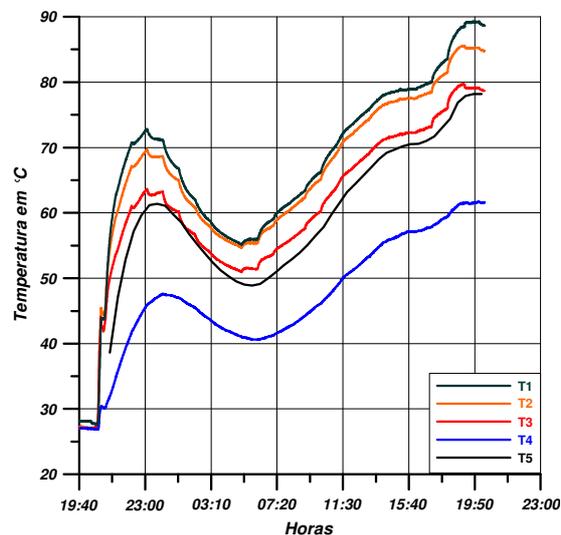


Figura 3.40 – Gráfico de variação de temperatura dos sensores do canal de óleo.

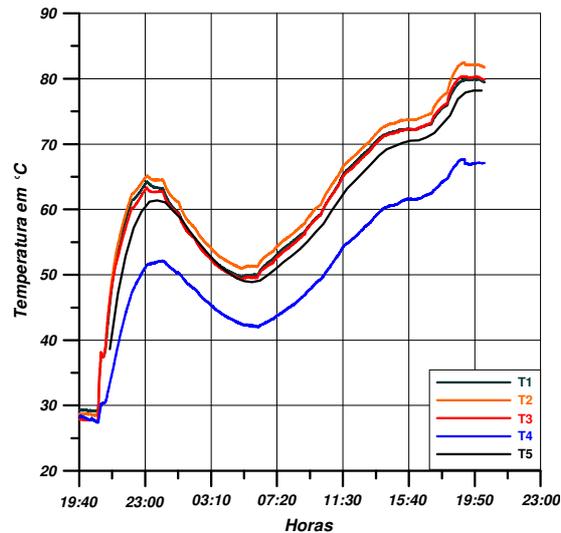


Figura 3.41 – Gráfico de variação de temperatura dos sensores da 7ª camada do enrolamento de AT.

### 3.7 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

A simulação do modelo térmico equivalente, conforme Figura 3.42, para o transformador de 100 kVA foi realizada pelo software *ATPDraw*®. Os pontos de medição são indicados pela letra v. A temperatura ambiente utilizada pela simulação foi considerada como constante e igual a 34°C, ou seja, a mesma registrada durante o ensaio do transformador na fábrica.

A determinação das temperaturas internas e das superfícies do núcleo, do enrolamento de BT e de AT foi definida pela simulação. O ponto de convergência são as temperaturas medidas nos ensaios pelos termômetros ópticos instalados:

- a) Na primeira camada do enrolamento de BT: 83,52°C;
- b) No canal de óleo entre os enrolamentos de BT e AT: 73,09°C;
- c) Na última camada do enrolamento de AT: 68,48°C.

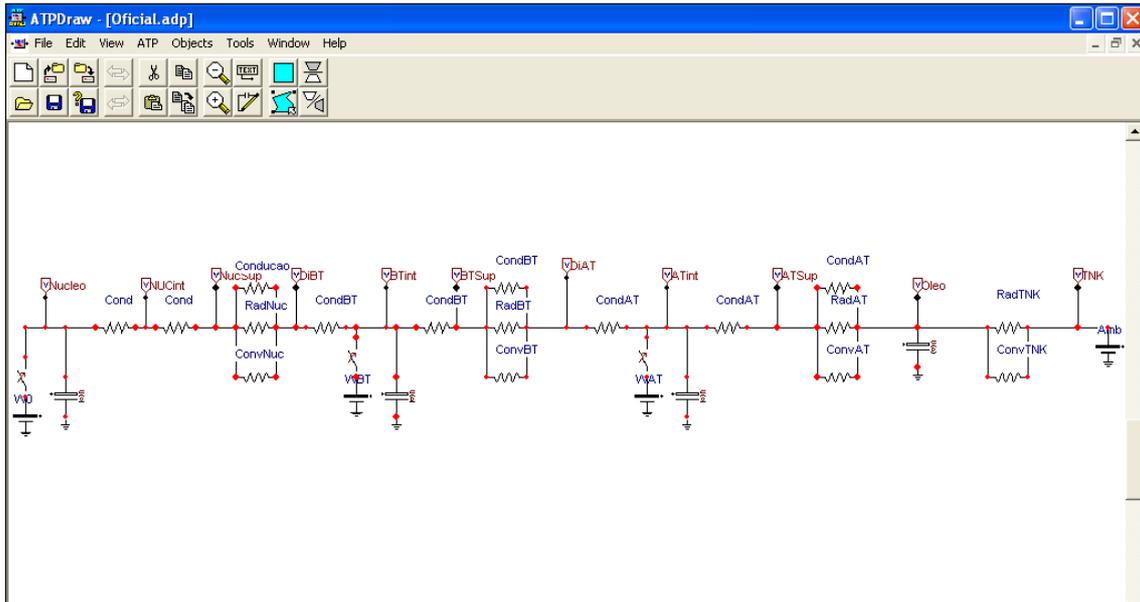


Figura 3.42 – Representação do circuito elétrico equivalente.

A Figura 3.43 mostra que as temperaturas convergem em sete iterações. Para primeira iteração foram consideradas temperaturas de acordo com os estudos teóricos. A temperatura na face externa do tanque foi igual à temperatura do topo do óleo [17].

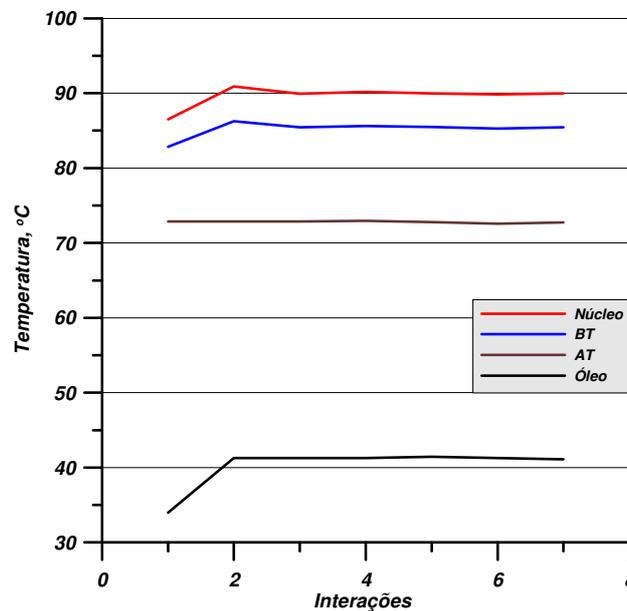


Figura 3.43 – Convergência da temperatura no processo de simulação.

O cálculo das resistências térmicas, que representam o processo da transferência do calor, da última camada do enrolamento de AT tem como ponto final a parede interna do tanque. Observa-se na Figura 3.43 que a temperatura do óleo é igual a 41°C. Esta é a temperatura na face interna do tanque onde se localiza a coluna do óleo frio segundo Figura 3.44 [18].

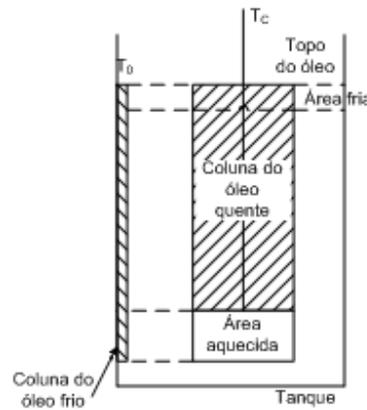


Figura 3.44 – Diagrama da temperatura – processo das colunas do óleo quente e frio<sup>[18]</sup>.

A Figura 3.45 apresenta o resultado da simulação do circuito equivalente, onde a temperatura em Kelvin, por analogia ao circuito elétrico, é indicada pela tensão em volts. Os resultados mostram as temperaturas internas do núcleo, do enrolamento de BT e AT, e do óleo na face interna do tanque.

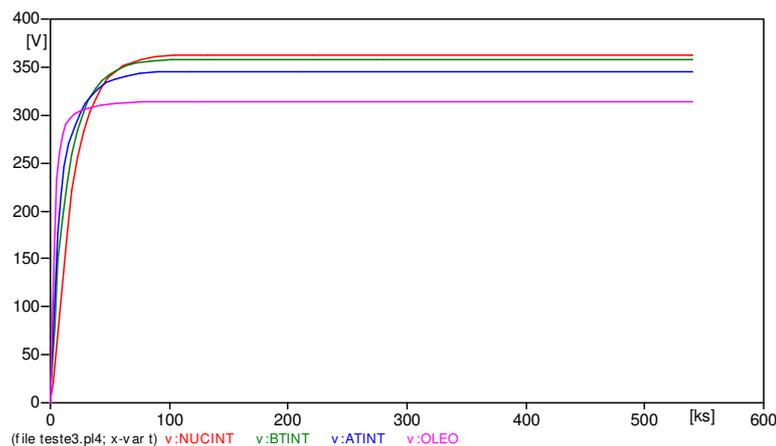


Figura 3.45 – Resultados para a temperatura interna do núcleo, dos enrolamentos de BT e AT, e óleo.

A temperatura interna do núcleo é de 363,10 K ou 89,95°C, do enrolamento de BT é de 358,58 K ou 85,43°C, do enrolamento de AT é de 345,89 K ou 72,74°C e do óleo (coluna fria) é de 314,24 K ou 41,09°C.

A temperatura interna do enrolamento de BT medida pelos sensores ópticos foi de 83,52°C, ou seja, uma diferença de 1,93°C em relação ao valor obtido por simulação.

Com relação à temperatura interna do núcleo, [19] afirma que o ponto mais quente do núcleo está localizado no centro da junção T, sendo a indução magnética menor devido ao aumento da perda. A temperatura interna do núcleo na simulação considera o centro da coluna do núcleo.

A temperatura na superfície externa do núcleo é igual a 87,53°C (360,68 K), nas superfícies internas da bobina de BT igual a 85,29°C (358,44 K) e da bobina de AT igual a 72,64°C (345,49 K) como mostrado na Figura 3.46.

Na superfície interna do enrolamento de AT, os sensores registraram uma temperatura de 73,09°C, ou seja, uma diferença de 0,45°C.

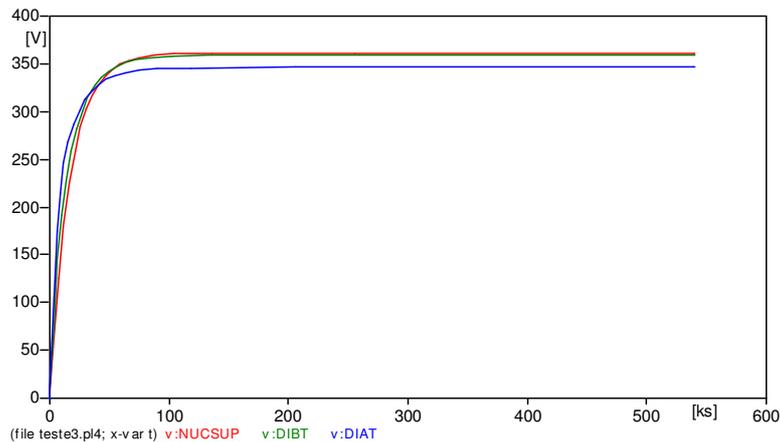


Figura 3.46 – Resultados para a temperatura externa do núcleo, e na superfície interna dos enrolamentos de BT e AT.

A Figura 3.47 indica a temperatura na superfície externa do enrolamento de AT. O resultado da simulação foi de 71,92°C (345,07 K) e o resultado registrado pelo sensor óptico foi de 68,48°C. A diferença entre essas temperaturas é de 3,44°C.

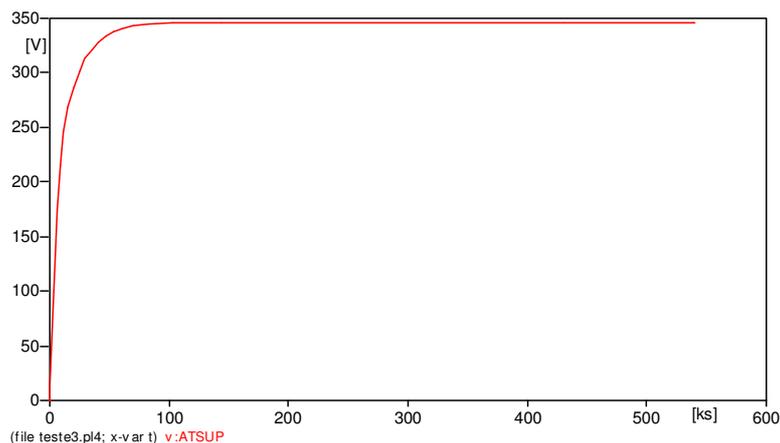


Figura 3.47 – Resultados para a temperatura externa do enrolamento de AT.

A temperatura do tanque, para a aproximação dos valores simulados com as medições dos sensores, foi de 75°C. A temperatura registrada pelo termômetro para o topo do óleo foi de 65,54°C.

A elevação da temperatura interna do núcleo em relação ao enrolamento de BT é de 4,52°C, do enrolamento de BT em relação ao de AT é de 12,69°C e do enrolamento de AT em relação ao topo do óleo é de 7,2°C.

A normalização brasileira [9] indica, para o transformador padrão, que a elevação da temperatura dos enrolamentos em relação à temperatura ambiente deve ser de 55°C e do ponto mais quente 65°C.

Para o transformador monofásico de 100 kVA eficiente a elevação da temperatura do núcleo em relação à ambiente é de 55,95°C. Do ponto mais quente do enrolamento é de 51,43°C e do enrolamento de AT é de 38,74°C.

Os resultados emitidos pelo relatório para o ensaio normalizado segundo NBR 5380 [15] indicam uma elevação da temperatura para o enrolamento de AT em relação ao óleo de 8,4°C e em relação ao ambiente 47°C. E a elevação da temperatura para o enrolamento de BT em relação ao óleo é de 1,7°C e em relação ao ambiente de 40,3°C.

A Figura 3.48 apresenta o comportamento das temperaturas internas do núcleo e dos enrolamentos de BT e AT para a curva de carga da Figura 3.38.

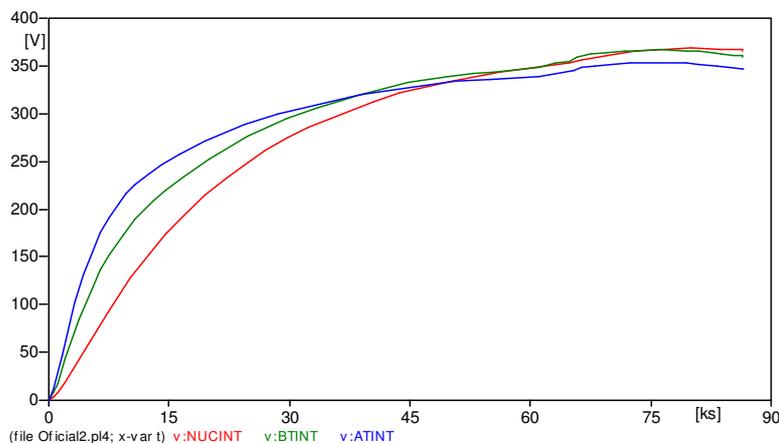


Figura 3.48 – Comportamento da temperatura para a curva de carga da Figura 3.38.

O pico de 1,5 p.u. ocorre às 19 horas e a temperatura máxima às 20 horas e 51 minutos. Isto é devido à inércia térmica e aos patamares seguintes de 1,48 e 1,40 p.u.

A comparação dos resultados da medição dos sensores ópticos com os simulados apresenta um erro de 7% para a camada interna do enrolamento de BT, de 6,45% para o canal de óleo e 3,2% para camada externa de AT.

O ensaio normalizado divide as perdas do núcleo entre os enrolamentos de BT e AT conforme representado na Figura 3.49 e não considera o efeito do fluxo de calor

gerado pelo núcleo. O relatório emitido deste ensaio apresentou temperatura do enrolamento de BT igual a 63,5°C e para o enrolamento de AT, 72,67°C.

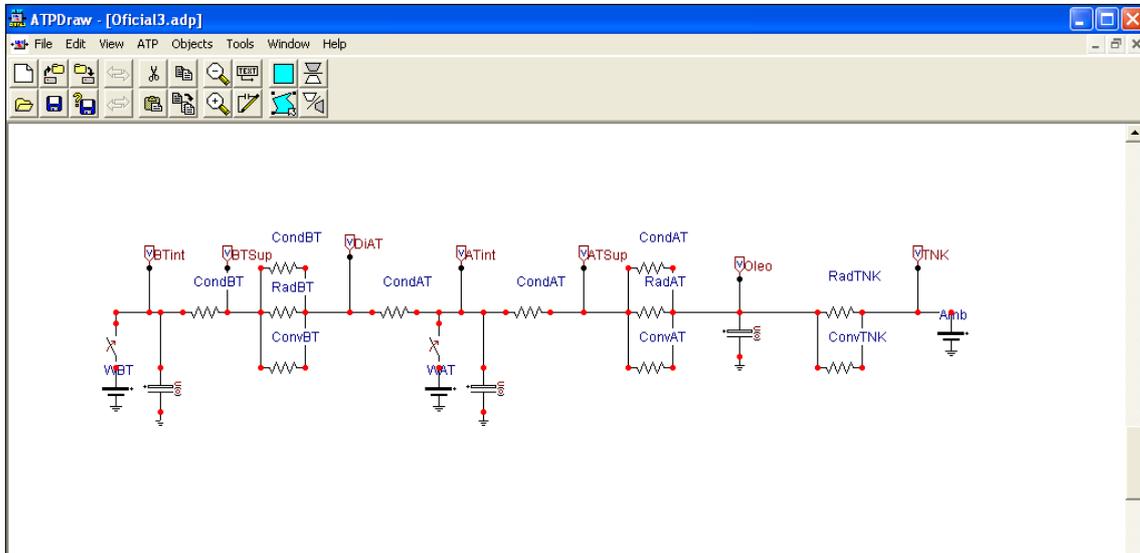


Figura 3.49 – Circuito elétrico equivalente com as perdas em vazio distribuídas nos enrolamentos de BT e AT.

A Figura 3.50 apresenta os resultados simulados no circuito térmico equivalente. A temperatura do enrolamento de BT foi igual a 83,93°C e para o enrolamento de AT, 72,67°C.

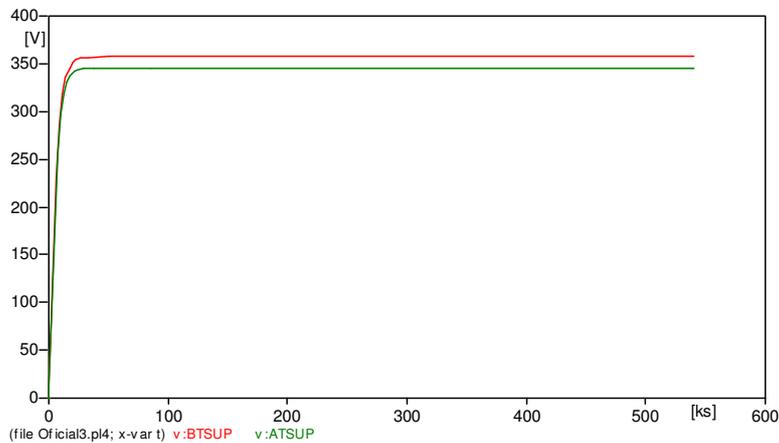


Figura 3.50 – Resultados para a temperatura interna dos enrolamentos de BT e AT.

### 3.8 COMENTÁRIO 2

A determinação do ponto mais quente do enrolamento, segundo normalizações, está baseada em procedimentos matemáticos. O estudo da modelagem térmica do transformador tem como objetivo avaliar o comportamento do processo da transferência do calor através da parte ativa, considerando as perdas no núcleo e nos enrolamentos. O desafio desta comprovação é obter a temperatura em tempo real em vários pontos internos do equipamento, de modo, a determinar o processo da transferência do calor.

A solução proposta utilizou a tecnologia FBG, distribuindo 12 pontos de medição ao longo dos enrolamentos. Observou-se que, com a medição óptica, o ponto mais quente do enrolamento encontra-se a 1/3 a partir do topo da bobina de BT. A diferença da temperatura do ponto mais quente medida pelo sensor óptico em relação ao método normalizado é de 17,9°C. Isto sugere que, atualmente, os transformadores de distribuição normalizados apresentam maior temperatura do ponto mais quente do enrolamento, o que pode ocasionar maior solitação térmica da isolação. E a redução da vida útil do equipamento é um efeito direto da temperatura do ponto mais quente. Para o caso do projeto do transformador eficiente de 100 kVA apresentou menor elevação da temperatura em relação ao ambiente quando comparado com o transformador padrão.

Como trabalho futuro para os transformadores com os sensores ópticos instalados é a medição simultânea do carregamento e dos sensores por um período de no mínimo 7 dias.

O circuito térmico equivalente baseado nos dados medidos pelos sensores ópticos representa um modelo para estudos de transferência de calor em transformadores de distribuição. Porém, o modelo é um processo abstrato sendo necessária sua comprovação por meio de ensaios em laboratório.

Uma proposta para estudo futuro é realizar através da modelagem por elementos finitos a temperatura em diversos pontos do transformador. Para esta modelagem, utilizar-se-á os resultados medidos pelos sensores ópticos de modo a proporcionar um desenho térmico tridimensional do transformador sob carga.

## CAPÍTULO 4

# RESTRIÇÃO DIELÉTRICA: COMPORTAMENTO DA ISOLAÇÃO FRENTE À SOLICITAÇÃO DIELÉTRICA

O conhecimento das características dielétricas dos transformadores é importante para avaliar o comportamento do isolamento. Isto porque na tese tem-se a variação dos parâmetros construtivos do transformador.

Estabelecer os limites mínimos e máximos para o calço, distância entre enrolamentos e isolamento entre as camadas tem a finalidade de orientar os cálculos dos projetos.

### 4.1 TENSÃO DE RUPTURA

O mecanismo da ruptura em sólidos depende da duração, da geometria dos eletrodos e da intensidade campo elétrico aplicado. Assim, o processo de ruptura está dividido em: puramente elétrico, eletromecânico, por ionização, térmico e por erosão [20], segundo Figura 4.1.

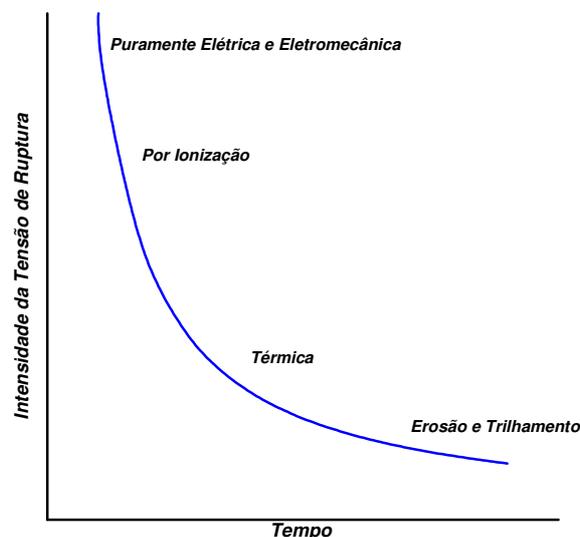


Figura 4.1 – Variação da tensão de ruptura em relação ao tempo [20].

O isolamento sólido utilizado na parte ativa do transformador é constituído pelo papel aplicado aos enrolamentos de BT e AT. Geralmente, para transformadores com enrolamento contínuo, os condutores do enrolamento de BT e as camadas do enrolamento de BT e AT são envolvidos por papel *Kraft*, conforme indicado na Figura 4.2.

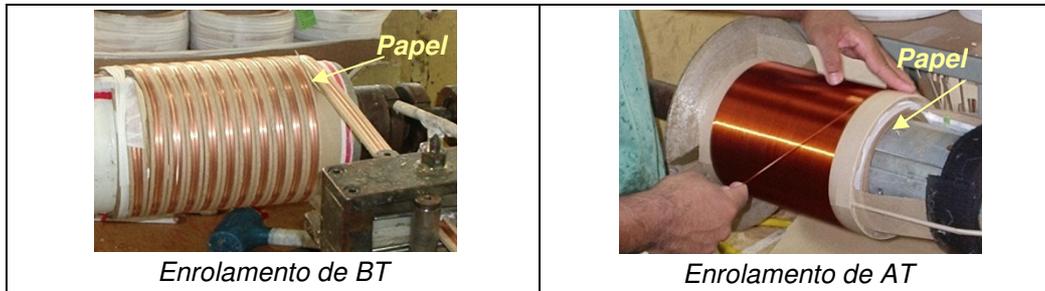


Figura 4.2 – Isolamento dos enrolamentos de BT e AT por papel.

A tensão disruptiva não é diretamente proporcional à espessura da isolação devido ao campo elétrico não uniforme. Uma das causas da não uniformidade são os efeitos das correntes parasitas nos condutores e as outras perdas de dispersão, que ocorrem por causa das correntes parasitas nas outras partes metálicas da estrutura do transformador.

A tensão disruptiva para o papel *Kraft* impregnado em óleo na temperatura ambiente e na tensão de frequência industrial, segundo [21,22], é expressa pela Equação (4.1).

$$U_{d,ac} = \frac{32,8}{d^{0,33}} \cdot \quad (4.1)$$

Onde:

$U_{d,ac}$  é a tensão disruptiva em frequência industrial em  $kV_{rms}$ ;

$d$  é a espessura em mm.

A tensão disruptiva para o papel em óleo sob a aplicação do impulso de tensão atmosférico, segundo [22], é apresentada na Equação (4.2).

$$U_{d,imp} = \frac{79,43}{d^{0,275}} \cdot \quad (4.2)$$

$U_{d,imp}$  é a tensão disruptiva sob impulso atmosférico em  $kV_{pico}$ .

O óleo do transformador proporciona o resfriamento térmico e possui função isolante. Para o óleo de transformador a uma temperatura de 90°C, o campo elétrico depende do volume conforme Equação (4.3) para a frequência industrial e (4.4) para o impulso atmosférico [22].

$$E_{dOleo,ac} = 34,9 - 1,74 \ln V . \quad (4.3)$$

$$E_{dOleo,imp} = 82,5 - 3,69 \ln V . \quad (4.4)$$

Onde:

$E_{dOleo,ac}$  é o campo elétrico no óleo para a frequência industrial em  $kV_{rms}/mm$ ;

$E_{dOleo,imp}$  é o campo elétrico no óleo sob impulso atmosférico em  $kV_{pico}/mm$ ;

$V$  é o volume em  $mm^3$ .

Conforme [22] a intensidade do campo elétrico de ruptura do óleo aumenta com a temperatura. E a isolação de papel deve ser dimensionada de modo a evitar corona no óleo e danos no isolamento.

#### 4.2 ANÁLISE DA TENSÃO DISRUPTIVA

A espessura do papel de 0,3 mm é a utilizada para o projeto de transformador padrão. Conforme as equações expostas em [22], variando a espessura do papel para valores 50% abaixo e acima de 0,3 mm, pode-se avaliar o comportamento da tensão disruptiva para um transformador trifásico 45 kVA na Figura 4.1. Quanto menor a espessura do papel isolante maior é o gradiente de tensão disruptiva por mm.

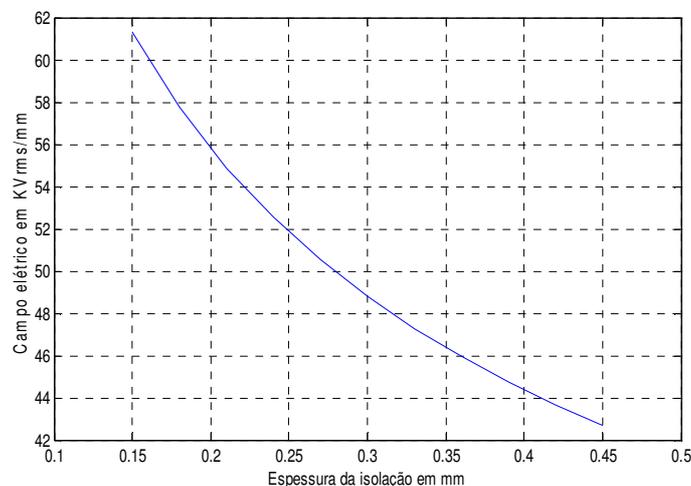


Figura 4.1 – Comportamento do campo elétrico em relação à espessura do papel isolante.

Ao variar a espessura do papel, se obtém alterações radiais no projeto da bobina que influencia as perdas a vazio, devido à variação no comprimento da culatra, e nas perdas em carga. O comportamento das perdas a vazio e das perdas no cobre em relação ao campo elétrico para os projetos de transformadores de 45 kVA com variação na espessura da isolação é apresentado na Figura 4.2. A densidade da corrente de AT e indução magnética são constantes e iguais ao valor de referência. A largura é variável e a espessura é constante para o condutor de BT.

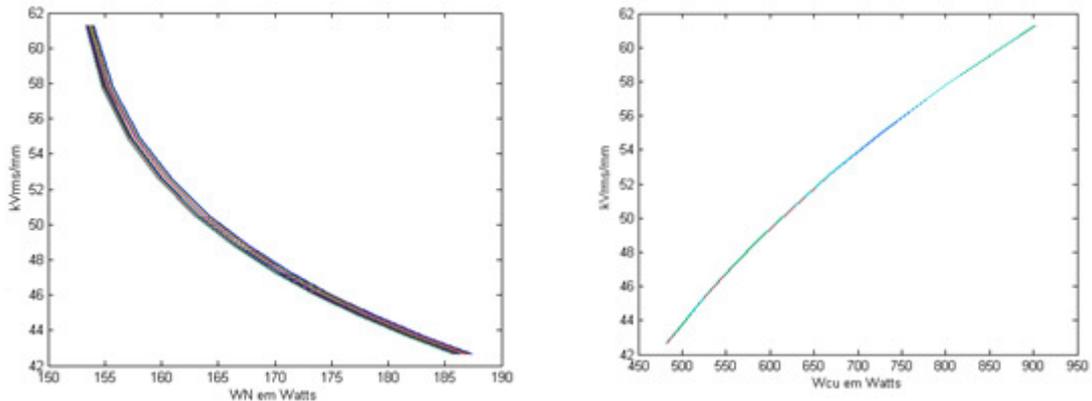


Figura 4.2 – Comportamento das perdas em vazio e das perdas em carga em relação ao campo elétrico para os projetos com variação na espessura da isolação de um transformador trifásico de 45 kVA.

As reduções nas perdas em carga resultam em um campo elétrico menor. Isto se deve ao aumento na espessura da isolação que incrementa o raio da bobina e, conseqüentemente, a massa de cobre. Com efeito, obtém-se comprimento da culatra e da altura a janela maior aumentando as perdas em vazio.

O comportamento das perdas em vazio e no cobre em relação ao campo elétrico, para os projetos com densidade da corrente de AT variável, é mostrado na Figura 4.3.

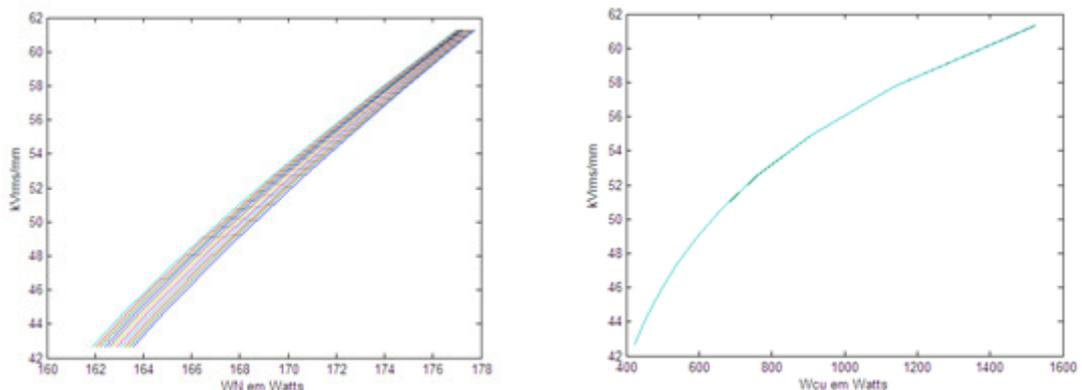


Figura 4.3 – Comportamento das perdas em vazio e das perdas em carga em relação ao campo elétrico para os projetos com variação na espessura da isolação de um transformador trifásico de 45 kVA.

Neste caso, onde a indução magnética e a densidade de corrente de BT são constantes e iguais ao valor de referência.

#### 4.3 COMENTÁRIO

O objetivo de avaliar o comportamento da isolação frente à solitação dielétrica é verificar a possibilidade da variação dos parâmetros construtivos tal como altura do calço, distância entre enrolamentos e espessura do papel para a isolação.

As alterações em parâmetros, tal como, espessura da isolação e distância entre enrolamentos, varia as perdas a vazio e em carga de acordo com o tipo do projeto adotado. Porém, tais mudanças, podem mudar a suportabilidade do equipamento frente aos surtos de tensão no sistema.

A proposta para estudos futuros é aplicar a ferramenta de elementos finitos para o conhecimento da distribuição do campo elétrico com as mudanças dos parâmetros construtivos utilizados para a isolação. Deste modo, estes resultados definirão as restrições de projeto para garantir o nível básico do isolamento segundo normalização vigente.

# *CAPÍTULO 5*

## *CONJUNTO DE SOLUÇÕES DE PROJETO*

A variação e a combinação de oito componentes construtivos da parte ativa do transformador permitem a análise de novas opções de projeto do equipamento. O comportamento dos projetos em relação à capitalização das perdas, impedância percentual e dissipação térmica na superfície das bobinas podem indicar um transformador eficiente.

Este capítulo apresenta projetos, no qual, é possível verificar que o aumento da massa de cobre, não necessariamente resulta em redução das perdas em carga. Isto é limitado por parâmetros de projetos, tal como, a resistência do enrolamento.

As combinações dos parâmetros construtivos selecionados da parte ativa formam matrizes tridimensionais de projetos de transformadores e os resultados das perdas, impedância, custo e temperatura são analisados. Isto permite a formação de conjuntos de soluções de projeto,  $S_p$ , para determinação do custo total mínimo.

No Capítulo 2 foi realizado o estudo das variações dos parâmetros e sua influência nas perdas através da metodologia das superfícies. Neste contexto, a compreensão das perdas nos projetos e dos valores das matrizes tridimensionais torna-se simplificada e, portanto, é aplicada nas matrizes de projeto desenvolvidas neste capítulo. O objetivo é determinar o projeto com menor custo total, ou menor perdas em vazio, ou menores perdas em carga, ou ainda menor temperatura do ponto mais quente e a viabilidade técnica e econômica.

### *5.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS CONSTRUTIVOS PARA AS SUPERFÍCIES DE PROJETO*

A metodologia para os cálculos de projetos de transformadores é realizada pela análise das superfícies de custo conforme o Capítulo 2. A ampliação da metodologia das matrizes tridimensionais utiliza os seguintes parâmetros construtivos:

- a) espessura do condutor de BT;

- b) largura do condutor de BT;
- c) densidade da corrente de AT;
- d) indução magnética;
- e) espessura da isolação das bobinas;
- f) altura da cabeça das bobinas;
- g) altura do calço;
- h) distância entre as bobinas de AT e BT.

Os valores definidos como de referência são aqueles utilizados em um projeto para o transformador padrão, sendo este o que possui as perdas em vazio e total de acordo com a normalização [1].

A combinação da variação destes parâmetros resulta em matrizes de projeto tridimensionais. Por exemplo, ao combinar a variação do condutor de BT com a variação da espessura da isolação obtêm-se uma matriz com dimensão 11x11. Adicionando a estes parâmetros as alturas do calço e da cabeça da bobina, a matriz torna-se tridimensional, 11x11x11. As linhas referem-se à variação do condutor de BT, as colunas à variação da espessura da isolação, e a terceira dimensão da matriz, denominada de página, refere-se à variação da cabeça da bobina e calço. A Figura 5.1 apresenta o esquema da matriz tridimensional.

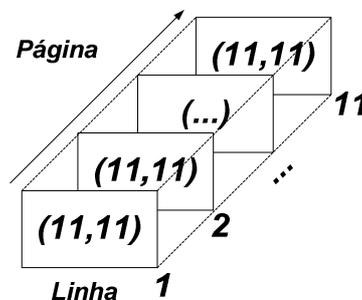


Figura 5.1 – Esquema da matriz tridimensional 11x11x11.

A Figura 5.2 mostra o esquema para uma matriz 11x11x22. A primeira parte tridimensional, com dimensão 11x11x11, considera a combinação da variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolação, com calço e cabeça da bobina constante. A combinação da variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolação, do calço e da cabeça da bobina é representada na segunda parte.

Neste contexto, os cálculos seguem a metodologia gerando matrizes de projeto com dimensão 11x11x22. As combinações dos parâmetros construtivos são realizadas para um transformador trifásico 45 kVA e classe de isolamento 15 kV. A perda em

vazio para este transformador é igual a 220 Watts e a perda total é de 1000 Watts segundo [1].

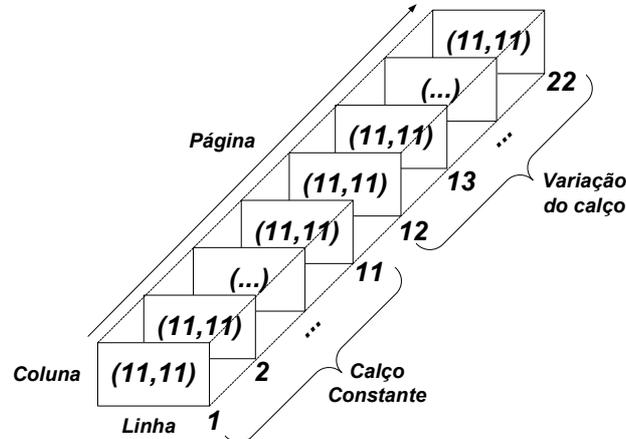


Figura 5.2 – Esquema da matriz tridimensional 11x11x22.

### 5.1.1 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS CONSTRUTIVOS NAS PERDAS

Os ajustes de projeto, com a variação na massa da parte ativa, para redução das perdas é uma prática conhecida. Porém, isto significa também, em variações nas especificações do projeto, tal como, nas dimensões da janela e no diâmetro das bobinas.

A Figura 5.3 apresenta as superfícies relacionando a altura da janela e às perdas no núcleo e em carga. Foram consideradas as seguintes condições:

- condutor de BT com largura variável e espessura constante;
- densidade da corrente de AT constante.

O aumento na altura da janela é, também, resultado do incremento do calço ou da cabeça da bobina ou em ambos simultaneamente.

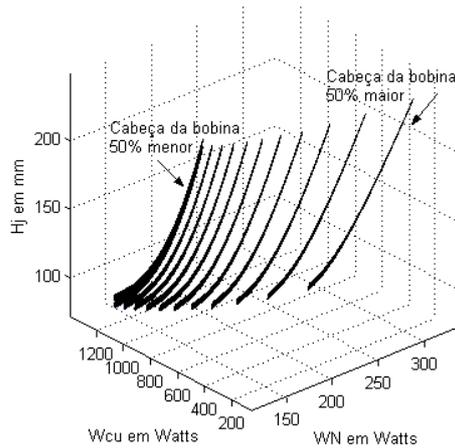


Figura 5.3 – Superfície da altura da janela em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e largura variável, com densidade de corrente de AT constante.

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam os valores da altura da janela versus as perdas para a primeira parte da matriz que considera as condições de: largura do condutor de BT, espessura da isolação, e da cabeça da bobina em 50% acima do valor de referência. Vale ressaltar que o valor do calço é constante. Uma vez que, o condutor está deitado, a largura encontra-se no eixo axial da bobina resultando no aumento da janela do núcleo.

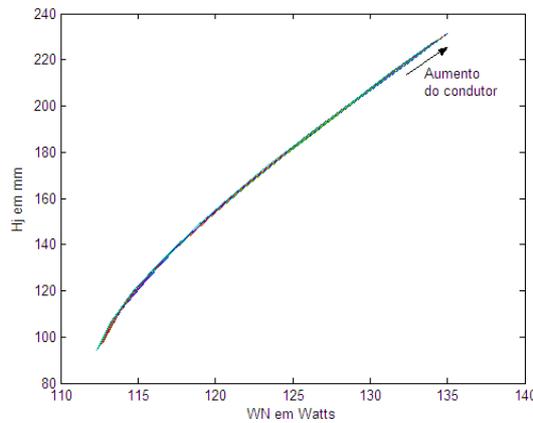


Figura 5.4 – Altura da janela versus as perdas no núcleo.

A Figura 5.4 mostra que quanto maior for a altura da janela maior serão as perdas no núcleo devido ao aumento na direção axial. Para estes projetos obtêm-se menores perdas no cobre com o aumento da altura da janela conforme Figura 5.5. Isto representa uma redução de 46,9% nas perdas do cobre.

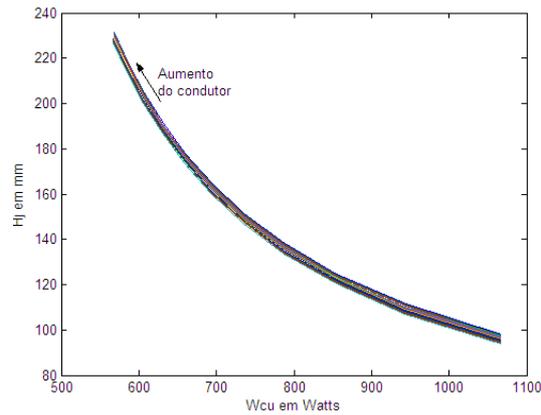


Figura 5.5 – Altura da janela versus às perdas no cobre.

As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam os resultados obtidos para a segunda parte da matriz. Os projetos consideram a largura do condutor de BT (sentido axial), a espessura da isolação, a cabeça da bobina, e calço 50% acima do valor de referência. A Figura 5.6 mostra que com a utilização de maiores condutores de BT e calço, maior é a altura da janela. O aumento da isolação proporciona um aumento radial da bobina e, portanto, em um aumento no comprimento da culatra. A proporção do aumento da altura da janela pelo comprimento da culatra resulta maiores perdas em vazio. Isso quando comparado com o aumento da altura da janela em relação a um comprimento da culatra menor.

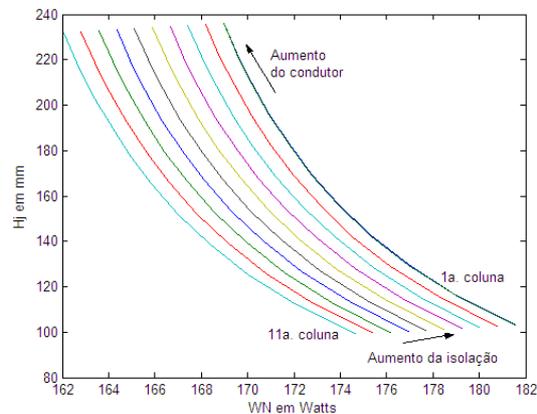


Figura 5.6 – Altura da janela versus as perdas no núcleo com variação da cabeça da bobina e calço.

A Figura 5.7 apresenta a altura da janela em função das perdas em carga. O aumento da espessura da isolação produz um aumento radial da bobina que ocasiona maiores perdas para uma mesma altura de janela reduzindo, também, o gradiente de tensão.

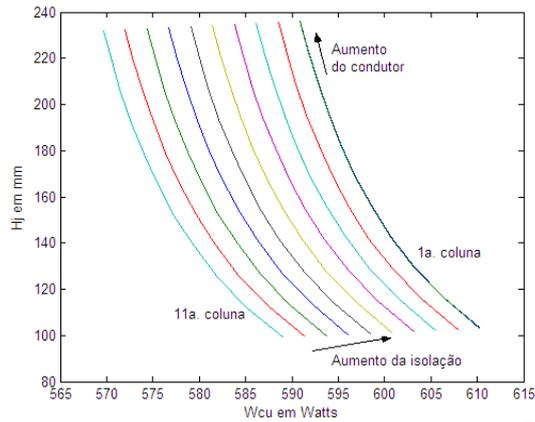


Figura 5.7 – Altura da janela versus as perdas no cobre com variação da cabeça da bobina e calço.

A Figura 5.8 apresenta a superfície da altura da janela considerando a espessura do condutor de BT variável, com largura e densidade da corrente de AT constante. Para este projeto obtêm-se menores perdas em vazio com o aumento da altura da janela. Neste caso ocorre a variação da espessura da isolamento (sentido radial), da cabeça da bobina e do calço reduzindo a altura da janela em relação ao caso anterior.

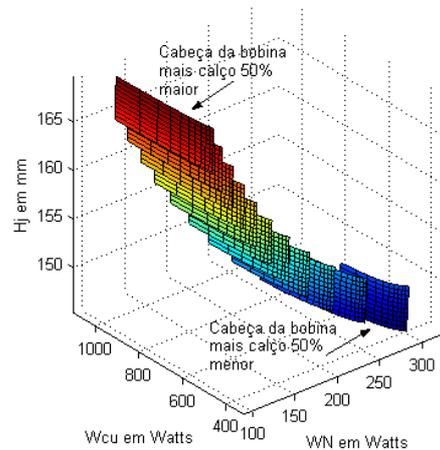


Figura 5.8 – Superfície da altura da janela em relação às perdas no núcleo e em carga com largura do condutor de BT constante e espessura variável, com diâmetro de AT constante.

A Figura 5.9 apresenta a superfície do diâmetro externo da bobina de BT em relação às perdas em vazio e em carga. A matriz de projeto do diâmetro externo da bobina de BT possui dimensão 11x11x11 e considera a largura do condutor de BT e espessura da isolamento variáveis. A variação da indução magnética forma as páginas da matriz tridimensional.

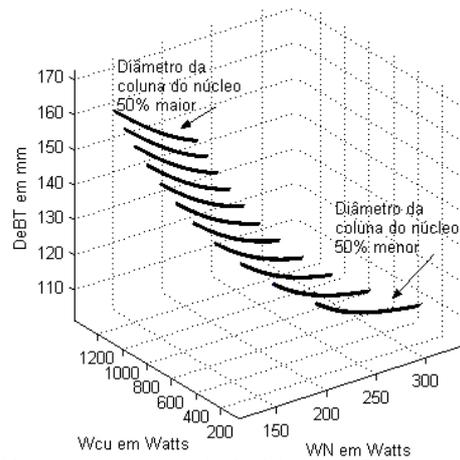


Figura 5.9 – Superfície do diâmetro externo da bobina de BT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com diâmetro de AT constante.

O aumento no diâmetro externo da bobina (sentido radial) resulta em maiores perdas em carga devido ao aumento do comprimento do condutor e, conseqüentemente, da resistência do enrolamento.

As superfícies do diâmetro externo da bobina de BT para a espessura do condutor de BT variável e largura constante, variação da espessura da isolação e da indução magnética são apresentadas na Figura 5.10.

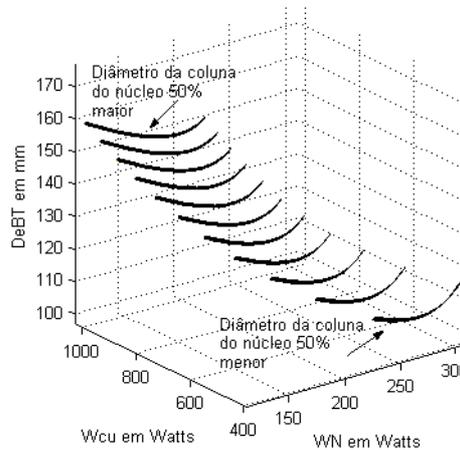


Figura 5.10 – Superfície do diâmetro externo da bobina de BT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com diâmetro de AT constante.

Os resultados obtidos para os projetos com espessura do condutor de BT e da isolação variáveis, e com indução magnética 50% menor do que as dimensões de referência são mostradas nas Figuras 5.11 e 5.12.

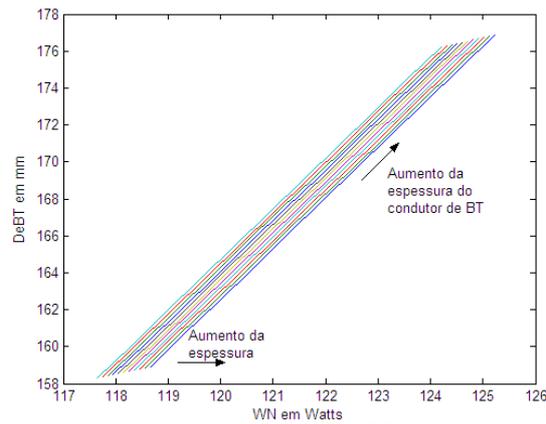


Figura 5.11 – Diâmetro externo da bobina de BT versus as perdas no núcleo.

A Figura 5.11 apresenta o comportamento do diâmetro externo em relação às perdas em vazio. O aumento do diâmetro externo de BT estabelece uma relação linear com as perdas. Isto ocorre devido ao incremento da espessura do condutor, da isolamento e do diâmetro do núcleo. Apesar da redução da indução magnética tem-se o incremento do comprimento da culatra, resultando em maiores perdas no núcleo.

O comportamento do diâmetro externo da bobina de BT em relação às perdas em carga é mostrado na Figura 5.12. Observa-se, que o aumento do diâmetro externo proporciona menores perdas em carga devido ao incremento da massa do cobre. Este ajuste de projeto pode favorecer transformadores para carregamentos com fator de energia maior que 10.

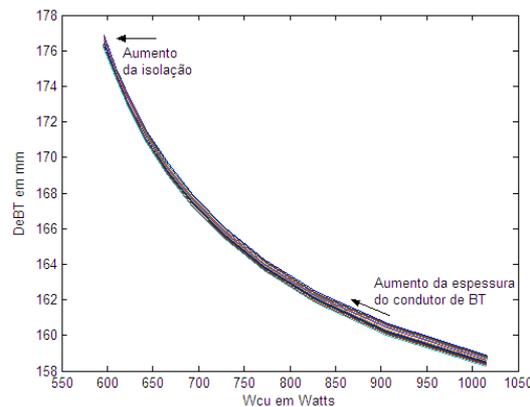


Figura 5.12 – Diâmetro externo da bobina de BT versus as perdas em carga.

A Figura 5.13 apresenta a superfície da massa de cobre do enrolamento secundário em relação às perdas em cobre e em vazio. Esta superfície representa os projetos com a largura do condutor de BT, espessura da isolamento e da coluna do núcleo variáveis.

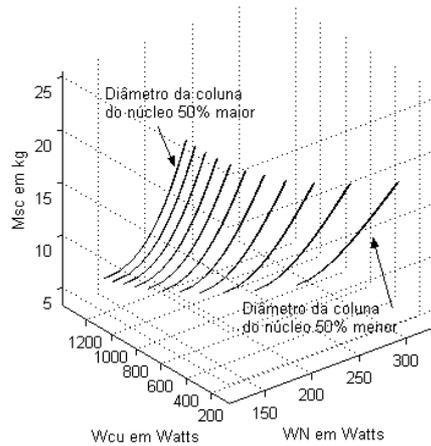


Figura 5.13 – Superfície da massa de cobre do enrolamento de BT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com diâmetro de AT constante.

Nestes projetos, o aumento da massa do enrolamento resulta em um aumento nas perdas em vazio para cada indução magnética. Isto ocorre devido ao incremento na altura da janela. Com relação às perdas em carga, menores perdas são obtidas com o aumento da massa.

As superfícies da massa de cobre do enrolamento de BT considerando os projetos com espessura do condutor de BT, da isolamento e da indução magnética variáveis são mostradas na Figura 5.14.

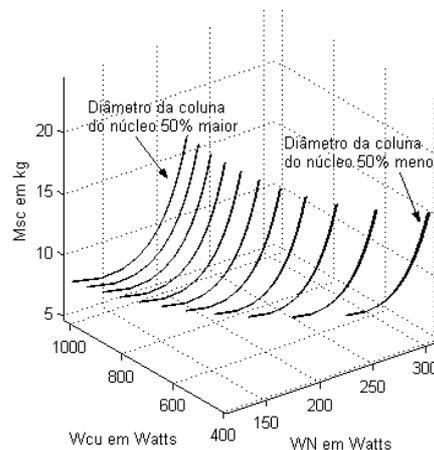


Figura 5.14 – Superfície da massa de cobre do enrolamento de BT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com diâmetro de AT constante.

Os valores para diâmetro interno de AT são representados por uma matriz com dimensão 11x11x22. O primeiro conjunto de superfícies é representado pela parte interna da matriz, com dimensão 11x11x11, e que considera o condutor de BT, a espessura da isolamento e a indução magnética variáveis, e com a distância entre os enrolamentos de AT e BT constante e igual ao valor de referência. O segundo

conjunto de superfícies é indicado pela segunda parte matriz onde o condutor de BT, a espessura da isolamento e a distância entre os enrolamentos são variáveis e com a indução magnética constante.

As superfícies do diâmetro interno do enrolamento de AT em relação às perdas em carga e em vazio são mostradas na Figura 5.15 em dois conjuntos de superfícies distintos.

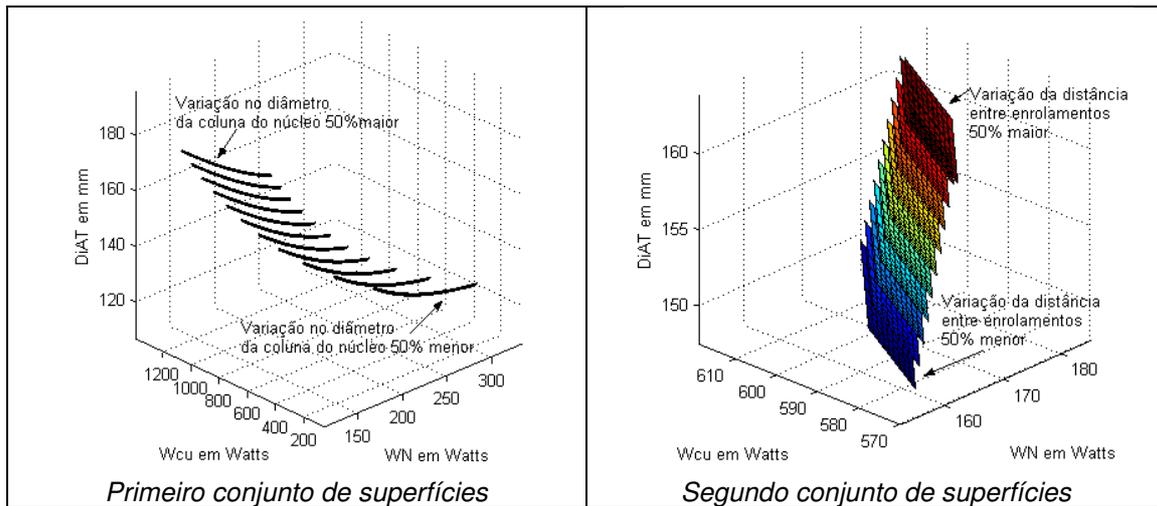


Figura 5.15 – Superfície do diâmetro interno do enrolamento de AT em relação às perdas no núcleo e no cobre considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com diâmetro de AT constante.

O primeiro conjunto de superfícies indica os projetos para a primeira parte da matriz, onde a distância entre enrolamentos é constante. E o segundo conjunto apresenta os projetos da segunda parte desta matriz, onde a indução magnética é constante.

Para o primeiro conjunto de superfícies, a Figura 5.16 apresenta o comportamento do diâmetro interno em relação às perdas em vazio para os projetos com indução magnética 50% menor do que o valor padrão. Obtém-se maior perda em vazio com a redução da densidade da corrente de BT para um determinado diâmetro interno. O aumento da espessura da isolamento ocasiona um aumento no diâmetro interno do enrolamento de AT considerando as perdas em vazio fixas.

A Figura 5.17 mostra o comportamento do diâmetro interno de AT em relação às perdas em vazio, considerando a distância entre os enrolamentos 50% maior do que o valor de referência.

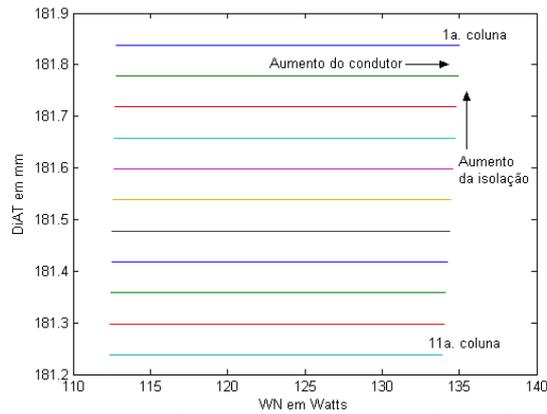


Figura 5.16 – Diâmetro interno do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio variando o diâmetro da coluna do núcleo.

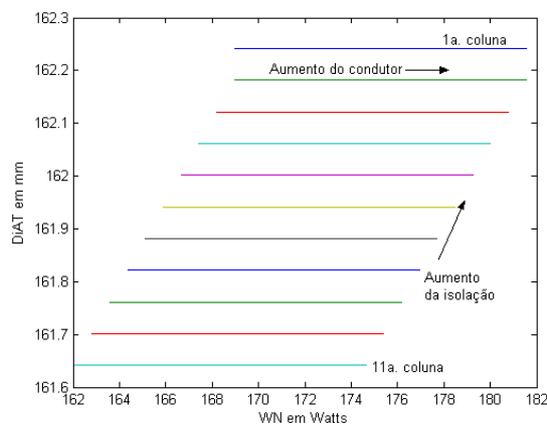


Figura 5.17 – Diâmetro interno do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio variando a distância entre enrolamentos.

O comportamento do aumento do diâmetro interno de AT em relação às perdas em carga é similar ao das perdas em vazio. A diferença está na densidade da corrente que, com a sua redução tende a diminuir a perda em carga. Deste modo, obtêm-se um comprimento da culatra maior que influencia o aumento na perda em vazio.

A Figura 5.18 apresenta as superfícies para o diâmetro interno de AT em relação às perdas em vazio e em carga. O primeiro conjunto de superfície apresenta espessura do condutor de BT, da isolação e da indução magnética variáveis. O segundo apresenta variação da espessura do condutor de BT, da espessura da isolação e da distância entre os enrolamentos.

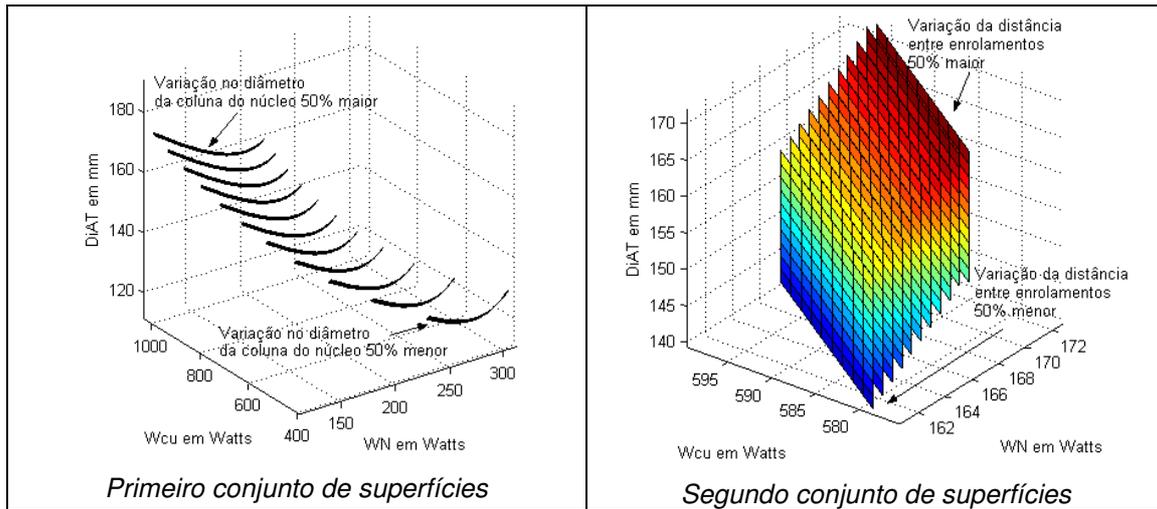


Figura 5.18 – Superfície do diâmetro interno do enrolamento de AT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com diâmetro de AT constante.

O primeiro conjunto de superfícies indica que as perdas em vazio são lineares em relação ao aumento do diâmetro interno do enrolamento de AT. Isto se deve à variação do diâmetro da coluna do núcleo, como na Figura 5.19. O segundo conjunto apresenta perdas em vazio constante em relação aos valores do diâmetro interno, de acordo com a Figura 5.20. O aumento da distância entre os enrolamentos influencia o comprimento da culatra, mantendo a indução magnética constante. Esses projetos permitem a manipulação do diâmetro interno do enrolamento de AT sem alterar as perdas em vazio.

As Figuras 5.19 e 5.21 apresentam os projetos com indução magnética 50% menor e a Figura 5.20, a distância entre enrolamentos 50% maior.

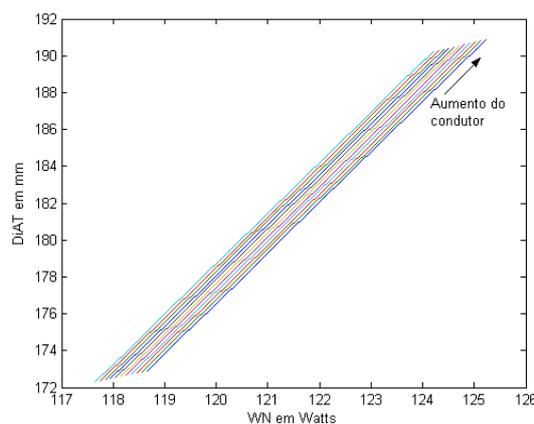


Figura 5.19 – Diâmetro interno da bobina de AT em relação às perdas em vazio, considerando a distância entre os enrolamentos constante.

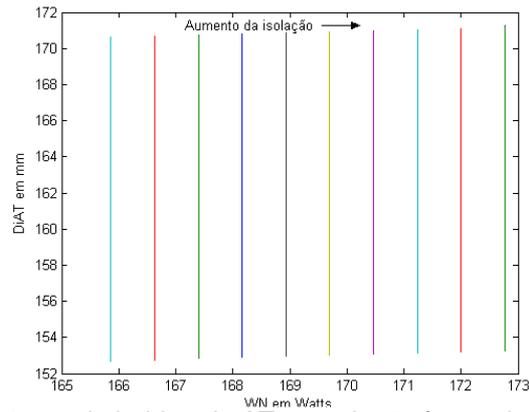


Figura 5.20 – Diâmetro interno da bobina de AT em relação às perdas em vazio, considerando o diâmetro da coluna do núcleo constante.

A primeira parte da matriz apresenta menores perdas em carga devido ao aumento do diâmetro interno de AT com redução da densidade da corrente conforme o comportamento apresentado na Figura 5.21.

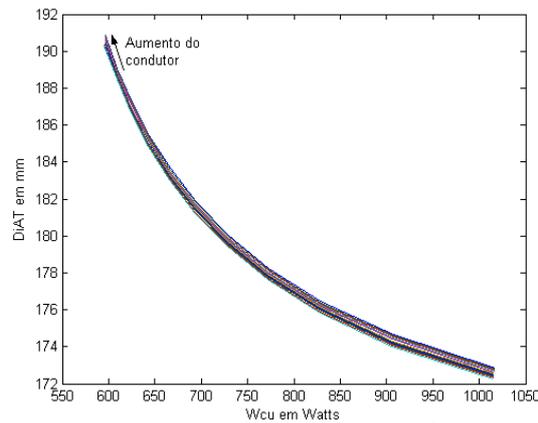


Figura 5.21 – Diâmetro interno da bobina de AT em relação às perdas em carga, considerando a distância entre os enrolamentos constante.

A Figura 5.22 apresenta as superfícies do diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio e em carga.

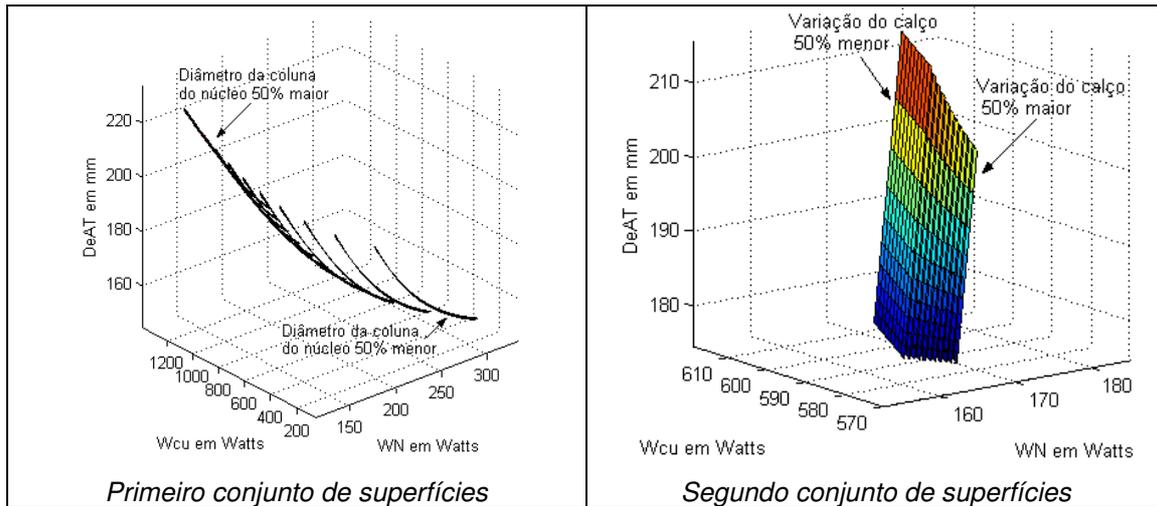


Figura 5.22 – Superfície do diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com diâmetro de AT constante.

O primeiro conjunto de superfícies considera variáveis a largura do condutor de BT, a espessura da isolamento e o diâmetro da coluna do núcleo. No segundo tem-se a densidade da corrente de AT constante e a distância entre as bobinas de AT e BT, do calço e cabeça da bobina variável.

Na primeira parte da matriz, observa-se que as perdas em vazio diminuem com o aumento do diâmetro externo. Isto ocorre devido ao incremento pronunciado no diâmetro da coluna do núcleo em relação ao comprimento da culatra e no condutor de BT. A Figura 5.23 apresenta os projetos com indução magnética 50% menor do que o valor de referência.

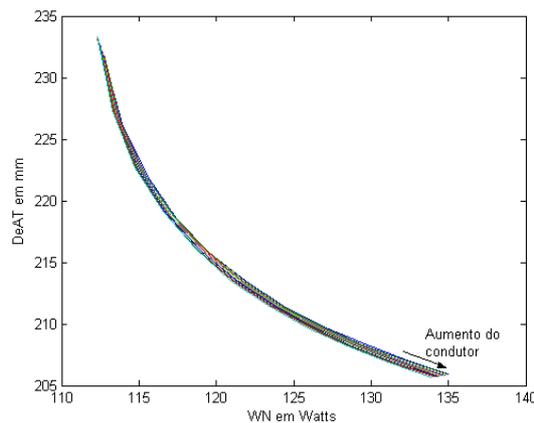


Figura 5.23 – Diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio, com variação do enrolamento de BT, isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

A Figura 5.24 mostra a relação do diâmetro externo em relação às perdas em vazio considerando o calço e a cabeça da bobina em 50% acima do valor de referência. As perdas em vazio da segunda parte da matriz são menores devido à

redução da distância entre os enrolamentos. Obtêm-se maiores perdas em carga, na primeira parte da matriz, devido ao aumento no diâmetro externo.

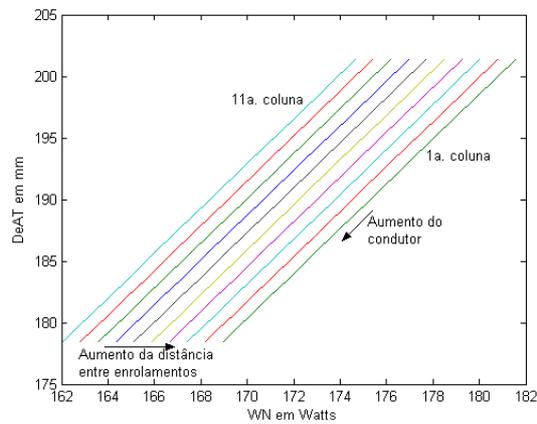


Figura 5.24 – Diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio, com diâmetro do condutor de AT constante, variação da distância entre bobinas e calço mais cabeça da bobina.

A Figura 5.25 apresenta a matriz que possui a indução magnética 50% menor do que o valor de referência. Para estes projetos o aumento na largura do enrolamento de BT aumenta a altura da bobina, uma vez que o condutor está deitado. Neste contexto, ocorre uma redução no diâmetro externo do enrolamento de AT.

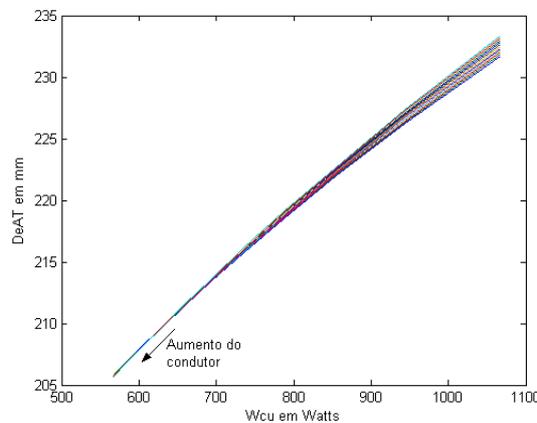


Figura 5.25 – Diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas em carga, com variação do enrolamento de BT, isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

A Figura 5.26 apresenta o comportamento do diâmetro externo da bobina de AT em relação às perdas em carga dos projetos que possuem a densidade da corrente de AT constante. O calço e a cabeça da bobina estão 50% acima do valor padrão.

O comportamento do diâmetro externo é linear em relação às perdas em carga. O aumento das perdas deve-se à constituição deste enrolamento, que possui uma resistência maior, mesmo com maior quantidade de cobre. Ou seja, o aumento da massa de cobre é limitado pelo comprimento do enrolamento para redução das

perdas.

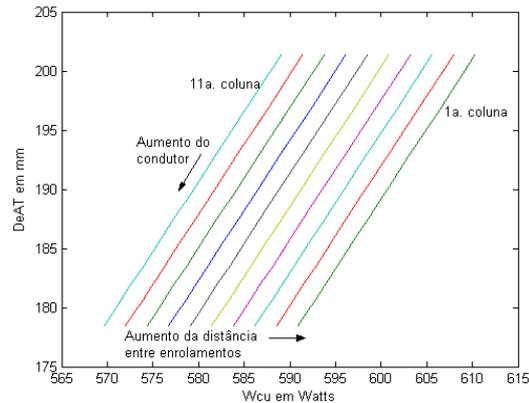


Figura 5.26 – Diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas em carga, com diâmetro do condutor de AT constante, variação da distância entre bobinas e calço mais cabeça da bobina.

A Figura 5.27 apresenta as superfícies para o diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio e em carga. A primeira superfície considera a espessura do condutor de BT, a espessura da isolamento e o diâmetro da coluna do núcleo variáveis. A segunda considera a variação no diâmetro do condutor de AT, na distância entre enrolamentos, no calço e na altura da bobina.

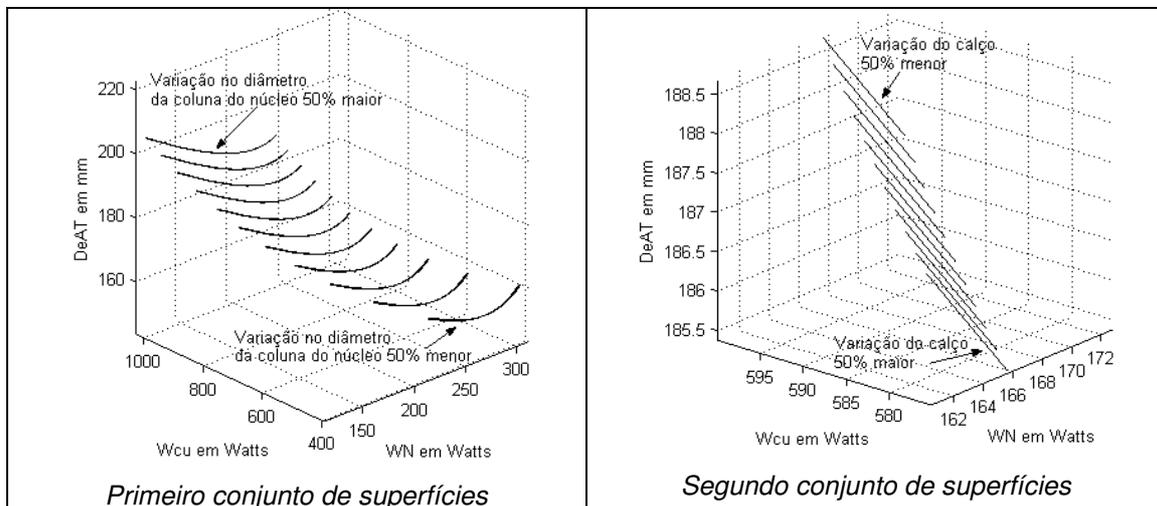


Figura 5.27 – Superfície do diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com variação no diâmetro de AT.

As perdas aumentam com o diâmetro externo no primeiro conjunto de superfícies. No segundo, as perdas variam em um determinado diâmetro externo devido à combinação dos parâmetros radiais. A indução magnética, para estes projetos, é constante.

Os projetos que constituem a primeira parte da matriz mostram que quanto menor a perda em carga, maior é o diâmetro externo do enrolamento de AT. Neste caso, tem-se a variação do diâmetro da coluna do núcleo e, logo, o aumento radial na bobina de BT. Na segunda parte, as perdas em carga variam com o diâmetro externo. A indução magnética permanece constante e o aumento radial ocorre na bobina de AT.

As superfícies do diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio e em carga são apresentadas na Figura 5.28. O primeiro conjunto considera variáveis os projetos com a largura do condutor de BT, espessura da isolamento e indução magnética. O segundo conjunto possui a densidade da corrente de AT constante, com a distância entre os enrolamentos, calço e cabeça da bobina variáveis.

As perdas em vazio, da primeira parte da matriz, se reduzem com o aumento do diâmetro externo. Isto ocorre devido ao aumento da indução magnética combinada com o aumento radial do comprimento da culatra. Na segunda parte, o aumento das perdas é linear em relação ao diâmetro externo do enrolamento de AT. Neste caso, o diâmetro da coluna do núcleo é constante e tem-se a variação no comprimento da culatra e altura da janela.

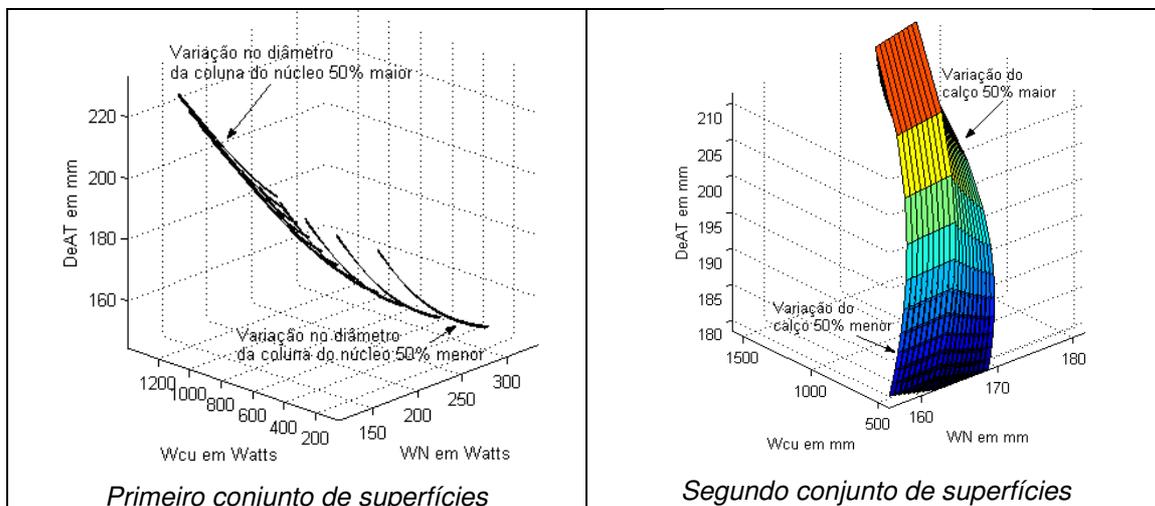


Figura 5.28 – Superfície do diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com variação no diâmetro de AT.

O comportamento do aumento das perdas em carga em relação ao diâmetro externo do enrolamento de AT para projetos com valores de indução magnética 50% menor é mostrado na Figura 5.29. O aumento da largura do condutor de BT resulta em uma maior altura da janela e menor diâmetro externo, ocasionando menores perdas em carga.

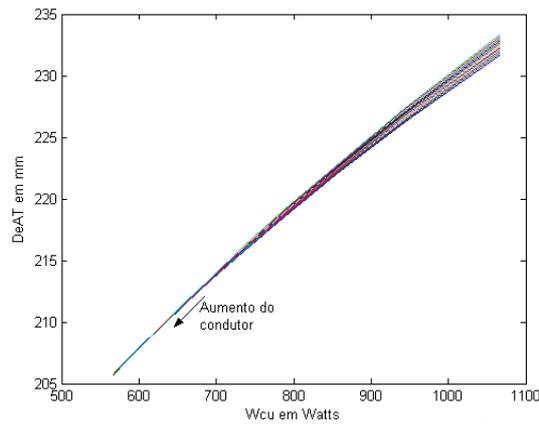


Figura 5.29 – Diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas em carga, com variação do enrolamento de BT, isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

A Figura 5.30 apresenta o comportamento das perdas em carga em relação ao diâmetro externo do enrolamento de AT, para projetos com valores de calço 50% maior. A indução magnética e a densidade da corrente de BT são constantes com a variação na densidade da corrente de AT.

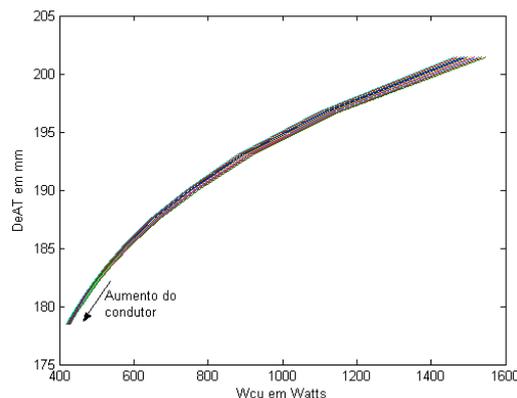


Figura 5.30 – Diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas em carga, com variação do diâmetro do condutor de AT variação da distância entre bobinas e calço mais cabeça da bobina.

As superfícies do diâmetro externo em relação às perdas em vazio e em carga são mostradas na Figura 5.31. O primeiro conjunto apresenta a espessura do condutor de BT, a isolamento e a indução magnética variáveis. A densidade da corrente de AT, a distância entre enrolamentos, o calço e a cabeça da bobina formam o segundo conjunto.

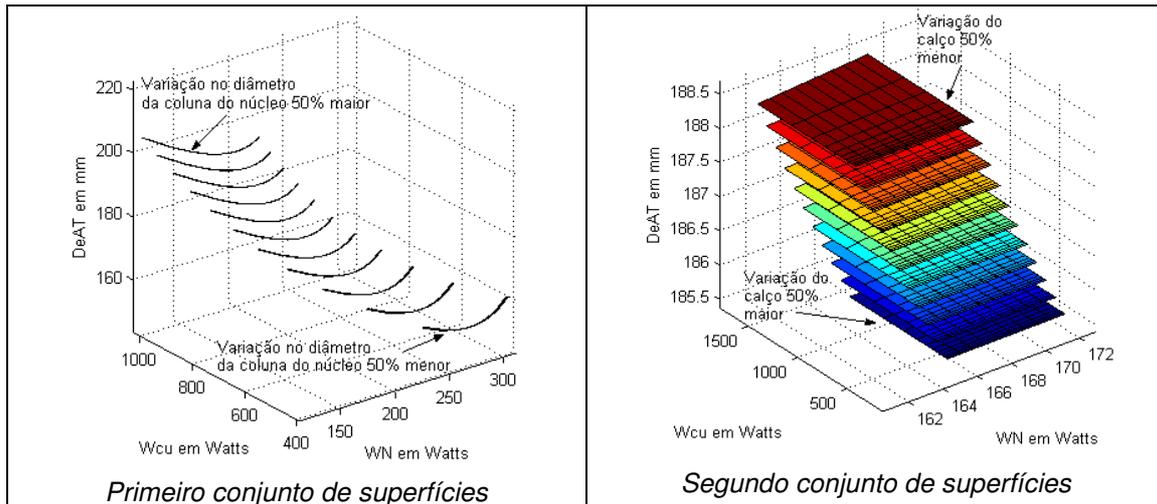


Figura 5.31 – Superfície do diâmetro externo do enrolamento de AT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com variação no diâmetro de AT.

A Figura 5.32 apresenta as superfícies do comportamento da massa do condutor de AT em relação às perdas. A largura do condutor de BT, a espessura da isolamento e a indução magnética são variáveis para o primeiro conjunto. No segundo, considera-se a densidade da corrente de AT constante com a distância entre enrolamentos, calço e cabeça da bobina variáveis.

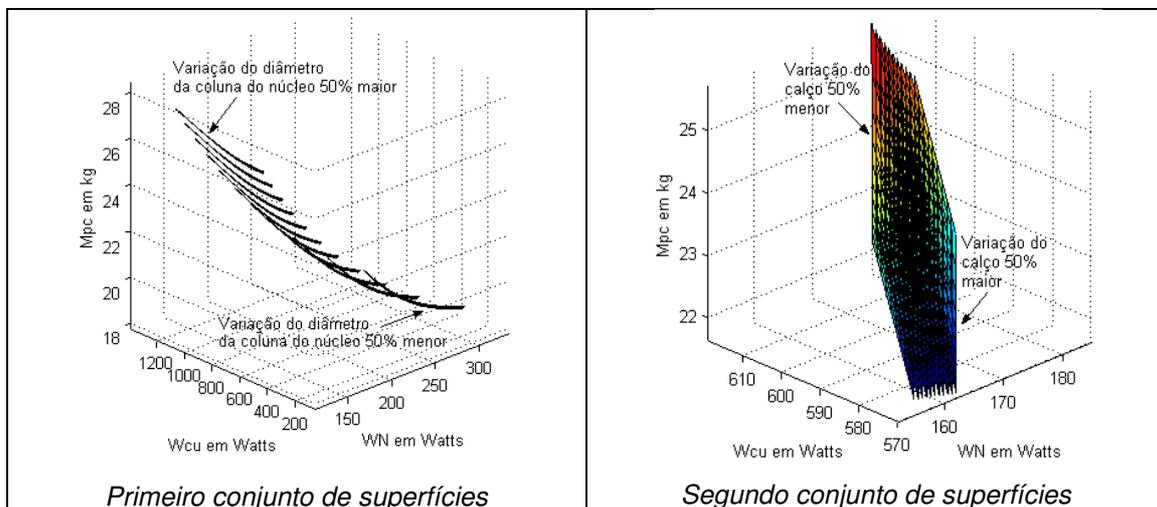


Figura 5.32 – Superfície da massa do enrolamento de AT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com diâmetro de AT constante.

As perdas em vazio para os projetos que possuem a indução magnética variável e constante são mostradas nas Figuras 5.33 e 5.34, respectivamente. O aumento da massa de cobre resulta na redução das perdas em vazio segundo Figura 5.33. Isto porque a indução magnética possui valor 50% abaixo da referência. A redução da massa do cobre ocasiona maior perda devido ao aumento da altura da janela.

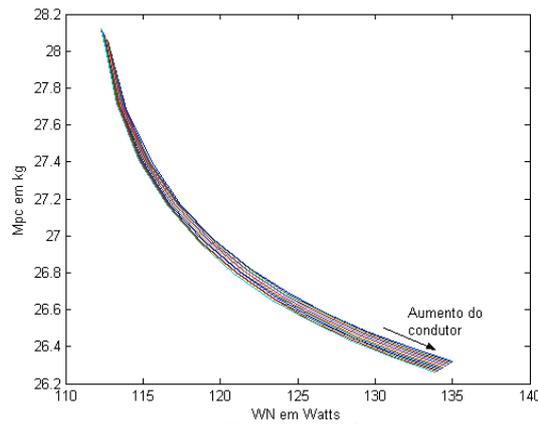


Figura 5.33 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio, com variação do enrolamento de BT, isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

A Figura 5.34 mostra que o aumento radial da bobina e, conseqüentemente, do comprimento da culatra, resulta no aumento das perdas em vazio. O comportamento da massa de cobre do enrolamento de AT em relação às perdas em carga é mostrado na Figura 5.35. O aumento das perdas é linear em função da massa, considerando os projetos com diâmetro externo e altura da janela com valores 50% acima do valor de referência. Isto resulta em um aumento da resistência do enrolamento.

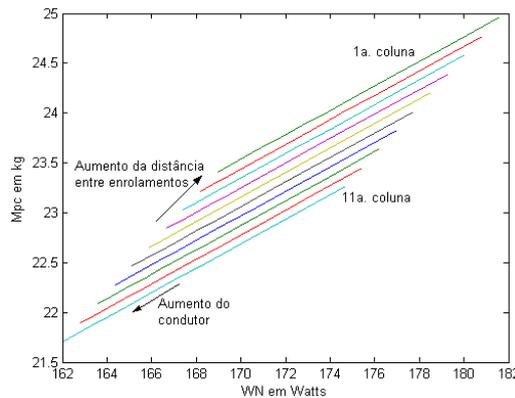


Figura 5.34 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio, com diâmetro do condutor de AT constante, variação da distância entre bobinas e calço mais cabeça da bobina.

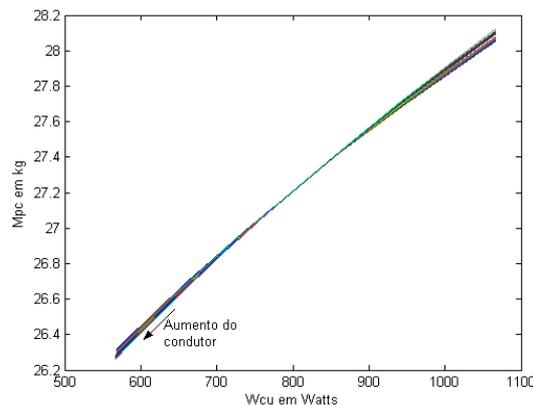


Figura 5.35 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em carga, com variação do enrolamento de BT, isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

A Figura 5.36 mostra o comportamento da massa do enrolamento de AT em relação às perdas em carga para os projetos da segunda parte da matriz. Ressalta-se que o condutor de BT é variável com a distância entre enrolamentos produzindo um efeito radial.

As superfícies da massa do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio e em carga são apresentadas na Figura 5.37.

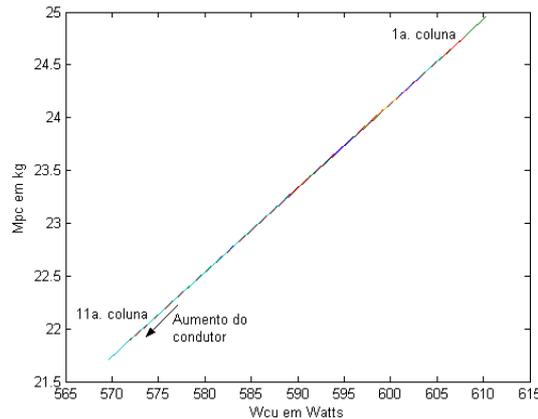


Figura 5.36 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em carga, com diâmetro do condutor de AT constante, variação da distância entre bobinas e calço mais cabeça da bobina.

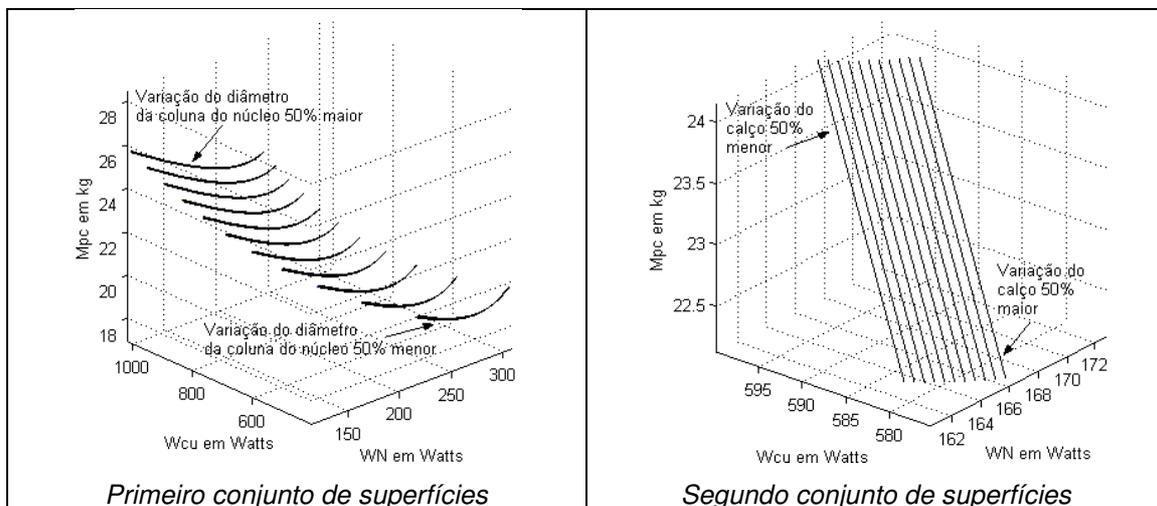


Figura 5.37 – Superfície da massa do enrolamento de AT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com diâmetro de AT constante.

A Figura 5.38 apresenta o comportamento das perdas em carga em relação à massa do enrolamento de AT considerando a indução magnética 50% menor. O aumento no comprimento da culatra contribui nas perdas em vazio.

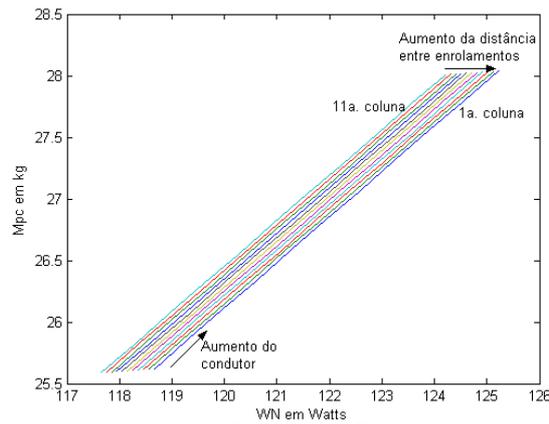


Figura 5.38 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio, com variação do enrolamento de BT, isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

O comportamento das perdas em vazio, em relação à massa do enrolamento de AT para valores de calço e cabeça da bobina 50% maiores, é mostrado na Figura 5.39. Neste caso, a densidade da corrente de AT e a indução magnética são constantes, variando a distância entre os enrolamentos. O aumento da massa do enrolamento, neste caso, proporciona um raio da bobina maior que influencia a largura da janela e a perda em vazio. Vale ressaltar que, a alteração na largura da janela se deve ao fato de que a distância entre os enrolamentos deve ser mantida constante.

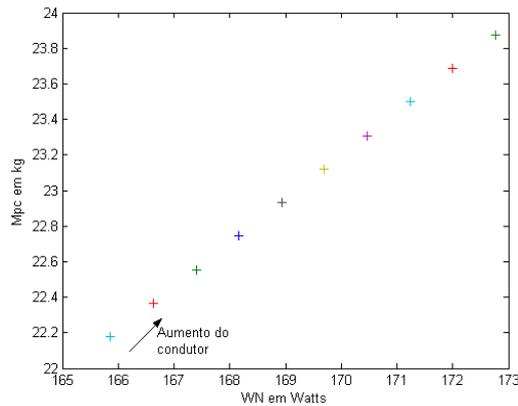


Figura 5.39 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio, com diâmetro do condutor de AT constante, variação da distância entre bobinas e calço mais cabeça da bobina.

A Figura 5.40 apresenta as perdas em carga em função da massa considerando os projetos com indução magnética com valor 50% abaixo da referência. O aumento no raio da bobina proporciona menores perdas com maior massa do enrolamento de AT. Para os projetos com calço e cabeça da bobina com valores 50% maiores são apresentados na Figura 5.41.

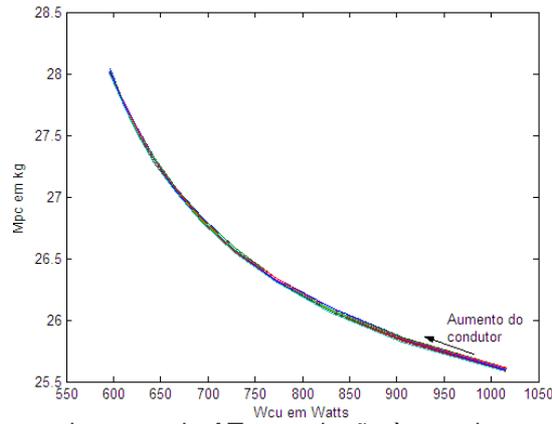


Figura 5.40 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em carga, com variação do enrolamento de BT, isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

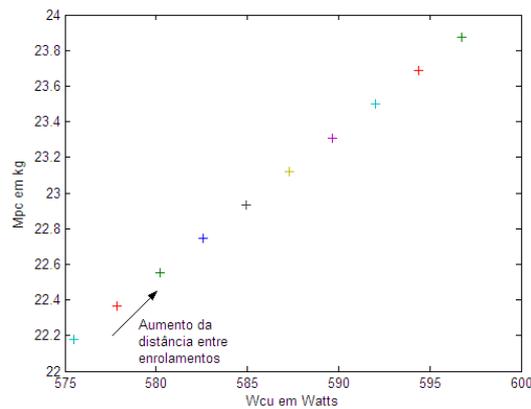


Figura 5.41 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em carga, com diâmetro do condutor de AT constante, variação da distância entre bobinas e calço mais cabeça da bobina.

As superfícies do comportamento da massa do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio e em carga são apresentadas na Figura 5.42. O primeiro conjunto de superfícies considera variações da largura do condutor de BT, da isolamento e da indução magnética. Os projetos com densidade da corrente de AT, distância entre enrolamentos, calço e cabeça da bobina variáveis, formam o segundo conjunto de superfícies.

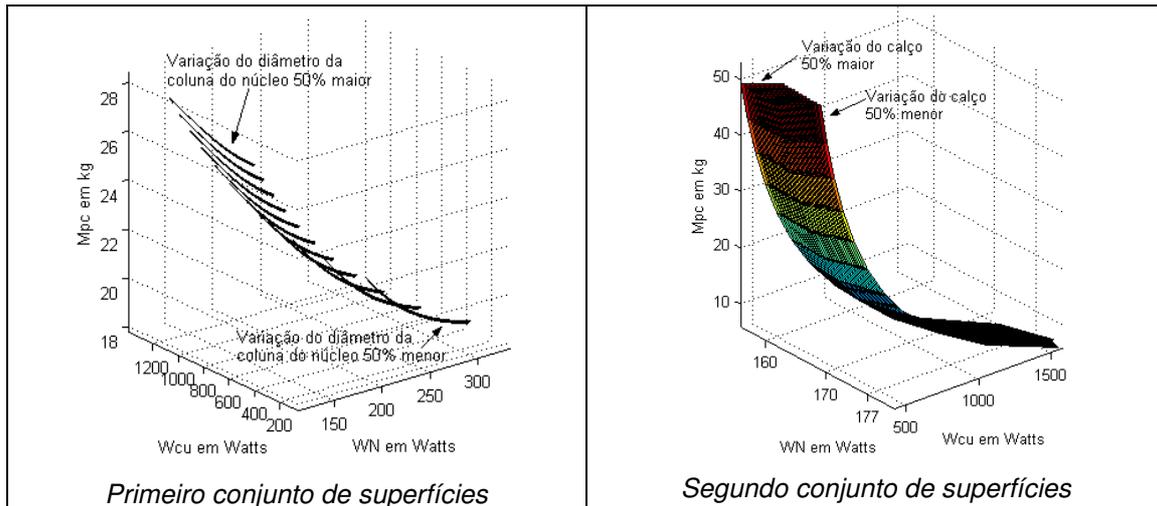


Figura 5.42 – Superfície da massa do enrolamento de AT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

A Figura 5.43 apresenta as perdas em vazio para a indução magnética 50% abaixo do valor de referência com variação da densidade da corrente de AT, resultando no aumento radial das bobinas. O incremento da altura da janela, do comprimento da culatra e do diâmetro da coluna do núcleo ocasionam menores perdas para maior massa do enrolamento de AT.

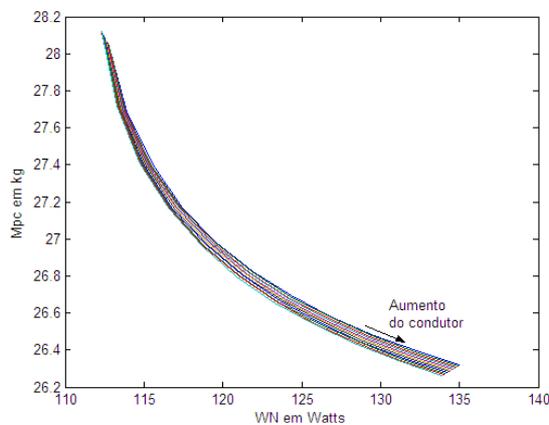


Figura 5.43 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio, com variação do enrolamento de BT, isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

As perdas em vazio em relação à massa do enrolamento de AT considerando os valores para calço e cabeça da bobina 50% maior que o de referência são mostrados na Figura 5.44. A densidade da corrente de AT é variável ocasionando o aumento no comprimento da culatra. A proporção do aumento do comprimento da culatra pela a altura da janela resulta em menores perdas em vazio para maiores massas.

A Figura 5.45 apresenta as perdas em carga para a indução magnética 50% abaixo do valor de referência. O aumento das perdas é devido ao incremento radial da bobina tornando a resistência do enrolamento maior.

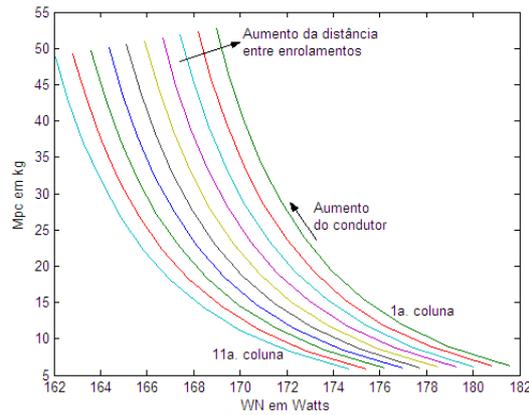


Figura 5.44 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio, com variação do diâmetro do condutor de AT, da distância entre bobinas e calço mais cabeça da bobina.

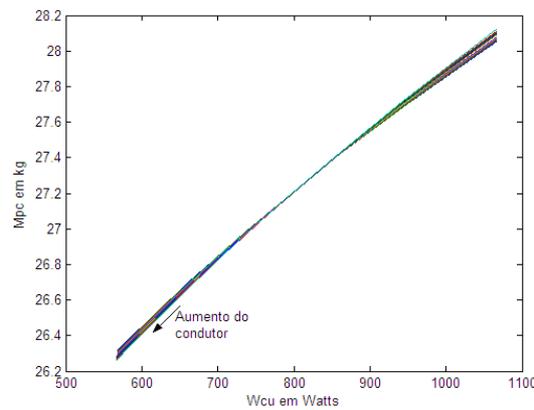


Figura 5.45 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em carga, com variação do enrolamento de BT, isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

As perdas em carga diminuem com o incremento da massa do enrolamento de AT para os projetos com calço e altura da bobina em 50% acima do valor de referência, conforme Figura 5.46.

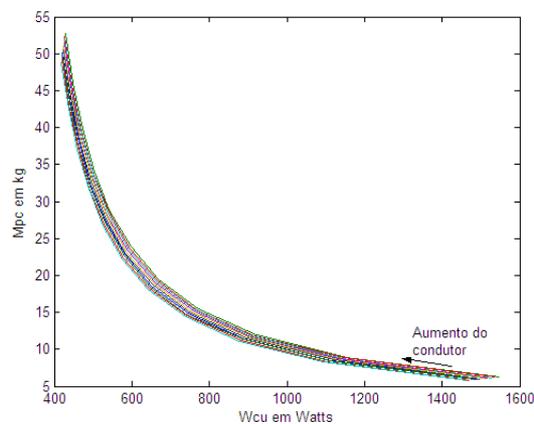


Figura 5.46 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em carga, com variação do diâmetro do condutor de AT, da distância entre bobinas e calço mais cabeça da bobina.

A Figura 5.47 apresenta as superfícies da massa do enrolamento de AT em função das perdas em vazio e em carga. Para o primeiro conjunto de superfícies tem-se a espessura do condutor de BT, a isolamento e a indução magnética variáveis. No segundo conjunto, a densidade da corrente de AT, a distância entre os enrolamentos, o calço e altura da bobina variáveis.

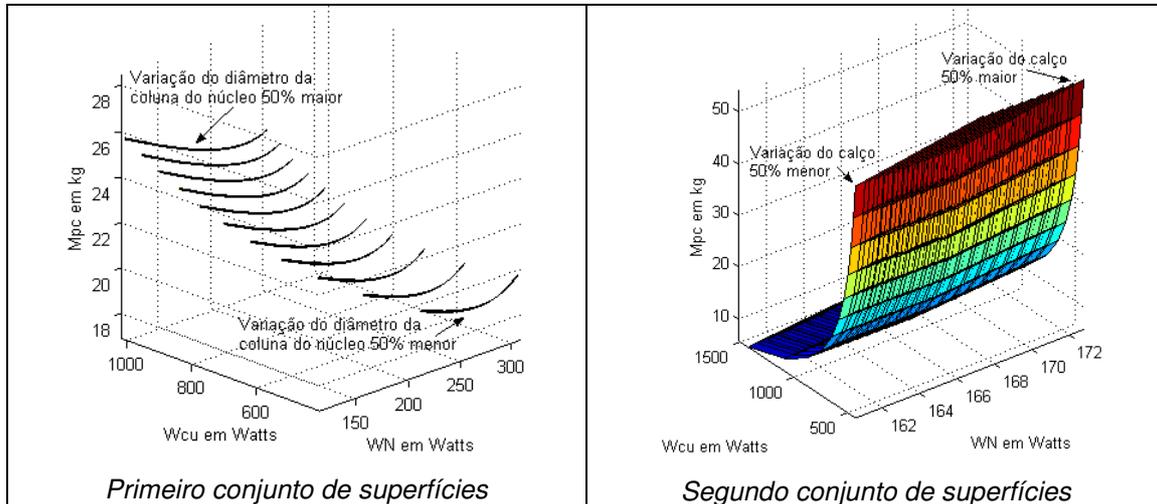


Figura 5.47 – Superfície da massa do enrolamento de AT em relação às perdas no núcleo e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

As perdas em vazio, para os projetos do primeiro conjunto de superfícies, aumentam linearmente com a massa do enrolamento de AT conforme Figura 5.48. Então, tem-se o diâmetro da coluna do núcleo com dimensões 50% maior que o valor de referência. Isto ocorre devido ao incremento no comprimento da culatra pelo aumento da espessura do condutor de BT.

No segundo conjunto, a massa do enrolamento de AT aumenta para uma determinada perda em vazio conforme mostrado na Figura 5.49.

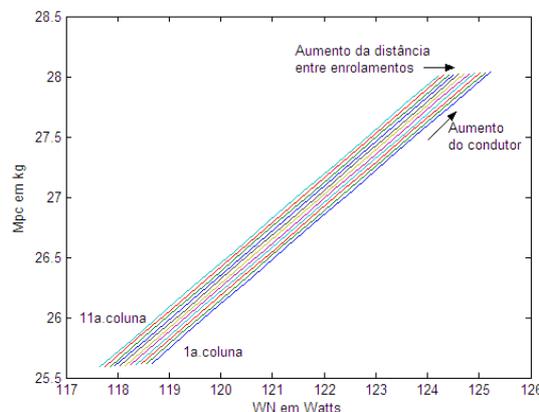


Figura 5.48 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio, com variação do enrolamento de BT, isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

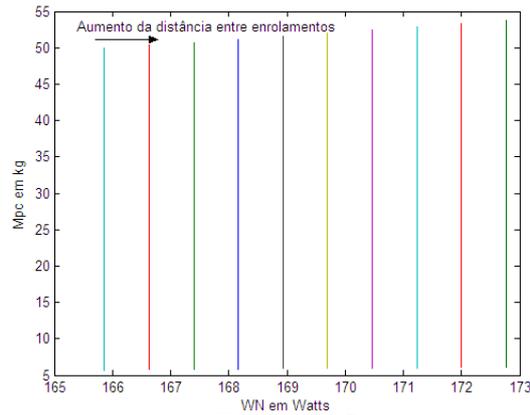


Figura 5.49 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em vazio, com variação do diâmetro do condutor de AT, da distância entre bobinas e calço mais cabeça da bobina.

As Figuras 5.50 e 5.51 apresentam a redução das perdas em relação à massa para projetos com diâmetro da coluna do núcleo, do calço e da cabeça da bobina 50% acima em relação ao valor de referência.

A Figura 5.52 apresenta as superfícies da massa do núcleo em relação às perdas em vazio e em carga.

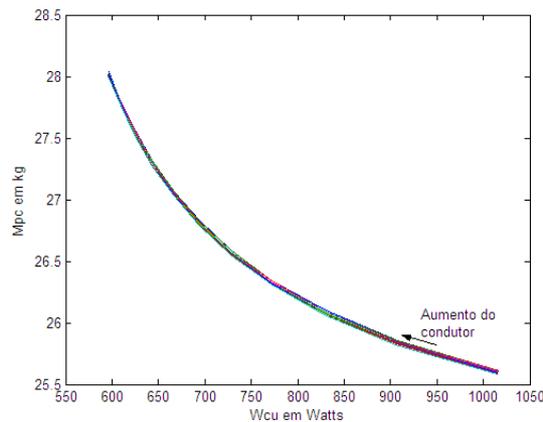


Figura 5.50 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em carga, com variação do enrolamento de BT, isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

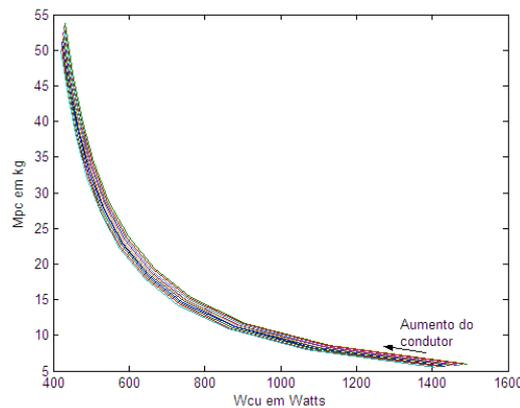


Figura 5.51 – Massa do enrolamento de AT em relação às perdas em carga, com variação do diâmetro do condutor de AT, da distância entre bobinas e calço mais cabeça da bobina.

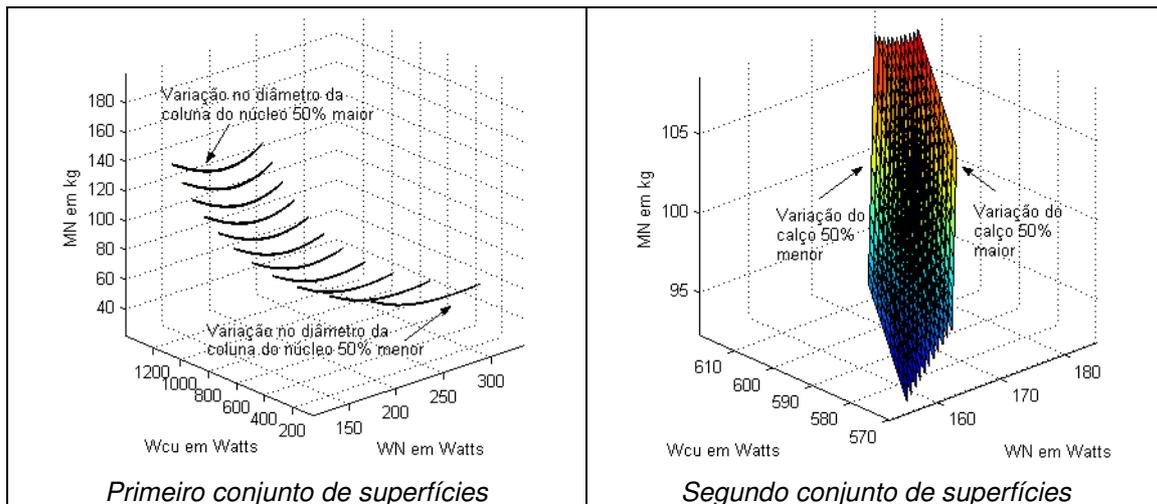


Figura 5.52 – Superfície da massa do núcleo em relação às perdas em vazio e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com diâmetro do condutor de AT constante.

O primeiro conjunto de superfícies possui os projetos com largura do condutor de BT, espessura da isolação e da indução magnética variáveis. O segundo conjunto possui densidade da corrente de AT constante, com variação na distância entre enrolamentos, no calço e na cabeça da bobina.

As Figuras 5.53, 5.54 e 5.55 mostram que a forma e a inclinação das superfícies, que indicam as perdas calculadas dos projetos, se altera conforme a variação dos demais parâmetros construtivos.

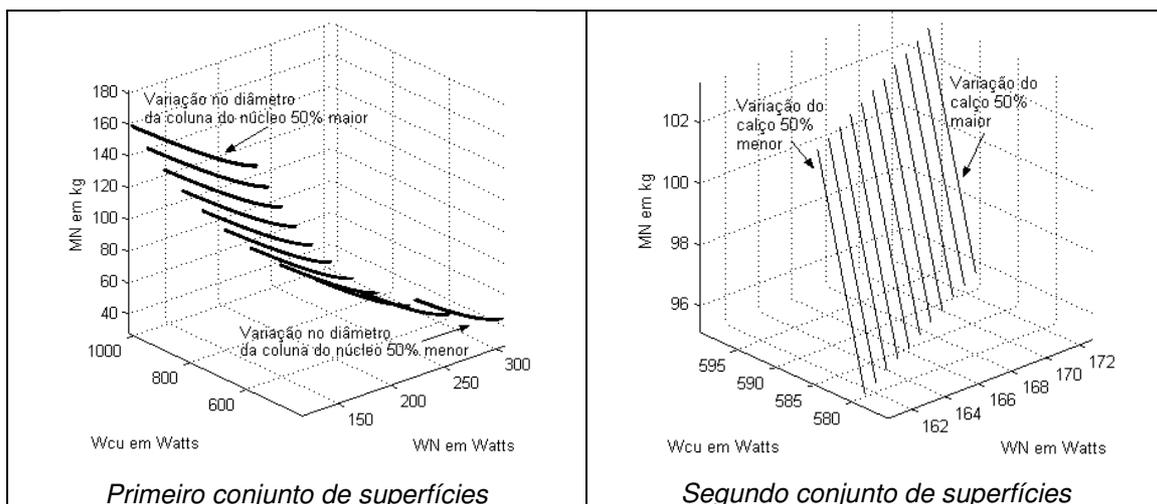


Figura 5.53 – Superfície da massa do núcleo em relação às perdas em vazio e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com diâmetro do condutor de AT constante.

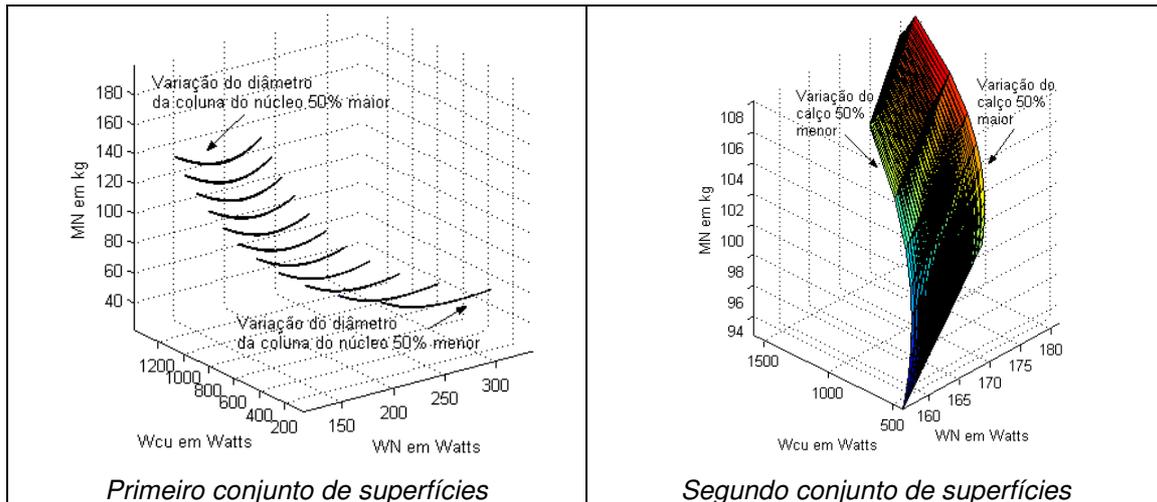


Figura 5.54 – Superfície da massa do núcleo em relação às perdas em vazio e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

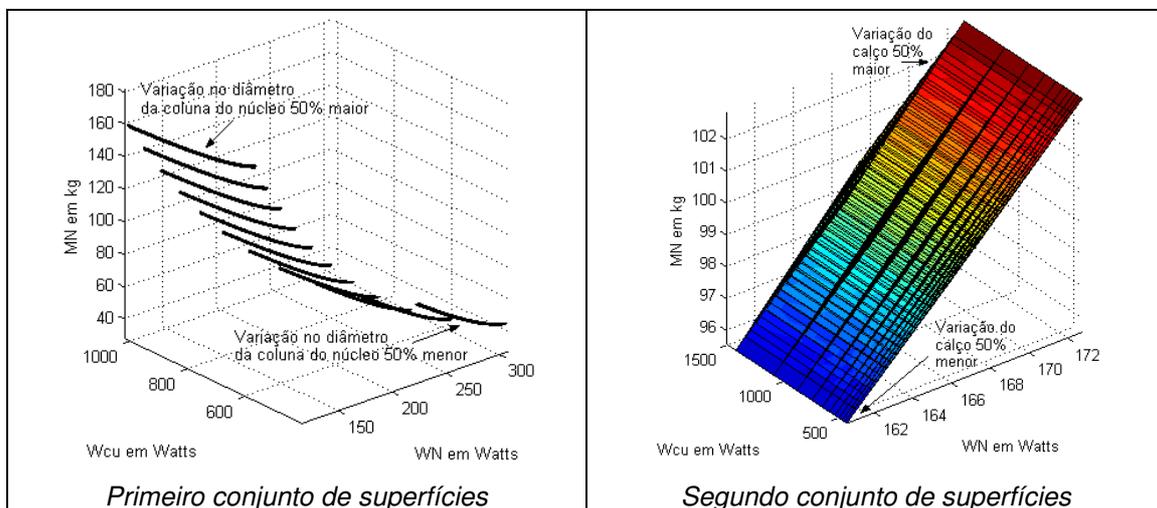


Figura 5.55 – Superfície da massa do núcleo em relação às perdas em vazio e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

Um valor particular de impedância percentual pode definir um projeto com menor custo de fabricação [23]. Se a impedância for baixa, as correntes e as forças de curto-circuito podem ser altas. É necessário diminuir a densidade da corrente dos enrolamentos. Por outro lado, se a impedância for alta resulta em um aumento nas perdas por corrente parasitas e por dispersão nas partes estruturais. Isto ocasiona maiores perdas em carga e elevação na temperatura do óleo.

As superfícies de impedância percentual indicam os projetos dentro dos valores da norma NBR 5440 [1], ou seja, com valor de 3,5% para o transformador trifásico de 45 kVA.

A Figura 5.56 apresenta as superfícies da impedância percentual para projetos que possuem a largura do condutor de BT, a espessura da isolamento e da indução magnética variáveis para a densidade da corrente de AT constante.

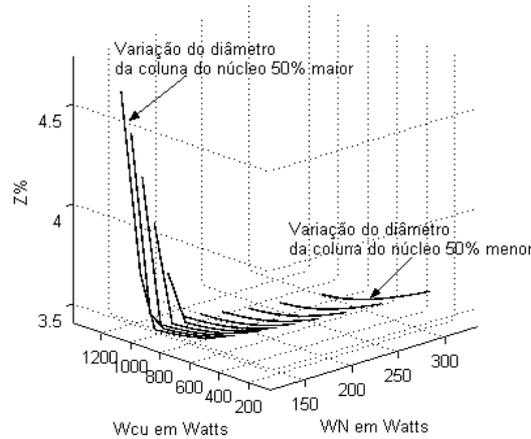


Figura 5.56 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com diâmetro do condutor de AT constante.

As superfícies da impedância percentual para projetos com variação da espessura do condutor de BT, da espessura da isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo são mostradas na Figura 5.57. A impedância aumenta bruscamente para projetos com baixas perdas em vazio.

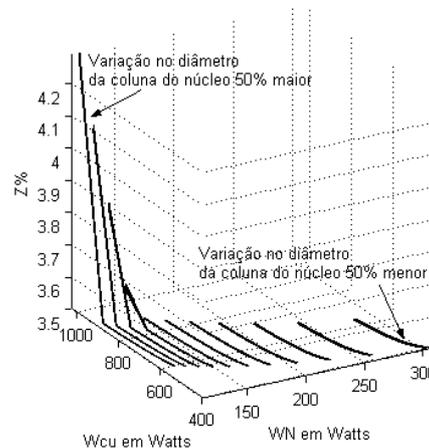


Figura 5.57 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com diâmetro do condutor de AT constante.

A Figura 5.58 apresenta o primeiro conjunto de superfícies da impedância percentual para projetos com variação da largura do condutor de BT, da espessura do isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo. O segundo representa os projetos com variação da densidade da corrente de AT, da distância entre enrolamentos e do calço.

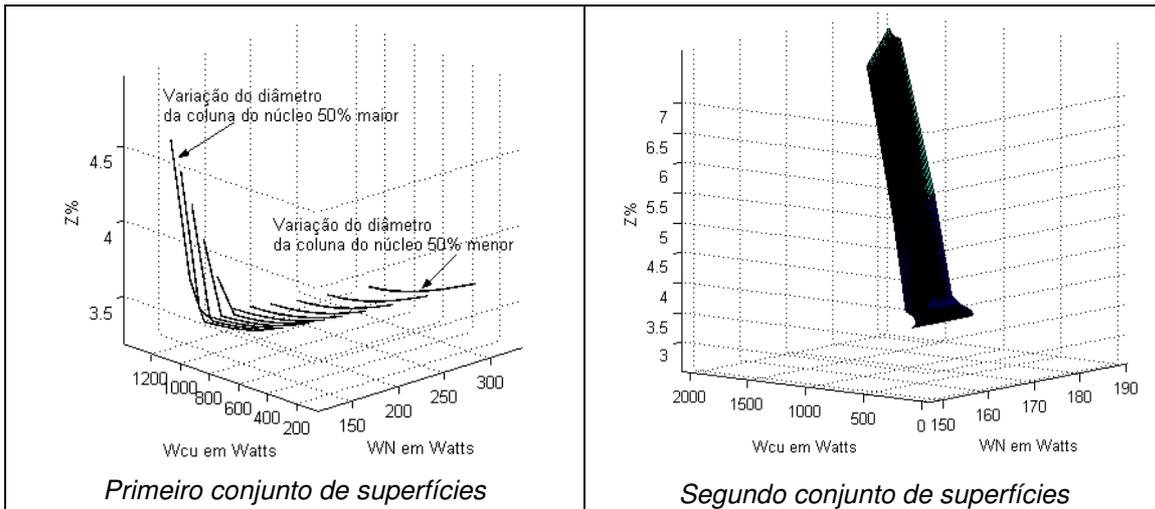


Figura 5.58 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

O comportamento das perdas em vazio e em carga para o segundo conjunto de superfícies é mostrado na Figura 5.59.

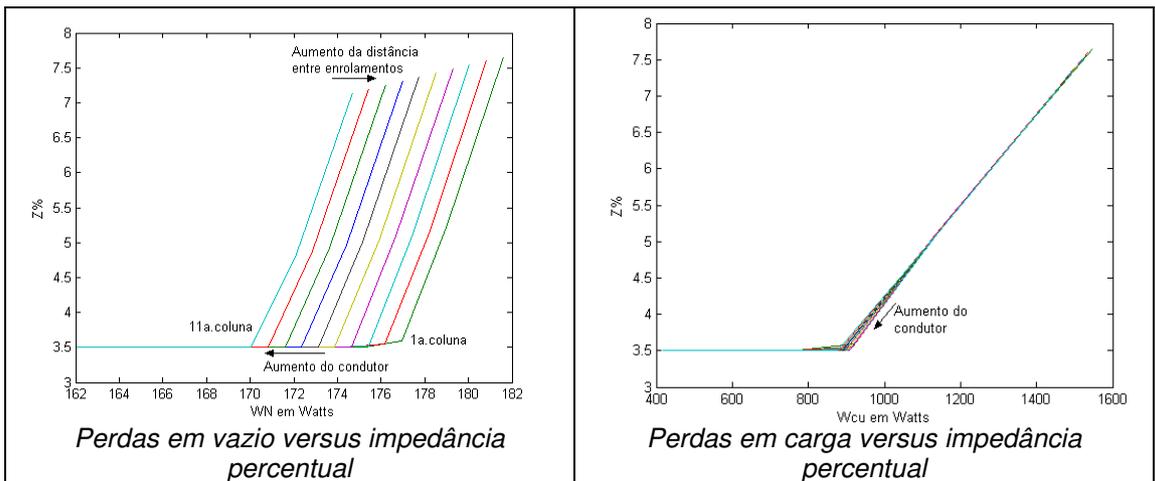


Figura 5.59 – Perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

A Figura 5.60 apresenta o primeiro conjunto de superfícies de impedância percentual para projetos com espessura do condutor de BT, da isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo variáveis. Os projetos com variação da densidade da corrente de AT, da distância entre enrolamentos e do calço formam o segundo conjunto.

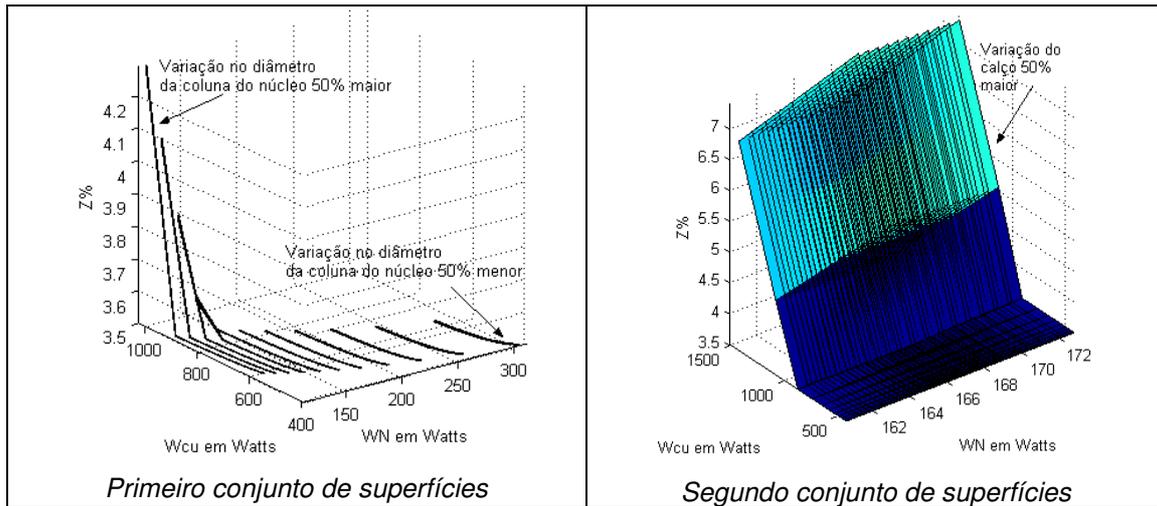


Figura 5.60 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

O comportamento das perdas em vazio e em carga para o segundo conjunto de superfícies é mostrado na Figura 5.61 para projetos com densidade da corrente de AT é 50% maior que o valor padrão. O projeto deve otimizar os parâmetros de diâmetro interno e externo do enrolamento para obter 3,5% de impedância percentual.

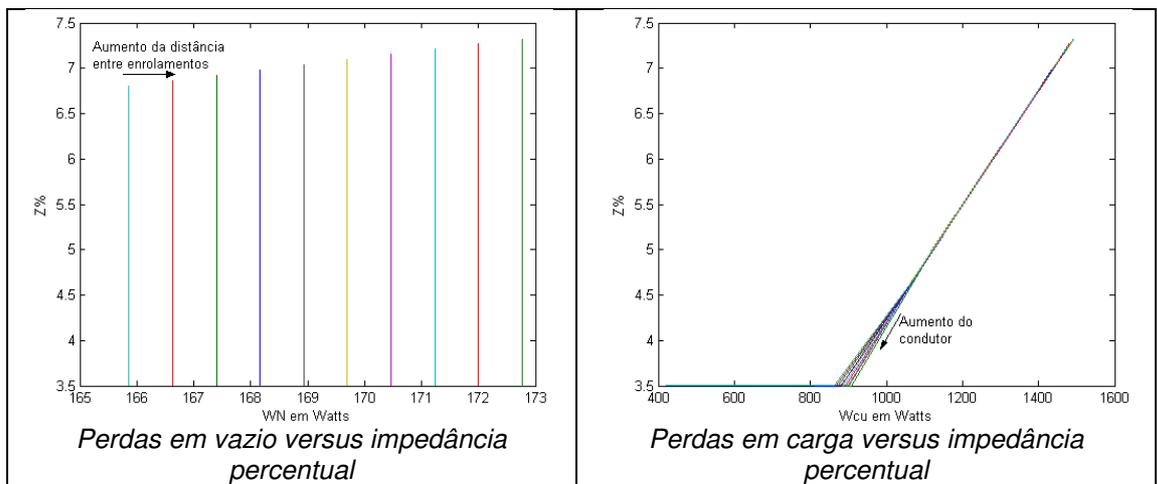


Figura 5.61 – Perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

As outras análises de projetos são realizadas a partir da composição e da variação simultânea dos parâmetros construtivos. Desta maneira é possível construir os conjuntos de soluções de projeto. Estes conjuntos permitem opções de projeto em relação ao custo total desejado. Os conjuntos de projetos são:

- a) Variação da densidade da corrente de BT, de AT e da indução magnética;
- b) Variação da densidade da corrente de AT, da espessura da isolamento e da indução magnética;

- c) Variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolação e do condutor de AT;
- d) Variação da densidade da corrente de AT, da distância entre enrolamentos e da indução magnética;
- e) Variação do calço, da cabeça da bobina, da espessura da isolação e da indução magnética;
- f) Variação da distância entre enrolamentos, da espessura da isolação e da indução magnética;
- g) Variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolação e do calço mais cabeça da bobina;
- h) Variação da densidade da corrente de AT, da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos.

A análise dos conjuntos de solução em relação à impedância percentual é mostrada no Anexo 1.

### 5.2 FORMAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE CUSTO

As superfícies do custo de fabricação indicam o comportamento dos projetos em relação aos custos iniciais de manufatura de um transformador. A Figura 5.62 apresenta estas superfícies sendo que o primeiro conjunto possui a largura do condutor de BT, espessura da isolação e indução magnética variáveis. O segundo considera a densidade da corrente de AT e a indução magnética constante, com a distância entre enrolamentos, calço e cabeça da bobina variáveis.

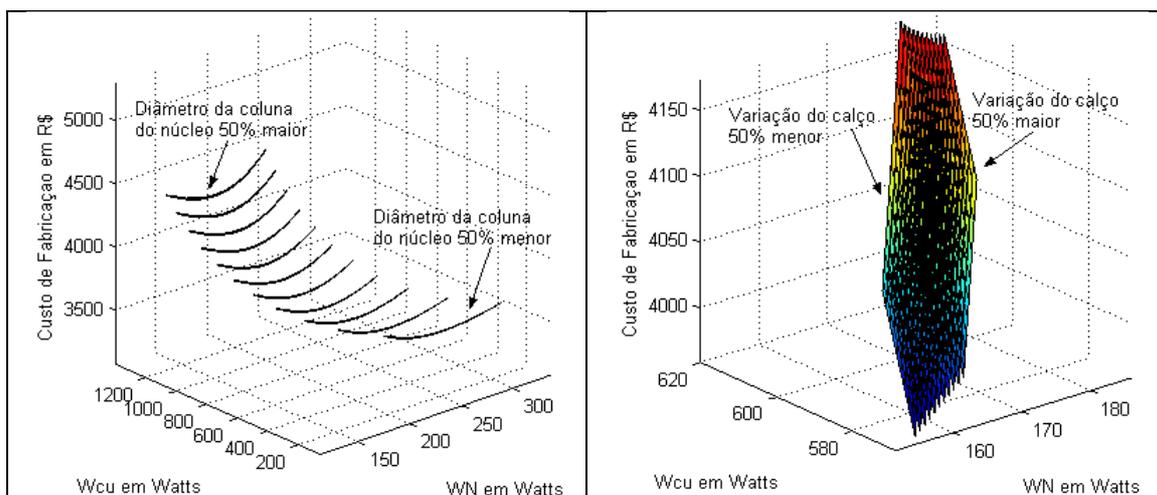


Figura 5.62 – Superfície do custo de fabricação em relação às perdas em vazio e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com diâmetro do condutor de AT constante.

As Figuras 5.63 a 5.65 apresentam as superfícies de fabricação em relação às perdas em vazio e em carga. Observa-se que quanto menor for a perda, maior é o custo de fabricação do transformador devido à quantidade de massa de aço-silício e cobre.

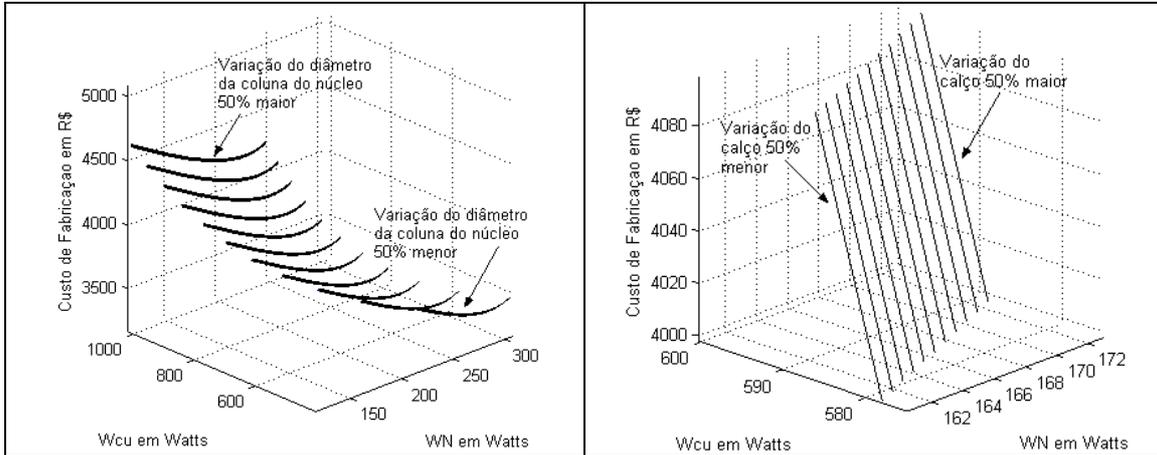


Figura 5.63 – Superfície do custo de fabricação em relação às perdas em vazio e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com diâmetro do condutor de AT constante.

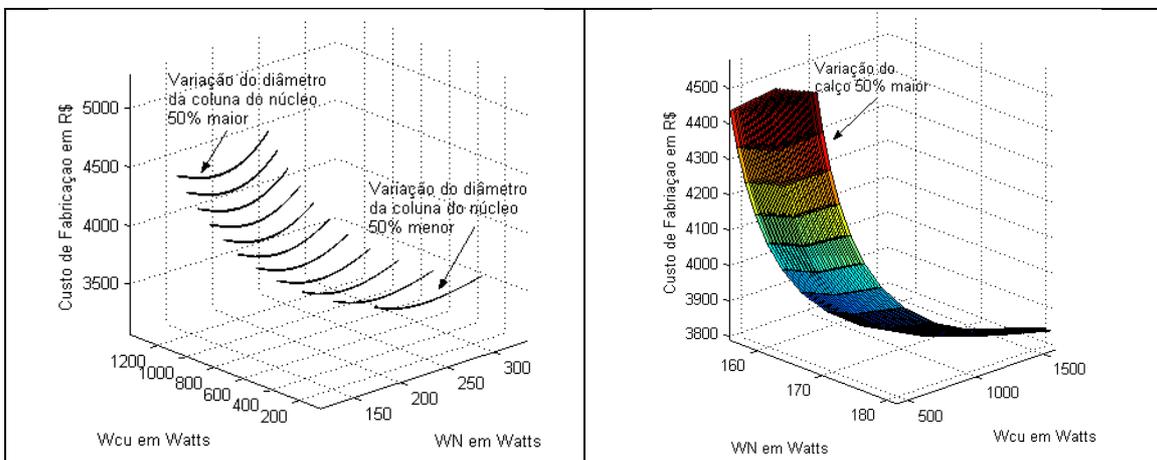


Figura 5.64 – Superfície do custo de fabricação em relação às perdas em vazio e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

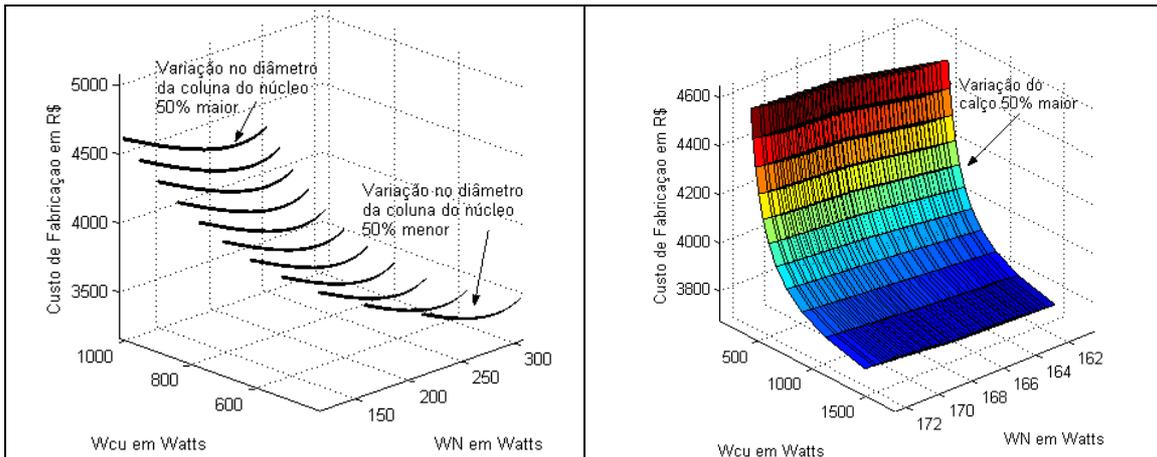


Figura 5.65 – Superfície do custo de fabricação em relação às perdas em vazio e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

A demanda comercial típica cedida pela concessionária AES-Sul e extrapolada, para o pico máximo de 1,2 p.u. é mostrada na Figura 5.66. O custo de energia é igual a 93,40 R\$/MWh, o tempo de análise é de 10 anos e a taxa de juros é de 8% ao ano.

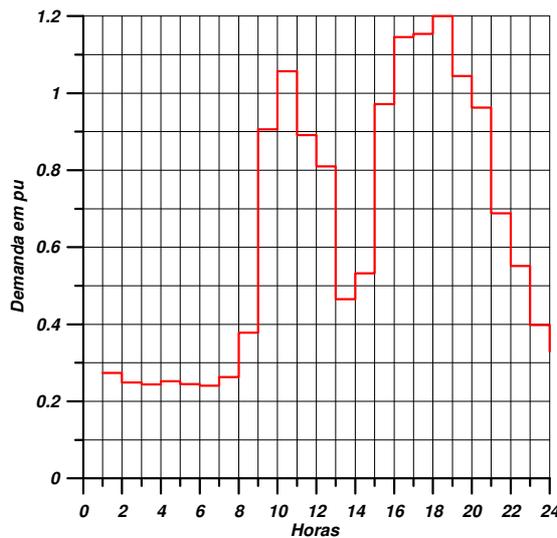


Figura 5.66 – Demanda comercial para um transformador de 45 kVA

A Figura 5.67 apresenta as superfícies de custo total em relação às perdas em vazio e em carga. O primeiro conjunto considera os projetos com largura do condutor de BT, isolamento e indução magnética variáveis. O segundo utiliza a densidade da corrente de AT e da indução magnética constante, com a distância entre enrolamentos, o calço e a cabeça da bobina variáveis.

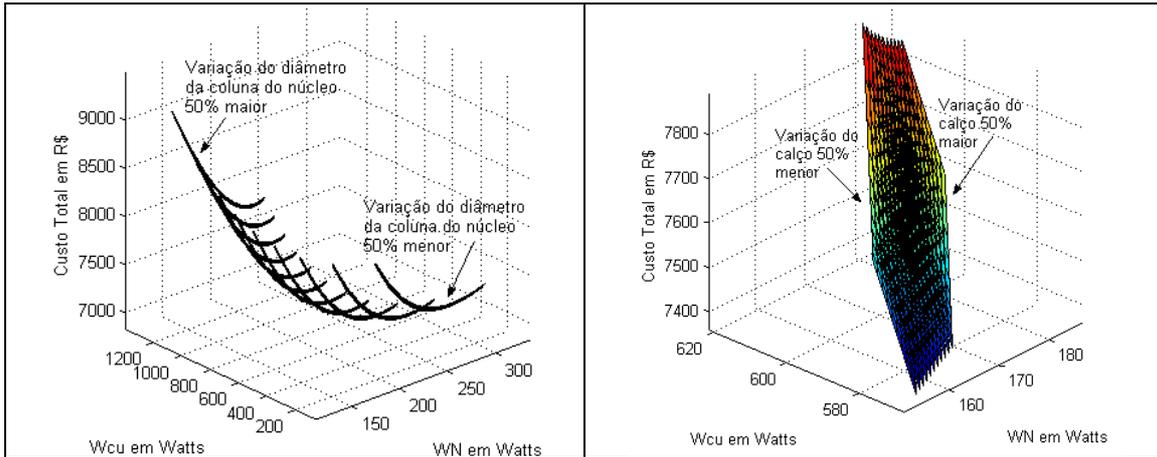


Figura 5.67 – Superfície do custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com diâmetro do condutor de AT constante.

Os projetos do primeiro conjunto de superfícies com densidade magnética 50% maior que o valor de referência apresenta perdas conforme Figura 5.68. O ponto de mínimo na superfície do custo total é R\$ 8.547,90. Isto resulta em perdas em vazio igual a 123,32 Watts e perdas em carga igual a 658,07 Watts.

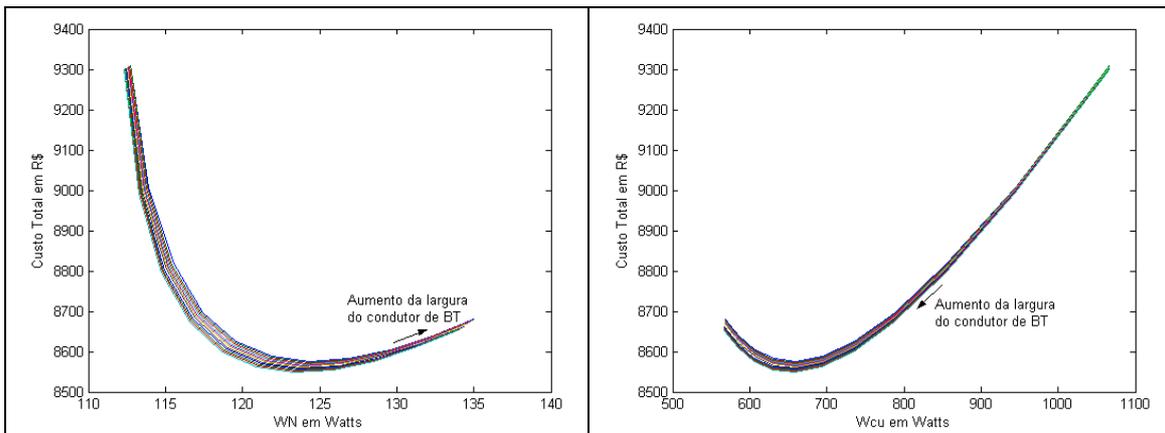


Figura 5.68 – Comportamento do custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a largura do condutor de BT, isolamento e diâmetro da coluna do núcleo em 50% acima do valor de referência.

Na Figura 5.69 mostra o comportamento do custo total em função das perdas para os projetos com densidade da corrente de AT constante, com valores para o calço 50% acima do valor de referência. O ponto de mínimo é igual a R\$ 7.432,60 com perdas em vazio de 162,05 Watts e perdas em carga de 569,65 Watts. Estes projetos apresentam o custo total linear em relação às perdas.

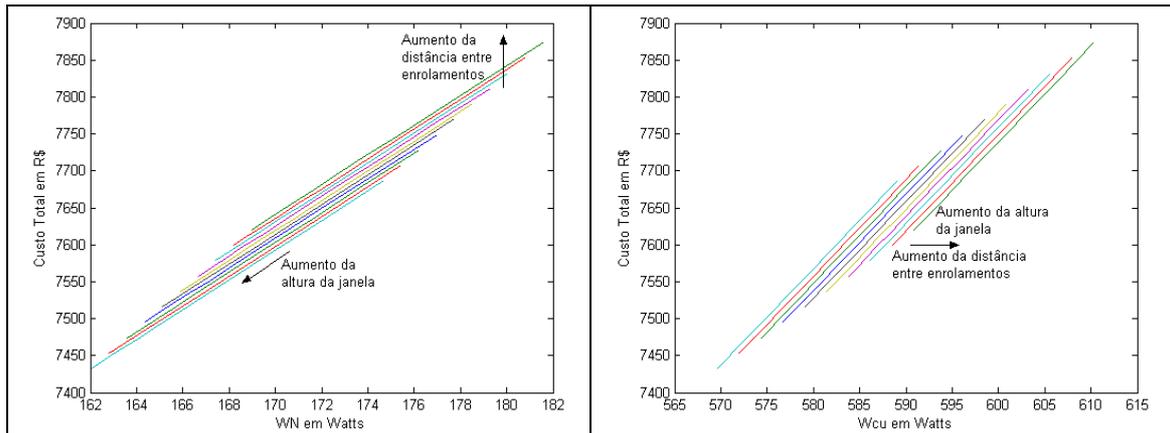


Figura 5.69 – Comportamento do custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando o diâmetro do condutor de AT constante, variação da distância entre enrolamentos e calço em 50% acima do valor de referência.

As superfícies de custo total em relação às perdas em vazio e em carga são apresentadas na Figura 5.70. O primeiro conjunto considera os projetos com espessura do condutor de BT, espessura da isolação e da indução magnética variáveis. O segundo utiliza a densidade da corrente de AT e da indução magnética constante, com variação da distância entre enrolamentos, do calço e cabeça da bobina.

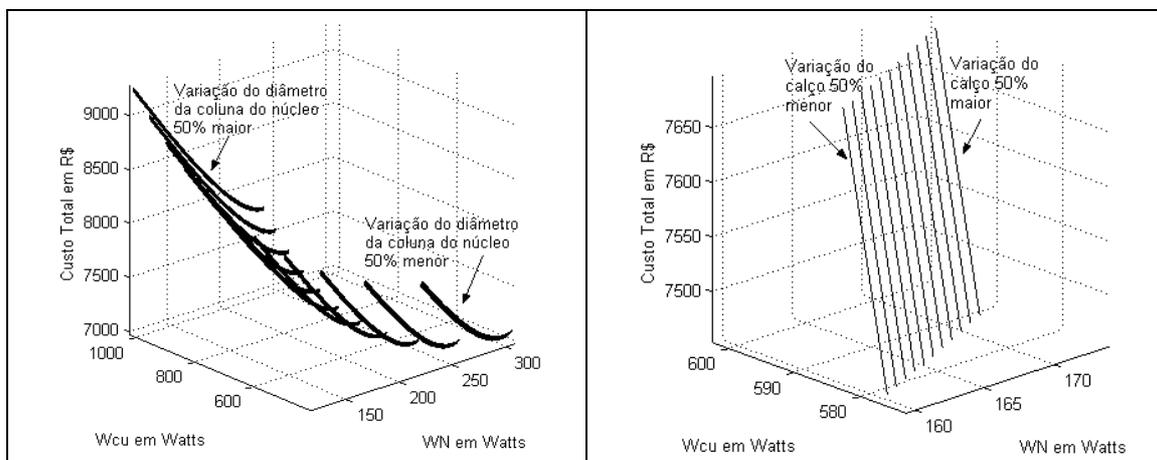


Figura 5.70 – Superfície do custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com diâmetro do condutor de AT constante.

Na Figura 5.71 obtém-se o comportamento para a indução magnética 50% acima do valor de referência. O ponto de mínimo é de R\$ 8.529,80, com perdas em vazio de 122,23 Watts e em carga de 642,98 Watts.

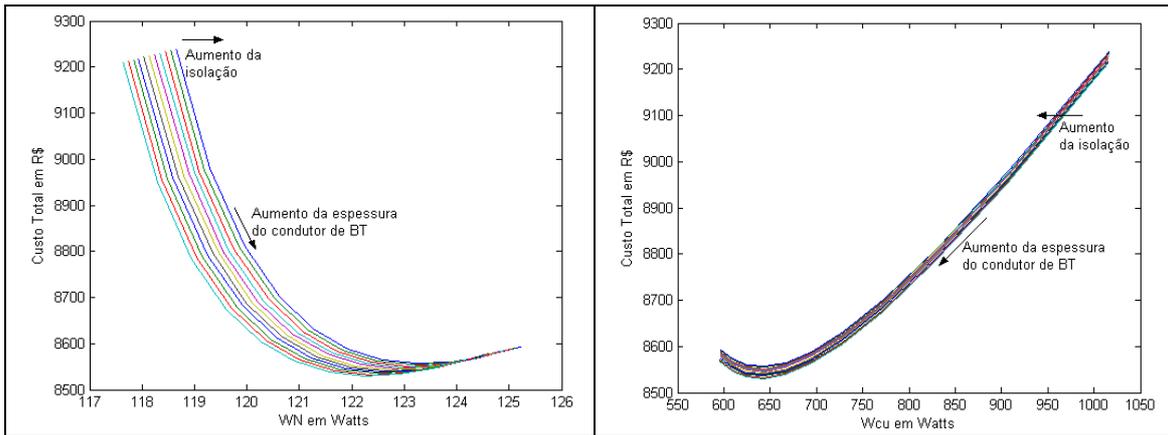


Figura 5.71 – Comportamento do custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a espessura do condutor de BT, isolamento e diâmetro da coluna do núcleo em 50% acima do valor de referência.

O comportamento das perdas para os projetos com calço e cabeça da bobina em 50% do valor de referência é mostrado na Figura 5.72. O ponto de mínimo é de R\$ 7.509,20 e o comportamento é linear em função das perdas.

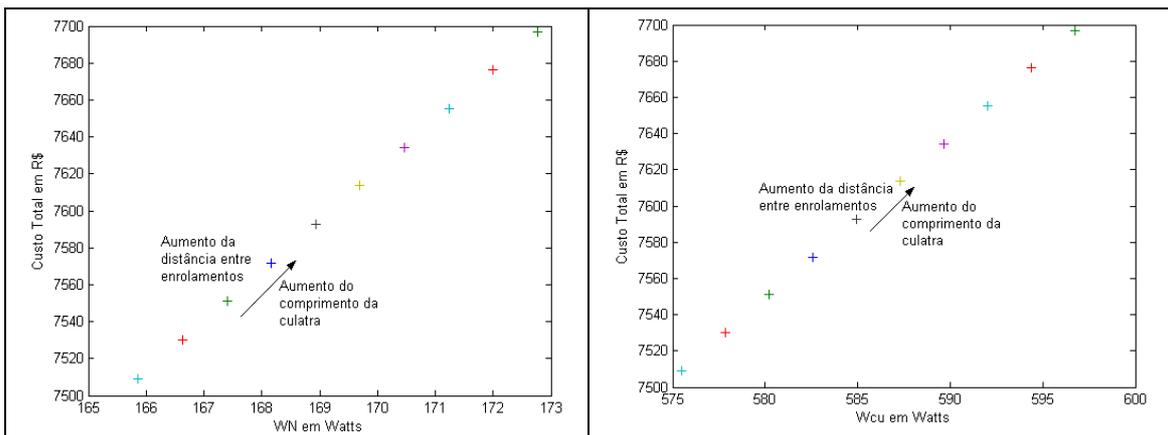


Figura 5.72 – Comportamento do custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando o diâmetro do condutor de AT constante, variação da distância entre enrolamentos e calço em 50% acima do valor de referência.

A Figura 5.73 apresenta as superfícies do custo total em relação às perdas em vazio e em carga. O primeiro conjunto considera os projetos com a largura do condutor de BT, espessura da isolamento e indução magnética variável. A variação na densidade da corrente de AT, na distância entre os enrolamentos, no calço e na cabeça da bobina formam o segundo conjunto.

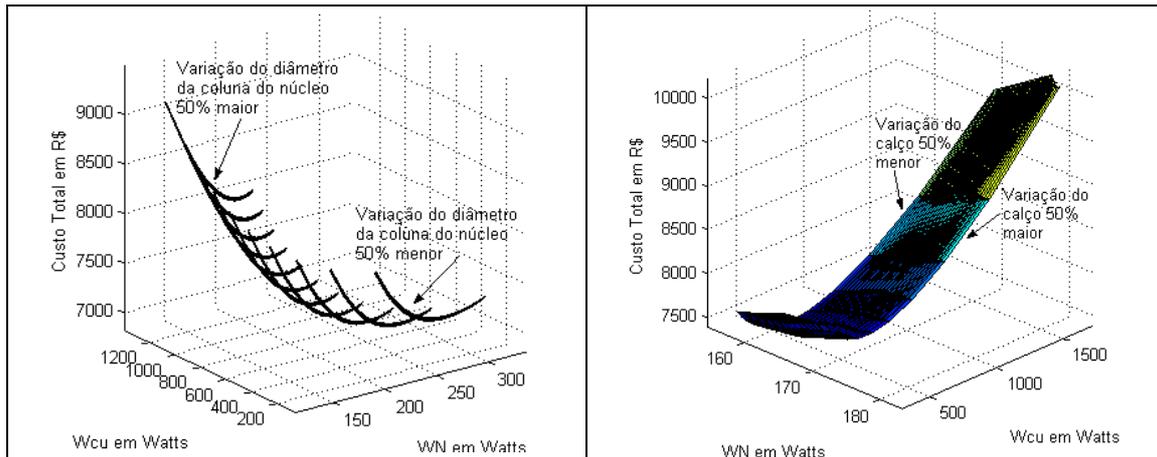


Figura 5.73 – Superfície do custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

Os projetos com indução magnética 50% acima do valor de referência são mostrados na Figura 5.74. O ponto mínimo é de R\$ 8.547,90, com perdas em vazio de 123,32 Watts e em carga de 658,87 Watts. Na Figura 5.75 obtém-se os resultados para valores da densidade da corrente de AT 50% acima do valor de referência. O ponto de mínimo é de R\$ 7.438,50, com perdas em vazio de 164,03 Watts e em carga de 488,70 Watts.

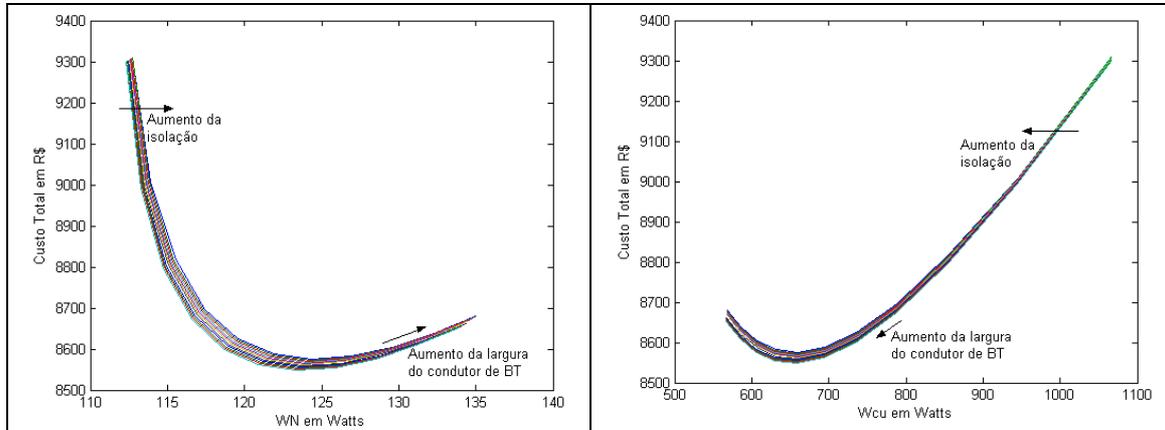


Figura 5.74 – Comportamento do custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a largura do condutor de BT, isolamento e diâmetro da coluna do núcleo em 50% acima do valor de referência.

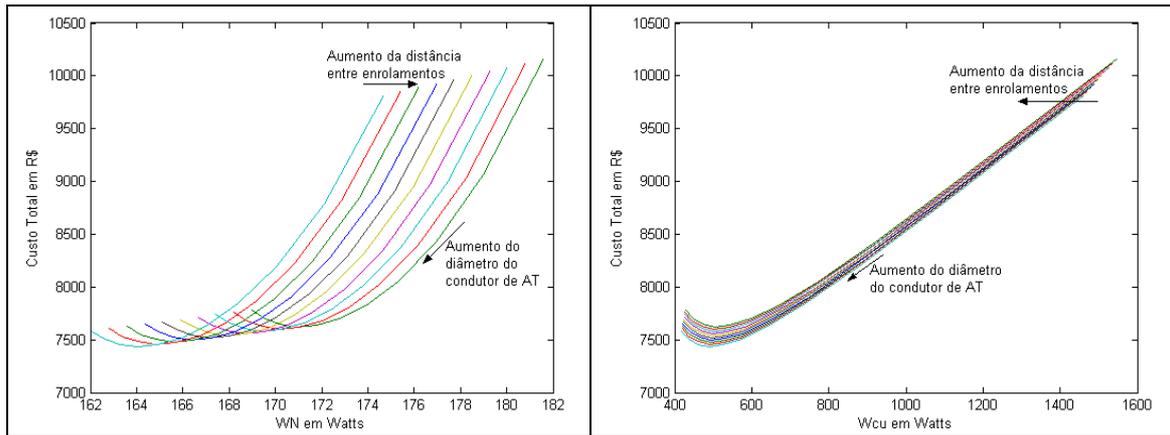


Figura 5.75 – Comportamento do custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação do diâmetro do condutor de AT, variação da distância entre enrolamentos e calço em 50% acima do valor de referência.

A Figura 5.76 apresenta as superfícies de custo total em relação às perdas em vazio e em carga. Os projetos com variação na espessura do condutor de BT, na espessura da isolamento e na indução magnética formam o primeiro conjunto de superfícies. O segundo considera a densidade da corrente de AT, a distância entre enrolamentos, o calço e a cabeça da bobina variáveis.

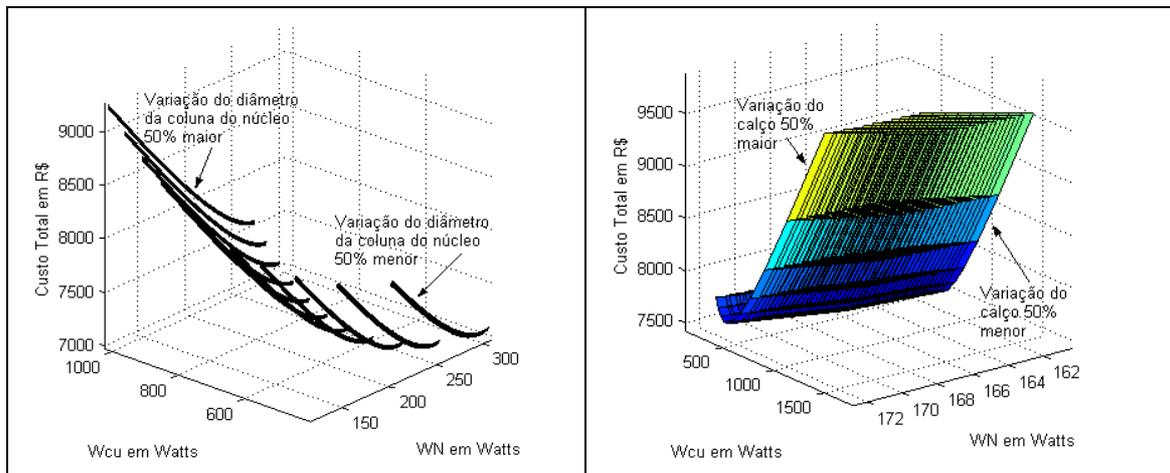


Figura 5.76 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação no diâmetro do condutor de AT, na distância entre enrolamentos e no calço mais a cabeça da bobina.

Os projetos que possuem indução magnética 50% menor que o valor de referência é mostrado na Figura 5.77. O ponto de mínimo é de R\$ 8.529,80, com perdas em vazio de 122,23 Watts e em carga de 642,98 Watts.

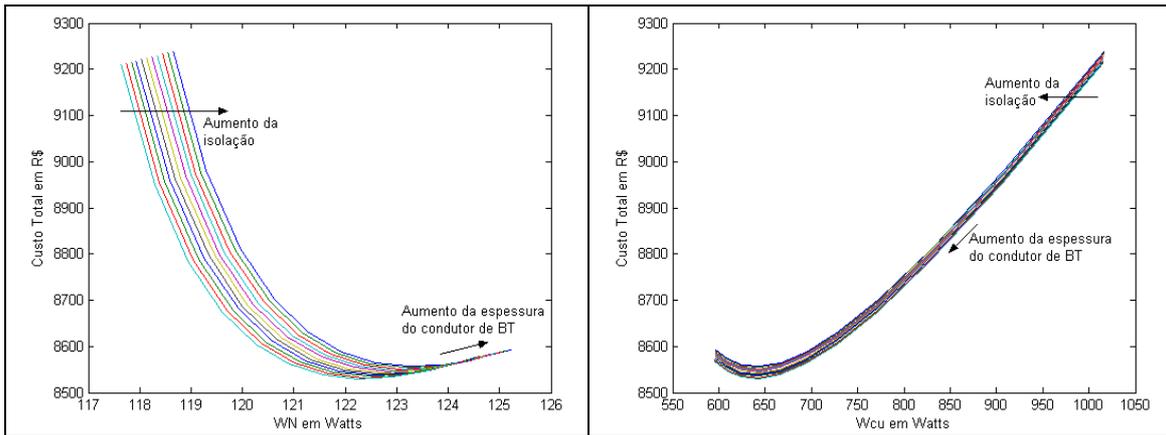


Figura 5.77 – Comportamento do custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a espessura do condutor de BT, isolamento e diâmetro da coluna do núcleo em 50% acima do valor de referência.

Na Figura 5.78 obtém-se os resultados para os projetos com valores do calço e cabeça da bobina 50% acima do valor de referência. O ponto de mínimo é de R\$ 7.470,80, com perdas em vazio de 165,86 Watts e em carga de 527,30 Watts. O comprimento da culatra é maior devido ao diâmetro do condutor de AT ocasionando maiores perdas em vazio.

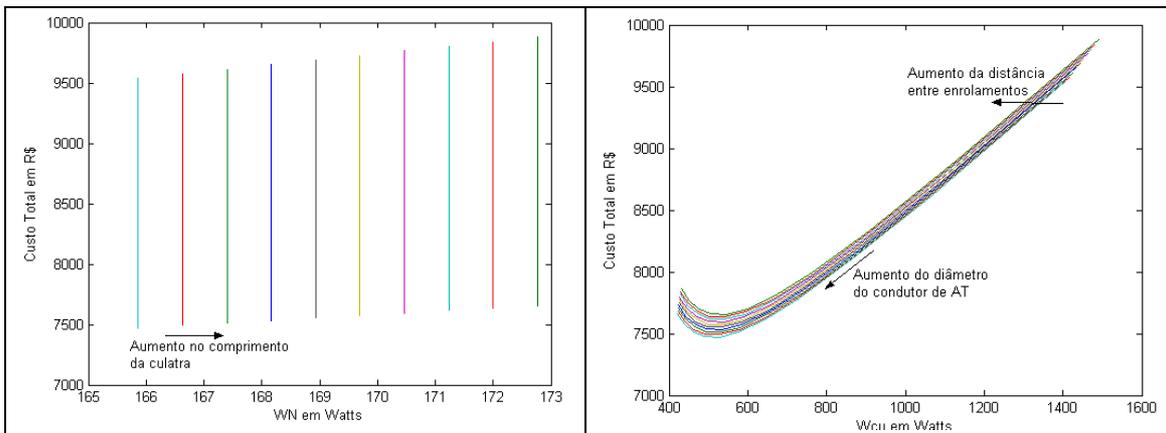


Figura 5.78 – Comportamento do custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação no diâmetro do condutor de AT, na distância entre enrolamentos e no calço em 50% acima do valor de referência.

As Figuras de 5.79 a 5.91 apresentam outras possibilidades de projeto e custo total.

a) *Variação do condutor de BT, do condutor de AT e da indução magnética:*

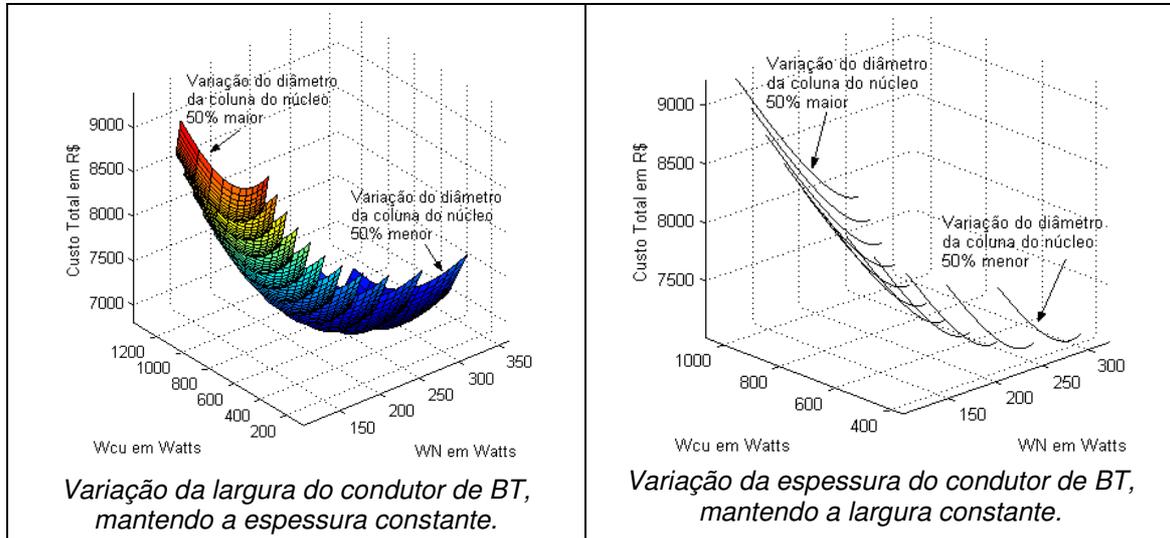


Figura 5.79 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação do condutor de BT e do diâmetro da coluna do núcleo, mantendo o condutor de AT constante.

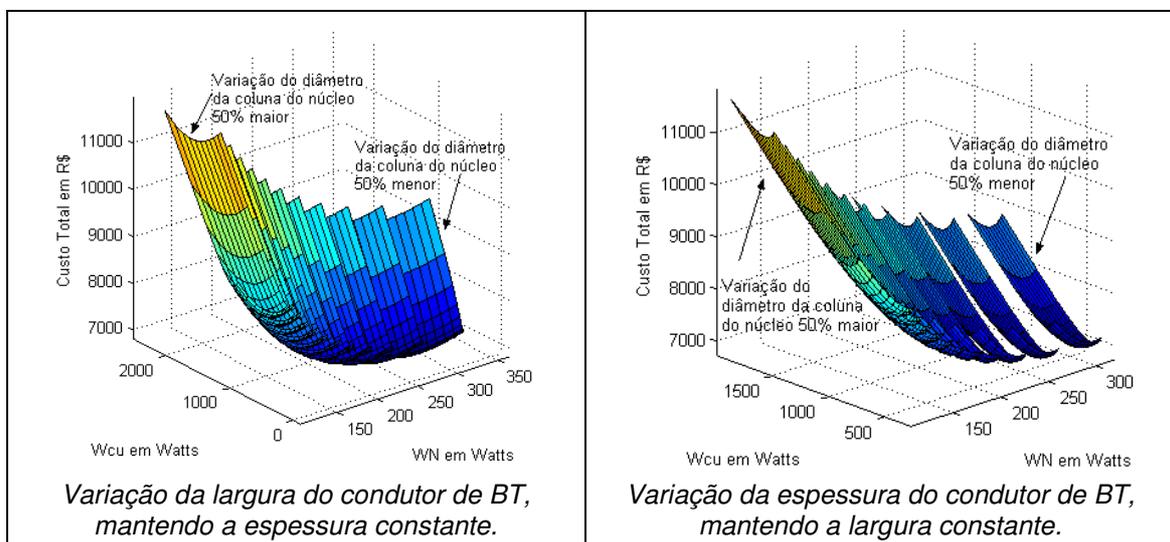


Figura 5.80 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação do condutor de BT, do condutor de AT e do diâmetro da coluna do núcleo.

b) *Variação do condutor de AT, da espessura da isolação e da indução magnética:*

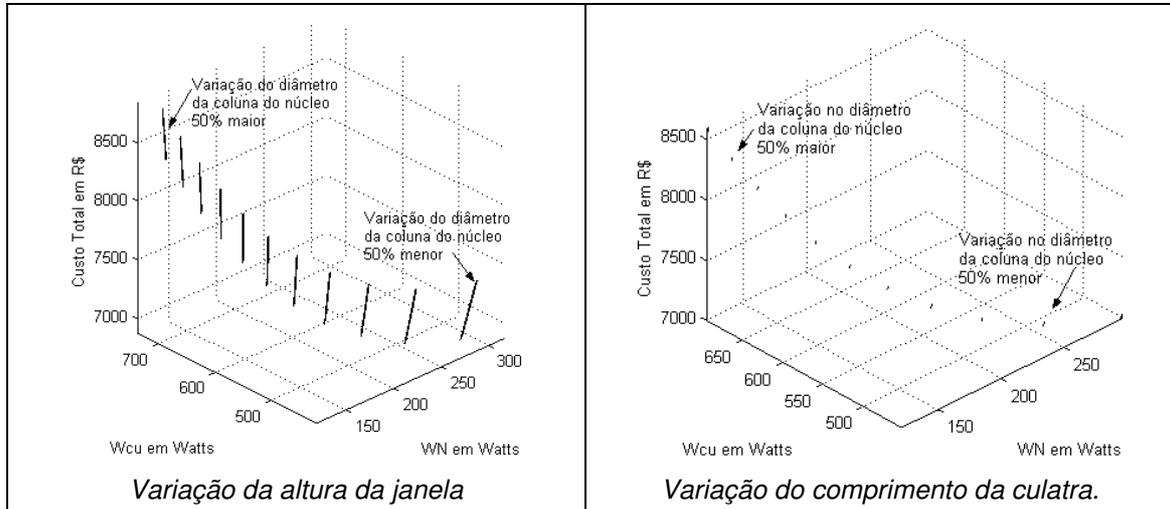


Figura 5.81 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação da espessura da isolação e do diâmetro da coluna do núcleo, mantendo o condutor de AT constante.

A influência da espessura da isolação forma gráficos lineares de custo total em relação às perdas. A densidade da corrente de AT é constante.

Quando se tem a variação da densidade da corrente de AT o comportamento é mostrado na Figura 5.82.

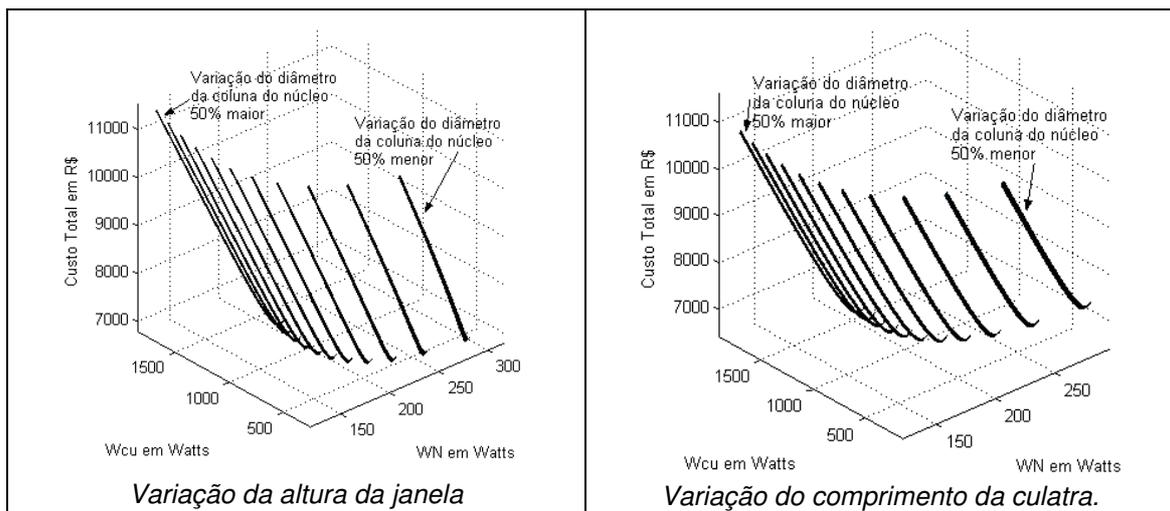


Figura 5.82 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação do condutor de AT, da espessura da isolação e do diâmetro da coluna do núcleo.

c) *Variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolação e da densidade da corrente de AT:*

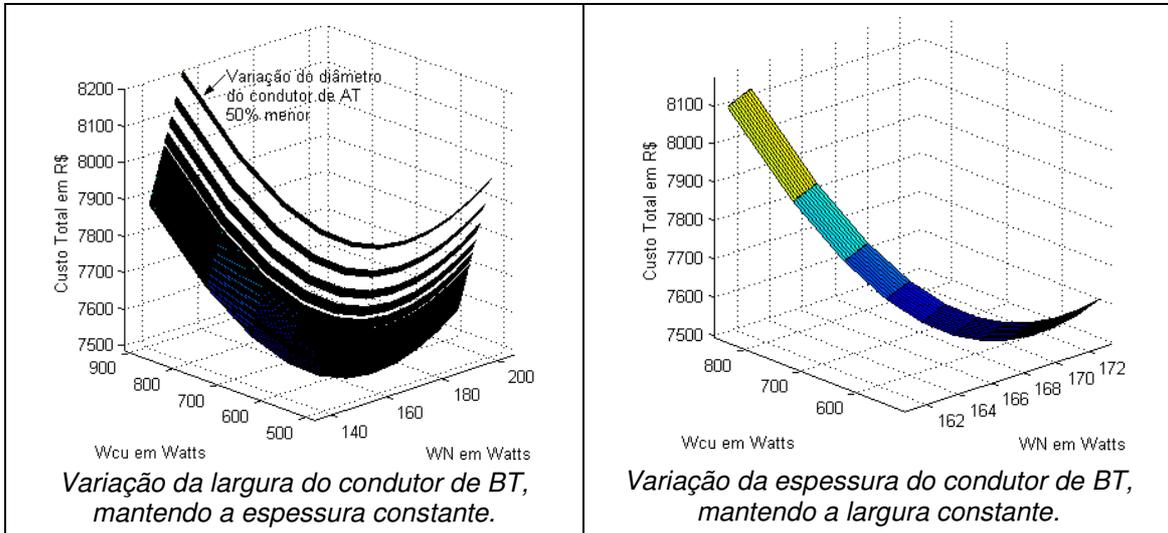


Figura 5.83 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação do condutor de BT e da espessura da isolação, mantendo o condutor de AT constante.

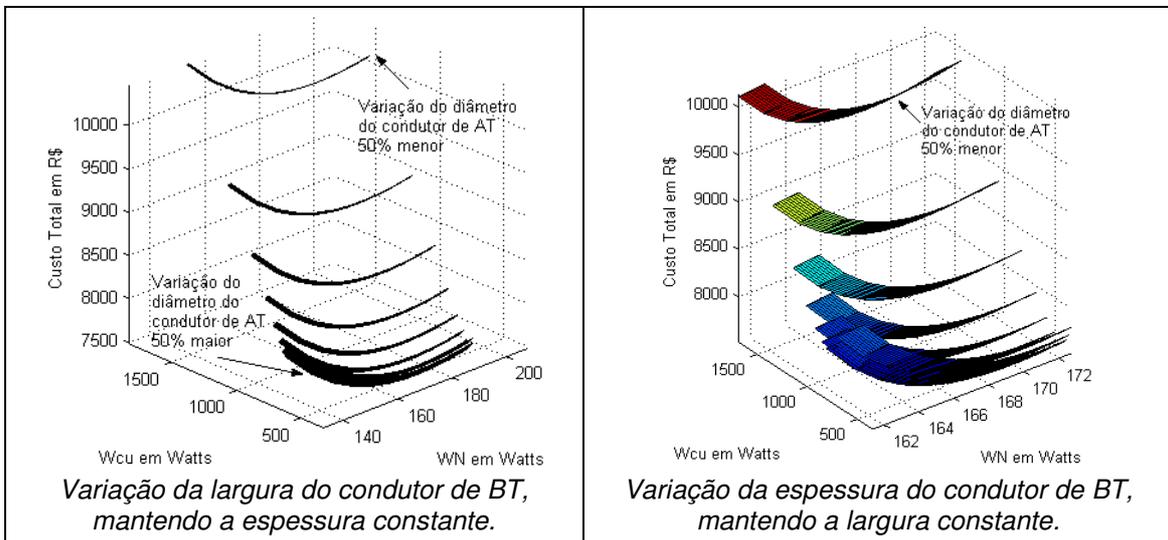


Figura 5.84 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação do condutor de BT, da espessura da isolação e do diâmetro do condutor de AT.

d) *Variação da densidade da corrente de AT, da distância entre enrolamentos e da indução magnética:*

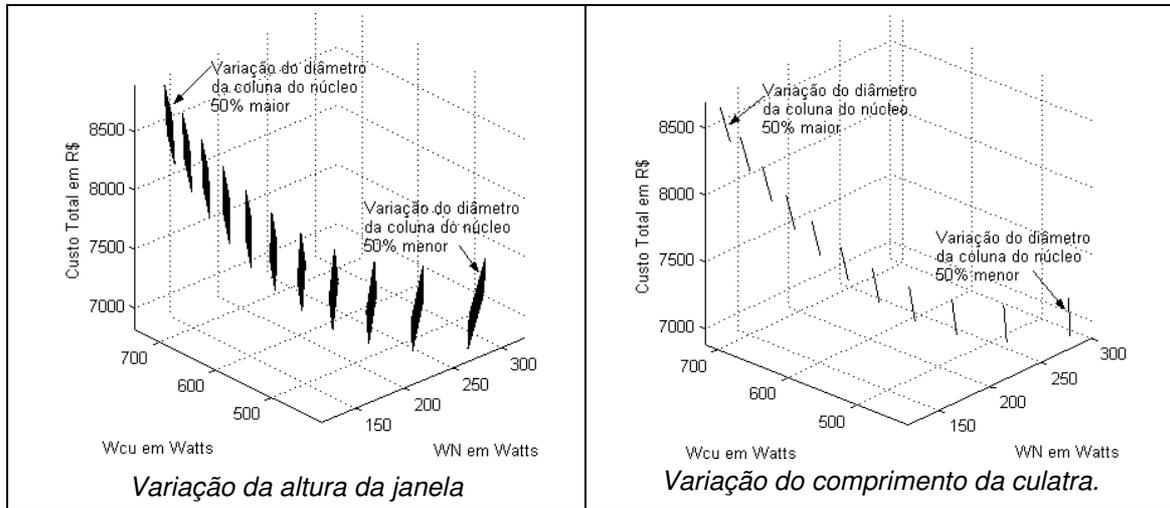


Figura 5.85 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação da distância entre enrolamentos e do diâmetro da coluna do núcleo, mantendo o condutor de AT constante.

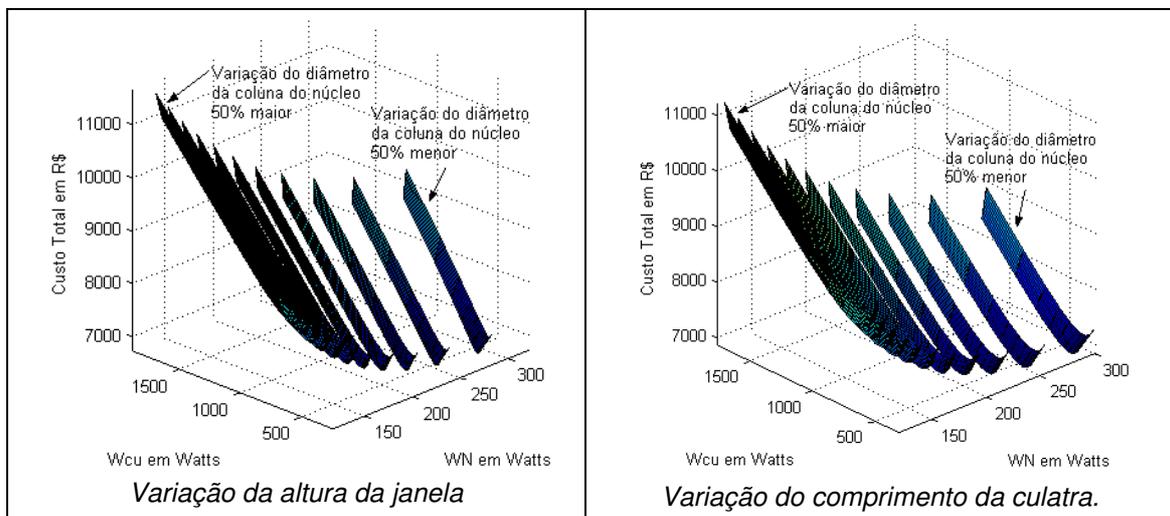


Figura 5.86 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação do condutor de AT, da distância entre enrolamentos e do diâmetro da coluna do núcleo.

e) *Varição do calço mais cabeça da bobina, da espessura da isolação e da indução magnética:*

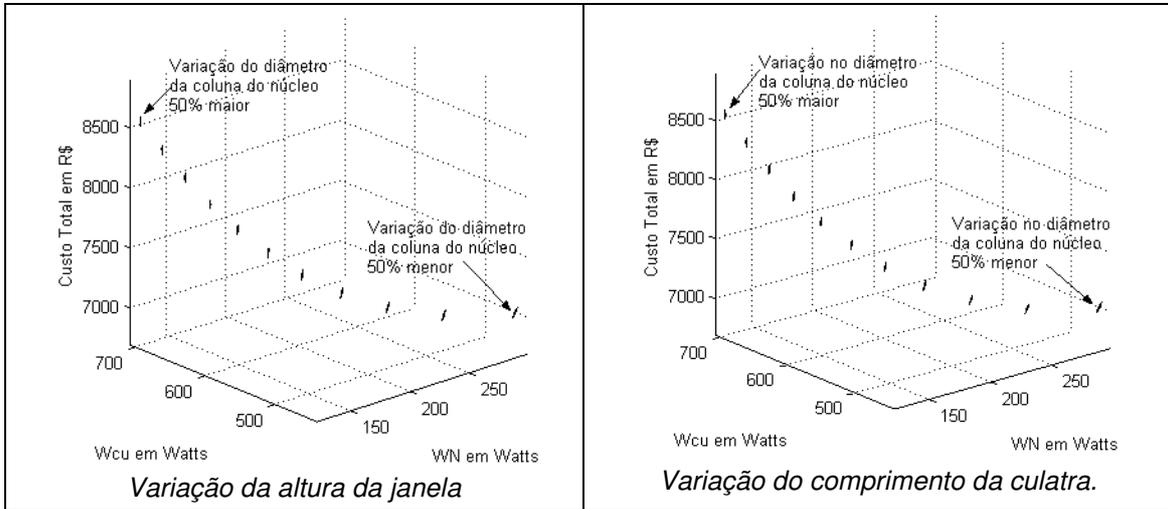


Figura 5.87 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação do calço mais cabeça da bobina, da espessura da isolação e do diâmetro da coluna do núcleo.

f) *Varição da distância entre enrolamentos, da espessura da isolação e da indução magnética:*

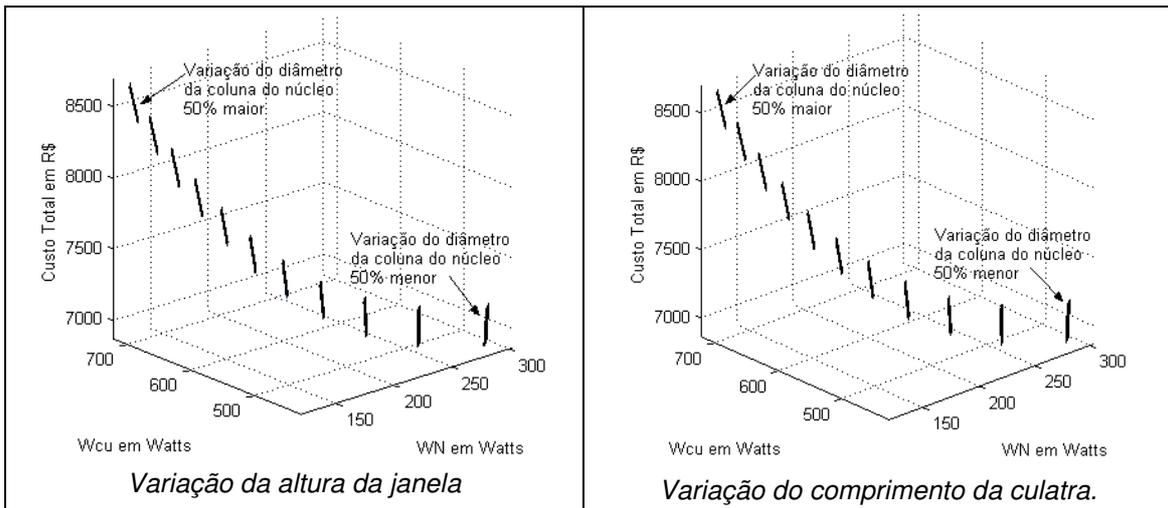


Figura 5.88 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação da distância entre enrolamentos, da espessura da isolação e do diâmetro da coluna do núcleo.

g) *Variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolação e do calço mais cabeça da bobina:*

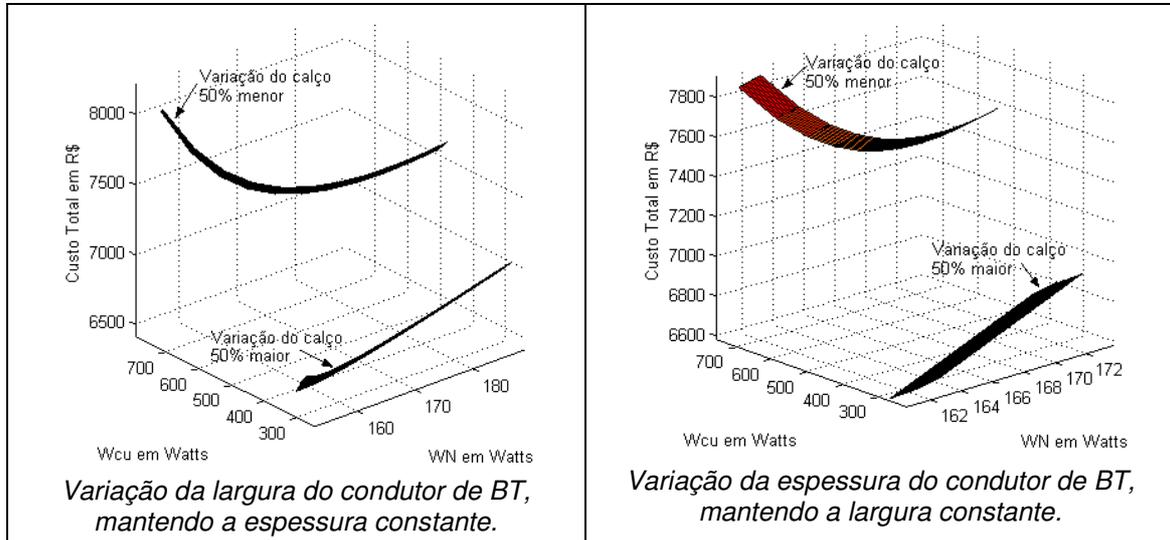


Figura 5.89 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação do condutor de BT, da espessura da isolação e do calço mais cabeça da bobina.

h) *Variação da densidade da corrente de AT, da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos:*

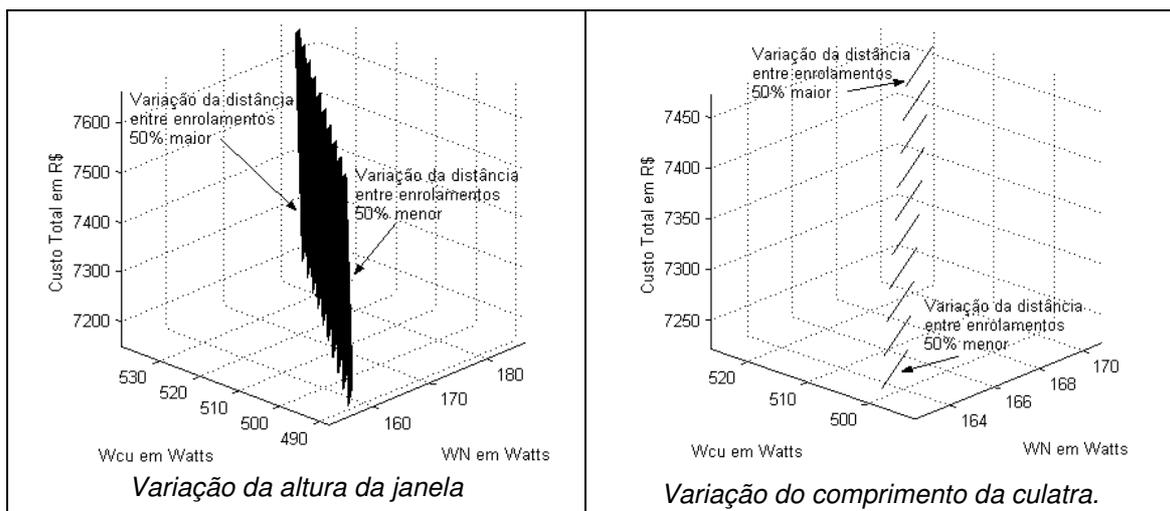


Figura 5.90 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos, mantendo o condutor de AT constante.

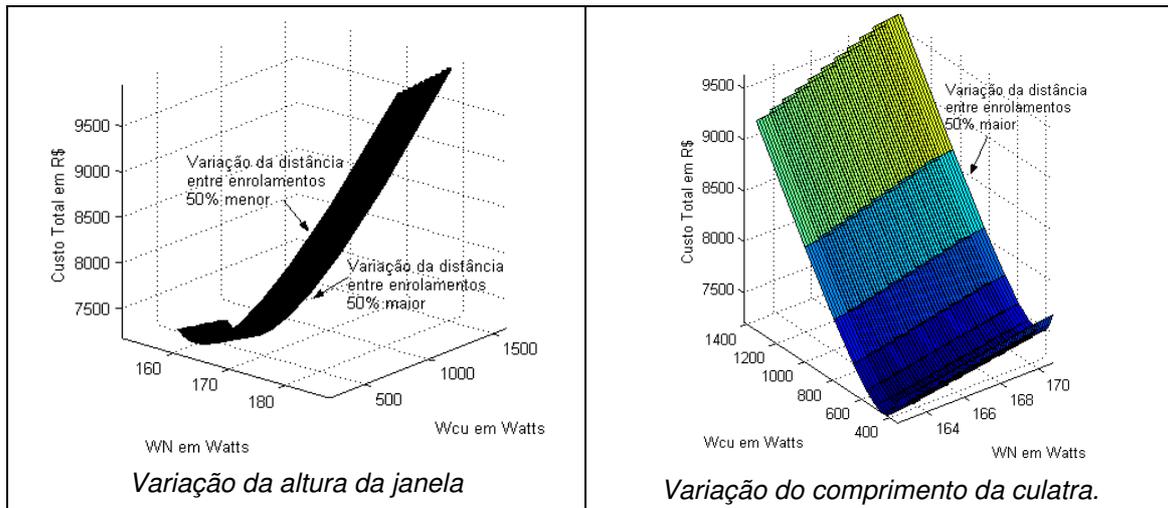


Figura 5.91 – Superfície de custo total em relação às perdas em vazio e em carga considerando a variação do condutor de AT, da espessura da isolamento e da distância entre enrolamentos.

A densidade da corrente de AT tem importante influência na formação das superfícies de custo total em relação às perdas, pois quando se tem sua variação as superfícies são não-lineares.

### 5.2.1 ANÁLISE DO PROJETO COM MENOR CUSTO TOTAL

O menor custo é apresentado pelo projeto que possui:

- Condutor de BT com largura constante e espessura 50% menor do valor de referência, ou seja, o comprimento da culatra é menor;
- Espessura da isolamento 50% menor em relação ao valor de referência;
- Calço e cabeça da bobina 40% menor em relação ao valor de referência;
- Densidade da corrente de AT igual ao valor de referência;
- Indução magnética igual ao valor de referência.

O menor custo total é portanto, igual a R\$ 6.575,50, ou seja, 13,30% menor que o custo de um transformador padrão com a carga considerada na Figura 5.66. A perda em vazio é igual a 160,64 Watts, ou seja, 3,79% menor em relação ao transformador padrão. A perda em carga é 53,02% menor e igual a 276,52 Watts. A economia de energia gerada pela substituição por uma unidade deste transformador é igual a 0,138 MWh/ano e 11,24 R\$/ano. Porém, este não possui tempo de retorno de investimento.

Ao analisar as outras superfícies de projeto tem-se, por exemplo, o que possui:

- Densidade da corrente de BT igual ao valor de referência;

- Condutor de AT 20% maior que o valor de referência;
- Distância entre enrolamentos 50% menor que o valor de referência;
- Calço e cabeça da bobina 50% menor que o valor de referência;
- Indução magnética igual ao valor de referência.

Este projeto tem o tempo de retorno de investimento igual a 2,21 anos com custo total igual a R\$ 7.371,60, ou seja, uma redução de 2,8% em relação ao transformador padrão. A redução de energia é igual a 0,528 MWh/ano e a economia gerada pela substituição é igual a 49,35 R\$/ano. Nestes casos, não estão sendo considerados o custo da mão-de-obra para a substituição do transformador.

Neste contexto, considera-se o custo mínimo e o tempo de retorno do investimento simultaneamente. Como consequência obtém-se um projeto adequado para redução de perdas. É necessário considerar também o projeto que produz as melhores condições dielétricas e de temperatura.

As superfícies de tempo de retorno do investimento, temperatura dos enrolamentos, do topo do óleo e do fator de aceleração de envelhecimento encontram-se no Anexo 1.

### 5.3 ANÁLISE DOS PROJETOS

A análise dos projetos dos transformadores de distribuição apresenta como resultado o menor custo total em função da impedância percentual e tempo de retorno do investimento. É verificado que alguns casos o custo total mínimo das superfícies não se encontram dentro da tolerância da impedância percentual e/ou não possuem TRI. Para cada conjunto de projeto é realizada a análise de modo a verificar se o ponto mínimo das superfícies encontra-se dentro das restrições técnicas.

- *Varição do condutor de BT, da espessura da isolação e da indução magnética.*

A Figura 5.92 apresenta a superfície do custo total em relação à impedância percentual e tempo de retorno do investimento para os projetos onde o condutor de BT possui espessura constante e largura variável.

Para estes projetos o custo mínimo tem uma redução de 7,77% em relação ao transformador padrão. Os projetos com impedância percentual normalizada e igual a 3,5%, não possuem tempo de retorno. Os projetos para a matriz de custo mínimo são mostrados na Figura 5.93. Observa-se que nenhum projeto desta matriz apresenta TRI menor que o tempo de análise de 10 anos.

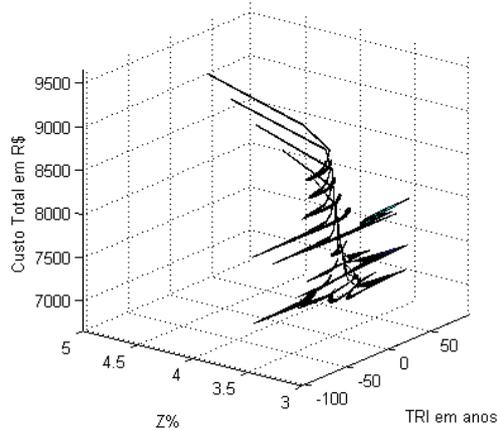


Figura 5.92 – Superfície do custo total em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da largura do condutor de BT.

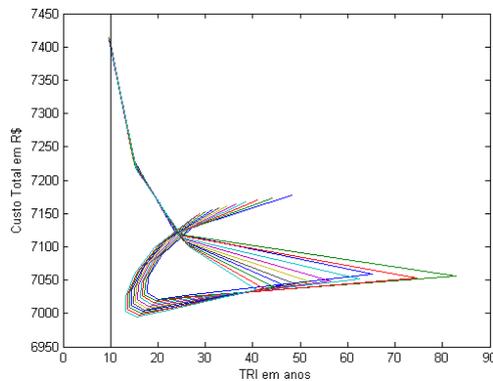


Figura 5.93 – Relação do custo total em relação ao tempo de retorno de investimento para projetos com variação da largura do condutor de BT.

Considerando os projetos com indução magnética constante, o projeto com menor tempo de retorno do investimento apresenta uma redução do custo total de 0,13% e TRI igual a 6 anos conforme o comportamento destes parâmetros mostrados na Figura 5.94.

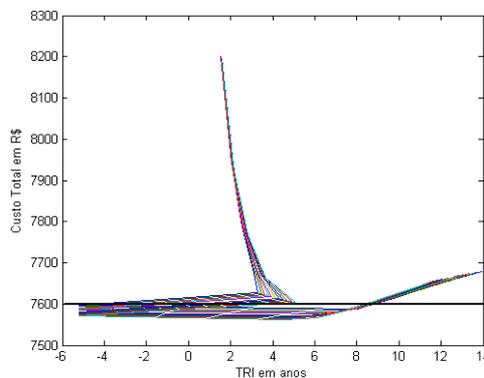


Figura 5.94 – Relação do custo total em relação ao tempo de retorno de investimento para projetos com variação da largura do condutor de BT.

A Figura 5.95 apresenta os projetos que possuem espessura do condutor de BT variável com largura constante nas superfícies de custo total em relação à impedância percentual e TRI.

O custo total mínimo é 7,78% menor em relação ao custo do transformador padrão, porém sem tempo de retorno de investimento conforme Figura 5.96. Observe-se que a superfície do TRI apresenta alguns pontos negativos. Na Figura 5.97 os valores de TRI inferiores ao tempo de análise se encontram no domínio complexo.

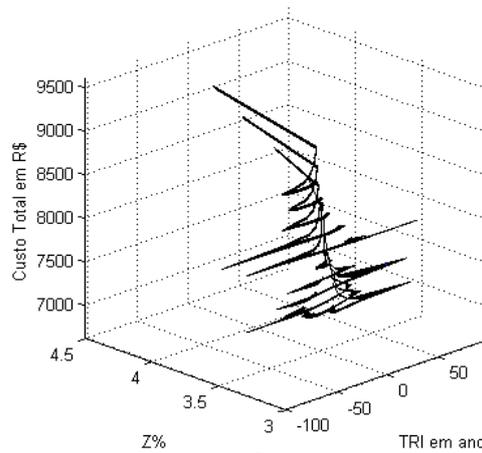


Figura 5.95 – Superfície do custo total em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da espessura do condutor de BT.

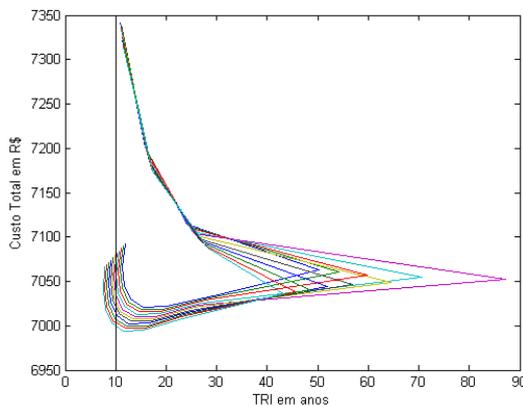


Figura 5.96 – Relação do custo total em relação ao tempo de retorno de investimento para projetos com variação da espessura do condutor de BT.

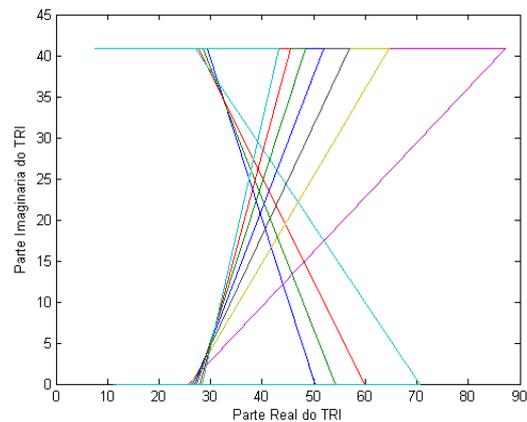


Figura 5.97 – Comportamento do TRI para projetos com variação da espessura do condutor de BT.

Os projetos com largura do condutor de BT, espessura da isolamento e indução magnética variáveis resultam em menores perdas em carga. As superfícies das perdas em vazio em relação à impedância percentual e TRI são mostrados na Figura 5.98. O projeto que apresenta menor perda em vazio possui perda em carga elevada e perda total do transformador trifásico de 45 kVA fica acima do limite estabelecido pelo padrão ABNT. Este projeto possui largura do condutor de BT e densidade da corrente de AT

50% acima dos valores padrão. O núcleo possui indução magnética 50% abaixo do valor padrão. A impedância percentual é de 4,6% e não possui tempo de retorno de investimento. Portanto, este projeto não se encontra dentro das tolerâncias devido a indução magnética ser impraticável, impedância percentual maior que 3,5% e sem TRI.

Para a matriz de projeto com indução magnética 50% abaixo do valor padrão, a Figura 5.99 apresenta o comportamento da perda em vazio em relação à impedância percentual. Observa-se que quanto menor for a perda em vazio maior será a impedância. A Figura 5.100 apresenta o comportamento das perdas em vazio em relação ao TRI para a mesma matriz do projeto.

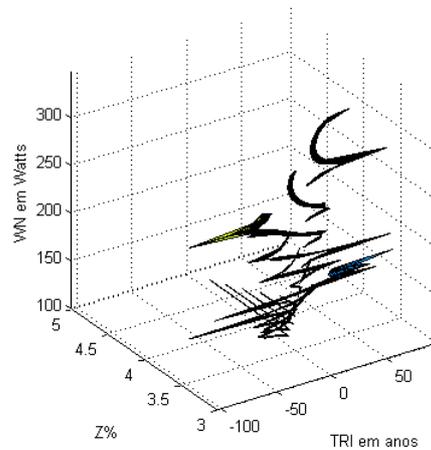


Figura 5.98 – Superfície das perdas em vazio em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da largura do condutor de BT.

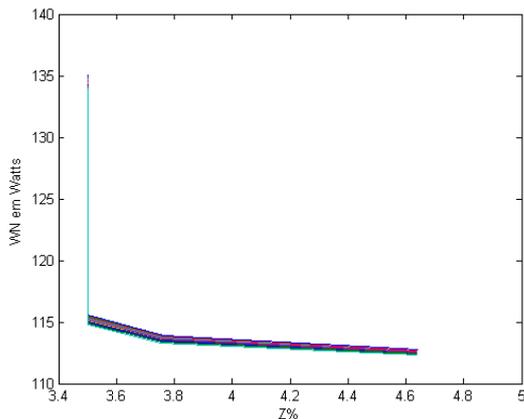


Figura 5.99 – Relação das perdas em vazio em relação à impedância percentual para projetos com variação da largura do condutor de BT.

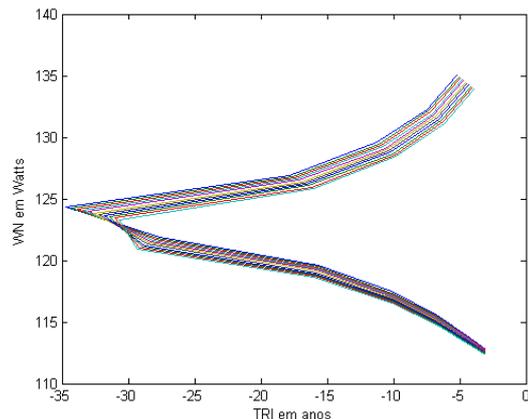


Figura 5.100 – Relação das perdas em vazio em relação ao TRI para projetos com variação da largura do condutor de BT.

A Figura 5.101 apresenta as superfícies das perdas em vazio em relação à impedância percentual e o TRI para projetos com a espessura do condutor de BT, a espessura da isolamento e indução magnética variáveis. O projeto que apresenta a

menor perda em vazio, de 122,28 Watts, possui diâmetro do núcleo, espessura do condutor de BT e isolamento 50% acima do valor padrão. Este projeto possui custo total, impedância percentual e TRI fora dos limites de tolerância e viabilidade econômica.

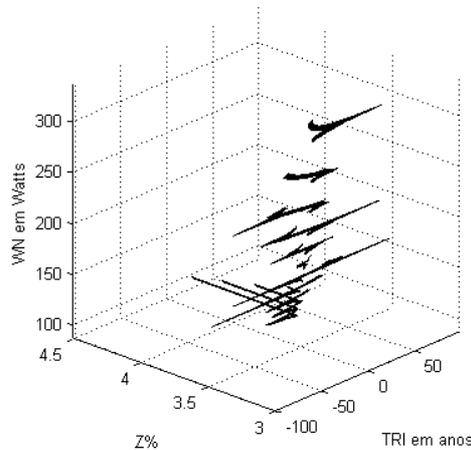


Figura 5.101 – Superfície das perdas em vazio em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da espessura do condutor de BT.

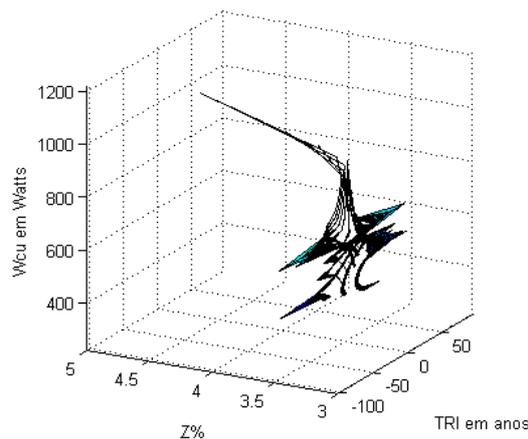


Figura 5.102– Superfície das perdas em carga em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da largura do condutor de BT.

A menor perda em carga é obtida para o projeto com a largura do condutor de BT e indução magnética em 50% acima do valor de referência, e espessura da isolamento 50% abaixo. É um projeto inviável em relação à indução magnética. O valor da perda em carga é igual a 371,46 Watts e das perdas em vazio igual a 331,82 Watts. O projeto que possui variação da largura do condutor de BT 10% acima do valor padrão, espessura da isolamento 50% abaixo e indução magnética igual ao valor de referência, a perda em carga é igual a 559,28 Watts e a perda em vazio igual a 169,83 Watts. O custo total é igual a R\$ 7.561,70, redução de 0,3%, e TRI de 4,5 anos.

A Figura 5.103 apresenta as superfícies das perdas em carga em relação à impedância percentual e TRI para projetos com variação da espessura do condutor de

BT, da espessura da isolamento e da indução magnética.

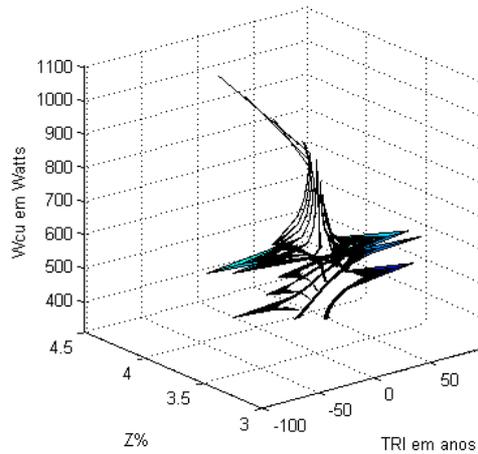


Figura 5.103 – Superfície das perdas em carga em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da espessura do condutor de BT.

O projeto que apresenta a menor perda em carga é inviável, pois utiliza o diâmetro da coluna do núcleo 50% menor, ou seja, uma indução de 34.800 Gauss o que é impraticável. O projeto com espessura do condutor de BT em 10% acima do valor padrão, com espessura da isolamento 40% abaixo e indução magnética constante resulta na perda em carga e na perda em vazio igual a 566,02 Watts e 167,36 Watts, respectivamente. O custo total é igual a R\$ 7.559,20, redução de 0,32%, e TRI de 4,5 anos.

A Figura 5.104 apresenta as superfícies da temperatura do enrolamento para a sobrecarga da Figura 5.89 em relação à impedância percentual e TRI para projetos com largura do condutor de BT, espessura da isolamento e indução magnética variáveis.

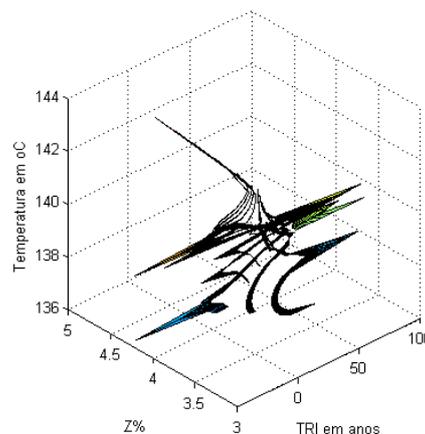


Figura 5.104 – Superfície da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da largura do condutor de BT.

A variação da largura do condutor de BT, espessura da isolação e indução magnética 50% acima do valor de referência produz o projeto com menor temperatura do enrolamento, 80,79°C. A perda em vazio e em carga é igual a 335,25 Watts e 372,62 Watts. Portanto, este projeto não é adequado, devido a perda em vazio estar acima do limite da especificação da NBR 5440 [1].

A Figura 5.105 apresenta as superfícies da temperatura de enrolamento em relação à impedância percentual e TRI para projetos com espessura do condutor de BT, espessura da isolação e indução magnética variáveis.

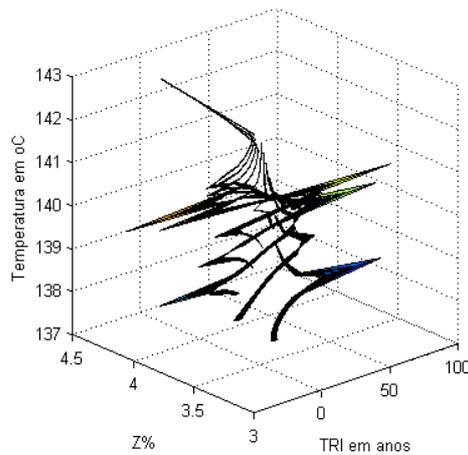


Figura 5.105 – Superfície da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da espessura do condutor de BT.

O projeto com a menor temperatura do enrolamento em sobrecarga, 137,43°C, tem a espessura do condutor de BT, a isolação e a indução magnética 50% acima do valor de referência. A perda em vazio e em carga é igual a 305,83 Watts e 400,94 Watts. Este projeto apresenta perdas em vazio acima do limite estabelecido por norma brasileira, além de não apresentar tempo de retorno de investimento.

- *Variação da densidade da corrente de AT, da distância entre enrolamentos e do tamanho do calço.*

O custo total mínimo com redução de 2,98% em relação ao custo total padrão é obtido para os projetos com altura da janela variável e densidade da corrente de AT constante. Porém, este tipo de projeto não apresenta tempo de retorno de investimento para a carga conforme Figura 5.106. O mesmo ocorre para projetos com comprimento da culatra variável e densidade da corrente de AT constante.

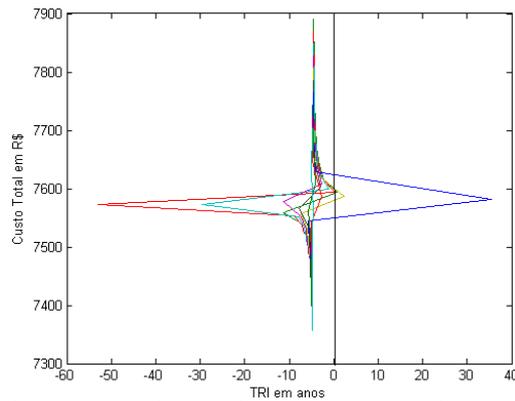


Figura 5.106 – Relação do custo total em relação ao tempo de retorno de investimento para projetos com variação da largura da janela do núcleo.

Os projetos com densidade da corrente de AT, distância entre enrolamentos e calço variáveis resultam nas superfícies do custo total em relação à impedância percentual e TRI segundo Figura 5.107.

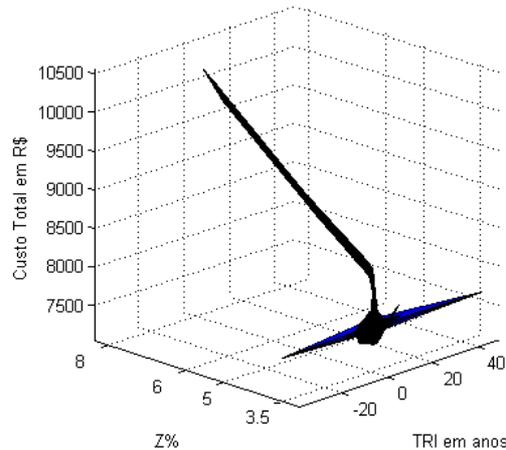


Figura 5.107 – Superfície do custo total em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de AT e altura da janela do núcleo.

O custo total mínimo é de R\$ 7.371,60, ou seja, uma redução de 2,8% em relação ao custo total padrão. O projeto que gera este custo mínimo possui densidade da corrente de AT 20% abaixo do condutor padrão, com distância entre enrolamentos e calço 50% abaixo das medidas padrão. A impedância percentual é igual a 3,5% e o TRI igual a 2,21 anos. A economia gerada pela substituição por esta unidade é igual a 49,35 R\$/ano. A perda em vazio é igual a 143,88 Watts e a perda em carga igual a 632,70 Watts.

A Figura 5.108 apresenta o comportamento da impedância percentual em relação ao custo total e a Figura 5.109 o comportamento do TRI para os projetos com calço 50% abaixo do valor padrão.

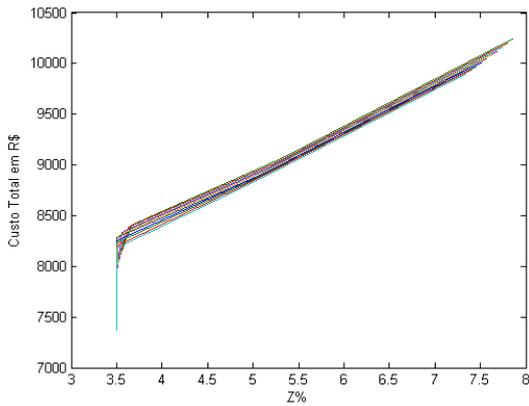


Figura 5.108 – Relação do custo total em relação à impedância percentual para projetos com variação do condutor de AT com a altura da janela.

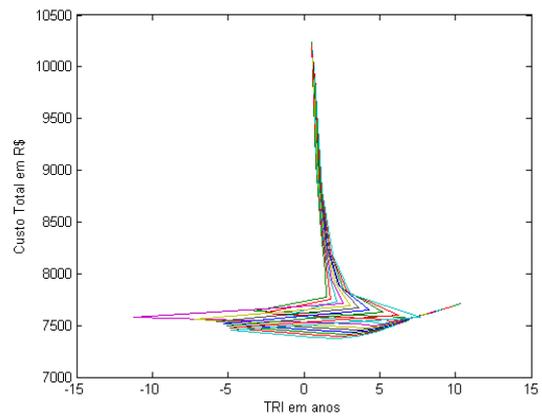


Figura 5.109 – Relação do custo total em relação ao TRI para projetos com variação do condutor de AT com a altura da janela.

A Figura 5.110 apresenta as superfícies do custo total em relação à impedância percentual e TRI, para os projetos com variação no diâmetro do condutor de AT, distância entre enrolamentos e calço.

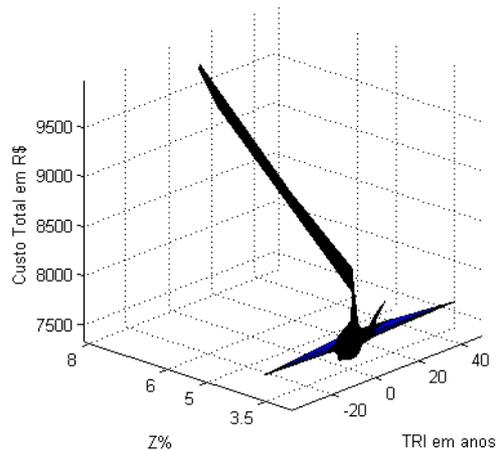


Figura 5.110 – Superfície do custo total em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de AT e comprimento da culatra do núcleo.

O custo total mínimo é de R\$ 7.413,60 resultando em uma redução de 2,2% em relação ao custo total padrão. O projeto de custo mínimo possui densidade da corrente de AT 10% abaixo do valor padrão, distância entre enrolamentos e calço 50% abaixo. A impedância percentual é igual a 3,5% e o TRI igual a 1 ano. A economia gerada pela substituição por esta unidade é igual a 30,53 R\$/ano.

O projeto que possui variação da distância entre enrolamentos e do calço 50% abaixo dos valores de referência e largura da janela 50% acima representa os resultados para perda em vazio mínima. A perda em vazio é de 155,80 W que proporciona uma redução de 29,18% e perda em carga igual a 571,03 Watts. Porém, o

tempo de retorno de investimento inviabiliza este projeto.

O projeto com calço 10% acima do valor de referência e largura da janela 30% abaixo, obtém-se um custo total de R\$ 7.579,80, ou seja, uma redução de 0,05%. A perda em vazio é de 168,36 Watts, a perda em carga é de 583,76 Watts, impedância percentual de 3,5% e TRI de 2,14 anos. Isto representa uma economia por substituição da unidade de 0,94 R\$/ano.

Para uma economia de 1,05 R\$/ano por substituição da unidade é obtido o projeto que consiste no calço igual ao valor de referência com a largura da janela igual a 30% abaixo. O custo total é de R\$ 7.576,60 com perda em vazio de 167,97 Watts, perda em carga de 584,25 Watts, impedância percentual de 3,5% e TRI igual a 1 ano.

Realizando a mesma análise em projetos com indução magnética constante e comprimento da culatra variável, aquele que possui a menor perda em vazio tem comprimento da culatra 50% acima do valor de referência e distância entre enrolamentos e calço 50% abaixo. A perda em vazio e a perda em carga são iguais a 160,53 Watts e 578,30 Watts, respectivamente.

Os projetos com indução magnética constante e com variação no comprimento da culatra, na distância entre os enrolamentos e no calço obtém-se a menor perda em vazio igual a 160,52 Watts. Esta perda ocorre com o comprimento da culatra de 50% acima do valor de referência e, distância entre os enrolamentos e tamanho do calço 50% abaixo. A perda em carga para este projeto é de 578,30 Watts. Porém, para os parâmetros econômicos adotados não se tem TRI. O custo total é igual a R\$ 7.452,40 representando uma redução de 1,8%.

O projeto com diâmetro do condutor de AT e da altura da janela do núcleo em 50% acima do valor de referência e distância entre centro de colunas e calço 50% abaixo, possui perda em vazio igual a 155,80 Watts e perda em carga de 419,31 Watts. O TRI é igual 6,1 anos e o custo total igual a R\$ 7.507,30, ou seja, uma redução de 1,1%.

O projeto com comprimento da culatra do núcleo e diâmetro do condutor de AT em 50% acima do valor de referência e distância entre centro de colunas e calço 50% abaixo, possui perda em vazio igual a 160,53 Watts e perda em carga de 422,54 Watts. O TRI é 7,9 anos e o custo total igual a R\$ 7.606,40, representando em um aumento de 0,22%.

Analisando as perdas mínimas em carga e considerando os projetos com variação da altura da janela do núcleo, da distância entre enrolamentos e do tamanho do calço obtém-se a menor perda em 569,65 Watts. Este projeto possui valores para a

largura da janela e do calço 50% acima da referência, com a distância entre enrolamentos 50% abaixo. A perda em vazio é igual a 162,05 Watts e não possui TRI. Um projeto com largura da janela 30% abaixo e distância entre enrolamentos 50% abaixo do valor de referência, com tamanho do calço igual ao valor padrão obtém-se perda em vazio e em carga igual a 156,95 Watts e 723,32 Watts, respectivamente. O custo total é igual a R\$ 7.576,90, redução de 0,1%, e TRI igual 0,5 anos.

Os projetos com variação no comprimento da culatra do núcleo, na distância entre os enrolamentos e no tamanho do calço resultam em menor perda em carga com 575,51 Watts. Este projeto possui comprimento da culatra e calço 50% acima e distância entre enrolamentos 50% abaixo do valor de referência proporcionando uma perda em vazio igual a 162,06 Watts, porém sem tempo de retorno de investimento. Para um projeto com comprimento da culatra 10% acima e distância entre os enrolamentos 50% abaixo do valor de referência, com tamanho do calço igual ao valor padrão obtém-se perda em vazio e em carga iguais a 167,20 Watts e 565,92 Watts, respectivamente. O custo total é igual a R\$ 7.556,80, redução de 0,4 %, e TRI igual 3,76 anos.

A Figura 5.111 apresenta as superfícies de perda em carga em relação à impedância percentual e TRI para projetos com largura da janela do núcleo, densidade da corrente de AT, distância entre enrolamentos e do tamanho do calço variáveis.

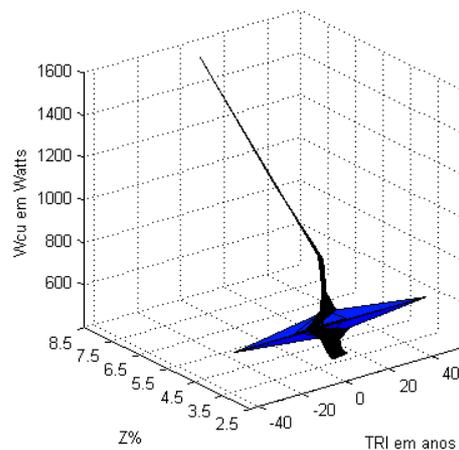


Figura 5.111 – Superfície das perdas em carga em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de AT e altura da janela do núcleo.

O ponto de menor perda em carga está em 418,69 Watts e o projeto consiste da variação da altura da janela e tamanho do calço 50% acima, distância entre os enrolamentos e densidade da corrente de AT 50% abaixo do valor de referência. Este projeto possui perda em vazio igual a 162,05 Watts, e de acordo com os parâmetros econômicos adotados, o custo total é igual a R\$ 7.581,90 representando uma

economia na substituição deste transformador de 76,81 R\$/ano e TRI igual a 7,4 anos.

As superfícies da perda em carga em relação à impedância percentual e TRI para os projetos com comprimento da culatra do núcleo, densidade da corrente de AT, distância entre enrolamentos e do tamanho do calço variáveis são mostradas na Figura 5.112.

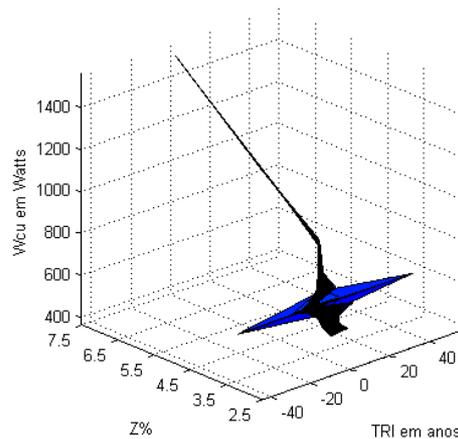


Figura 5.112 – Superfície das perdas em carga em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de AT e comprimento da culatra do núcleo.

O ponto de menor perda em carga está em 421,30 Watts e o projeto consiste da variação da altura da janela e calço 50% maior, e distância entre enrolamentos e densidade de corrente de AT 50% menor que o valor de referência. Este projeto possui perda em vazio igual a 165,86 Watts e custo total é igual a R\$ 7.661,70 representando uma economia na substituição deste transformador de 72,58 R\$/ano e TRI igual a 9,1 anos.

Analisando pelo ponto de mínimo das superfícies da temperatura dos enrolamentos, com temperatura ambiente de 40 °C no período das 17 às 18 horas da demanda na Figura 5.66, obtém-se o projeto com densidade da corrente de AT 50% abaixo do valor padrão. Isto resulta em um aumento na altura da janela do núcleo, distância entre enrolamentos e calço 50% acima do valor de referência. A temperatura do enrolamento é igual a 139,39 °C e as perdas em vazio e em carga são de 172,76 Watts e 430,74 Watts, respectivamente, com TRI de 16,7 anos.

O ponto na superfície que indica o projeto com densidade da corrente de AT 10% abaixo do valor de referência, distância entre enrolamentos e tamanho do calço 50% igual ao valor padrão produz temperatura do enrolamento de 140,32°C. As perdas em vazio e em carga são de 165,86 Watts e 536,76 Watts, com TRI de 3,9 anos.

A Figura 5.113 mostra as superfícies da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e TRI para projetos com altura da janela do núcleo, diâmetro do condutor de AT, distância entre enrolamentos e calço variáveis.

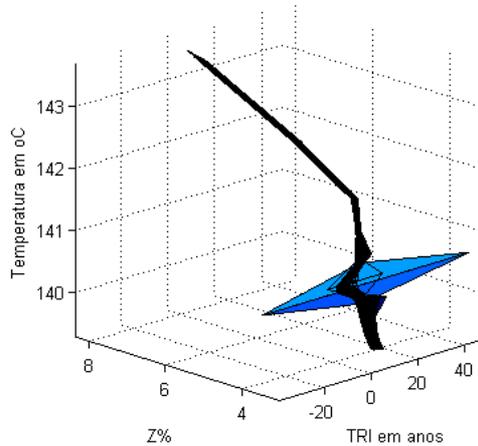


Figura 5.113 – Superfície da temperatura dos enrolamentos em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de AT e altura da janela do núcleo.

As superfícies da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e TRI, para projetos com comprimento da culatra do núcleo, diâmetro do condutor de AT, distância entre enrolamentos e calço variáveis são apresentadas na Figura 5.114.

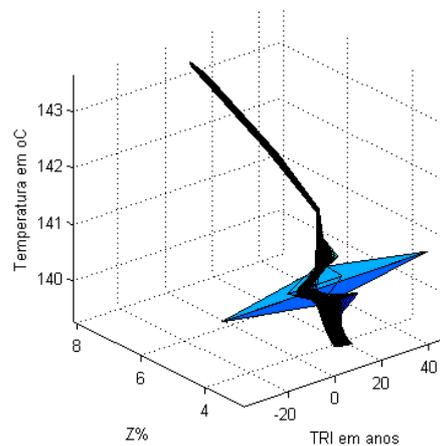


Figura 5.114 – Superfície da temperatura dos enrolamentos em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de AT e comprimento da culatra do núcleo.

- *Variação da densidade da corrente de BT, de AT e da indução magnética.*

A Figura 5.115 apresenta as superfícies de custo total em relação à impedância percentual e ao TRI, para os projetos com densidade da corrente de BT, altura da janela e indução magnética variáveis.

O projeto que apresenta o menor custo total, R\$ 6.891,30, possui largura do condutor de BT, altura da janela e indução magnética 50% acima do valor de referência. As perdas em vazio e em carga são de 266,98 Watts e 500,07 Watts. Este projeto é inviável devido à indução necessária para a área da coluna, 34.800 Gauss.

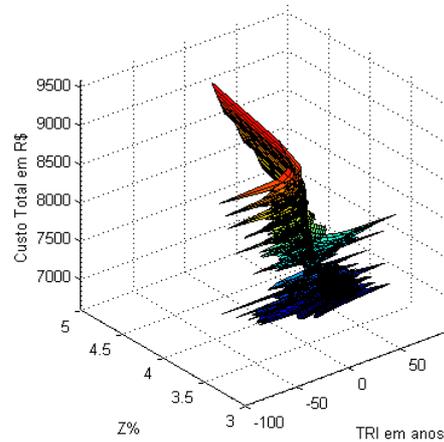


Figura 5.115 – Superfície do custo total em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de BT, mantendo o condutor de AT constante, e do diâmetro da coluna do núcleo.

O conjunto de soluções de projeto que possui densidade da corrente de AT constante com a variação do comprimento da culatra do núcleo têm o menor custo total de R\$ 7.007,70. Este projeto possui espessura do condutor de BT 10% acima do valor de referência e comprimento da culatra 50% (acima). O diâmetro da coluna do núcleo tem redução de 50% em relação ao valor padrão tornando-o inviável.

Um projeto com espessura do condutor de BT 10% acima e diâmetro da coluna do núcleo igual ao valor de referência possui custo total de R\$ 7.568,80. As perdas em vazio e em carga são iguais a 167,96 Watts e 566,42 Watts. A economia gerada pela substituição de cada unidade é de 8,70 R\$/ano e o TRI igual 5 anos.

A Figura 5.116 apresenta as superfícies de custo total em relação à impedância percentual e o TRI, para projetos com densidade da corrente de BT, de AT e indução magnética variáveis.

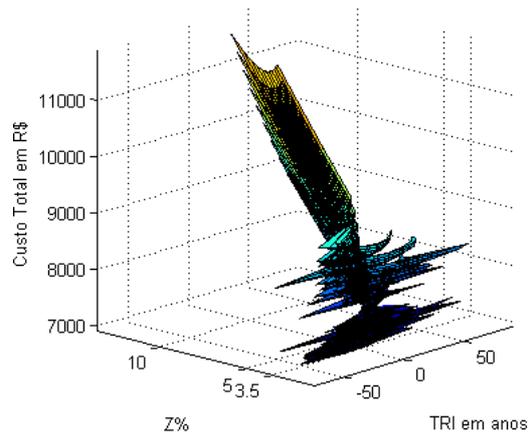


Figura 5.116 – Superfície do custo total em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de BT, do condutor de AT e do diâmetro da coluna do núcleo.

O menor custo total é de R\$ 6.910,50 para o projeto com largura do condutor de BT 30% abaixo do valor de referência, com densidade da corrente de AT 20% abaixo e indução magnética 50% abaixo. Este projeto é inviabilizado pelo diâmetro da coluna do núcleo. Para o projeto de custo total de R\$ 7.507,00 a redução de 1,01% representa uma economia de 40,67 R\$/ano pela substituição de cada unidade e TRI de 4,9 anos. O projeto consiste na utilização do condutor de BT e indução magnética iguais ao padrão e redução na densidade da corrente de AT em 20%. As perdas em vazio e em carga são iguais a 164,91 Watts e 497,60 Watts, respectivamente.

O custo total mínimo de R\$ 6.975,10 representa o projeto com espessura do condutor de BT e diâmetro do condutor de AT 10% acima que o valor de referência. Porém, o diâmetro da coluna do núcleo o torna inviável. Considerando este projeto e substituindo o diâmetro da coluna do núcleo pelo valor de referência obtém-se o custo total de R\$ 7.528,00, redução de 0,74%. Isto representa uma economia pela substituição da unidade de 30,53 R\$/ano e TRI de 4,9 anos. As perdas em vazio e em carga são iguais a 167,96 Watts e 515,45 Watts, respectivamente.

As superfícies das perdas em vazio em relação à impedância percentual e ao TRI, para os projetos com o diâmetro do condutor de AT constante são apresentados na Figura 5.117.

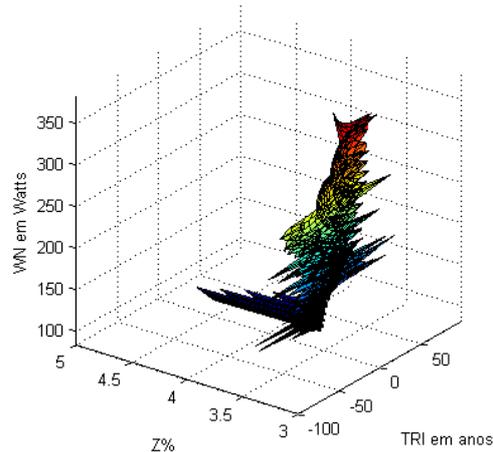


Figura 5.117 – Superfície das perdas em vazio em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de BT, mantendo o condutor de AT constante, e do diâmetro da coluna do núcleo.

A menor perda em vazio ocorre em 122,26 Watts para o projeto com largura do condutor de BT 20% abaixo do valor de referência e com altura da janela e diâmetro da coluna do núcleo 50% acima. Porém, este projeto é reprovado pelas perdas totais de 1.044,30 Watts.

A Figura 5.118 apresenta as superfícies das perdas em vazio em relação à impedância percentual e ao TRI, para projetos com condutor de BT, de AT e diâmetro da coluna do núcleo variáveis.

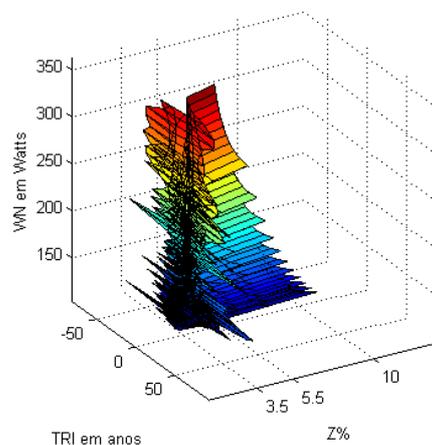


Figura 5.118 – Superfície das perdas em vazio em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de BT, do condutor de AT e do diâmetro da coluna do núcleo.

A menor perda em vazio encontra-se em 112,26 Watts para projetos com redução da largura do condutor de BT em 20%, aumento do diâmetro do condutor de AT e diâmetro da coluna do núcleo em 50%. A perda em carga é igual a 593,90 Watts, porém este projeto para os parâmetros econômicos adotados não possui TRI.

Com a espessura do condutor de BT variável, a menor perda em vazio é igual a 118,13 Watts. Para este projeto a espessura do condutor de BT, a densidade da corrente de AT e a indução magnética estão em 50% abaixo, produzindo uma perda total igual a 1.124,05 Watts, o que o torna inviável.

A Figura 5.119 apresenta a análise das superfícies de custo total em relação à impedância percentual e TRI, para a densidade da corrente de AT constante.

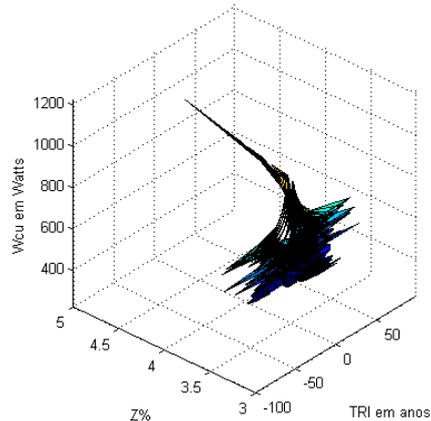


Figura 5.119 – Superfície das perdas em carga em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de BT, mantendo o condutor de AT constante, e do diâmetro da coluna do núcleo.

O projeto com a menor perda em carga, 372,04 Watts, possui largura do condutor de BT e indução magnética 50% acima proporcionando uma perda em vazio igual a 333,54 Watts. Este projeto torna-se inviável devido ao diâmetro da coluna do núcleo. Considerando o diâmetro da coluna do núcleo igual ao valor de referência com o aumento da largura do condutor de BT em 10% e da altura da janela em 50% tem-se um projeto com custo total R\$ 7.511,50, redução de 1%. A economia gerada pela substituição de cada unidade é igual a 13,95 R\$/ano com TRI igual a 1,35 anos. As perdas em vazio e em carga são iguais a 167,50 Watts e 555,03 Watts, respectivamente.

A análise das superfícies das perdas em carga em relação à impedância percentual e TRI em anos, para projetos com condutor de BT, de AT e diâmetro da coluna do núcleo variáveis são mostrados na Figura 5.155. A menor perda em carga ocorre em 246,64 Watts. Este projeto, porém, é inviável devido ao diâmetro da coluna do núcleo inadequado.

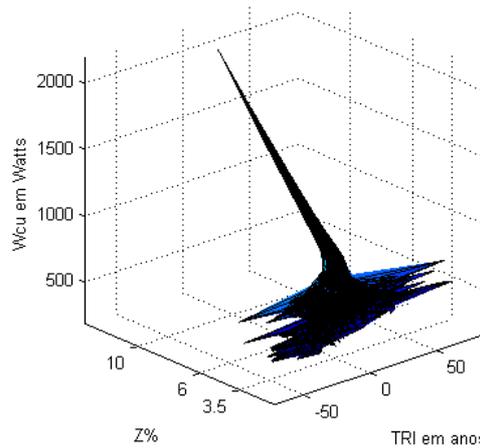


Figura 5.120 – Superfície das perdas em carga em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de BT, do condutor de AT e do diâmetro da coluna do núcleo.

A Figura 5.121 apresenta a análise das superfícies da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e TRI, para projetos com densidade da corrente de AT constante.

A menor temperatura do enrolamento está em 136,73 °C para projetos com largura do condutor de BT e indução magnética 50% acima dos valores de referência. As perdas em vazio são de 362,81 Watts e as perdas em carga são de 394,57 Watts com TRI de 9,6 anos. O projeto não é tecnicamente viável devido à indução magnética.

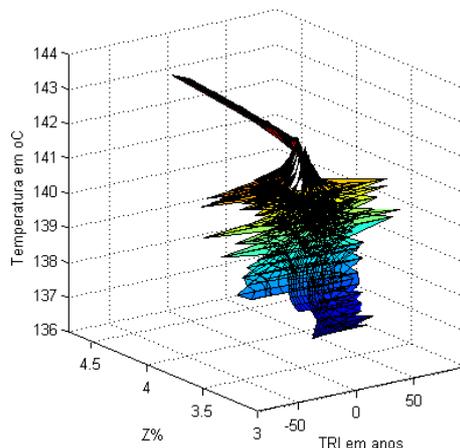


Figura 5.122 – Superfície da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de BT, com o condutor de AT constante, e diâmetro da coluna do núcleo variável.

Os projetos com condutor de AT constante e espessura do condutor de BT variável resultam na temperatura mínima do enrolamento de 137,44 °C. A espessura do condutor de BT e indução magnética estão 50% acima dos valores de referência. As perdas em vazio são iguais a 304,31 Watts e as perdas em carga de 400,52 Watts.

Este projeto é reprovado pelas perdas em vazio.

A análise das superfícies da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e o TRI, para projetos com densidade da corrente de BT, de AT e indução magnética variáveis é mostrada na Figura 5.157.

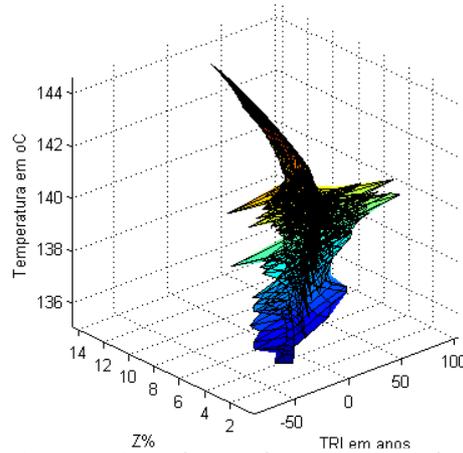


Figura 5.123 – Superfície da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de BT, do condutor de AT e do diâmetro da coluna do núcleo.

A temperatura mínima do enrolamento ocorre em 135,08 °C para o projeto com largura do condutor de BT, diâmetro do condutor de AT e indução magnética em 50% acima do valor padrão. Este projeto possui perdas em vazio igual a 304,31 Watts e em carga de 263,07 Watts, o que o torna impraticável devido à indução magnética.

Os projetos com espessura do condutor de BT, diâmetro do condutor de AT e indução magnética 50% acima do valor de referência possuem temperatura mínima do enrolamento de 135,66°C. As perdas em vazio são iguais a 304,31 Watts e em carga de 263,07 Watts.

*- Variação da densidade da corrente de AT, da espessura da isolação e da indução magnética do núcleo.*

A Figura 5.124 apresenta a análise das superfícies de custo total em relação à impedância percentual e ao TRI, com variação da altura da janela. O ponto mínimo de R\$ 6.920,60 indica o projeto com aumento do diâmetro do condutor de AT em 20%, redução da espessura da isolação e diâmetro da coluna do núcleo em 50% abaixo. As perdas em vazio e em carga são iguais a 288,72 Watts e 378,02 Watts, respectivamente. Este projeto torna-se inviável devido à indução necessária no núcleo.

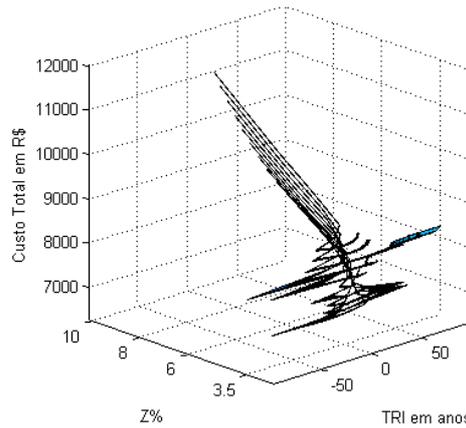


Figura 5.124 – Superfície de custo total em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de AT, da espessura da isolação e do diâmetro da coluna do núcleo.

Um projeto com redução na densidade da corrente de AT em 20%, da espessura da isolação em 50% e com indução magnética igual ao valor de referência o custo total é de R\$ 7.494,10 e redução de 1,2%. A economia gerada pela substituição de cada unidade é igual a 41,56 R\$/ano com TRI de 4,5 anos. As perdas em vazio e em carga são iguais a 164,11 Watts e 497,07 Watts, respectivamente.

A Figura 5.125 apresenta as superfícies das perdas em vazio em relação à impedância percentual e TRI. A menor perda em vazio encontra-se em 118,03 Watts para o projeto com aumento no diâmetro do condutor de AT, redução da espessura da isolação e da indução magnética em 50%. A perda em carga é igual a 503,87 Watts e este projeto não possui TRI de acordo com os parâmetros econômicos adotados.

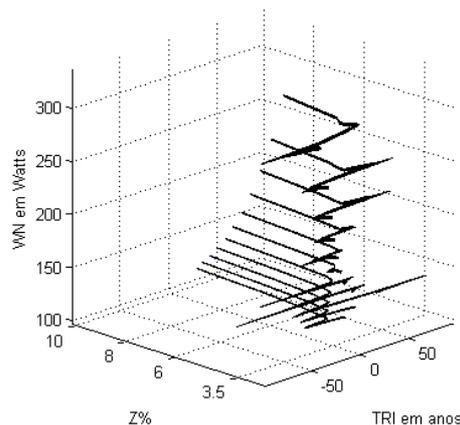


Figura 5.125 – Superfície de perda em vazio em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de AT, da espessura da isolação e do diâmetro da coluna do núcleo.

Um projeto com perda em vazio igual a 177,56 Watts ocorre com a redução da densidade da corrente de AT em 30%, espessura da isolação em 50% e indução magnética em 10%. Este projeto produz perdas em carga de 446,99 Watts e custo

total de R\$ 7.347,20, redução de 3,12%. A economia gerada pela substituição de cada unidade é de 52,00 R\$/ano e TRI de 2 anos.

As perdas em carga em relação à impedância percentual e ao TRI são mostradas na Figura 5.126.

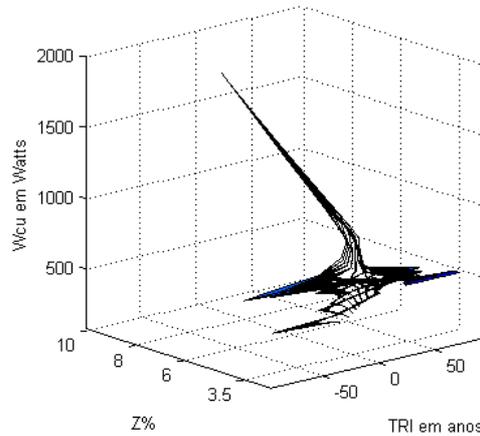


Figura 5.126 – Superfície de perda em carga em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de AT, da espessura da isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

A menor perda em carga encontra-se em 319,31 Watts para o projeto com aumento do diâmetro do condutor de AT, redução da espessura da isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo em 50%, tornando-o inviável.

A Figura 5.127 apresenta a superfície da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e TRI. O ponto com a menor temperatura do enrolamento é igual a 136,68 °C, para projetos com aumento do diâmetro do condutor de AT, da espessura da isolamento e da indução magnética em 50%.

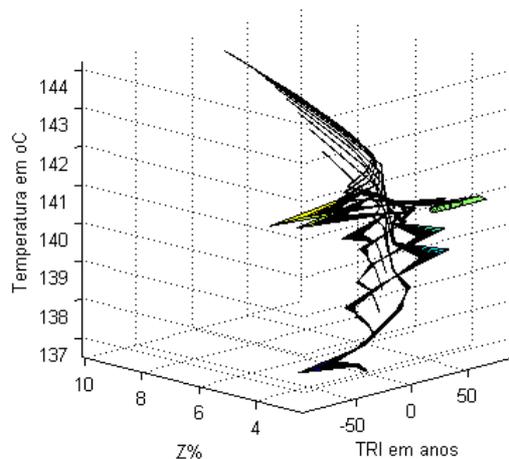


Figura 5.127 – Superfície da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do condutor de AT, da espessura da isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

- *Variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolação e da corrente de AT.*

O custo total mínimo de R\$ 7.484,70, com redução de 1,30%, indica o projeto com os condutores de BT e AT iguais ao padrão, redução da espessura da isolação e aumento da altura da janela do núcleo em 50%. Este projeto possui perdas em vazio e em carga de 161,89 Watts e 581,42 Watts, respectivamente, porém não apresenta TRI. Ao selecionar um projeto com aumento da largura do condutor de BT em 10%, redução da espessura da isolação e aumento altura da janela do núcleo em 50% com a densidade da corrente de AT constante, o custo total é de R\$ 7.497,50, sendo a redução de 1,14%. A economia gerada pela substituição é de 14,94 R\$/ano e o TRI de 1 ano. As perdas em vazio e em carga são de 166,64 Watts e 554,37 Watts, respectivamente.

O custo total mínimo de R\$ 7.554,20 indica o projeto com aumento da espessura do condutor de BT em 20%, redução da espessura da isolação e aumento do comprimento da culatra em 50%, com o diâmetro do condutor de AT constante. A economia gerada pela substituição por cada unidade é de 16,42 R\$/ano com TRI de 5 anos. As perdas em vazio e em carga são iguais a 168,19 Watts e 547,96 Watts, respectivamente.

A Figura 5.128 apresenta as superfícies de custo total em relação à impedância percentual e TRI.

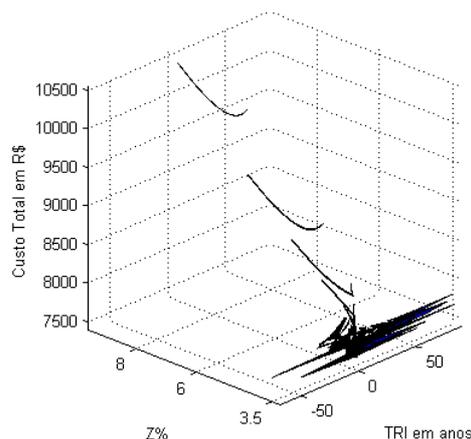


Figura 5.128 – Superfície do custo total em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da largura do condutor de BT, da espessura da isolação e do diâmetro do condutor de AT.

O custo total mínimo é igual a R\$ 7.494,10 com redução de 1,20% em relação ao custo total padrão e representa uma economia na substituição de cada unidade de 41,56 R\$/ano com TRI igual 4,5 anos. O projeto consiste no condutor de BT constante,

redução da espessura da isolação em 50% e aumento do diâmetro do condutor de AT em 20% em relação às dimensões de referência. As perdas em vazio e em carga são de 164,11 Watts e 497,07 Watts, respectivamente.

A Figura 5.129 apresenta as superfícies de custo total em relação à impedância percentual e TRI.

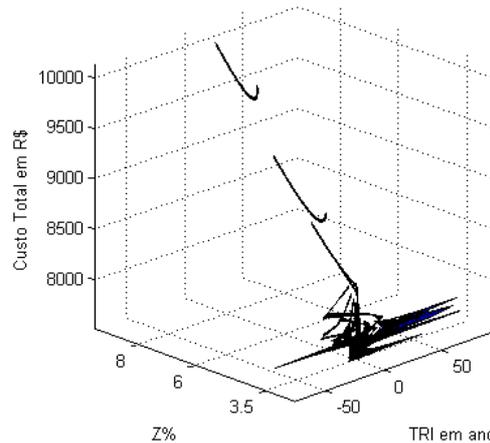


Figura 5.129 – Superfície do custo total em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da espessura do condutor de BT, da espessura da isolação e do diâmetro do condutor de AT.

O custo total mínimo é de R\$ 7.513,20, redução de 0,93%, representando em uma economia pela substituição por transformador igual a 38,46 R\$/ano e TRI de 4,9 anos. Este projeto consiste no aumento da espessura do condutor de BT em 50%, redução da espessura da isolação de 50% e aumento no diâmetro do condutor de AT igual a 10%. As perdas em vazio e em carga são de 168,19 Watts e 496,49 Watts, respectivamente.

Analisando em relação a menor perda em vazio de 138,12 Watts tem-se o projeto redução da largura do condutor de BT e da espessura da isolação em 50% com aumento na altura da janela do núcleo em 50%, mantendo o condutor de AT constante. As perdas em carga são de 879,02 Watts e o custo total de R\$ 7.887,60, ou seja, um aumento de 4,0%.

A perda em vazio mínima de 161,29 Watts indica o projeto com redução da espessura do condutor de BT e da isolação em 50% com aumento no comprimento da culatra do núcleo em 50%, mantendo o condutor de AT constante. As perdas em carga são de 850,13 Watts e o custo total de R\$ 8.007,80, ou seja, um aumento de 6,64%.

As superfícies das perdas em vazio para a análise em relação à impedância percentual e TRI em anos são apresentadas pela Figura 5.164. O ponto de mínimo ocorre em 138,12 Watts e indica o projeto com redução da largura do condutor de BT

e da espessura da isolação em 50% e aumento do diâmetro do condutor de AT em 50%. As perdas em carga são iguais a 721,33 Watts, porém este projeto não apresenta TRI.

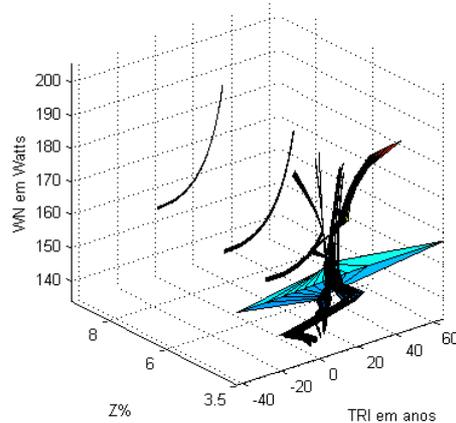


Figura 5.130 – Superfície das perdas em vazio em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da largura do condutor de BT, da espessura da isolação e do diâmetro do condutor de AT.

Um projeto com perda em vazio igual a 161,90 Watts ocorre com o projeto com redução da largura do condutor de BT em 10%, aumento da espessura da isolação em 50% e do diâmetro do condutor de AT em 10%. Este projeto produz perdas em carga de 570,45 Watts e custo total de R\$ 7.539,00, redução de 0,60%. A economia gerada pela substituição de cada unidade é de 11,93 R\$/ ano e TRI de 2,8 anos.

A Figura 5.131 apresenta as superfícies de perda em vazio em relação à impedância percentual e TRI. A menor perda em vazio é igual a 161,29 Watts e indica o projeto com redução da espessura do condutor de BT e da isolação em 50% e aumento no diâmetro do condutor de AT em 50%. A perda em carga é igual a 697,18 Watts, porém não possui TRI de acordo com os parâmetros econômicos adotados.

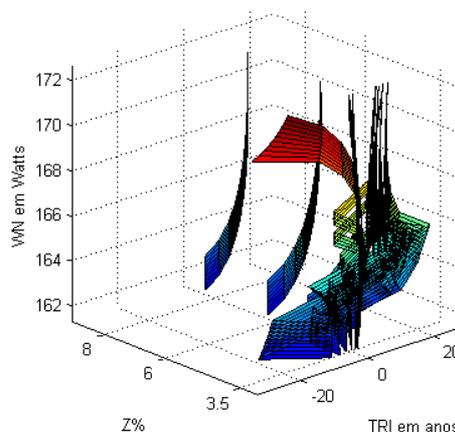


Figura 5.131 – Superfície da perda em vazio em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da espessura do condutor de BT, da espessura da isolação e do diâmetro do condutor de AT.

Analisando a menor perda em carga tem-se 482,23 Watts para projetos com aumento da largura do condutor de BT em 50%, redução da espessura da isolação em 50% e mantendo o condutor de AT constante. As perdas em vazio são de 185,66 Watts e o TRI de 11,38 anos.

A perda em carga mínima de 510,86 Watts indica o projeto com o aumento da espessura do condutor de BT e redução da isolação em 50% em relação ao valor de referência mantendo o condutor de AT constante. As perdas em vazio são iguais a 171,15 Watts e TRI de 8,13 anos.

A Figura 5.132 apresenta as superfícies das perdas em carga em relação à impedância percentual e TRI. O ponto de menor perda em carga é de 324,54 Watts e indica o projeto com aumento da largura do condutor de BT, da redução da espessura da isolação e do aumento do diâmetro do condutor de AT em 50% em relação ao valor padrão. As perdas em vazio são iguais a 185,66 Watts e TRI de 11,5 anos.

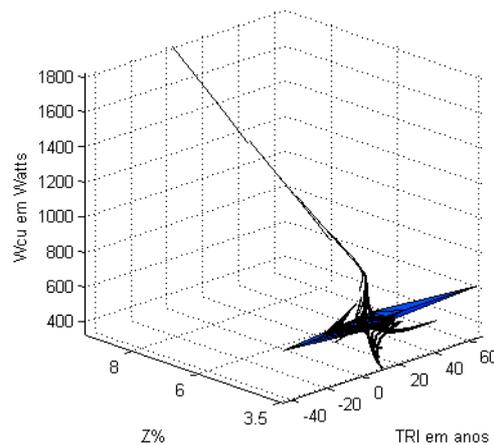


Figura 5.132 – Superfície das perdas em carga em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da largura do condutor de BT, da espessura da isolação e do diâmetro do condutor de AT.

A Figura 5.133 apresenta as superfícies das perdas em carga em relação à impedância percentual e ao TRI.

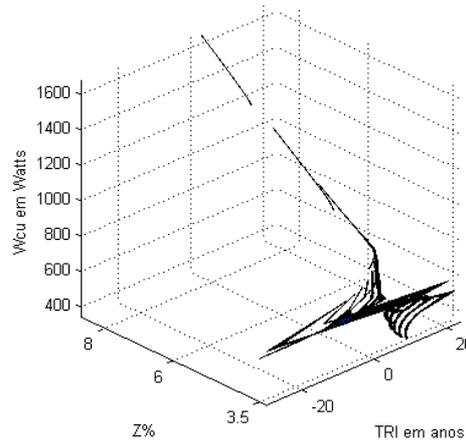


Figura 5.133 – Superfície da perda em carga em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da espessura do condutor de BT, da espessura da isolação e do diâmetro do condutor de AT.

O ponto mínimo de perda em carga ocorre em 341,04 Watts para o projeto com o aumento da espessura do condutor de BT, da redução da isolação e do aumento do diâmetro do condutor de AT em 50% em relação ao valor de referência. As perdas em vazio são iguais a 171,15 Watts e TRI igual a 10,43 anos.

A temperatura do enrolamento mínima de 139,53 °C é indicada pelo projeto com aumento da largura do condutor de BT e da espessura da isolação em 50% em relação ao valor de referência, mantendo o condutor de AT constante. As perdas em vazio e em carga são iguais a 201,52 Watts e 505,16 Watts, respectivamente, sem TRI. Vale ressaltar que, o diâmetro da coluna do núcleo é igual ao valor padrão.

Para a temperatura do enrolamento igual a 140,03 °C tem-se o projeto com aumento da espessura do condutor de BT e da isolação em 50% mantendo o condutor de AT constante. As perdas em vazio e em carga são iguais a 172,66 Watts e 511,71 Watts, com TRI igual a 9,5 anos.

A Figura 5.134 apresenta as superfícies da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e ao TRI. O ponto de temperatura do enrolamento mínima é igual a 138,09 °C para o projeto com aumento da largura do condutor de BT, da espessura da isolação e do diâmetro do condutor de AT em 50%. A perda em vazio é igual a 187,37 Watts e a perda em carga igual a 325,31Watts, com TRI igual a 12,1 anos.

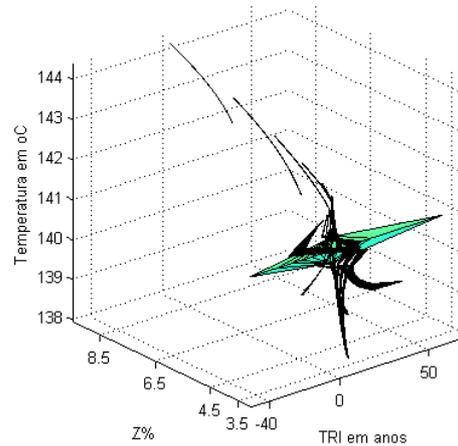


Figura 5.134 – Superfície da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da largura do condutor de BT, da espessura da isolamento e do diâmetro do condutor de AT.

A Figura 5.135 apresenta o ponto de mínimo para a temperatura do enrolamento de 138,54 °C. O projeto consiste no aumento da espessura do condutor de BT, da isolamento e do diâmetro do condutor de AT em 50% em relação ao valor de referência. As perdas em vazio e em carga são de 172,66 Watts e 341,67 Watts, com TRI de 10,9 anos.

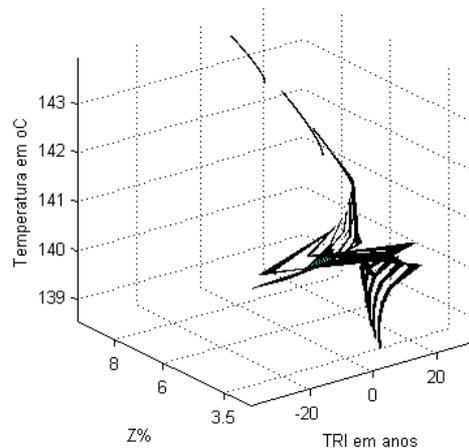


Figura 5.135 – Superfície da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação da espessura do condutor de BT, da espessura da isolamento e do diâmetro do condutor de AT.

- *Variação da densidade da corrente de AT, da distância entre enrolamentos e da indução magnética.*

O custo total mínimo de R\$ 6.805,00, redução de 10,27%, para projetos com aumento da altura da janela do núcleo, redução da distância entre enrolamentos e diâmetro da coluna do núcleo de 50%, mantendo o condutor de AT constante. As perdas em vazio e em carga são de 278,32 Watts e 433,39 Watts, respectivamente.

Porém, este projeto não é viável devido a indução necessária para a área da coluna do núcleo.

O custo total mínimo de R\$ 6.897,30, redução de 9,1%, para projetos com aumento no comprimento da culatra do núcleo, redução da distância entre enrolamentos e diâmetro da coluna do núcleo em 50%, com o condutor de AT constante. As perdas em vazio e em carga são de 286,78 Watts e 439,90 Watts, respectivamente. Conforme o caso anterior este projeto é inviável.

A Figura 5.136 apresenta o custo total em relação à impedância percentual e TRI. O custo mínimo encontra-se no ponto R\$ 6.825,70 para o projeto com aumento do diâmetro do condutor de AT em 20%, redução da distância entre enrolamentos e do diâmetro da coluna do núcleo em 50%. As perdas em vazio e em carga são de 282,66 Watts e 370,35 Watts, respectivamente. Este projeto é inviável devido à coluna do núcleo.

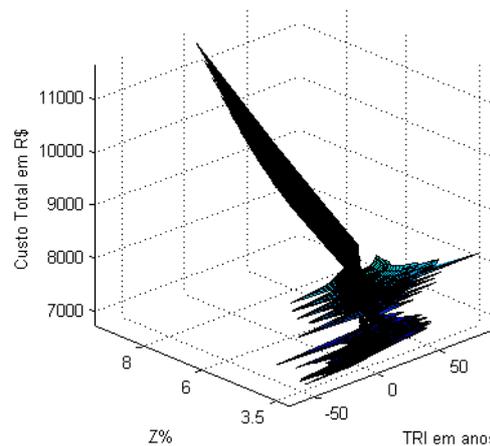


Figura 5.136 – Superfície do custo total em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do diâmetro do condutor de AT, da distância entre enrolamentos e do diâmetro da coluna do núcleo.

O projeto com aumento do diâmetro do condutor em 20%, redução da distância entre enrolamentos em 50% e diâmetro da coluna do núcleo igual ao valor de referência produz um custo total de R\$ 7.404,30, ou seja, redução de 2,36% em relação ao custo total do transformador padrão. A economia gerada pela substituição de cada unidade é igual a 47,32 R\$/ano e o TRI de 2,7 anos. As perdas em vazio e em carga são de 161,83 Watts e 489,40 Watts, respectivamente.

A Figura 5.137 apresenta as superfícies das perdas em vazio em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento. O ponto mínimo da perda em vazio é igual a 116,04 Watts para projetos com aumento do diâmetro do condutor de AT, redução da distância entre enrolamentos e aumento do diâmetro da coluna do

núcleo em 50%. As perdas em carga são iguais a 499,12 Watts, porém este projeto é inviável devido à indução necessária na coluna do núcleo.

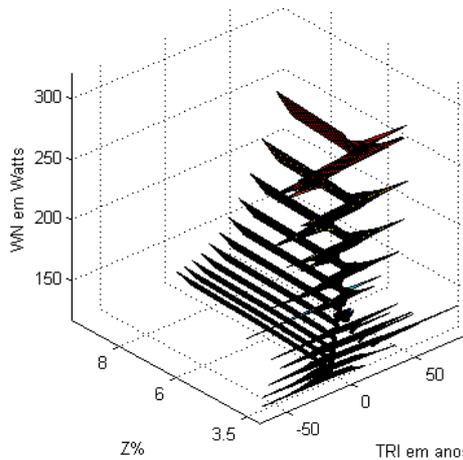


Figura 5.137 – Superfície das perdas em vazio em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do diâmetro do condutor de AT, da distância entre enrolamentos e do diâmetro da coluna do núcleo.

A Figura 5.138 apresenta as perdas em carga em relação à impedância percentual e ao TRI. A menor perda em carga encontra-se em 314,56 Watts com perda em vazio igual a 278,32 Watts. O projeto para esta perda possui um aumento do diâmetro do condutor de AT, redução da distância entre colunas e do diâmetro da coluna do núcleo em 50%. Este projeto é inviável devido o diâmetro da coluna do núcleo.

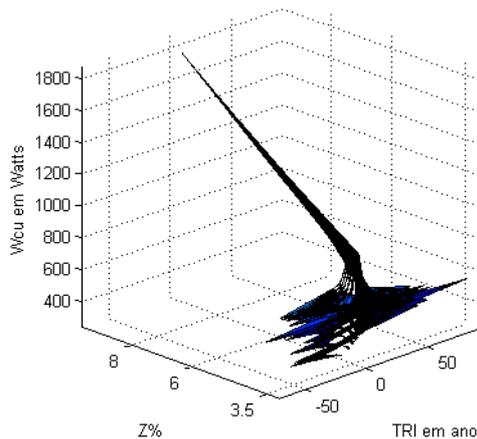


Figura 5.138 – Superfície das perdas em carga em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do diâmetro do condutor de AT, da distância entre enrolamentos e do diâmetro da coluna do núcleo.

A Figura 5.139 apresenta as superfícies da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e ao TRI. A temperatura do enrolamento mínima é igual a 136,67 °C. Este projeto possui um aumento no diâmetro do condutor de AT e

na distância entre enrolamentos em 50% e redução no diâmetro da coluna do núcleo em 50% produzindo perdas em vazio e em carga iguais a 292,13 Watts e 324 Watts.

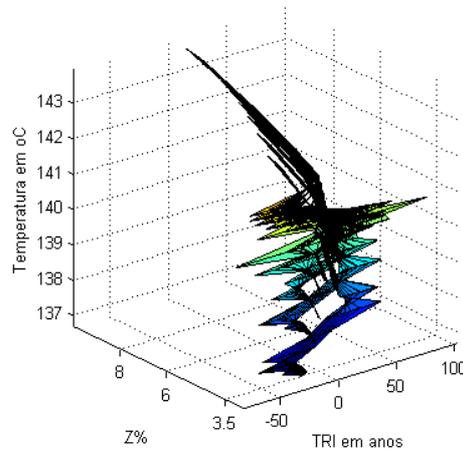


Figura 5.139 – Superfície da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do diâmetro do condutor de AT, da distância entre enrolamentos e do diâmetro da coluna do núcleo.

- *Varição do condutor de AT, da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos.*

A Figura 5.140 apresenta as superfícies de custo total em relação à impedância percentual e TRI. O custo total mínimo para esta superfície é igual a R\$ 7.174,00 para o projeto com aumento do diâmetro do condutor de AT em 20%, redução da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos em 50%. As perdas em vazio e em carga são iguais a 160,27 Watts e 410,42 Watts, respectivamente. Porém, este projeto não apresenta TRI.

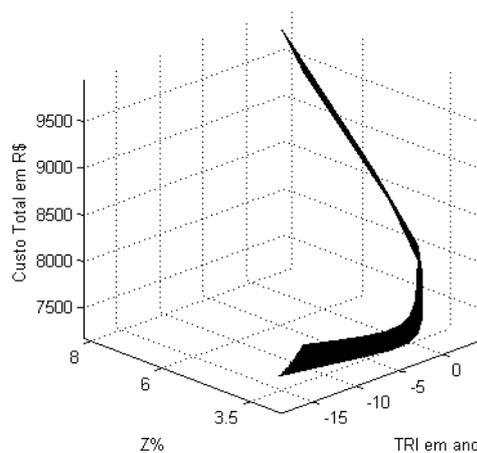


Figura 5.140 – Superfície de custo total em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do diâmetro do condutor de AT, da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos.

O projeto com custo total igual a R\$ 7.537,20, redução de 0,61%, indica o projeto com redução do diâmetro do condutor de AT em 10%, redução da espessura da isolação em 50% e aumento da distância entre enrolamento em 30%. As perdas em vazio e em carga são iguais a 169,87 Watts e 589,10 Watts com TRI igual a 0,39 anos.

As superfícies das perdas em vazio em relação à impedância percentual e ao TRI são mostradas na Figura 5.141. A menor perda em vazio encontra-se em 158,05 Watts e indica o projeto com o aumento do diâmetro do condutor de AT, redução da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos em 50%. As perdas em carga são iguais a 340,04 Watts, porém este projeto não apresenta TRI.

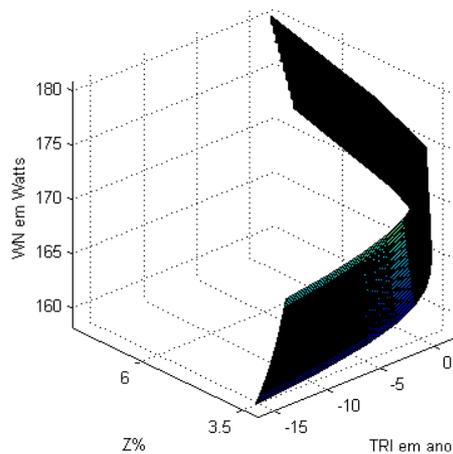


Figura 5.141 – Superfície das perdas em vazio em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do diâmetro do condutor de AT, da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos.

A Figura 5.142 apresenta as superfícies das perdas em carga em relação à impedância percentual e ao TRI. O ponto de menor perda em carga são 340,04 Watts e indica o projeto com aumento do diâmetro do condutor de AT, redução da espessura da isolação e redução da distância entre enrolamentos em 50%. As perdas em vazio são iguais a 158,05 Watts, porém este projeto não possui TRI.

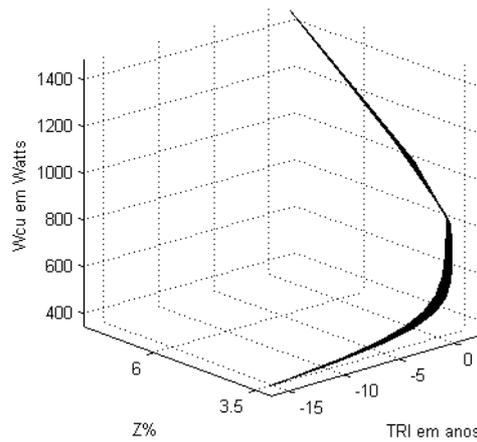


Figura 5.142 – Superfície das perdas em carga em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do diâmetro do condutor de AT, da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos.

A Figura 5.143 apresenta a superfície da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e ao TRI. A menor temperatura do enrolamento é igual a 81,32 °C para o projeto com redução do diâmetro do enrolamento de AT, da espessura da isolação e da distância entre enrolamento em 50%. As perdas em vazio e em carga são iguais a 180,11 Watts e 340,04 Watts, respectivamente. O projeto possui tempo de retorno de 0,5 anos, porém sua impedância percentual é igual a 7,3%, no qual, reprovava o projeto.

Um projeto com impedância percentual igual a 3,5% e indicado anteriormente para o custo total, possui redução do diâmetro do condutor de AT em 10%, redução da espessura da isolação em 50% e aumento da distância entre enrolamentos igual a 30% apresenta temperatura do enrolamento igual a 85,6 °C.

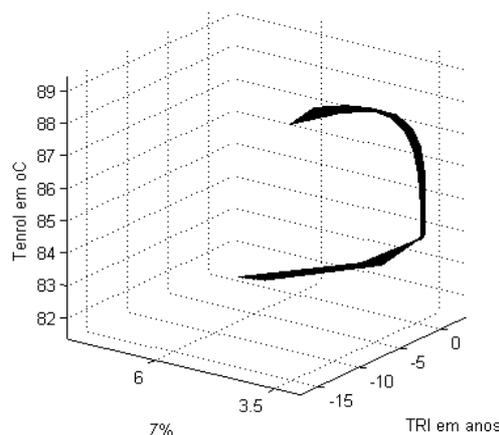


Figura 5.143 – Superfície da temperatura do enrolamento em relação à impedância percentual e tempo de retorno de investimento para projetos com variação do diâmetro do condutor de AT, da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos.

#### 5.4 COMENTÁRIOS

A equação de capitalização adotada para o custo total foi à utilizada pela metodologia PROPHET. No Brasil, as concessionárias devem obedecer ao órgão regulatório ANEEL onde a capitalização das perdas é dada pela remuneração do ativo durante um ciclo tarifário de 5 anos. O benefício ganho pela eficiência é contabilizado no próximo ciclo com redução no imposto e incremento na taxa WACC (custo médio do capital empregado). Para trabalho futuro a capitalização para o emprego do transformador de distribuição eficiente deve seguir a metodologia da ANEEL.

Os projetos de transformadores gerados pelas matrizes estão organizados por conjunto de soluções. As análises verificam o projeto com menor custo total, menor perda a vazio, menor perda em carga e menor temperatura do ponto mais quente. Esses pontos podem ser escolhidos pelo cliente. Os valores do ponto mais quente do enrolamento apresentados neste capítulo segue o cálculo normalizado e temperatura ambiente de 40 °C. Segundo as análises, o menor custo total para o transformador trifásico de 45 kVA com a curva de carga considerada neste capítulo, taxa de juros de 8% a.a., tempo de análise de 10 anos e custo de energia de 93,40 R\$/MWh foi obtida com o projeto que possui espessura do condutor de BT e da isolação 50% menor que o valor de referência, com calço e cabeça da bobina 40% menor que o valor padrão. A perda em carga para este projeto reduz 53%, porém não se tem tempo de retorno do investimento (TRI).

Os projetos com menor custo total para a combinação da variação do condutor de BT, da espessura da isolação e da indução magnética não apresentam TRI e a impedância percentual é maior que o valor da norma para o transformador trifásico de 45 kVA.

O custo total mínimo para os projetos com variação do condutor de AT, distância entre enrolamentos e tamanho do calço atende às restrições técnicas. Porém, para o projeto com menor perda em vazio não se tem TRI. E para o projeto com menor perda em carga, maior é a massa do enrolamento de AT, mas com TRI maior que 5 anos.

Para os projetos com variação no condutor de AT, de BT e da indução magnética, o projeto com menor custo total é aquele com indução magnética maior em 50% do valor de referência o que o torna impraticável. Para o projeto com menor perda em vazio, as perdas totais encontram-se acima da tolerância da norma, além de

não possuir TRI. E para menores perdas em carga e ponto mais quente do enrolamento, a indução magnética é impraticável.

Os projetos com variação do condutor de AT, da espessura da isolação e indução magnética apresentam o menor custo total para a redução da coluna do núcleo em 50%, o que torna a indução magnética impraticável. Um segundo ponto nas superfícies com menor custo total é aquele projeto onde a indução magnética é mantida constante e igual ao valor de referência e redução na densidade da corrente de AT em 20%. Uma solução para projetos com menores perdas a vazio é a redução da indução magnética em 10%, sendo o TRI de 2 anos. E para o projeto com menor temperatura do ponto mais quente possui indução magnética 50% maior do que o valor padrão. Neste caso, é nítida a influência do diâmetro da coluna do núcleo na temperatura, ou seja, as perdas no núcleo para este tipo de projeto não podem ser desprezadas durante o ensaio de elevação de temperatura.

Para os projetos com variação nos condutores de BT, de AT e espessura da isolação, os projetos que produzem menor custo total, menor perda em carga e menor temperatura do ponto mais quente possuem TRI maior que o tempo de análise considerado (10 anos). Para a menor temperatura do ponto mais quente tem-se o aumento de 50% dos três parâmetros construtivos analisados. E para a menor perda em vazio, o projeto possui um aumento no custo total de 4% e um aumento da altura da janela.

Os pontos de mínimo nas superfícies de custo total, perda a vazio, perda em carga e temperatura do ponto mais quente apresentam indução magnética 50% menor para os projetos com variação no condutor de AT, distância entre enrolamento e indução magnética. Para as chapas de aço-silício utilizadas atualmente o valor da indução é impraticável. Observa-se que para os projetos onde se tem a variação da indução magnética os pontos mínimos são determinados pelo diâmetro da coluna do núcleo. Nestes casos, sugere-se uma variação no valor de indução de 10% acima ou abaixo do valor padrão.

E considerando os projetos com variação do condutor de AT, da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos, o menor custo total, a menor perda a vazio e a menor perda em carga não possui TRI. Isto ocorre com o aumento do condutor de AT e redução da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos. E a menor temperatura do ponto mais quente ocorre para um projeto com a redução do diâmetro do condutor de AT e da espessura da isolação, com aumento da distância entre enrolamentos.

A determinação do ponto de menor custo total atendendo às exigências técnicas e econômicas será realizada por processo de varredura nos conjuntos de projeto no Capítulo 6.

## *CAPÍTULO 6*

# *PROJETO ÓTIMO BASEADO NAS SUPERFÍCIES DE PROJETO*

A determinação do projeto ótimo do transformador está relacionada ao menor custo de fabricação e das perdas capitalizadas.

O assunto é estudado desde 1959 com o trabalho dos engenheiros da Westinghouse Electric Corporation [18]. A abordagem é teórica e baseada nos projetos que apresentam variação da reatância e/ou das perdas. O estudo não apresenta a relação das perdas com a variação da carga e conseqüentemente o custo.

O trabalho “Economics and Power Transformer Design” [24] apresentado em 1963 enfatiza as perdas em carga e a potência para a redução do custo total. É considerado que o aumento do volume da massa reduz as perdas.

A proporção entre determinados parâmetros construtivos define o nível das perdas, ou seja, o aumento da massa de aço-silício e de cobre pode ou não reduzir as perdas.

Atualmente, a procura do projeto ótimo de transformador tem sido auxiliada pelas ferramentas computacionais, como programação geométrica, algoritmo genético e inteligência artificial [22,25]. Nestes casos, os parâmetros utilizados são a tensão primária e secundária, a potência, temperatura, rendimento e a razão das perdas em vazio pelas perdas em carga. A função objetiva é composta pela soma das massas e dos volumes.

Neste capítulo a proposta é determinar o menor valor para o custo total que engloba o custo de fabricação e das perdas capitalizadas. O ponto mínimo define todos os parâmetros construtivos do transformador para a obtenção das perdas. A partir do conjunto de soluções definidos no Capítulo 5 é especificada uma metodologia para procura do ponto mínimo estabelecendo o projeto ótimo de transformadores de distribuição.

### 6.1. PROCEDIMENTO PARA A OTIMIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES

A definição de projetos ótimos ou a aplicação ótima de projetos tem sido auxiliada pelas técnicas de otimização. Tais técnicas procuram a melhor solução atendendo ou não algumas exigências que devem ser satisfeitas.

A modelagem matemática de um projeto é definida por uma função chamada de função custo ou função objetiva. A otimização tem o objetivo de minimizar ou maximizar as variáveis desta função. Quando a função custo não possui nenhuma exigência o processo é chamado de otimização sem restrições.

A otimização com restrições possui alguns limites para a determinação do ponto ótimo. Essas restrições são do tipo linear, não-linear, geométricas e não-diferenciáveis definindo o tipo de otimização a ser aplicada no projeto ou na atuação deste.

A estrutura básica para uma função custo de uma variável com restrições é exemplificada na Equação (6.1) para a obtenção de um ponto mínimo ou máximo.

$$\begin{aligned} \min(\max)f(x) \quad x \in R^n. \\ \text{Com restrições:} \\ c_i(x) = 0, \quad i \in E. \\ c_i(x) \geq 0, \quad i \in I. \end{aligned} \tag{6.1}$$

Onde  $E$  e  $I$  são subconjuntos de  $R$ .

Um procedimento conceitual e comparativo para pontos estacionários, pontos onde a derivada de primeira ou de segunda ordem da função custo é zero, pode ser concebido a partir da expansão da série de Taylor, Equação (6.2).

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \frac{\Delta x f^{(1)}(x)}{1!} + \frac{(\Delta x)^2 f^{(2)}(x)}{2!} + \frac{(\Delta x)^3 f^{(3)}(x)}{3!} + \dots \tag{6.2}$$

Supondo o ponto estacionário em  $x=x_a$  e a derivada de primeira ordem  $f^{(1)}(x_a)$  igual a zero obtém-se a Equação (6.3).

$$f(x_a + \Delta x) - f(x_a) \cong \frac{(\Delta x)^2 f^{(2)}(x_a)}{2}. \tag{6.3}$$

Se a derivada de segunda ordem,  $f^{(2)}(x_a)$ , for maior que zero resulta na Equação (6.4).

$$\begin{aligned} f(x_a + \Delta x) - f(x_a) &> 0 \\ f(x_a + \Delta x) &> f(x_a). \end{aligned} \quad (6.4)$$

Onde  $\Delta x$  é um acréscimo infinitesimal.

Portanto,  $x_a$  é um ponto de mínimo local. Por outro lado, se a derivada  $f^{(2)}(x_a)$  for menor que zero tem-se a Equação (6.5). Logo,  $x_a$  é um ponto de máximo local.

$$\begin{aligned} f(x_a + \Delta x) - f(x_a) &< 0 \\ f(x_a + \Delta x) &< f(x_a). \end{aligned} \quad (6.5)$$

Este conceito tem o objetivo de facilitar a pesquisa do ponto de mínimo nas superfícies de projeto descritas no Capítulo 5. As superfícies são formadas pelas matrizes onde cada elemento representa um projeto completo de transformador e constituem o conjunto de soluções. A função custo é definida na Equação (6.6).

$$\begin{aligned} &\min(C_{Total}). \\ C_{Total} &= C_{TR/Analise} + C_{W0} + C_{WL}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Sendo,

$$C_{W0} = T_{W0} \cdot W_N \cdot \frac{(1+j)^n - 1}{(1+j)^n \cdot j}. \quad (6.7)$$

$$C_{WL} = T_{WL} \cdot W_{Cu} \cdot \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{KVA_i}{KVA_N} \right)^2 \cdot \left( \frac{(1+j)^n - 1}{(1+j)^n \cdot j} \right). \quad (6.8)$$

Onde:

$T_{W0}$  é a tarifa para as perdas em vazio em R\$/kW;

$T_{WL}$  é a tarifa para as perdas em carga em R\$/kW;

$j$  é a taxa de juros;

$n$  é o período de análise em anos;

$KVA_i$  é a potência transformada;

$KVA_N$  é a potência nominal do transformador;

$W_N$  é a perda em vazio em W;

$W_{Cu}$  é a perda no cobre em W.

Os pontos nas superfícies de custo total representam os elementos das matrizes tridimensionais. O procedimento comparativo e iterativo para a determinação do ponto mínimo na superfície de custo total ocorre da seguinte maneira:

- O custo mínimo inicial é um valor aleatório;
- Para a iteração  $k$ , na coluna  $j$ , cada elemento,  $c(i,j,k)$ , da matriz tridimensional de custo total é comparado com o valor do custo mínimo, Equação (6.9);

$$[c(1, j, k), c(2, j, k), \dots, c(N, j, k)]^T. \quad (6.9)$$

$$c(i, j, k) < C_{Mínimo}.$$

- O processo de pesquisa do custo mínimo no conjunto de soluções de projeto,  $S_p$ , deve seguir às restrições técnicas de perdas em vazio, total e impedância percentual estabelecido segundo ABNT [1], Equações (6.10) a (6.12);

$$W_N(i, j, k) \leq W_{N(ABNT)}. \quad (6.10)$$

$$W_{Total}(i, j, k) \leq W_{Total(ABNT)}. \quad (6.11)$$

$$Z\%(i, j, k) \leq Z\%(ABNT). \quad (6.12)$$

- A restrição econômica indicada pelo tempo de retorno de investimento ( $TRI$ ) é decisiva para a definição do projeto com menor custo total, Equação (6.13).

$$0 < TRI(i, j, k) \leq 5anos. \quad (6.13)$$

A Figura 6.1 apresenta o fluxograma da rotina de pesquisa do ponto mínimo no conjunto de soluções.

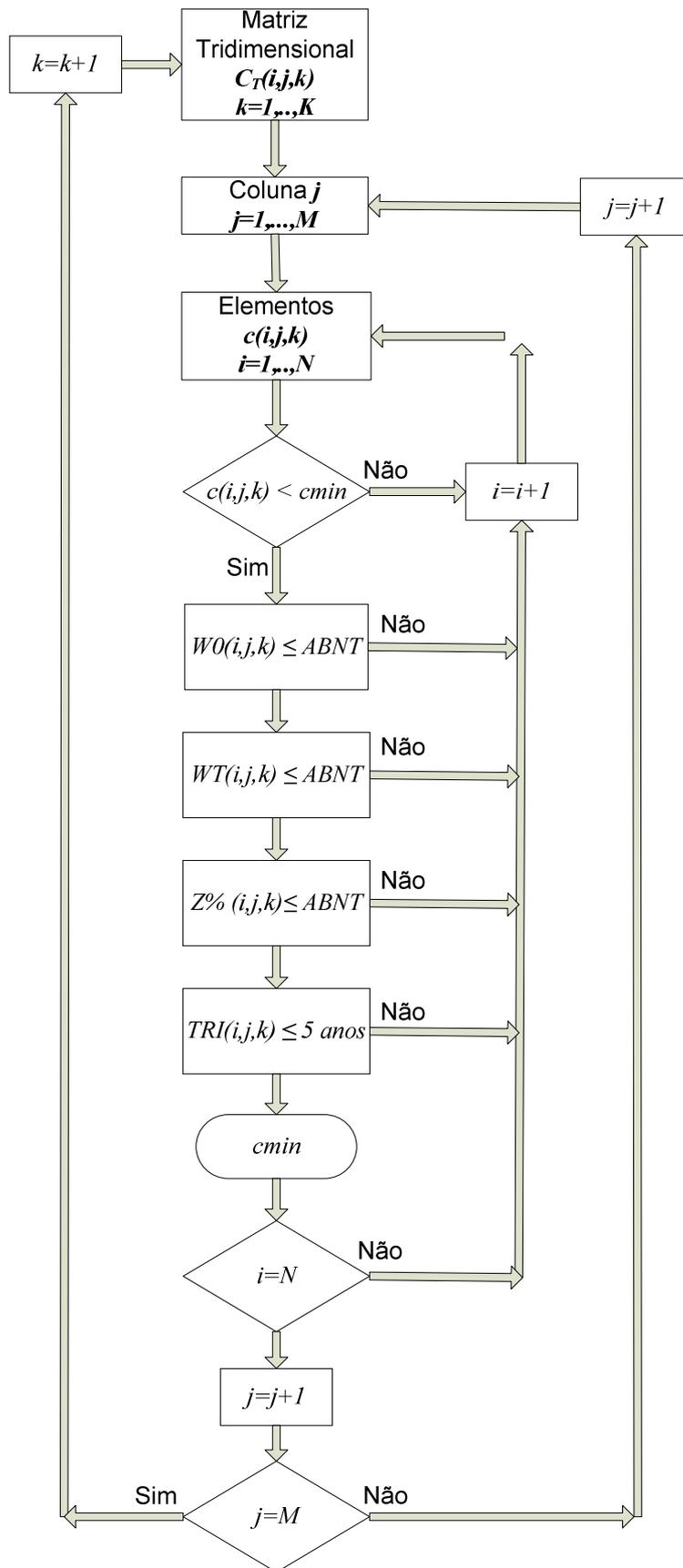


Figura 6.1 – Fluxograma de pesquisa do ponto mínimo local nas superfícies de custo total.

O ponto de mínimo local, determinado nas superfícies de custo total, em alguns casos, pode apresentar um custo de fabricação elevado para a expectativa do comprador. Os pontos de mínimos globais localizados entre o mínimo local e o custo total padrão podem fornecer outras opções de projeto para avaliação econômica do comprador e fabricante.

O procedimento de pesquisa e determinação destes pontos ocorre nas seguintes etapas:

- Determinar o fator  $R$ , ou seja, a razão entre o custo mínimo e o custo total padrão;
- Se  $R$  for maior que um, indica que o ponto mínimo está muito próximo do custo total padrão e, neste intervalo, não possui projetos que atendem às restrições técnicas e econômica. Caso  $R < 1$  define-se um multiplicador;
- Para cada iteração calcula-se o multiplicador,  $M(k)$ , conforme Equação (6.14);

$$M(k) = R + 0,1 \cdot k. \quad (6.14)$$

- Caso  $M(k) < 1$  é estimado o custo total mínimo,  $C_{Min}(k)$ , localizado após o ponto de mínimo local, Equação (6.15). O multiplicador tem a finalidade de partir do ponto de mínimo local em direção ao valor do custo total padrão. Neste percurso são coletados os pontos de mínimos globais;

$$C_{Min}(k) = C_{Padrão} \cdot M(k). \quad (6.15)$$

- Para a iteração  $k$ , na coluna  $j$ , compara-se o valor do elemento matricial  $c(i,j,z)$  com o custo total mínimo estimado  $C_{Min}(k)$ , Equação (6.16);

$$C_{Min}(k-1) < c(i, j, z) < C_{Min}(k). \quad (6.16)$$

- Os valores de custo mínimo entre o ponto de mínimo local e custo total padrão deve atender às restrições das Equações (6.10) a (6.13).

A Figura 6.2 apresenta o fluxograma para a determinação de pontos de custo total menor do que o valor padrão.

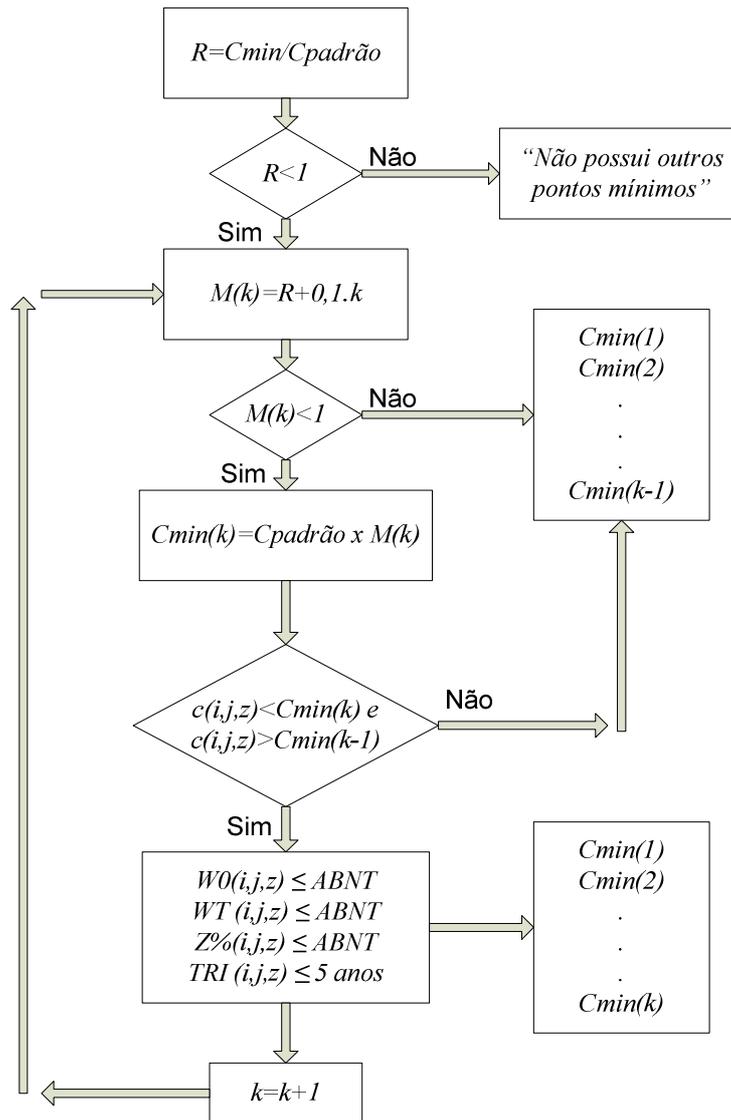


Figura 6.2 – Fluxograma de pesquisa de custo total menor que o valor padrão nas superfícies.

## 6.2. OTIMIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE CUSTO TOTAL

A otimização das superfícies de custo total é aplicada em quatro tipos de carregamentos e são apresentados os conjuntos de soluções de projeto para as restrições técnicas e econômicas consideradas.

### 6.2.1 CUSTO TOTAL MÍNIMO PARA FATOR DE ENERGIA CONSUMIDA IGUAL A 12,56

As superfícies construídas no Capítulo 5 para a demanda da Figura 6.3 formam o conjunto de soluções de projetos analisados segundos às restrições técnicas e econômicas.

A demanda comercial da Figura 6.3 apresenta o fator de energia consumida igual a 12,56. Este fator pode ser interpretado como o tempo de operação do transformador sob carga nominal, Equação (6.17).

$$FE = \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{kVA_i}{kVA_N} \right)^2. \quad (6.17)$$

A otimização comparativa e iterativa pesquisa nas superfícies as melhores soluções. Para demonstração foi utilizado o projeto do transformador trifásico 45 kVA e classe de isolamento 15 kV. O custo de energia é de 93,40 R\$/MWh, a taxa de juros é de 8% ao ano e o tempo de análise de 10 anos.

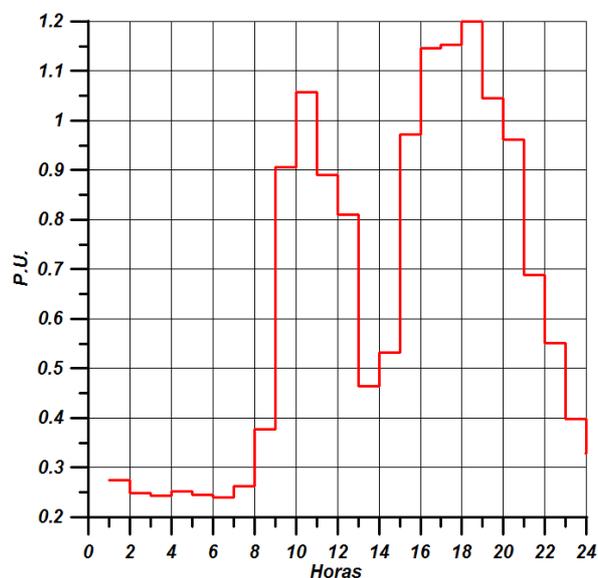


Figura 6.3 – Demanda comercial na região de concessão da AES-Sul extrapolada para 1,2 p.u.

Os conjuntos de soluções de projeto que apresentam opções de projetos viáveis são os seguintes:

a) *Conjunto dos projetos que possuem variação na densidade da corrente de AT, na distância entre enrolamentos e na cabeça da bobina.*

O elemento  $c(1,9,21)$  é o ponto mínimo entre as superfícies da matriz de custo total com variação na altura da janela, Figura 6.4. A variação da altura da janela ocorre devido à disposição do condutor de BT que está deitado para o projeto calculado.

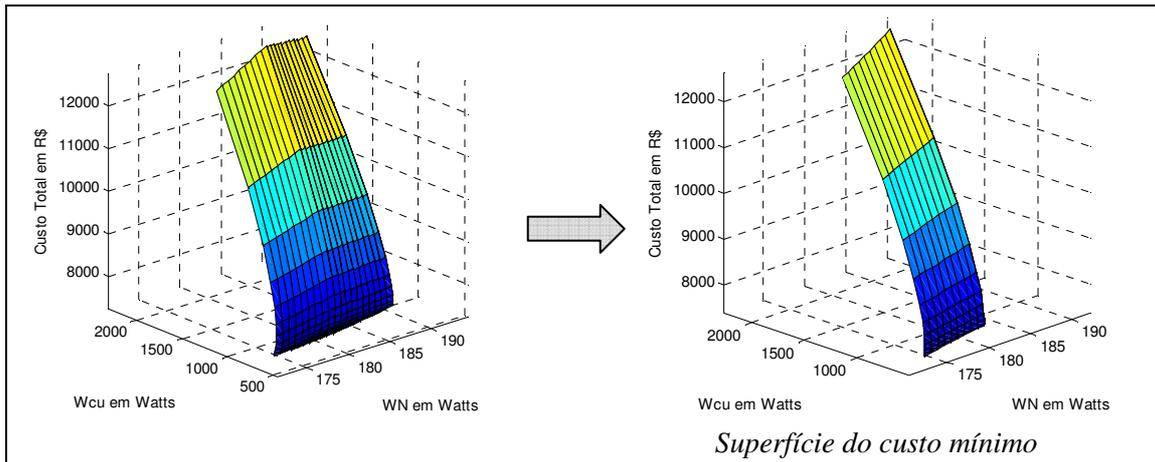


Figura 6.4 – Superfícies de custo total para variação da altura da janela.

O projeto no ponto mínimo da superfície, em relação aos valores de referência, tem redução da densidade da corrente de AT em 50%, distância entre enrolamentos em 30% e altura da cabeça da bobina em 40%.

As perdas em vazio e em carga são de 173,83 Watts e 509,82 Watts, respectivamente, ou seja, uma redução de 4,44% e 33,6%. Isto produz uma redução de 5,66% no custo total com tempo de retorno de investimento de 2,5 anos e uma economia por unidade de 117,14 R\$/ano para os parâmetros econômicos adotados. A redução de energia deste transformador em relação ao padrão é de 1,3248 MWh/ano.

A massa de cobre para o projeto ótimo tem um acréscimo de 44,94%. Considerando a temperatura ambiente de 40°C para o patamar entre as 17 e 18 horas têm-se a temperatura do topo do óleo igual a 106,66°C e para o ponto mais quente do enrolamento de 140,13°C. Em relação ao projeto padrão obtém-se uma redução de 1,16°C.

Os pontos de custo total entre o ponto de mínimo e o valor do custo total padrão são determinados segundo o fluxograma da Figura 6.2 e apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2. A Tabela 6.1 apresenta dez projetos com a redução de custo total, densidade da corrente de AT, distância entre enrolamentos, altura da cabeça da bobina e redução das perdas em vazio e em carga.

A Tabela 6.2 apresenta o tempo de retorno do investimento, a economia por substituição por unidade e a redução de energia para estes pontos.

Tabela 6.1 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Distância entre Enrolamentos</i>	<i>Altura da Cabeça da Bobina</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	5,66	50% menor	30% menor	40 % menor	4,44	33,60
1	5,60	40% menor	50% menor	10% maior	3,15	30,36
2	5,40	40% menor	40% menor	10% maior	2,70	30,11
3	5,35	40% menor	30% menor	10% menor	3,03	29,84
4	4,91	40% menor	30% menor	30% maior	1,46	29,88
5	4,84	50% menor	20% menor	10% maior	2,01	33,42
6	4,78	40% menor	40% maior	30% menor	0,64	28,10
7	4,67	30% menor	20% menor	Padrão	1,93	24,87
8	4,66	30% menor	40% menor	50% maior	0,90	25,50
9	4,34	50% menor	20% maior	40% menor	2,17	32,52
10	4,04	40% menor	20% maior	40% menor	1,66	23,68

Tabela 6.2 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	5,66	2,50	117,14	1,32
1	5,60	2,06	104,56	1,11
2	5,40	2,20	103,07	1,10
3	5,35	2,22	102,69	1,09
4	4,91	2,49	100,47	1,07
5	4,84	3,00	112,93	1,20
6	4,78	3,26	93,36	0,99
7	4,67	1,98	84,70	0,90
8	4,66	2,02	85,23	0,91
9	4,34	3,31	110,21	1,18
10	4,04	2,38	80,36	0,86

O ponto de mínimo nas superfícies de custo total que considera a variação no comprimento da culatra é  $c(2,11,20)$ , Figura 6.5.

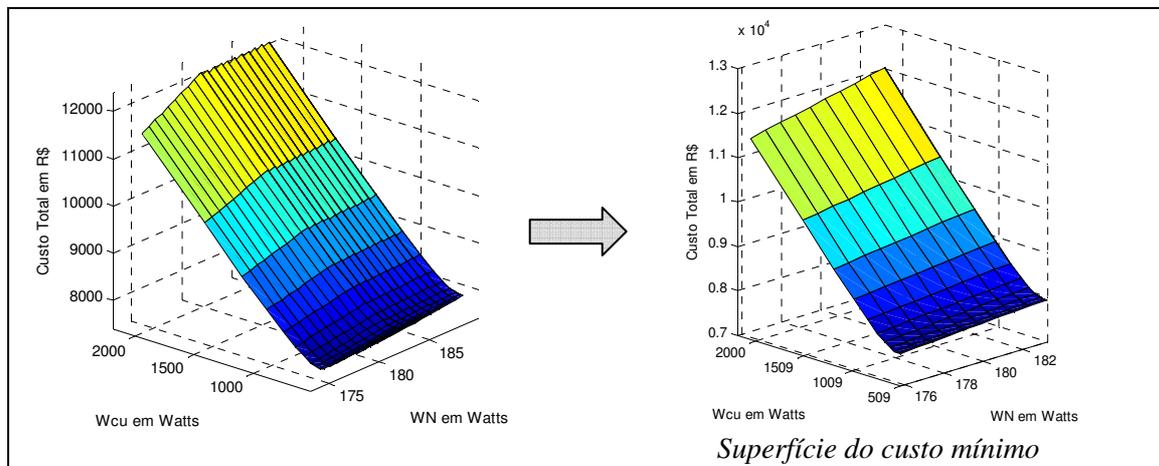


Figura 6.5 – Superfícies de custo total para variação do comprimento da culatra.

O projeto ótimo possui redução da densidade da corrente de AT em 40%, da distância entre enrolamentos em 50% e da cabeça da bobina em 30%. A redução das perdas em vazio e em carga são iguais a 3,36% e 29,96%, respectivamente. A energia economizada é de 1,10 MWh/ano. A redução do custo total deste projeto em relação ao padrão é de 5,50% com tempo de retorno do investimento de 2,14 anos e uma economia por unidade de 103,52 R\$/ano.

As Tabelas 6.3 e 6.4 apresentam os projetos com custo total menor que o valor padrão atendendo às exigências técnicas e econômicas.

Tabela 6.3 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Distância entre Enrolamentos</i>	<i>Altura da Cabeça da Bobina</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	5,50	40% menor	50% menor	30% menor	3,36	29,96
1	4,44	20% menor	40% menor	30% menor	2,90	19,23
2	4,34	30% menor	10% menor	40% menor	1,90	24,19
3	4,28	40% menor	Padrão	40% menor	1,45	28,70
4	4,23	20% menor	50% menor	20% maior	1,53	19,67
5	3,69	10% menor	50% menor	40% menor	3,72	12,09
6	3,59	20% menor	30% maior	30% maior	0,26	19,02
7	3,51	20% menor	20% menor	10% maior	0,54	18,64

Tabela 6.4 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

$k$	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	5,50	2,14	103,52	1,10
1	4,44	1,16	67,56	0,72
2	4,34	2,18	82,39	0,88
3	4,28	2,88	96,55	1,03
4	4,23	1,36	66,98	0,71
5	3,69	0,40	45,30	0,48
6	3,59	1,84	62,93	0,67
7	3,51	1,87	62,11	0,66

b) Conjunto dos projetos que possuem variação da densidade da corrente de BT, de AT e da indução magnética.

Neste conjunto de projetos com variação na altura da janela – devido à disposição do condutor de BT – o projeto ótimo é o elemento  $c(8,1,16)$  nas superfícies da Figura 6.6. Este projeto possui redução da largura do condutor de BT em 20%, da densidade da corrente de AT em 50% e da indução magnética em 10%.

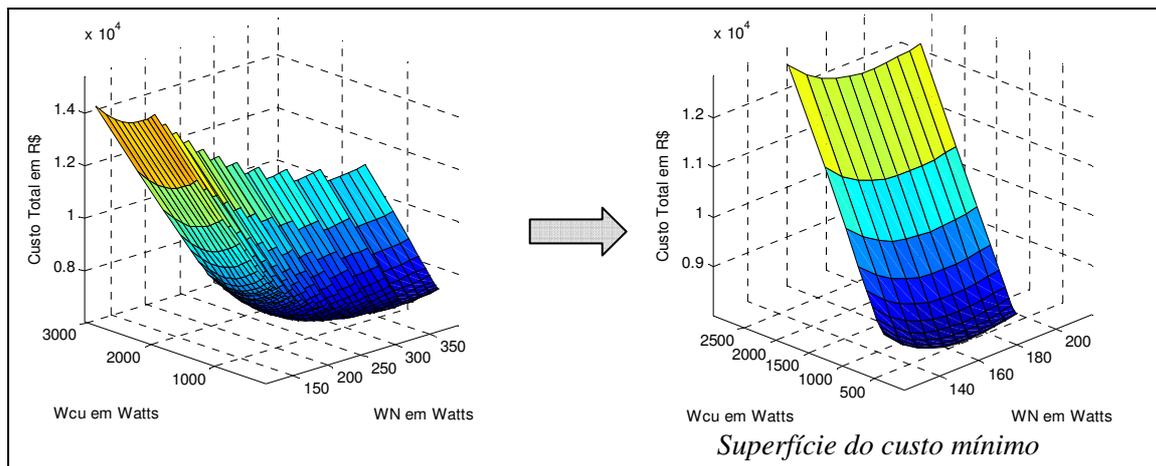


Figura 6.6 – Superfícies de custo total para variação da altura da janela.

O projeto de custo total mínimo apresenta redução das perdas em vazio e em carga de 14,44% e 19,46%, respectivamente, e de energia de 0,91 MWh/ano. O custo total é menor em 1,78% do valor de referência com TRI de 5,06 anos e economia por unidade de 85,48 R\$/ano.

As Tabelas 6.5 e 6.6 apresentam os resultados dos projetos localizados entre o ponto mínimo e o padrão que satisfazem às exigências impostas.

Tabela 6.5 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Largura do Condutor de BT</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Indução Magnética</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	1,78	20% maior	50% menor	10% menor	14,44	19,46
1	1,77	10% menor	40% menor	10% menor	5,52	30,14
2	1,73	Padrão	30% menor	10% menor	8,19	21,24

Tabela 6.6 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	1,78	5,06	85,48	0,91
1	1,77	5,51	107,35	1,14
2	1,73	5,04	82,06	0,87

c) Conjunto dos projetos que possuem variação da densidade da corrente de AT, da espessura da isolação e da indução magnética.

A Figura 6.7 apresenta as superfícies com variação da altura da janela onde está localizado o custo total mínimo  $c(4,4,17)$ . Este projeto possui aumento no diâmetro do condutor de AT e da espessura da isolação em 20% com a indução magnética igual ao valor de referência.

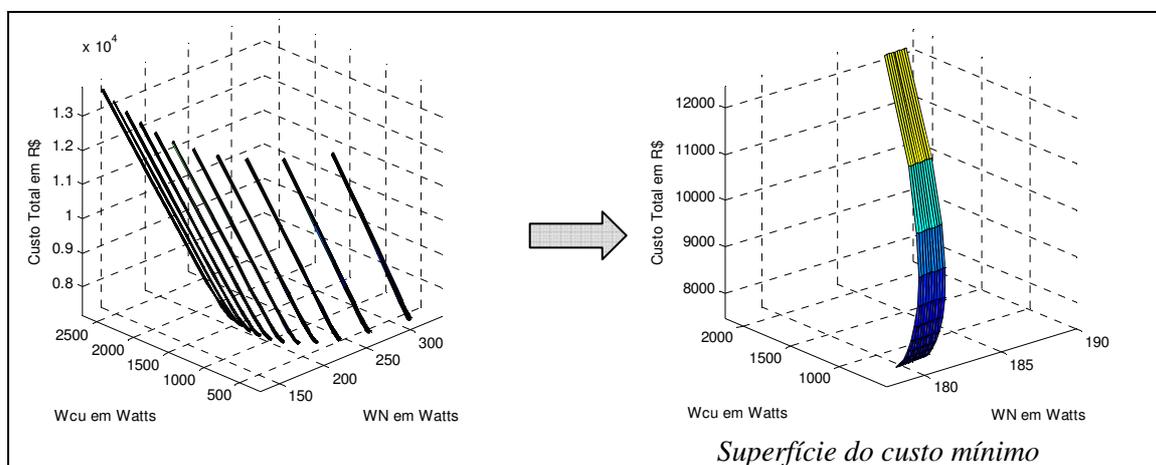


Figura 6.7 – Superfícies de custo total para variação da altura da janela.

As Tabelas 6.7 e 6.8 apresentam os custos totais dos projetos menores que o valor padrão para o custo total mínimo ( $k=0$ ) e para as demais iterações.

Tabela 6.7 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

$k$	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Espessura da Isolação</i>	<i>Indução Magnética</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	3,32	20% menor	20% maior	Padrão	0,52	18,18
1	3,20	20% menor	50% maior	Padrão	0,20	18,12
2	2,06	50% menor	10% menor	10% menor	8,73	30,25
3	1,73	30% menor	Padrão	10% menor	8,19	21,24

Tabela 6.8 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

$k$	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	3,32	2,01	60,56	0,64
1	3,20	2,12	59,89	0,64
2	2,06	5,32	112,47	1,20
3	1,73	5,04	82,06	0,87

As superfícies de custo total com variação do comprimento da culatra onde se tem o ponto mínimo  $c(2,7,16)$  são apresentadas na Figura 6.8. Este projeto possui redução na densidade da corrente de AT em 40%, na espessura da isolação e na indução magnética em 10%. As perdas em vazio e em carga têm uma redução de 7,35% e 25,89%.

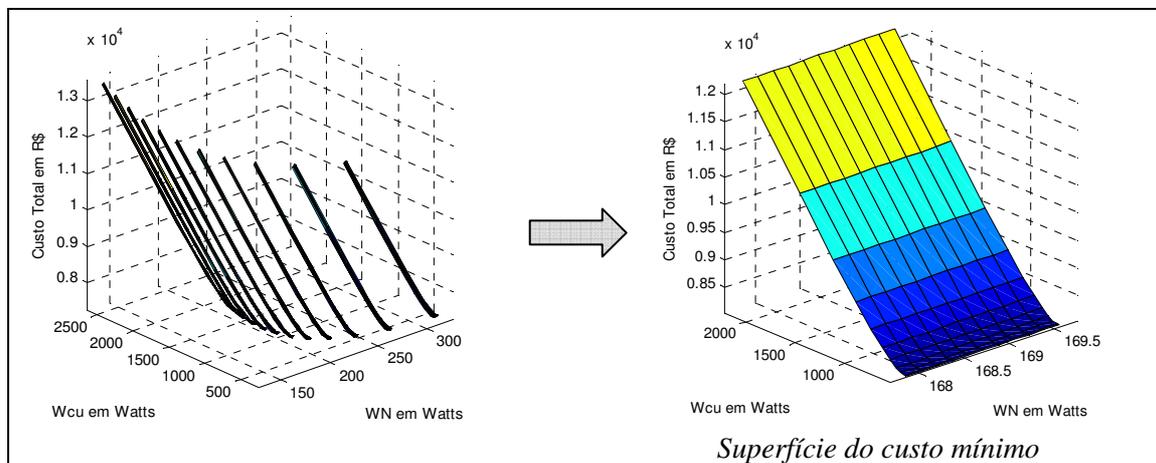


Figura 6.8 – Superfícies de custo total para variação do comprimento da culatra.

O custo total mínimo possui uma redução de 1,52% em relação ao padrão com tempo de retorno do investimento de 5,5 anos. A economia por substituição do transformador é de 96,10 R\$/ano e de energia é de 1,02 MWh/ano.

d) Conjunto dos projetos que possuem variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolamento e da densidade da corrente de AT.

O condutor de BT, nestes projetos, encontra-se deitado e a variação da densidade da corrente de BT ocorre na largura do condutor e altura da janela, ou na espessura do condutor e comprimento da culatra.

A Figura 6.9 apresenta a superfície de custo total onde se encontra o ponto mínimo local  $c(8,3,13)$ . O projeto possui, em relação aos valores de referência, redução da largura do condutor de BT em 20% e na densidade da corrente de AT em 40% com aumento de 30% na espessura da isolamento.

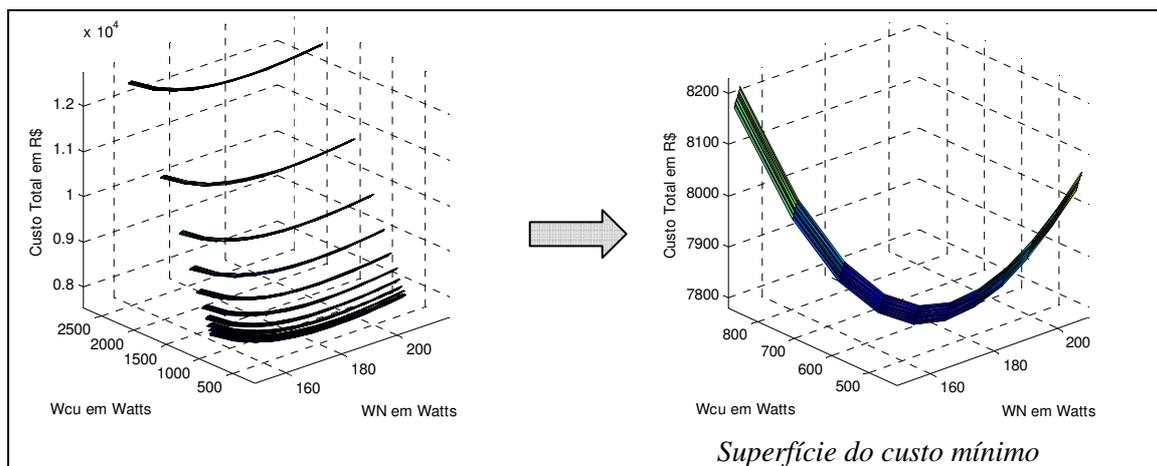


Figura 6.9 – Superfícies de custo total para variação da altura da janela.

As reduções nas perdas em vazio e em carga são iguais a 7,35% e 18,74%, respectivamente. O custo total mínimo é 4,15% menor com TRI de 1,83 anos. A economia por substituição do transformador é igual a 72,57 R\$/ano e de energia é de 0,77 MWh/ano.

As Tabelas 6.9 e 6.10 apresentam quatro pontos de custo total entre os valores de mínimo e padrão. As características do projeto estão na Tabela 6.9 para o ponto mínimo ( $k=0$ ) e para os valores entre o mínimo e o padrão. A Tabela 6.10 apresenta o TRI, a economia em R\$ por ano e MWh por ano devido à substituição do transformador padrão pelo eficiente.

Tabela 6.9 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Largura do Condutor de BT</i>	<i>Espessura da Isolação</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	4,15	20% menor	30% maior	40% menor	7,35	18,74
1	3,38	10% menor	20% maior	20% menor	3,72	13,59
2	3,32	Padrão	20% maior	20% menor	0,52	18,18
3	3,20	Padrão	50% maior	20% menor	0,20	18,12
4	2,28	40% menor	20% menor	50% menor	14,52	5,52

Tabela 6.10 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	4,15	1,83	72,57	0,77
1	3,38	1,05	50,23	0,53
2	3,32	2,01	60,56	0,64
3	3,20	2,12	59,89	0,64
4	2,28	1,81	39,75	0,42

A Figura 6.10 apresenta a superfície onde se localiza o custo total mínimo  $c(8,3,12)$ . O projeto possui redução na espessura do condutor de BT em 20% e na densidade da corrente de AT em 50%, e aumento de 30% na espessura da isolação.

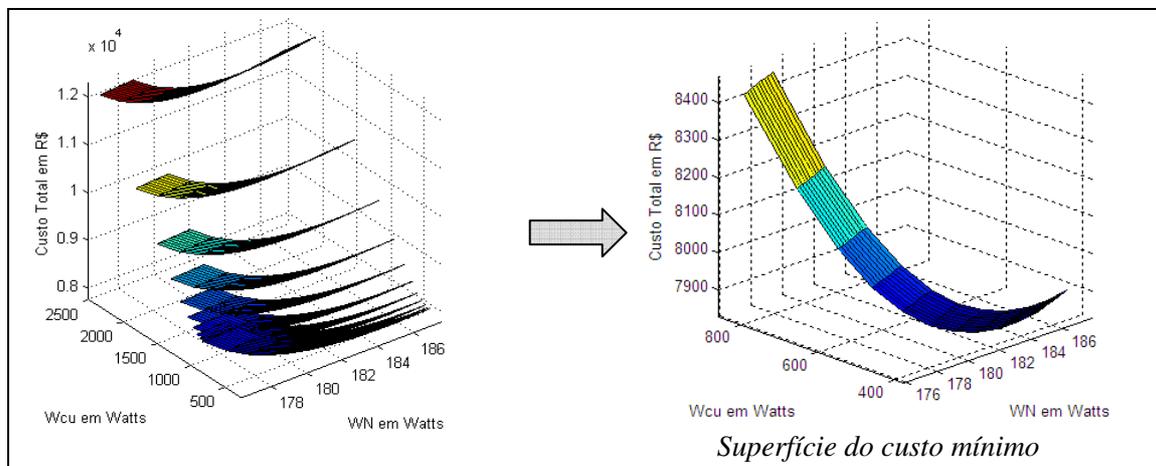


Figura 6.10 – Superfícies de custo total para variação do comprimento da culatra.

As reduções de 0,73% e 23,36% nas perdas em vazio e em carga, respectivamente, ocasionam a diminuição do custo total mínimo em 2,40%. A economia de energia é de 0,83 MWh/ano e devido à substituição da unidade é de 77,92 R\$/ano. O TRI é de 4,08 anos.

As Tabelas 6.11 e 6.12 mostram que se tem um ponto de custo total localizado entre o valor mínimo e o padrão.

Tabela 6.11 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Espessura do Condutor de BT</i>	<i>Espessura da Isolação</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	2,40	20% menor	30% maior	50% menor	0,73	23,36
1	1,36	30% menor	10% menor	50% menor	1,66	16,75

Tabela 6.12 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	2,40	4,08	77,92	0,83
1	1,36	4,78	57,54	0,61

Observa-se que para este FE, Equação (6.17), o projeto que possui variação da densidade da corrente de AT, da distância entre enrolamentos e da altura da cabeça da bobina (item a), apresenta uma redução maior do custo total e das perdas em carga.

### 6.2.2 CUSTO TOTAL MÍNIMO PARA FATOR DE ENERGIA CONSUMIDA IGUAL A 8,7

A análise considerando a demanda da Figura 6.11 e o seu fator de energia consumida de 8,7 é apresentada considerando o custo de energia igual a 93,40 R\$/MWh, a taxa de juros de 8% ao ano e tempo de análise de 10 anos.

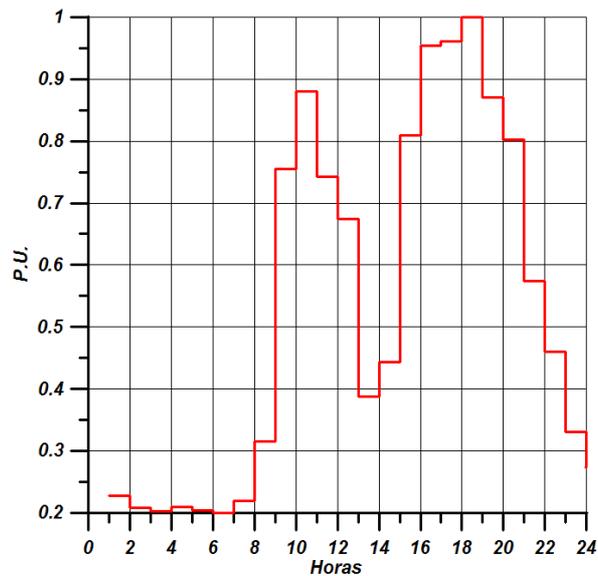


Figura 6.11 – Demanda comercial na região de concessão da AES-Sul para 1,0 p.u.

Os conjuntos de soluções que apresentam opções de projetos para o custo total mínimo são:

a) *Conjunto dos projetos que possuem variação da densidade da corrente do condutor de AT, da distância entre enrolamentos e da altura da cabeça da bobina.*

O ponto de mínimo quando se tem a variação da altura da janela é o elemento *c(2,11,16)* na superfície da Figura 6.12.

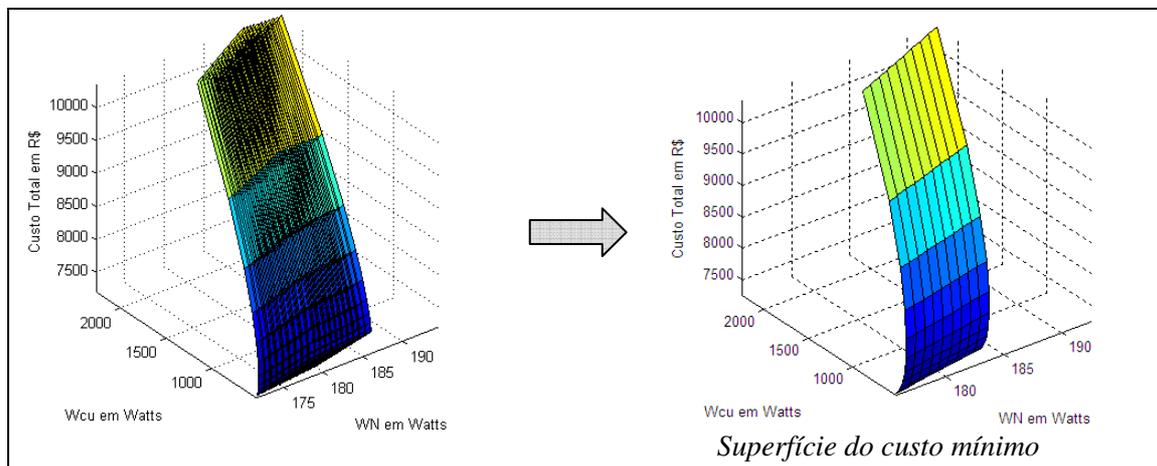


Figura 6.12 – Superfícies de custo total para variação da altura da janela.

O custo total mínimo possui uma redução de 3,45% em relação ao valor de referência como mostrado na Tabela 6.13. A tabela, também, apresenta os valores percentuais dos parâmetros dos projetos entre o mínimo e o padrão. A Tabela 6.14 mostra o comportamento do TRI e da economia por substituição da unidade e de energia para estes projetos.

Tabela 6.13 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Distância entre Enrolamentos</i>	<i>Altura da Cabeça da Bobina</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	3,45	40% menor	50% menor	10% maior	3,16	30,36
1	3,18	40% menor	40% menor	10% maior	2,70	30,11
2	3,16	50% menor	30% menor	40% menor	4,44	33,61
3	3,16	40% menor	30% menor	10% menor	3,03	29,85
4	2,86	30% menor	20% menor	Padrão	1,93	24,88
5	2,79	30% menor	40% menor	50% maior	0,90	25,51
6	2,67	40% menor	30% menor	30% maior	1,47	29,88
7	2,60	40% menor	Padrão	30% menor	2,45	29,09
8	2,28	50% menor	20% menor	10% maior	2,02	33,42
9	2,27	30% menor	20% maior	40% menor	1,66	23,68
10	2,20	10% menor	40% menor	20% maior	1,46	12,01

Tabela 6.14 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	3,45	3,01	74,04	0,79
1	3,18	3,24	72,80	0,77
2	3,16	3,72	83,36	0,89
3	3,16	3,27	72,69	0,77
4	2,86	2,91	59,70	0,63
5	2,79	2,99	59,59	0,63
6	2,67	3,72	70,43	0,75
7	2,60	3,79	70,09	0,75
8	2,28	4,51	79,34	0,84
9	2,27	3,53	56,56	0,60
10	2,20	1,00	29,61	0,31

O projeto de menor custo total quando se tem variação do comprimento da culartra é o elemento  $c(2,11,20)$ . A redução do custo total é de 3,31% em relação ao valor padrão. As Tabelas 6.15 e 6.16 apresentam os projetos com custo total menor que o padrão com sua redução de perdas, TRI, economia por unidade e de energia.

Tabela 6.15 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Distância entre Enrolamentos</i>	<i>Altura da Cabeça da Bobina</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	3,31	40% menor	50% menor	30% menor	3,36	29,96
1	3,12	20% menor	40% menor	30% menor	2,90	19,23
2	2,94	10% menor	50% menor	40% menor	3,72	12,09
3	2,84	20% menor	50% menor	20% maior	1,53	19,67
4	2,56	30% menor	10% menor	40% menor	1,90	24,19
5	2,20	20% menor	30% menor	30% maior	0,26	19,02
6	2,15	20% menor	20% menor	10% maior	0,54	18,64
7	2,09	40% menor	Padrão	40% menor	1,45	28,70

Tabela 6.16 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	3,31	3,13	73,41	0,78
1	3,12	1,66	48,23	0,51
2	2,94	0,50	33,15	0,35
3	2,84	1,48	47,22	0,50
4	2,56	3,21	58,08	0,62
5	2,20	2,73	43,82	0,46
6	2,15	2,77	43,37	0,46
7	2,09	4,33	67,71	0,72

b) Conjunto de projetos que possuem variação da densidade da corrente de AT, da espessura da isolação e da indução magnética.

A Figura 6.13 apresenta a superfície onde se localiza o ponto mínimo  $c(4,4,17)$ . A redução do custo total deste projeto é de 1,98%, ou seja, este ponto encontra-se próximo ao valor padrão. Isto significa que esta superfície apresenta um ponto entre o mínimo e o padrão. As Tabelas 6.17 e 6.18 mostram para o ponto mínimo e para o projeto  $k=1$  a redução do custo total, das perdas, da energia e o TRI.

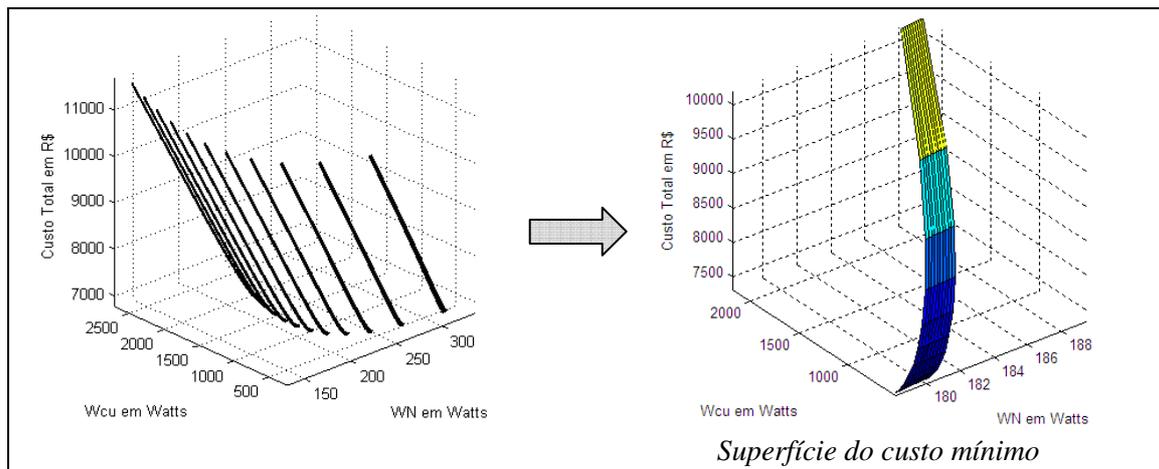


Figura 6.13 – Superfícies de custo total para variação da altura da janela.

Tabela 6.17 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

$k$	Redução do Custo Total, %	Densidade da Corrente de AT	Espessura da Isolação	Indução Magnética	Redução das Perdas em Vazio, %	Redução das Perdas em Carga, %
0	1,98	20% menor	20% maior	Padrão	0,52	18,18
1	1,86	20% menor	50% maior	Padrão	0,20	18,12

Tabela 6.18 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

$k$	Redução do Custo Total, %	TRI, anos	Economia por Unidade, R\$/ano	Redução de Energia, MWh/ano
0	1,98	2,99	42,29	0,45
1	1,86	3,17	41,68	0,44

c) Conjunto dos projetos que possuem variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolação e da densidade da corrente de AT.

O custo total mínimo é o elemento  $c(8,3,13)$  que está localizado na superfície da Figura 6.14.

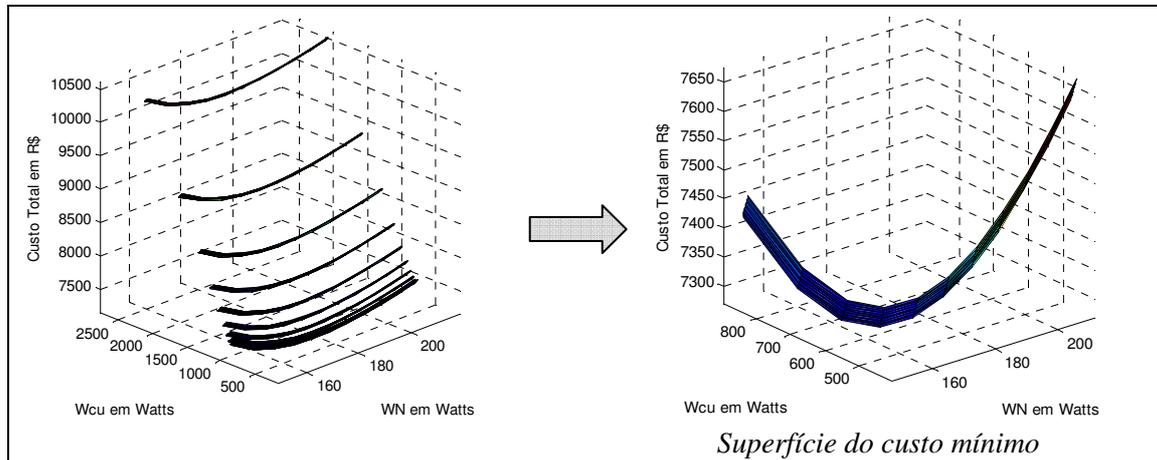


Figura 6.14 – Superfícies de custo total para variação da altura da janela.

As Tabelas 6.19 e 6.20 apresentam os valores das reduções e dos parâmetros do projeto para os quatro pontos entre o valor mínimo e o padrão. Observa-se que para o ponto mínimo a largura do condutor de BT é 20% menor, a espessura da isolação é 30% maior e a densidade da corrente de AT é 40%. Este projeto possui TRI de 2,53 anos.

Tabela 6.19 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

$k$	Redução do Custo Total, %	Largura do Condutor de BT	Espessura da Isolação	Densidade da Corrente de AT	Redução das Perdas em Vazio, %	Redução das Perdas em Carga, %
0	2,84	20% menor	30% maior	40% menor	7,35	18,74
1	2,46	10% menor	20% maior	20% menor	3,72	13,59
2	1,99	40% menor	20% menor	50% menor	14,52	5,52
3	1,98	Padrão	20% maior	20% menor	0,52	18,18
4	1,86	Padrão	50% maior	20% menor	0,20	18,12

Tabela 6.20 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

$k$	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	2,84	2,53	53,74	0,57
1	2,46	1,47	36,58	0,39
2	1,99	2,13	34,21	0,36
3	1,98	2,99	42,29	0,45
4	1,86	3,17	41,68	0,44

d) Conjunto dos projetos que possuem variação da densidade da corrente de AT, da espessura da isolamento e da distância entre enrolamentos de BT e AT.

A Figura 6.15 apresenta a superfície do custo total mínimo  $c(3,11,20)$  quando se tem a variação da altura da janela.

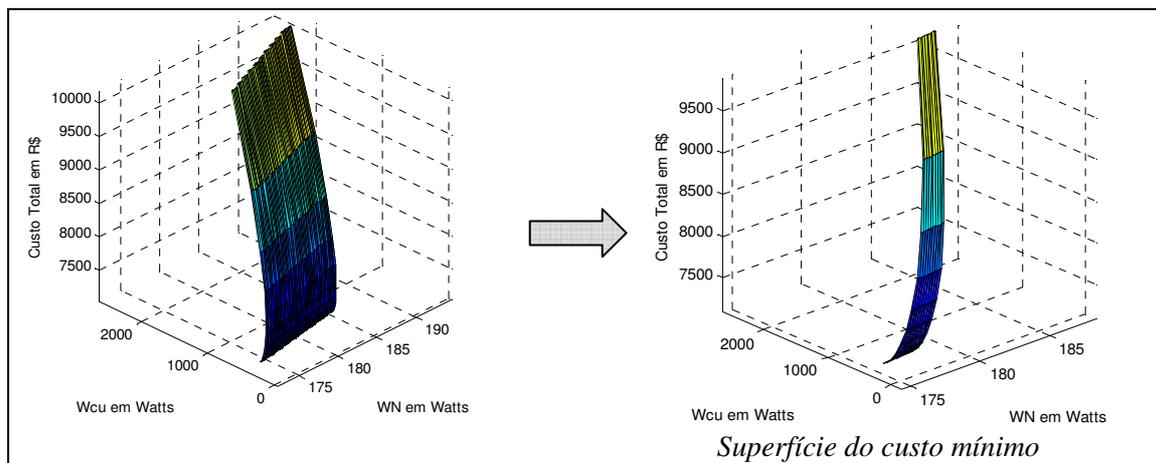


Figura 6.15 – Superfícies de custo total para variação da altura da janela.

A Tabela 6.21 apresenta os valores percentuais dos parâmetros construtivos para o ponto mínimo da superfície deste conjunto ( $k=0$ ) com a redução do custo total, das perdas em vazio e das perdas em carga.

Tabela 6.21 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Espessura da Isolação</i>	<i>Distância entre Enrolamentos</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	5,57	30% menor	50% menor	30% menor	2,92	36,25
1	5,53	30% menor	40% menor	30% menor	2,82	36,23
2	5,14	30% menor	10% menor	20% menor	2,04	35,88
3	5,13	10% menor	50% menor	50% menor	3,18	23,47
4	4,97	10% menor	10% menor	50% menor	2,77	23,38
5	4,43	10% menor	10% menor	30% menor	1,86	22,58
6	4,15	20% menor	40% maior	Padrão	0,31	29,12
7	3,35	10% menor	10% menor	10% maior	0	20,98

A Tabela 6.22 apresenta os valores de TRI, da economia por unidade e de energia para o ponto mínimo da superfície deste conjunto ( $k=0$ ) e para os seis projetos viáveis.

Tabela 6.22 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	5,57	1,71	87,13	0,93
1	5,53	1,73	86,93	0,93
2	5,14	1,95	84,99	0,91
3	5,13	0,09	58,34	0,62
4	4,97	0,18	57,52	0,61
5	4,43	0,50	54,34	0,58
6	4,15	1,85	66,98	0,71
7	3,35	1,28	47,97	0,51

O custo total mínimo para a variação do comprimento da culatra é o elemento  $c(1,8,21)$  na superfície da Figura 6.16.

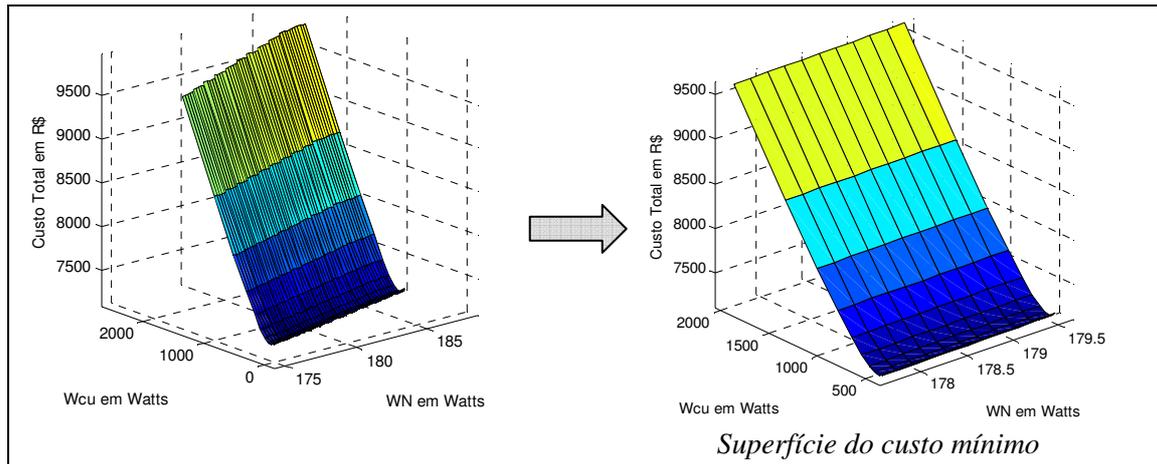


Figura 6.16 – Superfícies de custo total para variação do comprimento da culatra.

As Tabelas 6.23 e 6.24 mostram os valores das reduções para o projeto de custo total mínimo ( $k=0$ ) e para os projetos com valores de custo total menores que o padrão.

Tabela 6.23 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

$k$	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Espessura da Isolação</i>	<i>Distância entre Enrolamentos</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	4,57	50% menor	20% menor	40% menor	2,02	44,51
1	4,56	40% menor	50% maior	50% menor	1,75	23,08
2	4,34	50% menor	40% maior	40% menor	1,40	44,42
3	3,69	50% menor	Padrão	10% menor	0,45	43,83

Tabela 6.24 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

$k$	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	4,57	3,24	104,66	1,12
1	4,56	0,44	55,32	0,59
2	4,34	3,39	103,53	1,10
3	3,69	3,83	100,78	1,07

Os projetos com variação da densidade da corrente de AT, da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos (item d) apresentam redução maior para o custo total e para as perdas em carga deste FE. A redução das perdas em vazio é

maior para os projetos com variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolamento e da densidade de corrente de AT (item c).

### 6.2.3 CUSTO TOTAL MÍNIMO PARA FATOR DE ENERGIA CONSUMIDA IGUAL A 4,5

A análise para a demanda da Figura 6.17 com FE de 4,5 é apresentada para os mesmos parâmetros econômicos adotados no item 6.2.2.

O conjunto de soluções que apresentam projetos viáveis são:

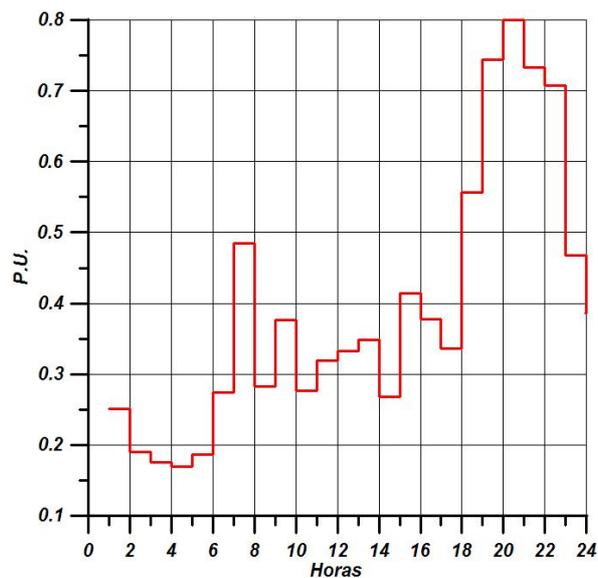


Figura 6.17 – Demanda residencial na região de concessão da AES-Sul para pico máximo de 0,8 p.u.

a) *Conjunto de projetos que possuem variação da densidade da corrente de AT, da distância entre enrolamentos e da altura da cabeça da bobina.*

O custo total mínimo quando se tem a variação na altura da janela é o elemento  $c(5,10,15)$  na superfície da Figura 6.18. Este apresenta uma redução de 1,13% em relação ao custo total padrão com TRI de 1,85 anos e economia por unidade de 16,44 R\$/ano conforme Tabelas 6.25 e 6.24.

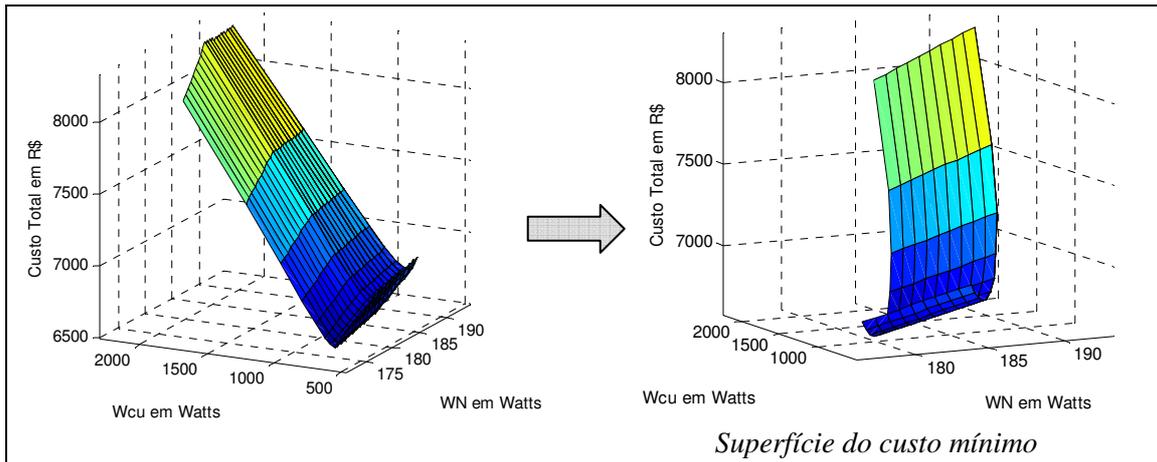


Figura 6.18 – Superfícies de custo total para variação da altura da janela.

Observa-se que na Tabela 6.25 a redução do custo total mínimo é de 1,13%. Isto significa que se tem um ponto entre o valor mínimo e padrão nesta superfície. A Tabela 6.26 mostra os resultados para o TRI, economia por unidade e de energia.

Tabela 6.25 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Distância entre Enrolamentos</i>	<i>Altura da Cabeça da Bobina</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	1,13	10% menor	40% menor	20% maior	1,46	12,01
1	0,86	10% menor	Padrão	40% maior	1,88	10,28

Tabela 6.26 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	1,13	1,85	16,45	0,17
1	0,86	2,60	15,02	0,16

A superfície da Figura 6.19 apresenta o ponto de mínimo em  $c(5,11,21)$ . Este possui redução do custo total de 1,95% em relação ao padrão. Nesta superfície tem-se dois pontos entre os valores de mínimo e padrão.

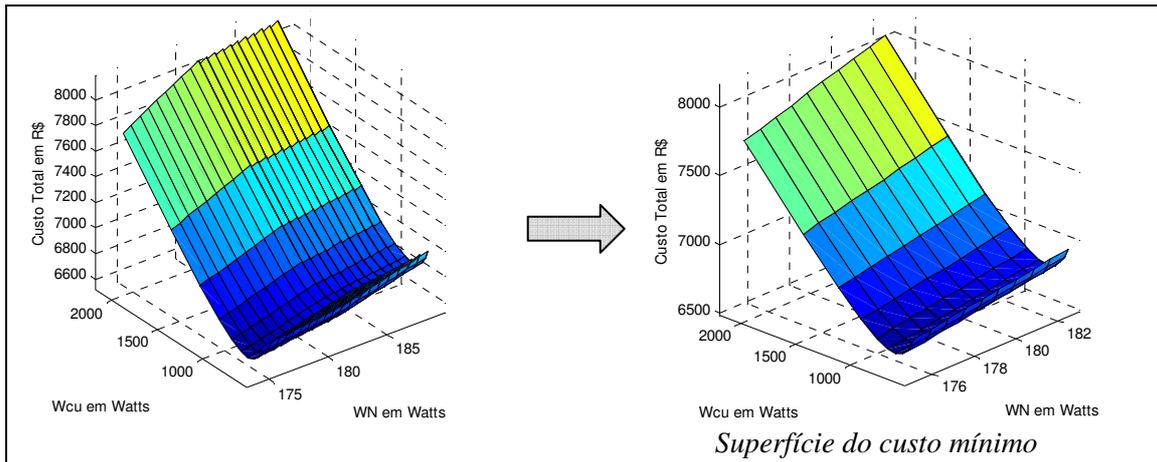


Figura 6.19 – Superfícies de custo total para variação do comprimento da culatra.

As Tabelas 6.27 e 6.28 mostram os valores percentuais dos parâmetros variáveis do projeto para o ponto mínimo ( $k=0$ ) e nos dois projetos com valores de custo total menor que o padrão.

Tabela 6.27 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

$k$	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Distância entre Enrolamentos</i>	<i>Altura da Cabeça da Bobina</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	1,95	10% menor	50% menor	40% menor	3,72	12,09
1	1,37	20% menor	40% menor	30% menor	2,90	19,23
2	1,01	20% menor	50% menor	20% maior	1,53	19,67

Tabela 6.28 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

$k$	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	1,95	0,08	19,91	0,21
1	1,37	3,11	27,18	0,29
2	1,01	3,91	25,67	0,27

b) Conjunto de projetos que possuem variação da densidade da corrente de AT, espessura da isolamento e da distância entre enrolamentos.

A Figura 6.20 apresenta a superfície onde se localiza o ponto mínimo  $c(5,11,22)$  com uma redução de 3,14% no custo total.

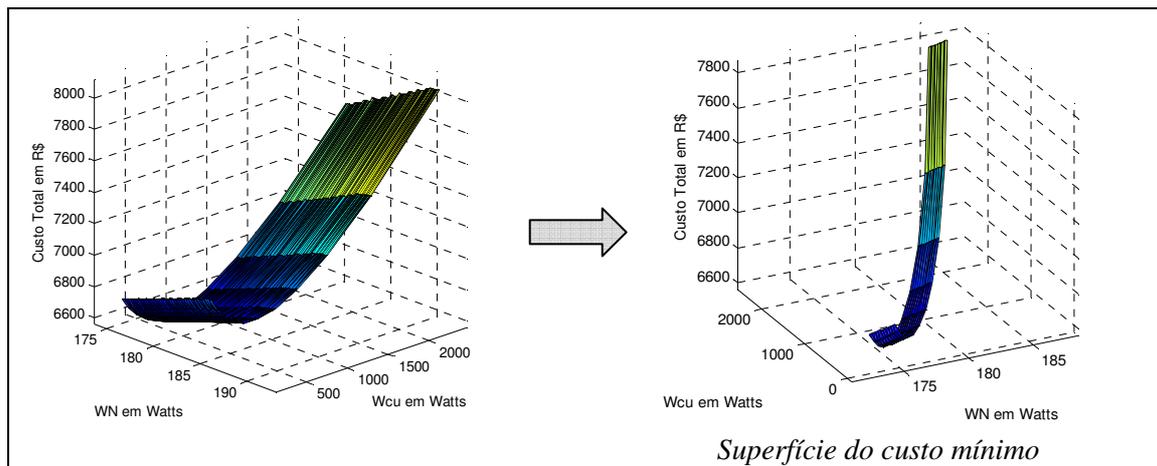


Figura 6.20 – Superfícies de custo total para variação da altura da janela.

Este conjunto de projetos possui seis pontos onde o valor para o custo total é menor que o padrão. Os valores percentuais da variação dos parâmetros construtivos estão indicados na Tabela 6.29. O TRI e a economia por substituição e de energia estão mostrados na Tabela 6.30.

Tabela 6.29 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Espessura da Isolação</i>	<i>Distância entre Enrolamentos</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	3,14	10% menor	50% menor	50% menor	3,18	23,47
1	2,98	10% menor	10% menor	50% menor	2,77	23,38
2	2,46	10% menor	10% menor	20% maior	1,86	22,58
3	2,24	30% menor	50% menor	20% maior	2,92	36,25
4	2,20	30% menor	40% menor	20% maior	2,82	36,23
5	1,81	30% menor	10% menor	20% menor	2,04	35,88
6	1,44	20% menor	40% maior	Padrão	0,31	29,12

Tabela 6.30 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

$k$	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	3,14	0,16	32,64	0,34
1	2,98	0,33	31,92	0,34
2	2,46	0,93	29,61	0,31
3	2,24	3,33	47,44	0,50
4	2,20	3,39	47,27	0,50
5	1,81	3,91	45,70	0,48
6	1,44	3,81	35,09	0,37

O projeto com variação da densidade da corrente de AT, da espessura da isolamento e da distância entre enrolamentos (item b) possui uma redução maior do custo total no projeto de custo total mínimo  $k=0$ . A maior redução das perdas em carga é encontrada no projeto  $k=3$  e das perdas em vazio no projeto de custo total mínimo.

#### 6.2.4 CUSTO TOTAL MÍNIMO PARA FATOR DE ENERGIA CONSUMIDA IGUAL A 2,5

O fator de energia consumida de 2,5 é representado pela curva de carga da Figura 6.21, onde o ponto máximo é igual a 0,6 pu com duração de 1 hora.

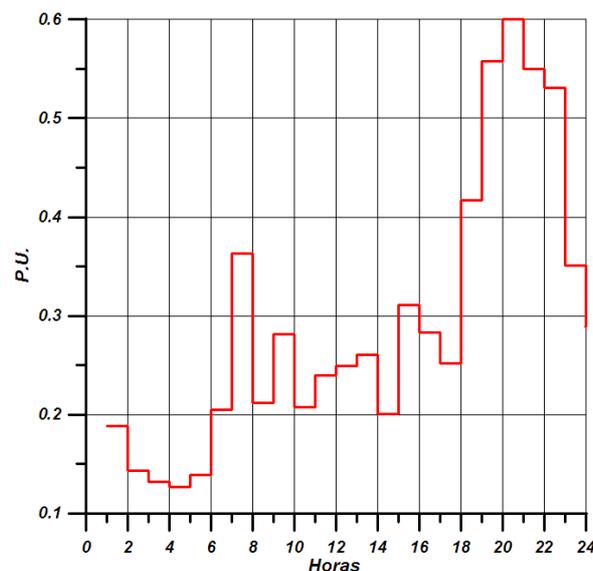


Figura 6.21 – Demanda residencial na região de concessão da AES-Sul para pico máximo de 0,6 p.u.

O processo de otimização selecionou dois conjuntos de projeto que possuem:

- *variação da densidade da corrente de AT, da distância entre enrolamentos e da altura do calço;*

- *variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolação e da densidade da corrente de AT.*

O transformador que opera com este fator de energia possui maiores perdas em vazio. O segundo conjunto de projeto apresenta maiores reduções para perdas em vazio quando comparado com o primeiro, e é detalhado nesta seção.

*a) Conjunto de projetos que possuem variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolação e da densidade de corrente de AT.*

A obtenção de menores resultados para as perdas em vazio é obtida com valores de indução magnética próximo ao joelho da curva da densidade magnética, ou seja, 1,7 Teslas. A lâmina de aço-silício do tipo E004, comercializada no Brasil, é utilizada em transformadores de distribuição e possui densidade magnética de 1,68 Watts por quilograma.

As Tabelas 6.31 e 6.32 apresentam as características do projeto e a redução das perdas em relação ao projeto padrão nos pontos de mínimo local e global na superfície. A Figura 6.22 apresenta as superfícies de custo total para o conjunto de soluções selecionados.

Tabela 6.31 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>Densidade da Corrente de BT</i>	<i>Espessura da Isolação</i>	<i>Densidade da Corrente de AT</i>	<i>Redução das Perdas em Vazio, %</i>	<i>Redução das Perdas em Carga, %</i>
0	1,71	20% menor	50% menor	40% maior	14,36	14,65
1	1,62	20% menor	30% menor	40% maior	14,36	14,65

Tabela 6.32 – Pontos de custo total menores que o valor padrão.

<i>k</i>	<i>Redução do Custo Total, %</i>	<i>TRI, anos</i>	<i>Economia por Unidade, R\$/ano</i>	<i>Redução de Energia, MWh/ano</i>
0	1,71	2,97	23,50	0,25
1	1,62	4,00	23,27	0,24

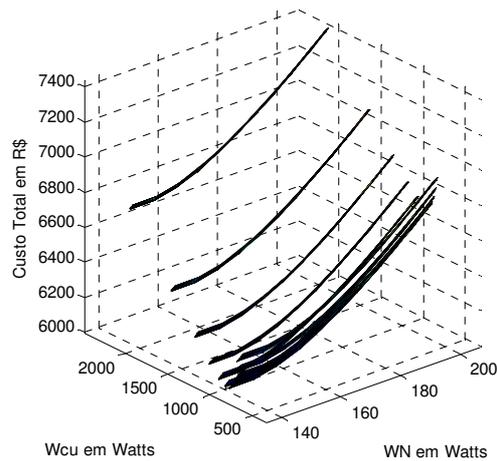


Figura 6.22 – Superfícies de custo total para o fator de energia igual a 2,5.

A recristalização secundária das lâminas de aço silício permite o crescimento dos grãos magnéticos em contornos do tipo CSL (*coincidence site lattice*). Este processo reduz a perda magnética para 1,53 Watts por kilograma [26].

Considerando um núcleo com lâminas de aço silício com recristalização secundária obtém-se redução de 22% para as perdas em vazio e 20% para as perdas em carga.

### 6.3 COMENTÁRIOS

A metodologia para determinação dos projetos com menor custo total nas superfícies produzidas no Capítulo 5 é demonstrada neste capítulo para alguns fatores de energia como exemplos. A metodologia consiste na busca de projetos adequados à carga estudada respeitando as restrições técnicas e econômicas.

Os projetos selecionados são o ponto de mínimo local e os de mínimo global entre as superfícies de um determinado conjunto de soluções. A superfície selecionada possui as perdas garantidas e o tempo de retorno do investimento. Vale ressaltar que, é necessário estudos futuros detalhados sobre a validação dielétrica dos projetos que alteram os valores dos espaçamentos e isolamento.

Desta forma, o objetivo é orientar a escolha de projetos que minimizem as perdas capitalizadas na rede. A metodologia das superfícies mostra as características técnicas e econômicas dos projetos.

# *CAPÍTULO 7*

## *CONCLUSÃO*

O estudo do cálculo do projeto de transformadores e a análise da viabilidade econômica foram realizados em [5]. A ampliação deste estudo utilizando matrizes tridimensionais foi realizada no Capítulo 2, constituindo o primeiro passo de desenvolvimento desta tese. As matrizes formam superfícies de custo total e de fabricação em relação às perdas, proporcionando o conhecimento do custo das perdas capitalizadas para o transformador selecionado.

A metodologia da construção das superfícies visa descrever o comportamento das perdas em função do custo ou das alterações de determinados parâmetros construtivos. Portanto, tem-se como problema a procura de soluções de projeto viáveis economicamente nas superfícies geradas. A partir das restrições estabelecidas, é possível determinar os projetos adequados. No caso do transformador, para o processamento dos parâmetros construtivos, devem-se observar as perdas, a temperatura no ponto mais quente e a suportabilidade frente a surtos dentro dos limites das normas nacionais.

As temperaturas do ponto mais quente e do topo do óleo podem ser alteradas com a variação dos parâmetros construtivos. Neste contexto, deve-se observar o limite da elevação da temperatura de acordo com o material da isolamento empregado. O estudo da transferência de calor torna-se importante na adequação de projeto e, portanto, este trabalho apresentou os resultados da distribuição da temperatura em um transformador de distribuição eficiente. Para isto, foi empregada a tecnologia dos sensores ópticos de Rede de Bragg com a distribuição de 12 pontos de medição nos enrolamentos e no canal de óleo. A localização do ponto mais quente do enrolamento encontra-se aproximadamente a 1/3 da bobina de BT e a temperatura registrada foi 18°C maior do que a medição normalizada. Isto porque a normalização calcula a temperatura do ponto mais quente através de manipulações matemáticas a partir da temperatura do topo do óleo medida por um termopar. Estes resultados permitiram a construção de um circuito elétrico equivalente para o estudo dos fenômenos de

transferência de calor em regime permanente no transformador. A modelagem do circuito térmico é obtida através de processos iterativos e pode ser utilizada quando se deseja um resultado aproximado para as variações nos diâmetros das bobinas, do canal de óleo e da distância da parte ativa à parede do tanque.

A combinação dos parâmetros construtivos forma conjuntos de soluções possíveis de projeto, e a partir da curva típica da carga, são indicados projetos com tempo de retorno do investimento menor do que 5 anos. O objetivo é minimizar as perdas na rede de distribuição sugerindo no pedido de compra as perdas garantidas (vazio e em carga). Isto porque atualmente, os transformadores de distribuição são padronizados pela NBR5440 que estabelece o limite para as perdas em vazio e total. Desta forma, a norma nacional permite que os projetos possam ser adequados de acordo com o preço das commodities, uma vez que as perdas em carga estão livres, o que não representa, necessariamente, a melhor opção para a concessionária. Os conjuntos de soluções organizam os projetos de transformadores gerados pelas matrizes. As análises dos conjuntos determinam o projeto com menor custo total, menor perda a vazio, menor perda em carga e menor temperatura do ponto mais quente. Características que podem ser escolhidas segundo a necessidade do cliente. Os valores do ponto mais quente do enrolamento apresentados seguem o cálculo normalizado e consideram a temperatura ambiente de 40 °C. Segundo as análises, o menor custo total para o transformador trifásico de 45 kVA com a curva de carga da Figura 5.66, taxa de juros de 8% a.a., tempo de análise de 10 anos e custo de energia de 93,40 R\$/MWh foi obtida com o projeto que possui espessura do condutor de BT e da isolação 50% menor que o valor de referência, com calço e cabeça da bobina 40% menor que o valor padrão. A perda em carga para este projeto reduziu em 53%, porém não se tem tempo de retorno do investimento (TRI). Foi verificado que alguns conjuntos de soluções apresentaram perda em carga menor sem aumentar a massa de cobre, e que a variação adequada para a indução magnética seja de  $\pm 10\%$  em relação ao valor padrão. Isto ocorre devido ao tipo de lâmina (espessura de 0,27mm e de grão orientado) comercializada no Brasil para transformadores de distribuição.

A curva típica da carga do transformador é um fator decisivo para a obtenção dos resultados esperados. Para a definição da curva típica é indicado um estudo estatístico da carga. E para facilitar a varredura do conjunto de soluções de projeto, foi utilizado o conceito do fator de energia consumida (FE) para definir o comportamento da carga. Para menores FE, os projetos indicados são aqueles que possuem variação na densidade da corrente de BT, AT e espessura da isolação. Isto devido às mudanças no valor da razão altura e largura da janela. Observa-se que neste caso,

não se tem alteração na indução magnética para a redução das perdas a vazio. E quanto maior o FE, maiores são as opções de projeto, sendo o conjunto de soluções com variação na densidade da corrente de AT, distância entre enrolamentos e altura da cabeça da bobina apresentam mais possibilidades de projetos em relação aos demais conjuntos de solução analisados.

As concessionárias realizam medições das cargas e atualizam o banco de dados da empresa no período da revisão tarifária da ANEEL. Com esses dados é possível aplicar uma análise estatística para as várias distribuições de probabilidade, de modo a escolher a distribuição adequada ao perfil de carregamento. Este método representa com maior fidelidade a carga típica da região a ser instalado o transformador eficiente.

#### *TRABALHOS FUTUROS*

Paralelamente a este trabalho, está sendo desenvolvido um estudo estatístico da carga, de forma a definir com maior critério o fator de energia consumida e a análise econômica para aplicação do transformador de distribuição eficiente. A partir deste estudo, como sugestão, tem-se o emprego da ferramenta computacional das redes neurais para a variação dos parâmetros construtivos segundo um conjunto de cargas.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se a análise técnica e econômica para transformadores que utilizam enrolamentos de alumínio. O impacto desta aplicação a médio e longo prazo quando comparado com os transformadores tradicionais.

Outra sugestão é o estudo do comportamento da distribuição do campo elétrico com a alteração dos espaçamentos e espessura da isolação. O objetivo seria a verificação dos limites para a variação destes parâmetros de projeto.

Atualmente, está sendo desenvolvido um estudo do mapeamento térmico do transformador através da aplicação do Método de Elementos Finitos. Este estudo visa descrever com maior fidelidade o processo da transferência de calor através dos resultados obtidos pelos sensores de fibra óptica com Rede de Bragg. Isto pode permitir a localização do ponto mais quente e seu comportamento com o carregamento, além de melhorias de projeto e análise das metodologias de ensaios.

# ANEXO 1

## ANÁLISE DOS CONJUNTOS DE SOLUÇÃO DE PROJETOS

### A1.1 SUPERFÍCIES DA IMPEDÂNCIA PERCENTUAL

a) *Variação da densidade da corrente de BT, de AT e da indução magnética;*

A Figura A1.1 apresenta a impedância percentual para projetos que possuem largura do condutor de BT e da indução magnética variáveis. O comportamento das perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual para os projetos com diâmetro da coluna do núcleo 50% maior que o valor de referência é mostrado na Figura A1.2. Existe uma faixa de perdas ou projeto que podem ser trabalhados com as variações dos parâmetros.

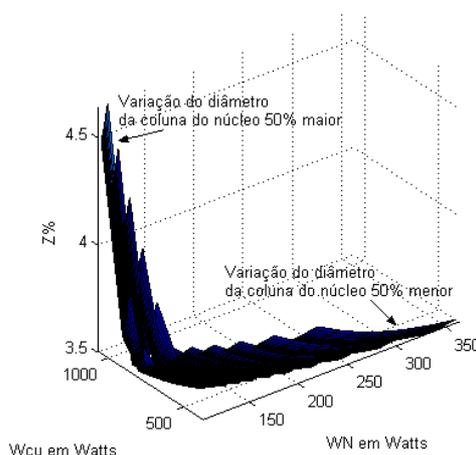


Figura A1.1 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com diâmetro do condutor de AT constante.

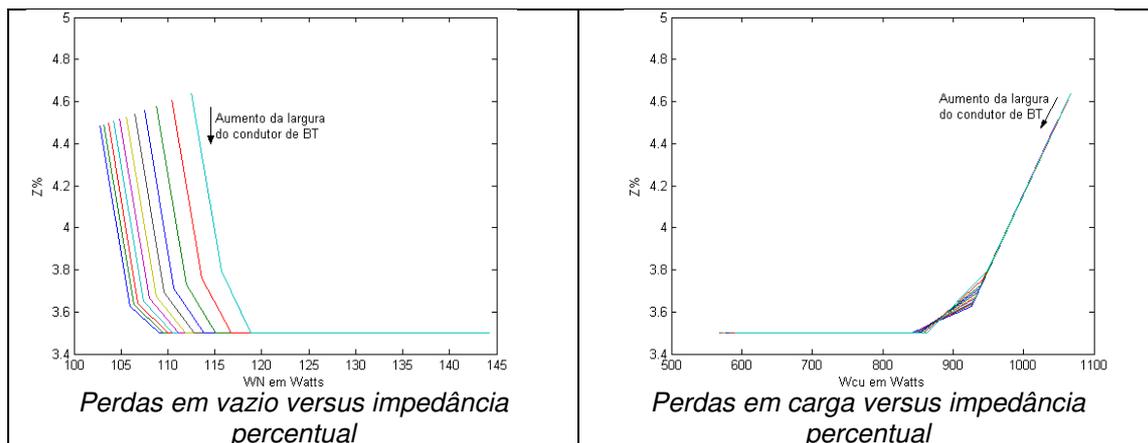


Figura A1.2 – Perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com diâmetro do condutor de AT constante.

As superfícies da impedância percentual para projetos que possuem a espessura do condutor de BT e do diâmetro da coluna do núcleo variáveis, densidade da corrente de AT constante são apresentados na Figura A1.3.

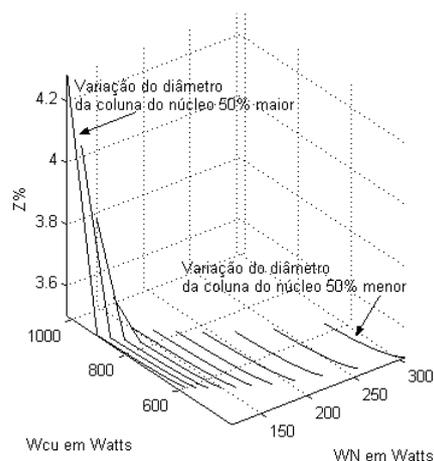


Figura A1.4 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com diâmetro do condutor de AT constante.

A Figura A1.5 apresenta as superfícies de impedância percentual para projetos com largura do condutor de BT, densidade da corrente de AT e da indução magnética variáveis. O comportamento das perdas em vazio e em carga para projetos com parâmetros em 50% acima do valor de referência é mostrado na Figura A1.6.

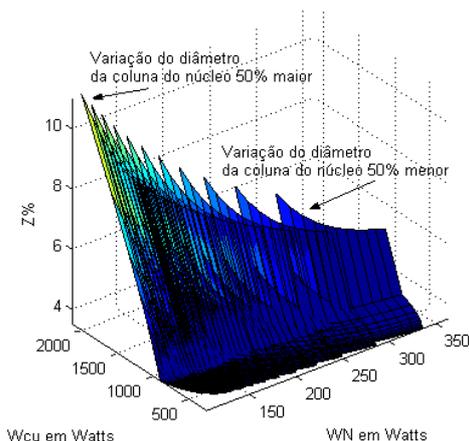


Figura A1.5 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

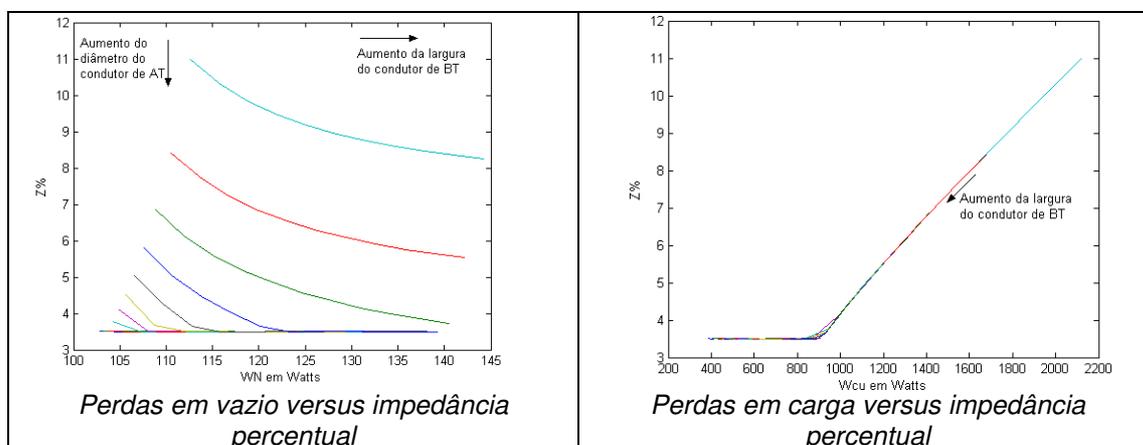


Figura A1.6 – Perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando a espessura do condutor de BT constante e variação da sua largura, com variação do diâmetro do condutor de AT.

As superfícies de impedância percentual para projetos com espessura do condutor de BT, diâmetro do condutor de AT e coluna do núcleo variáveis são apresentados na Figura A1.7.

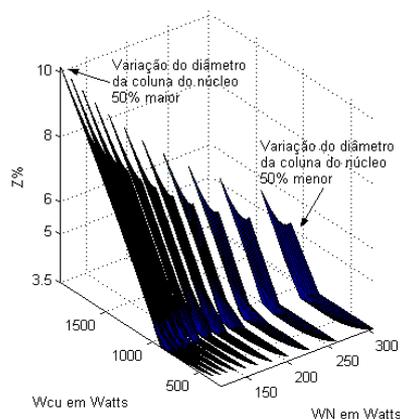
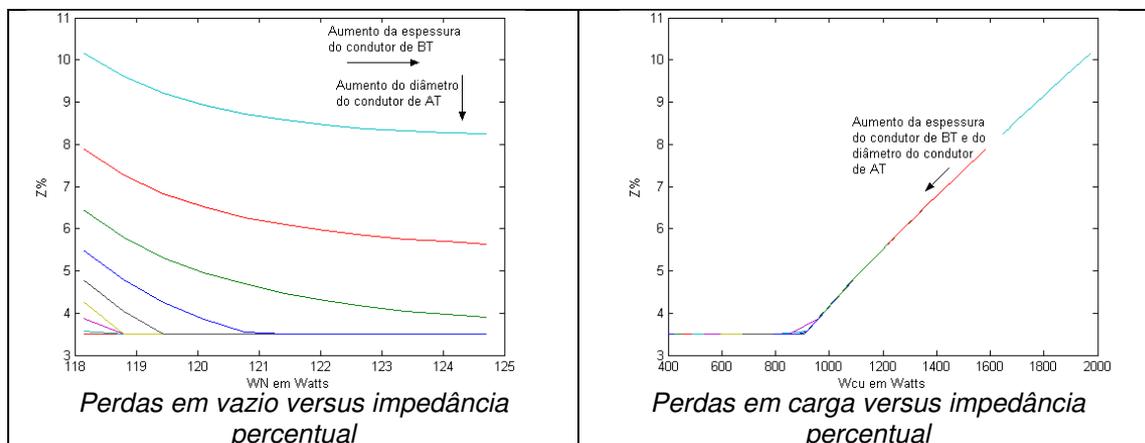


Figura A1.7 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando a largura do condutor de BT constante e variação da sua espessura, com variação no diâmetro do condutor de AT.

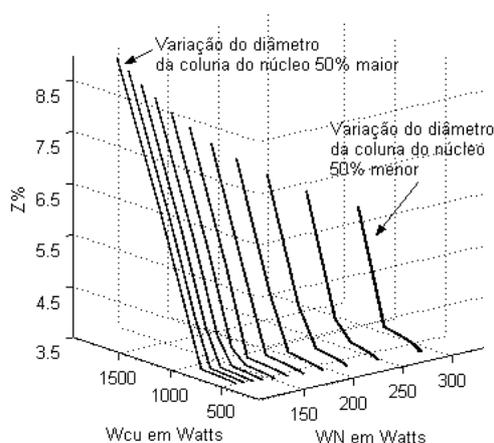
O comportamento das perdas em vazio e em carga para projetos com a densidade magnética 50% abaixo do valor de referência é mostrado na Figura A1.8. O comportamento da impedância percentual é não-linear para valores acima de 3,5%.



b) *Variação da densidade da corrente de AT, da espessura da isolamento e da indução magnética;*

Os projetos que consideram o condutor de BT e AT constante, com variação da espessura da isolamento e da indução magnética apresentam impedância percentual igual a 3,5%.

A Figura A1.9 apresenta as superfícies da impedância percentual para projetos que possuem o condutor de BT constante e com variação na densidade da corrente de AT, na espessura da isolamento e na indução magnética.



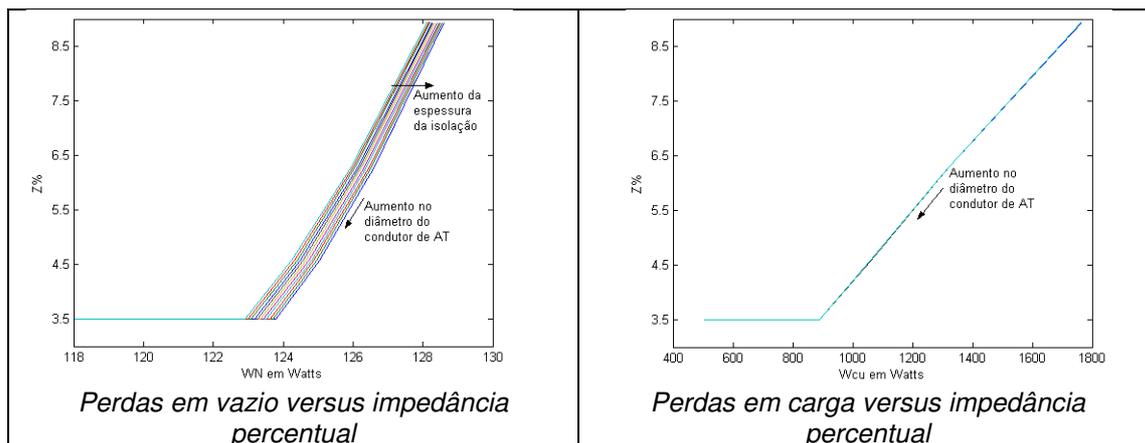


Figura A1.10 – Perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando o condutor de BT constante e com variação do diâmetro do condutor de AT.

Os projetos com variação da densidade da corrente de AT, da espessura da isolação e da indução magnética são apresentados na Figura A1.11. O comportamento da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga são mostrados na Figura A1.12.

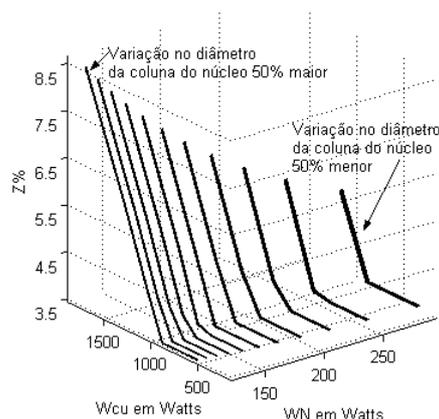


Figura A1.11 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando o condutor de BT constante e com variação no diâmetro do condutor de AT.

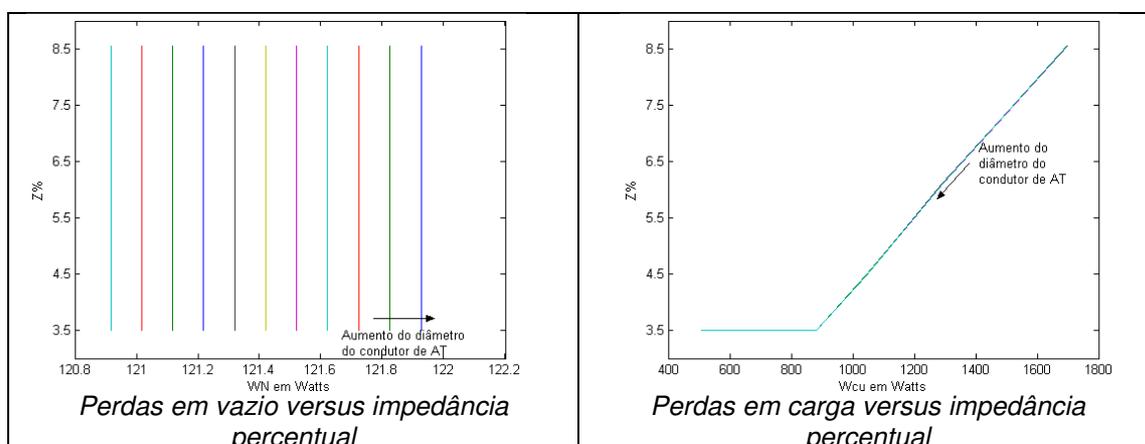


Figura A1.12 – Perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando o condutor de BT constante e com variação do diâmetro do condutor de AT.

c) *Variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolação e do condutor de AT;*

Para projetos onde a largura do condutor de BT e a espessura da isolação são variáveis, com densidade da corrente de AT constante a impedância percentual igual a 3,5%. Devido à variação da largura do condutor de BT obtém-se altura da janela variável.

Os projetos onde a espessura do condutor de BT e espessura da isolação são variáveis mantendo-se a densidade da corrente de AT constante e impedância percentual igual a 3,5%. A variação da espessura do condutor de BT resulta em uma variação no comprimento da culatra.

A Figura A1.13 apresenta as superfícies de impedância percentual para a largura do condutor de BT, da espessura da isolação e densidade da corrente de AT variável.

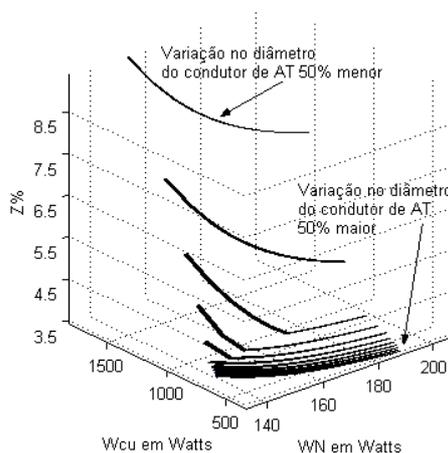


Figura A1.13 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando variação da largura do condutor de BT e com variação no diâmetro do condutor de AT.

As perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando projetos que possuem o diâmetro do condutor de AT 20% menor que o valor de referência é mostrado na Figura A1.14. De acordo com as superfícies, quanto maior o diâmetro do condutor de AT menor é a impedância percentual. A combinação do diâmetro do condutor de AT 10% menor que o valor de referência com a variação da largura do condutor de BT 50% menor obtém-se impedância percentual maior.



Figura A1.14 – Perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando a variação da largura do condutor de BT e com variação do diâmetro do condutor de AT.

A Figura A1.15 apresenta a superfície de impedância percentual para projetos com a espessura do condutor de BT, da isolamento e da indução magnética variáveis.

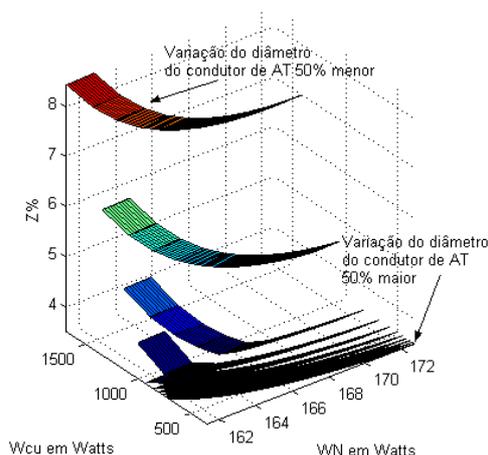


Figura A1.15 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando variação da espessura do condutor de BT e com variação no diâmetro do condutor de AT.

A impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga, considerando os projetos com diâmetro do condutor de AT 20% menor que o valor de referência são mostrados na Figura A1.16. Segundo as superfícies, quanto menor for a densidade da corrente de AT menor é a impedância percentual. A combinação do diâmetro do condutor de AT 10% menor que o valor de referência com a variação da espessura do condutor de BT 50% menor obtém-se impedância percentual maior.

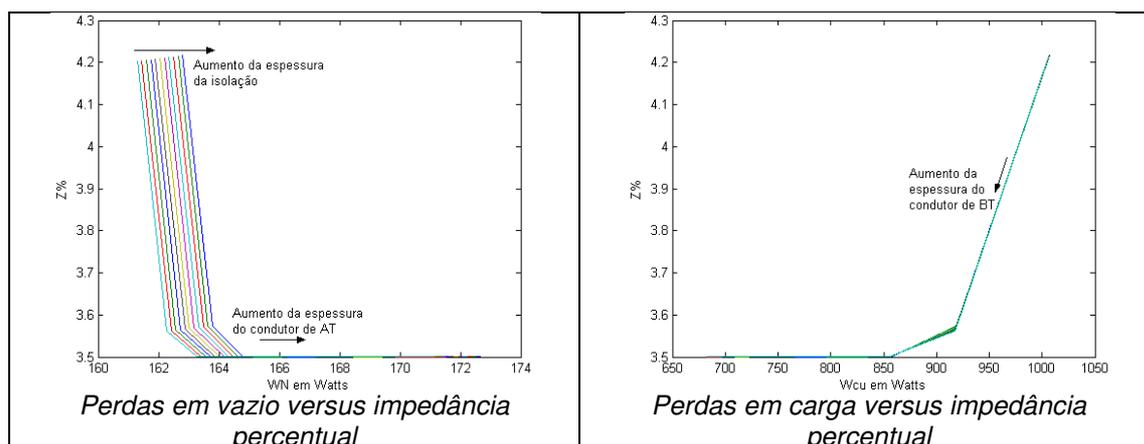


Figura A1.16 – Perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando a variação da espessura do condutor de BT e com variação do diâmetro do condutor de AT.

d) *Variação da densidade da corrente de AT, da distância entre enrolamentos e do diâmetro da coluna do núcleo;*

Para projetos que possuem o condutor de BT e AT constante com a distância entre enrolamentos e do diâmetro da coluna do núcleo variáveis, a impedância percentual é igual a 3,5%.

As superfícies de impedância percentual para projetos com variação na densidade da corrente de AT, na distância entre enrolamentos e na indução magnética são mostradas na Figura A1.17.

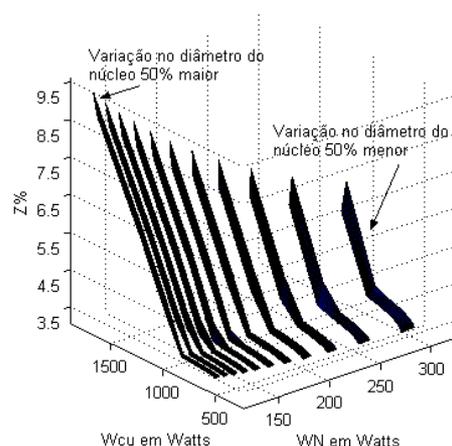


Figura A1.17 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando o condutor de BT constante e com variação no diâmetro do condutor de AT.

A Figura A1.18 apresenta a impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando os projetos que possuem o diâmetro do condutor de AT 20% menor que o valor de referência.

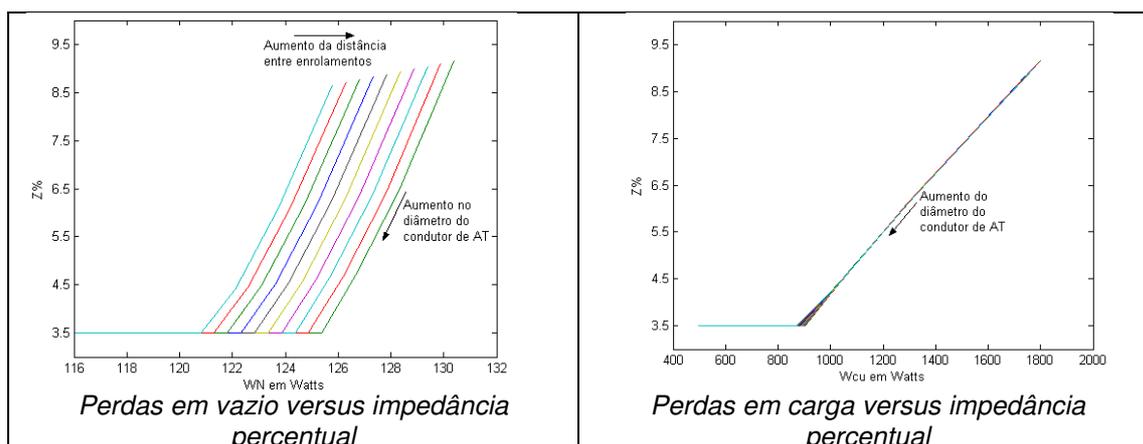


Figura A1.18 – Perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando o condutor de BT constante e com variação do diâmetro do condutor de AT.

As superfícies de impedância percentual para projetos com densidade da corrente de BT constante e variação na densidade de AT, na distância entre enrolamentos e na indução magnética são apresentadas na Figura A1.19. A diferença entre as Figuras A1.17 e A1.19 está na altura da janela e no comprimento da culatra. A altura da janela na Figura A1.17 é maior do que na A1.19. O comprimento da culatra é maior na Figura A1.19 do que na A1.17.

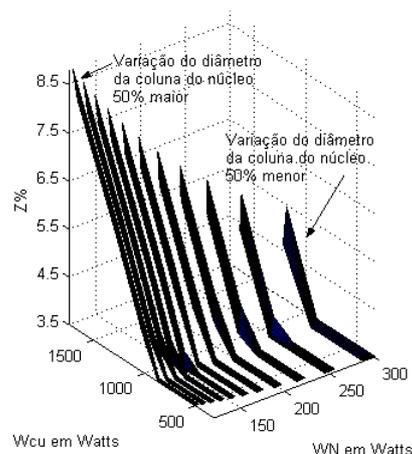


Figura A1.19 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando o condutor de BT constante e com variação no diâmetro do condutor de AT.

A Figura A1.20 mostra a impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando os projetos com densidade da corrente de AT 50% menor do que o valor de referência. A mudança no valor da impedância percentual deve-se às alterações no comprimento da culatra.

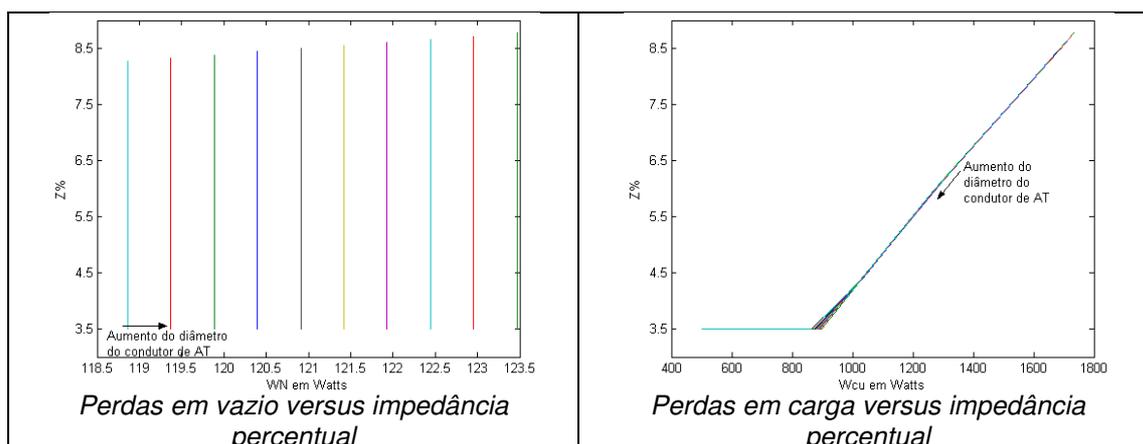


Figura A1.20 – Perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando o condutor de BT constante e com variação do diâmetro do condutor de AT.

Nestes projetos, observa-se que o comportamento da impedância percentual é não-linear para valores acima de 3,5%.

Os projetos que apresentaram impedância percentual igual a 3,5 %, apesar do ajustes das bobinas em relação à coluna do núcleo e do comprimento da culatra foram:

e) *Variação do calço, da cabeça da bobina, da espessura da isolação e da indução magnética;*

f) *Variação da distância entre enrolamentos, da espessura da isolação e da indução magnética;*

g) *Variação da densidade da corrente de BT, da espessura da isolação, do calço e da cabeça da bobina;*

h) *Variação da densidade da corrente de AT, da espessura da isolação e da distância entre enrolamentos.*

As superfícies de impedância percentual para a variação da densidade da corrente de AT são mostradas na Figura A1.21. As perdas em vazio e em carga para os projetos com variação da distância entre enrolamentos 50% acima do valor de referência são mostradas na Figura A1.22.

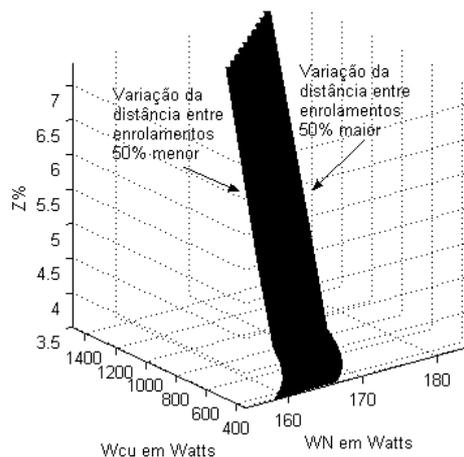


Figura A1.21 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando o condutor de BT constante e com variação no diâmetro do condutor de AT.

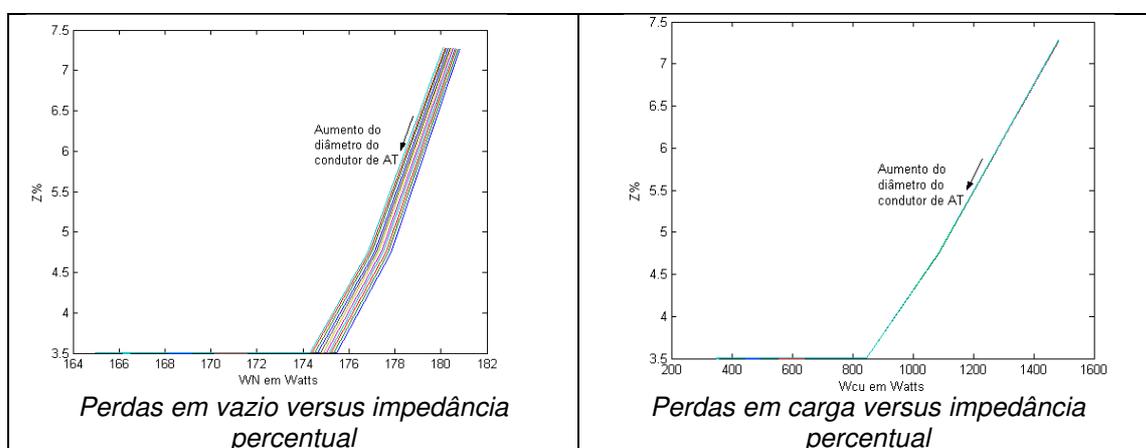


Figura A1.22 – Perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando o condutor de BT constante e com variação do diâmetro do condutor de AT.

A Figura A1.23 apresenta as superfícies de impedância percentual para a variação da densidade da corrente de AT com indução magnética constante e maior comprimento da culatra. As perdas em vazio e em carga para projetos com variação da distância entre enrolamentos 50% acima do valor de referência são mostrados na Figura A1.24.

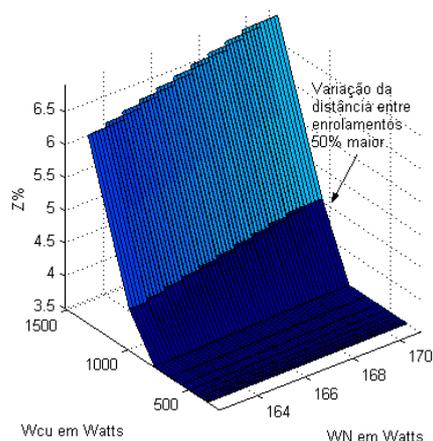


Figura A1.23 – Superfície da impedância percentual em relação às perdas em vazio e em carga considerando o condutor de BT constante e com variação no diâmetro do condutor de AT.

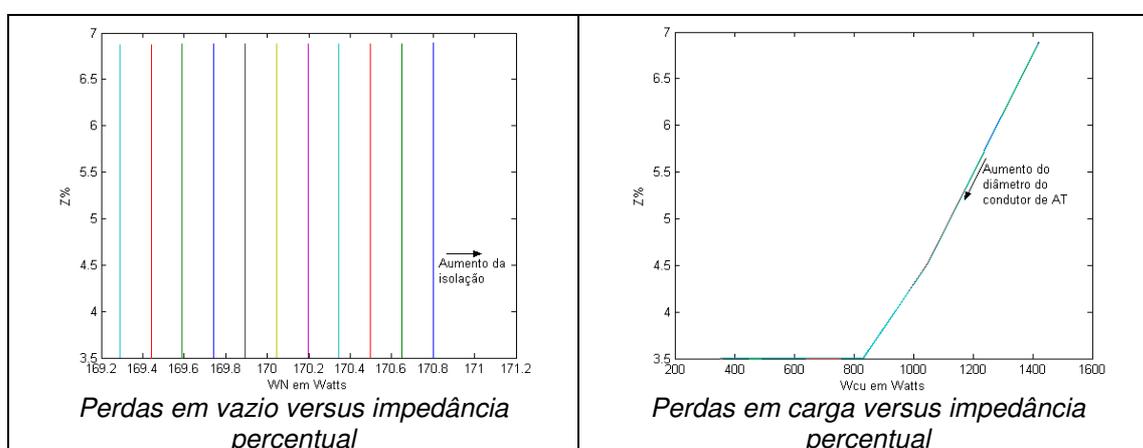


Figura A1.24 – Perdas em vazio e em carga em relação à impedância percentual considerando o condutor de BT constante e com variação do diâmetro do condutor de AT.

Todos os conjuntos de projetos apresentam valores constantes e iguais a 3,5% de impedância percentual em relação às perdas. Para valores acima de 3,5%, a impedância percentual é não-linear.

### A1.2 SUPERFÍCIES DE TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO

As superfícies de tempo de retorno do investimento (TRI) indicam os projetos que apresentam o melhor resultado em relação às perdas em vazio e em carga. A Figura A1.25 apresenta estas superfícies para os projetos com densidade da corrente constante de BT e AT, espessura da isolamento e indução magnética variáveis. A Tabela A1.1 mostra os valores do TRI para esta superfície. O projeto com TRI igual a 0,1 anos possui espessura da isolamento 50% maior em relação ao valor padrão.

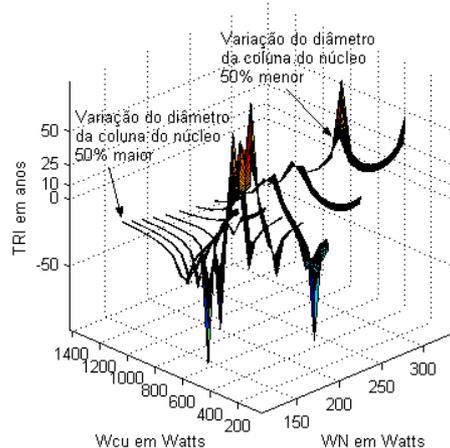


Figura A1.25 – Superfície de TRI considerando os condutores de BT e AT constante, com variação da espessura da isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo.

Tabela A1.1 – Valores de TRI em relação ao diâmetro da coluna do núcleo

<i>Variação da indução magnética em relação ao valor de referência</i>	<i>TRI em anos</i>
<i>50 % maior</i>	<i>Não possui</i>
<i>40% maior</i>	<i>Não possui</i>
<i>30% maior</i>	<i>Não possui</i>
<i>20% maior</i>	<i>Não possui</i>
<i>10% maior</i>	<i>0,1</i>
<i>Valor de referência</i>	<i>Não possui</i>
<i>10% menor</i>	<i>0,64</i>
<i>20% menor</i>	<i>4,74</i>
<i>30% menor</i>	<i>6,64</i>
<i>40% menor</i>	<i>8,97</i>
<i>50 % menor</i>	<i>9,65</i>

A superfície de TRI para os projetos com densidade da corrente constante de BT e AT, distância entre enrolamentos, calço e cabeça da bobina variáveis são mostrados na Figura A1.26. A Tabela A1.2 apresenta os valores do TRI para estes projetos.

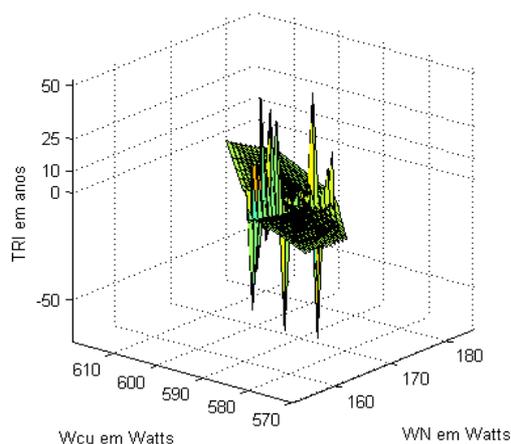


Figura A1.26 – Superfície de TRI considerando os condutores de BT e AT constante, com variação da distância entre enrolamento e do calço mais cabeça da bobina.

A Figura A1.27 apresenta, à esquerda, as superfícies de TRI para os projetos com espessura da isolamento e indução magnética variáveis. À direita, as superfícies de TRI para os projetos com densidade da corrente de AT, a distância entre enrolamentos, o calço e cabeça da bobina variáveis, resultando no incremento do comprimento da culatra.

Tabela A1.2 – Valores de TRI em relação ao calço mais cabeça da bobina

<i>Varição do calço mais cabeça da bobina em relação ao valor de referência</i>	<i>TRI em anos</i>
<i>50 % maior</i>	<i>Não possui</i>
<i>40% maior</i>	<i>Não possui</i>
<i>30% maior</i>	<i>Não possui</i>
<i>20% maior</i>	<i>Não possui</i>
<i>10% maior</i>	<i>2,14</i>
<i>Valor de referência</i>	<i>Não possui</i>
<i>10% menor</i>	<i>1,84</i>
<i>20% menor</i>	<i>Não possui</i>
<i>30% menor</i>	<i>Não possui</i>
<i>40% menor</i>	<i>Não possui</i>
<i>50 % menor</i>	<i>0,25</i>

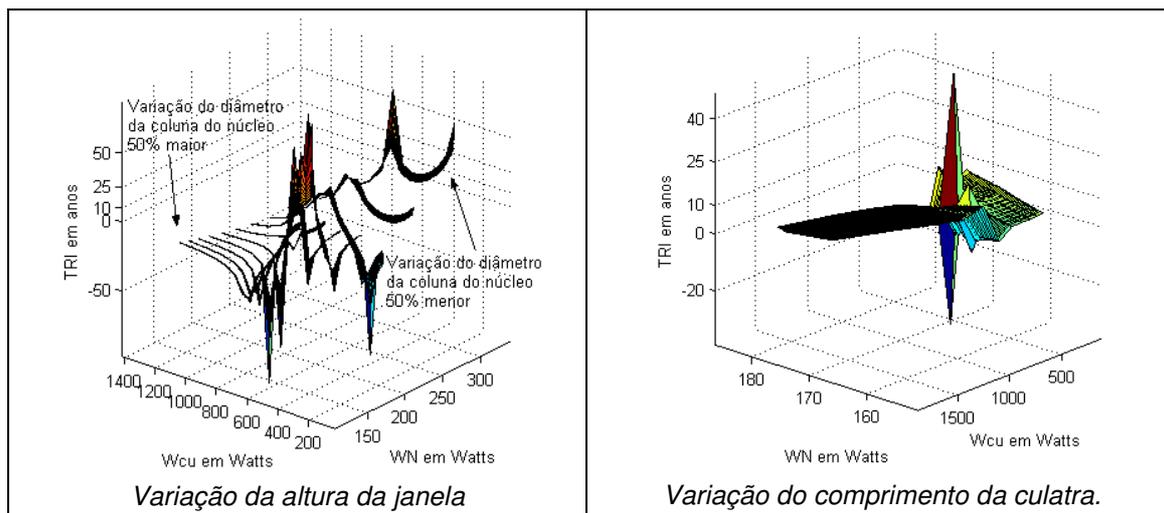


Figura A1.27 – Superfície de TRI considerando o projeto com os condutores de BT e AT constante, com variação da espessura da isolamento e do diâmetro da coluna do núcleo e o projeto com variação do condutor de AT, distância entre enrolamento e do calço mais cabeça da bobina.

### A1.3 SUPERFÍCIES DAS TEMPERATURAS DOS ENROLAMENTOS

As superfícies da temperatura do enrolamento são calculadas de acordo com a NBR 5416 [3] conforme Capítulo 3. A constante do ponto mais quente é igual a 0,08 para transformadores com o método de resfriamento ONAN. O aumento da temperatura média acima da ambiente deve ser de 65°C ou 55°C, dependendo da classe de isolamento do transformador. A carga inicial para o cálculo é de 1,15 p.u. e a final de 1,20 p.u. A Figura A1.28 apresenta as superfícies da temperatura do ponto mais quente considerando a temperatura ambiente igual a 40°C.

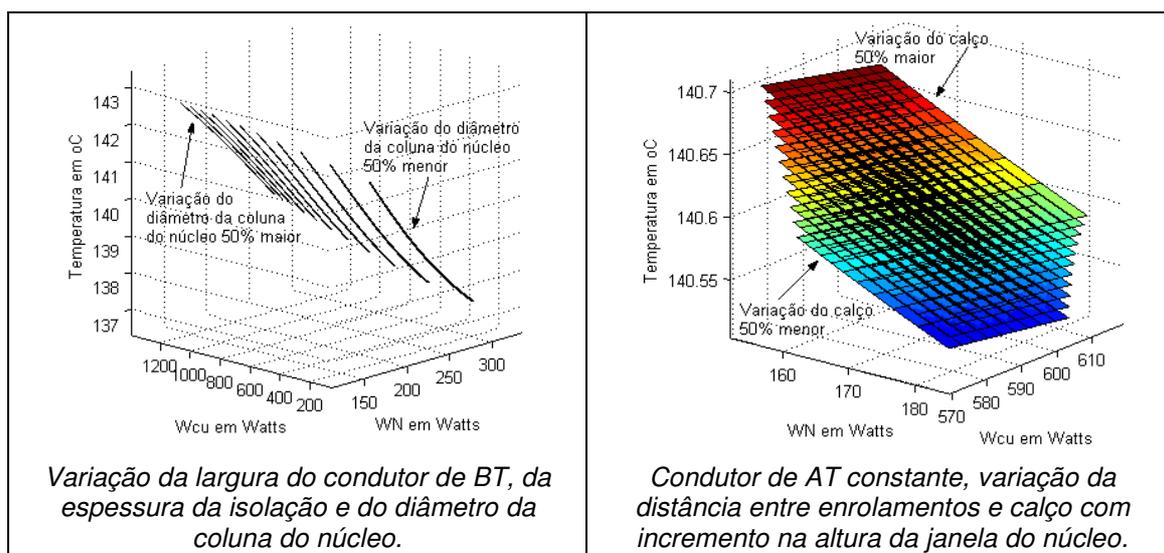


Figura A1.28 – Superfície da temperatura do ponto mais quente em relação às perdas em vazio e em carga.

Os projetos, das primeiras superfícies, possuem a largura do condutor de BT, espessura da isolação e da indução magnética variáveis. O segundo conjunto de superfícies apresenta projetos com condutores de BT e AT constantes, variando a distância entre enrolamentos, calço e altura da janela do núcleo.

A Figura A1.29 apresenta a temperatura do ponto mais quente do enrolamento considerando o primeiro conjunto de superfícies com espessura do condutor de BT, espessura da isolação e indução magnética variáveis. Os projetos com densidade da corrente de AT constante e variação na distância entre enrolamentos, no calço e no comprimento da culatra do núcleo formam o segundo conjunto de superfícies.

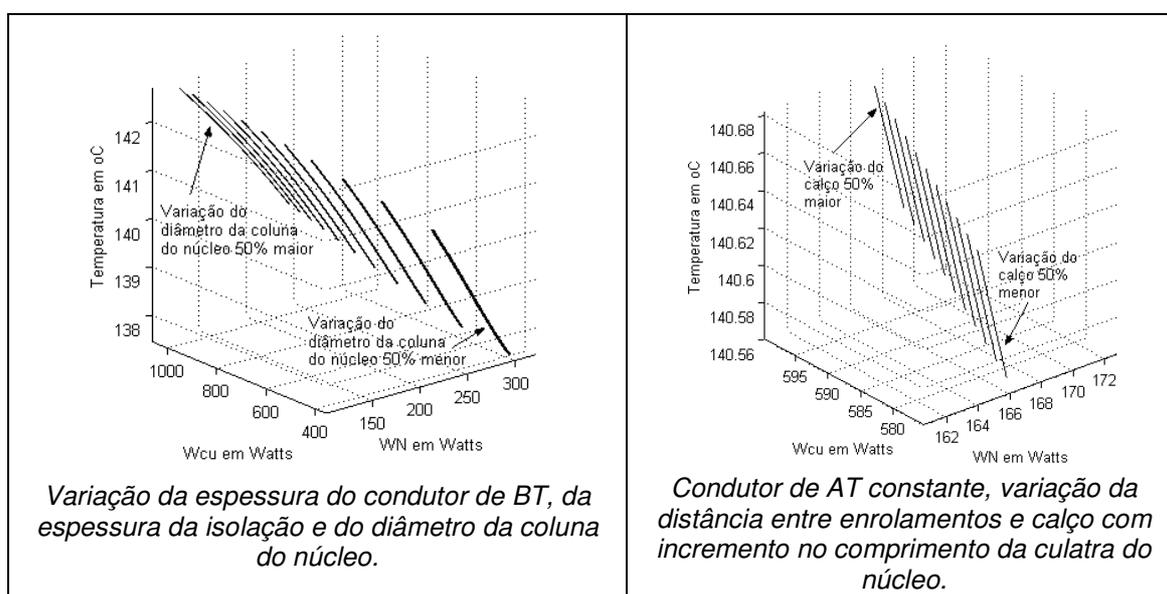


Figura A1.29 – Superfície da temperatura do ponto mais quente em relação às perdas em vazio e em carga.

A temperatura do ponto mais quente do enrolamento para os projetos com densidade da corrente de AT, distância entre enrolamentos, calço e altura da janela do núcleo variáveis formam o primeiro conjunto de superfícies da Figura A1.30. O segundo apresenta os projetos com variação da densidade de corrente de AT, da distância entre enrolamentos, do calço e do comprimento da culatra do núcleo.

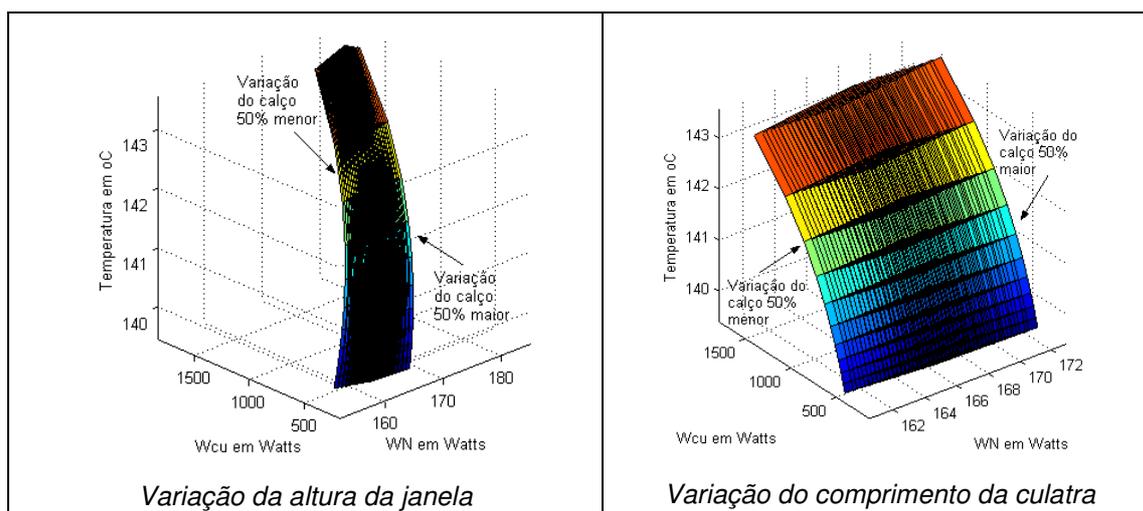


Figura A1.30 – Superfície da temperatura do ponto mais quente em relação às perdas em vazio e em carga.

#### A1.4 SUPERFÍCIES DE TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO

As superfícies da temperatura do enrolamento são calculadas de acordo com a NBR 5416 [3], com valor para a constante de tempo do topo do óleo igual a 2,7h para transformadores com o método de resfriamento ONAN.

A Figura A1.31 apresenta as superfícies do topo do óleo em relação às perdas em vazio e em carga para o período entre 17 e 18 horas da demanda na Figura 5.89. O primeiro conjunto de superfícies apresenta projetos com largura do condutor de BT, espessura da isolamento e indução magnética variáveis. Os projetos com densidade da corrente de AT constante e variação da distância entre enrolamentos, do calço e da altura da janela do núcleo formam o segundo conjunto.

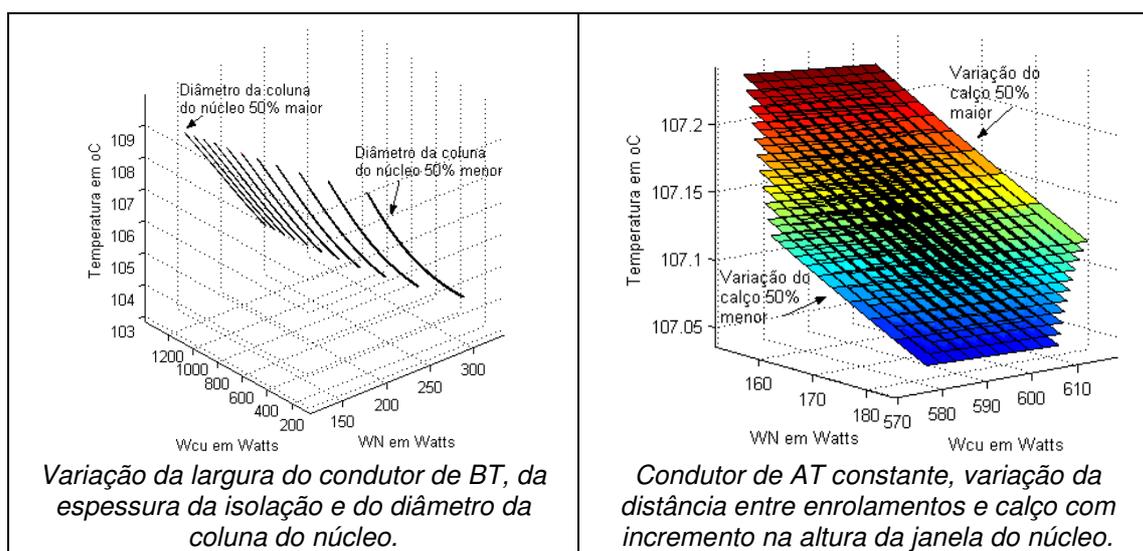


Figura A1.31 – Superfície da temperatura do topo do óleo em relação às perdas em vazio e em carga.

As superfícies da temperatura do topo do óleo em relação às perdas em vazio e em carga são mostradas na Figura A1.32. O primeiro conjunto de superfícies apresenta a espessura do condutor de BT, a espessura da isolação e a indução magnética variáveis. Os projetos com densidade de corrente de AT constante, variação da distância entre enrolamentos, do calço e do comprimento da culatra produzem o segundo conjunto.

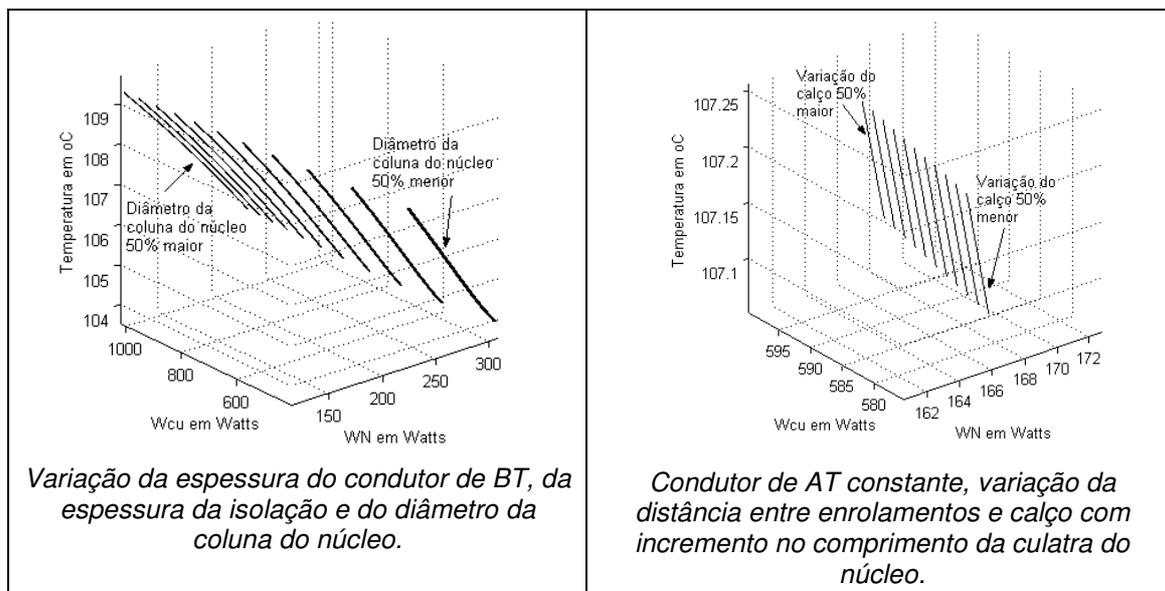


Figura A1.32 – Superfície da temperatura do topo do óleo em relação às perdas em vazio e em carga.

A Figura A1.33 apresenta as superfícies da temperatura do topo do óleo em relação às perdas em vazio e em carga. O primeiro conjunto de superfícies apresenta o diâmetro do condutor de AT, a distância entre enrolamentos, o calço e a altura da janela do núcleo variáveis. O segundo conjunto mostra os projetos com a densidade da corrente de AT, a distância entre enrolamentos, o calço e o comprimento da culatra variáveis.

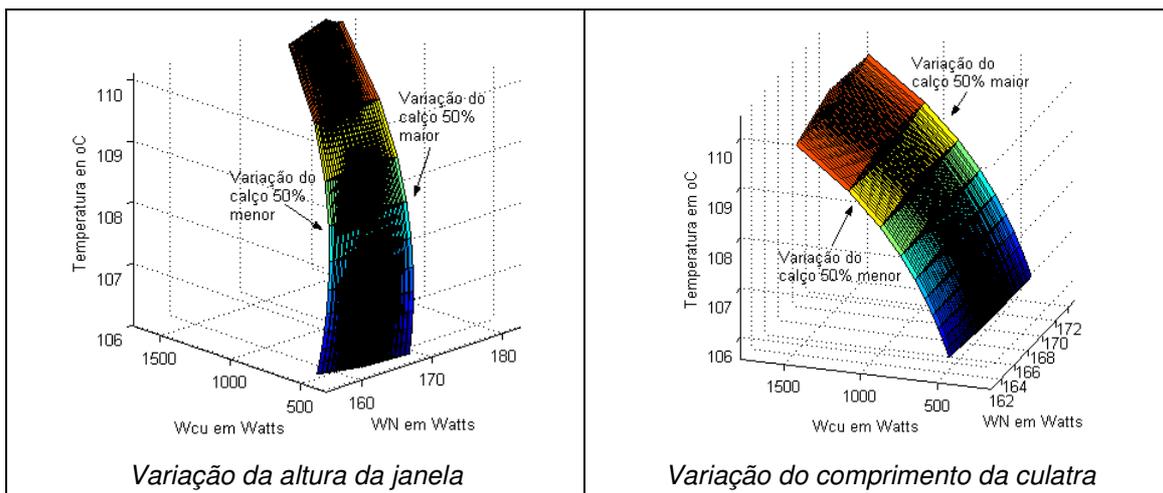


Figura A1.33 – Superfície da temperatura do topo do óleo em relação às perdas em vazio e em carga.

### A1.5 SUPERFÍCIES DO FATOR DE ACELERAÇÃO DE ENVELHECIMENTO

O fator de aceleração de envelhecimento (FAA) é a relação da vida útil do projeto com temperatura de 110°C e dividido pela vida útil do transformador no ponto mais quente do enrolamento conforme Equação (A1.1).

$$FAA = e^{39,16-15000/(\theta_H+273)} \tag{A1.1}$$

A Figura A1.34 apresenta as superfícies de FAA em relação às perdas em vazio e em carga de acordo com a temperatura do ponto mais quente para o período entre as 17 e 18 horas para a demanda na Figura 5.66 do Capítulo 5.

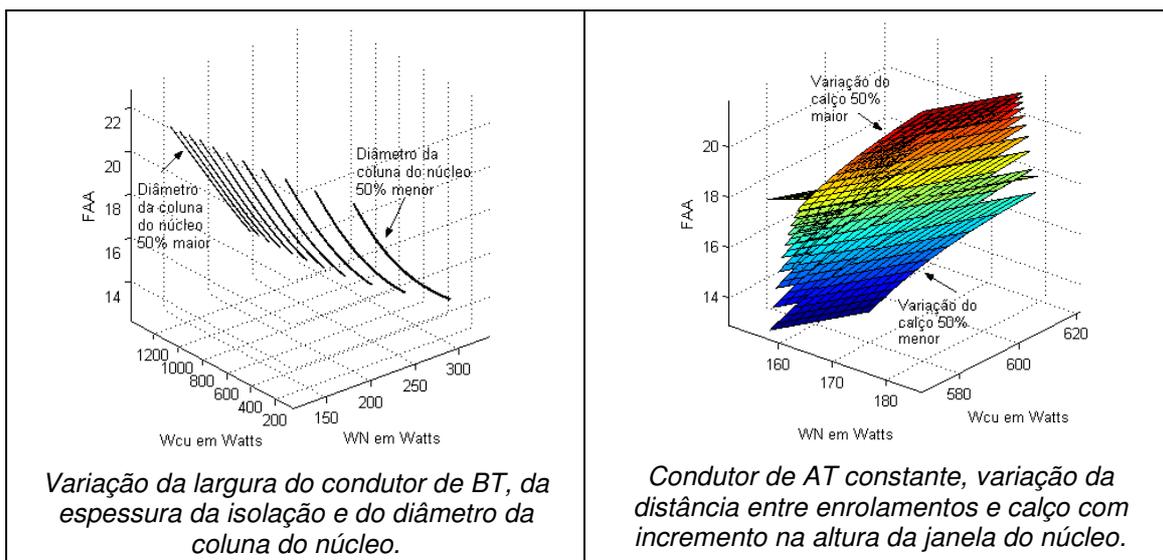


Figura A1.34 – Superfície do fator de aceleração de envelhecimento em relação às perdas em vazio e em carga.

O primeiro conjunto de superfícies considera os projetos com a largura do condutor de BT, a espessura da isolação e indução magnética variáveis. Os projetos com densidade da corrente de AT constante e variação na distância entre enrolamentos, no calço e na altura da janela do núcleo formam o segundo conjunto de superfícies.

As superfícies de FAA em relação às perdas em vazio e em carga são apresentadas na Figura A1.35. Os projetos com a espessura do condutor de BT, a espessura da isolação e indução magnética variáveis produzem o primeiro conjunto de superfícies. O segundo considera os projetos com densidade da corrente de AT constante e variação na distância entre enrolamentos, no calço e no comprimento da culatra do núcleo.

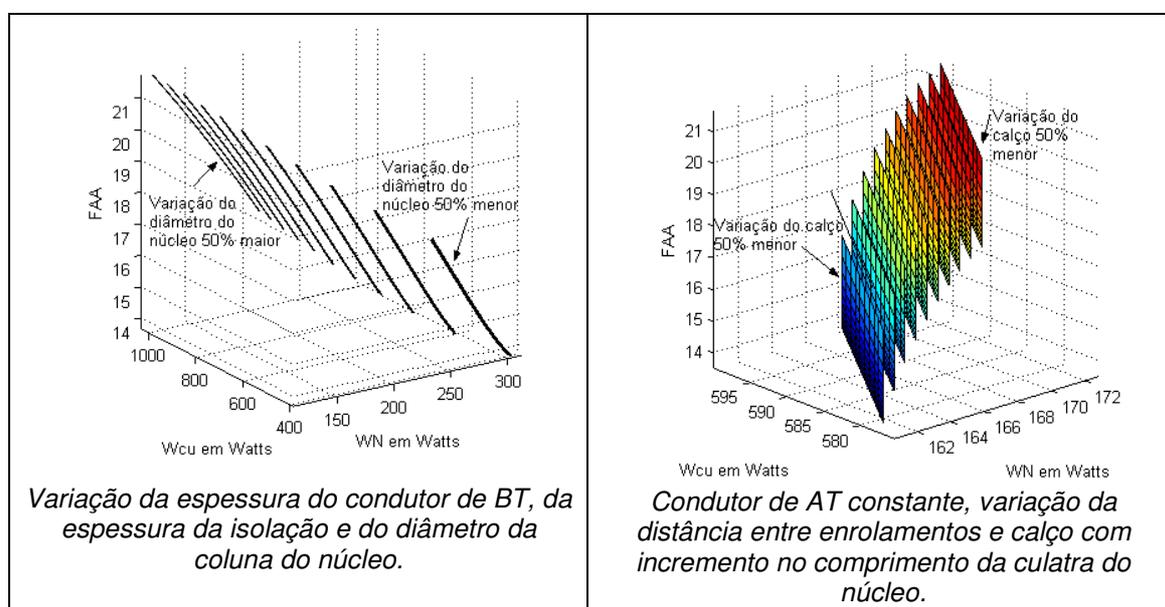


Figura A1.35 – Superfície do fator de aceleração de envelhecimento em relação às perdas em vazio e em carga.

A Figura A1.36 apresenta as superfícies de FAA em relação às perdas em vazio e em carga. O primeiro conjunto de superfícies considera os projetos com densidade da corrente de AT, distância entre enrolamentos, calço e altura da janela variáveis. Os projetos com variação na densidade da corrente de AT, na distância entre enrolamentos, no calço e no comprimento da culatra do núcleo formam o segundo conjunto.

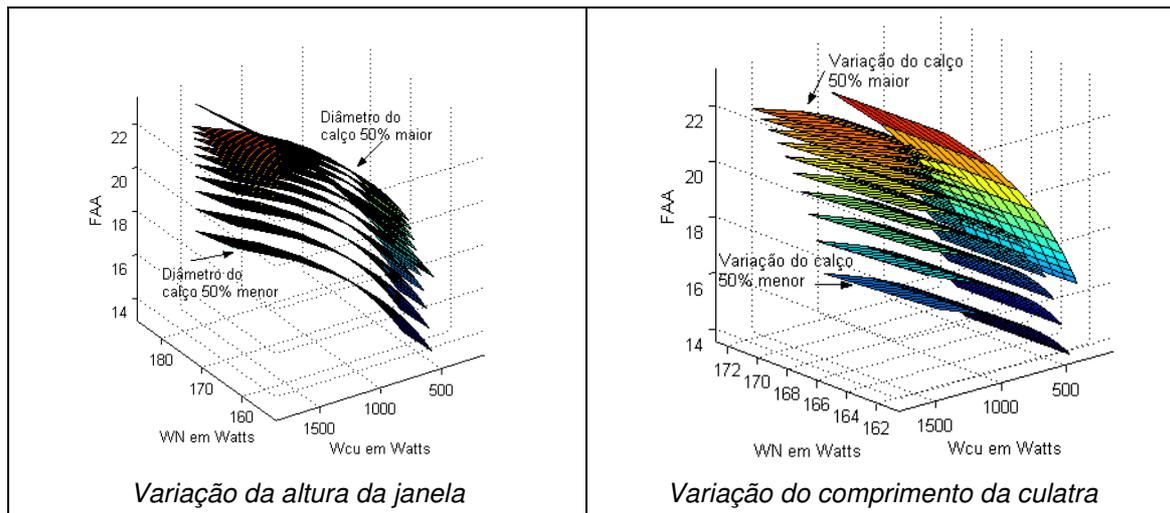


Figura A1.36 – Superfície do fator de aceleração de envelhecimento em relação às perdas em vazio e em carga.

## *BIBLIOGRAFIA*

- [1] NBR 5440: Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição: Padronização. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica. Julho, 1999.
- [2] European Copper Institute. "The Scope for Energy Saving in the EU through the use of energy-efficient electricity distribution transformers". European Communities, 1999.
- [3] NEMA Standards Publication TP 1-2002. "Guide for Determining Energy Efficiency for Distribution Transformers". National Electrical Manufacturers Association, 2002.
- [4] U.S. Department of Energy. "Distribution Transformers Final Rule Technical Support Document – TSD". Washington, DC 20585.
- [5] Picanço, A.F. "Avaliação Econômica de Transformadores de Distribuição com Base no Carregamento e Eficiência Energética". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Abril de 2006.
- [6] Martin, J.C. "La escuela del técnico electricista: teoría, calculo y construcción de transformadores". Vol. VII. Editorial Labor, S.A. 1957.
- [7] IEEE C57.91 – 1995. "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers". IEEE Power Engineering Society, Junho, 2003.
- [8] Winders, J.J. "Power Transformers: Principles and Applications". Marcel Dekker, Inc. 2002.
- [9] NBR 5356: Transformadores de Potência: Especificação. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica. Agosto, 1993.
- [10] NBR 5416: Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência: Procedimento. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica. Julho, 1997.

[11] NBR 5380: Transformadores de Potência: Método de Ensaio. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica. Maio, 1993.

[12] Jakob, M. and Hawkins, G.A. “Elements of Heat Transfer” 3rd Edition, Wiley International Edition, 1957.

[13] McAdams, W.H. “Heat Transmission” 3rd Edition, McGraw-Hill Book company, Inc, 1954.

[14] Electric Power Research Institute. “Basic Transformer Life Characteristics – Volume 1: Overload Characteristics and Life-Test Evaluation”, EPRI, 1982.

[15] Electric Power Research Institute. “Basic Transformer Life Characteristics – Volume 2: Evaluation of a Fluoroptic Thermometer as a Hot-Spot Sensor for Power Transformers”, EPRI, 1982.

[16] Lat, M.V. “Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arresters”. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-102, No.7, July, 1983.

[17] Blume, L.F., Boyajian, A., Camilli, G., Lennox, T.C., Minneci, S., Montsinger, V.M. “Transformer Engineering: A Treatise on the Theory, Operation, and, Application of Transformers” John Wiley & Sons, Inc, 1951.

[18] Bean, R.L., Chackan, N., Moore, H.R., Wentz,E.C. “Transformers for the Electric Power Industry” McGraw-Hill Book Company, Inc. 1959.

[19] teNyenhuis, E.G., Girgis, R.S., Mechler, G.F., Zhou, G. “Calculation of Core Hot-Spot Temperature in Power and Distribution Transformers”. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.17, No.4, October 2002.

[20] Kuffel, E. and Abdulah, M. “High-Voltage Engineering” Pergamon Press, 1970.

[21] Arora, R. and Mosch, W. “High Voltage Insulation Engineering: Behavior of Dielectrics, Their Properties and Applications” New Age Publishers, 1995.

- 
- [22] DeVecchio, R.M., Poulin, B., Feghali, P.T., Shah, D.M., Ahuja, R. "Transformer Design Principles" CRC Press, 2001.
- [23] Kulkarni, S.V. and Khaparde, S.A. "Transformer Engineering : Design and Practice". Marcel Dekker, CRC Press, Taylor&Francis Group, 2004.
- [24] Putman, T.H. "Economics and Power Transformer Design" IEEE, Dezembro, 1963.
- [25] Jabr, R.A. "Application of Geometric Programming to Transformer Design", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.41, No.11, Novembro, 2005.
- [26] de Alcantara, F.L. e de Cunha, M.A. "Estudo da Recristalização Secundária do Aço Silício de Grão Orientado", Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v.2, n.3, p. 32-36, São Paulo, jan-mar 2006.

#### *BIBLIOGRAFIA RELACIONADA*

- [1] Wilkes, G.B. "Heat Insulation", John Wiley & Sons, Inc., 1950.
- [2] Ryder, S.A. "A Simple Method for Calculating Winding Temperature Gradient in Power Transformers". IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.17, No.4, October 2002.
- [3] Swift, G., Molinski, T.S., Lehn, W. "A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling – Part I: Theory and Equivalent Circuit". IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.16, No.2, April 2001.
- [4] Tylavsky, D.J., He, Q., Si, J., McCulla, G.A., Hunt, J.R. "Transformer Top-Oil Temperature Modeling and Simulation". IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.36, No.5, September 2000.
- [5] Lesieutre, B.C., Hagman, W.H., Kirtley Jr., J.L. "An Improved Transformer Top Oil Temperature Model for Use in An On-Line Monitoring and Diagnostic System" IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.12, No.1, January 1997.
- [6] Vilaithong, R., Tenbohlen, S., Stirl, T. "Investigation of Different Top-Oil Temperature Models for On-Line Monitoring System of Power Transformer". Institute of

Power Transmission and High Voltage Technology, University of Stuttgart, Germany, 2006.

[7] Pudlo, G., Tenbohlen, S., Linders, M., Krost, G. "Integration of Power Transformer Monitoring and Overload Calculation into the Power System Control Surface". IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, 2002.

[8] Pierre, D. A. "Optimization Theory with Applications" Dover Publications, Inc., 1986.

[9] Lasdon, L.S. "Optimization Theory for Large Systems" Dover Publications, Inc., 2002.

[10] Fletcher, R. "Practical Methods of Optimization" Volume 1 e 2. John Wiley & Sons, 1980.

#### *ARTIGOS PUBLICADOS*

[1] A.F. Picanço, M.L.B. Martinez, P.C.Rosa, "Bragg System for Temperature Monitoring in Distribution Transformers", Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol.80, Issue 1, January 2010, ISSN 0378-7796.

[2] A.F.Picanço, M.L.B.Martinez, de Salles, C., "Desempeno de Transformadores de Distribución", Mundo Electrico – Revista Especializada em Electrotecnia, Enero-Marzo, 2009, Vol. 23, Nº74, ISSN 1692-7052, Pags 109 a 114, Bogotá, Colombia.

[3] A.F.Picanço, C. de Salles, P.C.Rosa, M.L.B. Martinez, and H.R.P.M de Oliveira. "Development of Economical Analysis and Technical Solutions for Efficient Distribution Transformers". 6<sup>th</sup> Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion – MedPower 2008, Thessaloniki, Greece, November 2008.

[4] A.F.Picanço, H.R.P.M de Oliveira, M.L.B. Martinez, and P.C.Rosa. "Development of Economic Analysis and Technical Solutions for Efficient Distribution Transformers in MV Grid". 2008 Electrical Power and Energy Conference – EPEC2008, Vancouver, Canada, October 2008.

[5] A.F.Picanço, C. de Salles, P.C.Rosa, M.L.B. Martinez, H.R.P.M de Oliveira and N.C. de Jesus. "Designing Transformers According to Load". 15th-ISH International Symposium on High Voltage Engineering, 2007.