



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP



Constantino Sousa Duarte Silva

Modelização de Transformadores a Frequência Variável Incluindo os Efeitos dos Harmónicos

MMI

Porto, 2004

UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA

**MODELIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES A FREQUÊNCIA
VARIÁVEL, INCLUINDO OS EFEITOS DOS HARMÔNICOS**

Constantino Sousa Duarte Silva

Março de 2004



FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

**MODELIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES A FREQUÊNCIA
VARIÁVEL, INCLUINDO OS EFEITOS DOS HARMÓNICOS**

Constantino Sousa Duarte Silva

Licenciado em Engenharia Electrotécnica - Ramo de Automação Energia e
Electrónica pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de
Coimbra

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
mestre em Manutenção Industrial

Dissertação realizada sob a supervisão do
Prof. Amândio Gabriel Morim Silva
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Março de 2004

UNIVERSIDADE DO PORTO	
Faculdade de Engenharia	
BIBLIOTECA M	
N.º	78214
CDU	621.3(043)
Data	9, 9, 2004

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Morim Silva pela pedagogia, rigor técnico e disponibilidade apresentados ao longo do trabalho.

Ao Eng. José Pinheiro Jorge pelo apoio técnico e disponibilidade em busca de soluções para todos os problemas surgidos durante os ensaios.

Ao Eng. Paulo Amado pela disponibilidade e cessão de artigos de interesse para o presente estudo.

À empresa EFACEC, pelas facilidades concedidas.

RESUMO

A utilização dos meios informáticos actuais tem proporcionado melhoramentos significativos no projecto, concepção e diagnóstico de avarias nas máquinas eléctricas. Para melhor aproveitar as capacidades dos referidos meios disponíveis, surge a necessidade de caracterização das máquinas eléctricas.

Os transformadores são máquinas de grande importância, presentes na produção, transporte e distribuição de energia eléctrica. Pelas razões apontadas, surge a necessidade de caracterização das referidas máquinas em determinados regimes de funcionamento.

No presente trabalho, aborda-se a modelização dos transformadores, evidenciando os funcionamentos a frequência variável e com harmónicos na alimentação. Os modelos obtidos são validados por comparação com os resultados experimentais.

ABSTRACT

The use of computers and adapted software has been providing significant improvements in the design, conception and fault diagnosis in the electrical machines. In order to achieve the best advantage of referred available means, it's necessary to characterize the electrical machines.

The transformers are very important machines, presents in the production, transport and distribution of electrical energy. Therefore, the need of their characterization in certain works conditions.

In the present work, the modeling is approached, evidencing the operations at variable frequency and harmonics effects on transformer. The obtained models are validated by comparison with the experimental results.

ÍNDICE

	Pág.
Capítulo 1 Introdução	1
Capítulo 2 Perdas nos circuitos magnéticos	3
2.1 Propriedades das chapas magnéticas	4
2.1.1 Generalidades acerca da chapa magnética	4
2.1.2 Chapas de cristais orientados	4
2.1.3 Chapas sem cristais orientados	5
2.1.4 Perdas por Histerese	6
2.1.5 Perdas por correntes de Foucault	9
2.1.6 Perdas no circuito magnético	12
2.1.7 Princípios para redução de perdas nos circuitos magnéticos	12
2.1.8 Perdas específicas de algumas chapas magnéticas	14
2.1.9 Determinação das perdas específicas das chapas magnéticas	15
2.1.10 Determinação da resistência do isolamento superficial	16
2.2 Princípios teóricos para separação das perdas no ferro nas suas componentes por Histerese e por correntes de Foucault	17
2.2.1 Determinação da resistência do enrolamento alimentado	17
2.2.2 Separação das perdas no ferro nas suas componentes de Histerese e por correntes de Foucault	18
2.3 Síntese e conclusões	20
Capítulo 3 Determinação do Circuito Equivalente de um Transformador	21
3.1 Ensaios económicos	21
3.1.1 Ensaios em circuito aberto ou em vazio	22
3.1.1.1 Procedimentos e objectivo para o ensaio	22
3.1.1.2 Condições particulares para realização do ensaio	22
3.1.2 Montagens	23
3.1.2.1 Montagem clássica para ensaios em vazio	23

	Pág.
3.1.2.2 Montagem para determinação da resistência dos enrolamentos	24
3.1.2.3 Cálculos de grandezas e parâmetros	24
3.1.2.3.1 Determinação do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	24
3.1.2.3.2 Representação esquemática do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	26
3.1.3 Ensaio em curto circuito	27
3.1.3.1 Procedimentos e objectivo do ensaio	27
3.1.3.2 Condições particulares para realização do ensaio	27
3.1.3.3 Montagens	28
3.1.3.3.1 Montagem clássica para ensaios em curto circuito	28
3.1.3.3.2 Montagem para determinação da resistência dos enrolamentos	28
3.1.3.4 Cálculos de grandezas e parâmetros	29
3.1.3.4.1 Caracterização do circuito eléctrico equivalente	29
3.2 Modelo equivalente em gama (Γ) referido ao secundário	33
3.3 Determinação experimental do circuito equivalente	34
3.3.1 Estudo com o primeiro transformador	34
3.3.1.1 Determinação do Ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético em regime nominal	34
3.3.1.2 Cálculo da resistência de fase	35
3.3.1.3 Cálculos de parâmetros e grandezas	36
3.3.1.4 Grandezas e parâmetros do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	37
3.3.1.5 Determinação dos restantes parâmetros do circuito eléctrico equivalente ao transformador em regime nominal	38
3.3.1.6 Cálculo da resistência de fase	38
3.3.1.7 Caracterização do circuito eléctrico equivalente	39
3.3.1.8 Parâmetros do circuito equivalente por fase, em gama (Γ) referido ao secundário	41
3.3.2 Estudo com o segundo transformador	42
3.3.2.1 Determinação do Ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético em regime nominal	42
3.3.2.2 Cálculo da resistência de fase	43
3.3.2.3 Cálculos de parâmetros e grandezas	43
3.3.2.4 Grandezas e parâmetros do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	45
3.3.2.5 Determinação dos restantes parâmetros do circuito eléctrico equivalente ao transformador em regime nominal	45
3.3.2.6 Cálculo da resistência de fase	45
3.3.2.7 Caracterização do circuito eléctrico equivalente	46

	Pág.
3.3.2.8 Parâmetros do circuito equivalente por fase, em gama (Γ) referido ao secundário	48
3.4 Síntese e conclusões	49
Capítulo 4 Estudo do Comportamento de um Transformador Trifásico com a Frequência da Tensão de Alimentação Variável	
Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalente	51
4.1 Condições de ensaios a realizar nos transformadores	52
4.1.1 Condições particulares para os ensaios em circuito aberto ou em vazio	52
4.1.1.1 Determinação da razão de variação tensão e frequência de modo a manter a indução constante	52
4.1.2 Condições para a realização dos ensaios em curto circuito	53
4.2 Estudos realizados no transformador Yy	54
4.2.1 Registo de valores impostos e medidos nos ensaios em vazio (ou em circuito aberto)	54
4.2.1.1 Separação das perdas no ferro nas suas duas componentes – Perdas por efeito de Histerese e perdas devidas às correntes de Foucault	55
4.2.1.2 Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio, à frequência variável e indução constante	58
4.2.1.3 Representação gráfica dos Valores numéricos das perdas por efeitos de Histerese e por efeitos das correntes de Foucault	60
4.2.1.4 Representação gráfica dos valores numéricos das componentes resistiva e reactiva do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	61
4.2.2 Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito, à frequência variável e indução constante	62
4.2.2.1 Representação gráfica dos valores numéricos característicos do circuito eléctrico	64
4.2.2.1.1 Representação gráfica dos Valores numéricos das resistências suplementares, por fase, referidas ao secundário	65
4.2.2.1.2 Representação gráfica dos valores numéricos das resistências e reactâncias combinadas, por fase, referidas ao secundário	65
4.3 Estudos realizados no transformador de ligação Dy	65
4.3.1 Registo de valores impostos e medidos nos ensaios em vazio (ou em circuito aberto)	65
4.3.1.1 Separação das perdas no ferro nas suas duas componentes – Perdas por efeito de Histerese e perdas devidas às correntes de Foucault	66
4.3.1.2 Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio, à frequência variável e indução constante	68
4.3.1.3 Representação gráfica dos valores numéricos das perdas por efeitos de Histerese e por efeitos das correntes de Foucault	71

	Pág.
4.3.1.4 Representação gráfica dos valores numéricos das componentes resistiva e reactiva do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	72
4.3.2 Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito, à frequência variável e indução constante	73
4.3.2.1 Representação gráfica dos valores numéricos característicos do Circuito eléctrico	74
4.3.2.1.1 Representação gráfica dos valores numéricos das resistências suplementares, por fase, referidas ao secundário	74
4.3.2.1.2 Representação gráfica dos valores numéricos das resistências e reactâncias combinadas, por fase, referidas ao secundário	75
4.4 Síntese e conclusões	75
Capítulo 5 Estabelecimento de Leis Matemáticas Representativas dos Parâmetros do Circuito Equivalente de um Transformador, a Frequência Variável	
Regras para Estipulação dos Parâmetros do Circuito Equivalente de um Transformador, a Frequência Variável	77
5.1 Estabelecimento de Leis Matemáticas	78
5.2 Regras práticas para estipulação dos parâmetros, a frequência variável	79
5.2.1 Introdução teórica	79
5.2.1.1 Regra para determinação das reactâncias	80
5.2.2 Regra para determinação das resistências	80
5.2.2.1 Regras para determinação da componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, á frequência variável	81
5.2.2.2 Determinação da resistência combinada dos enrolamentos	82
5.2.2.3 Regra para determinação da resistência suplementar, à frequência variável	82
5.3 Estipulação de parâmetros de um transformador a frequência variável - Casos práticos	83
5.3.1 Estipulação de parâmetros do transformador de ligação Yy, aplicando os conceitos das regras práticas	84
5.3.1.1 Estipulação de impedâncias reactivas, a frequência variável	84
5.3.1.2 Estipulação de resistências	85
5.3.1.2.1 Estipulação da componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, a frequência variável	85
5.3.1.2.2 Determinação da resistência combinada dos enrolamentos	87
5.3.1.2.3 Estipulação da resistência suplementar, à frequência variável	88
5.4 Estipulação de parâmetros do transformador de ligação Yy, através do conceito de polinómios aproximantes (leis matemáticas)	89
5.4.1 Leis matemáticas representativas dos parâmetros do Circuito Magnético	89

	Pág.
5.4.2 Leis matemáticas representativas dos parâmetros do circuito eléctrico equivalente	91
5.5 Estipulação de parâmetros do transformador de ligação Dy, aplicando os conceitos das regras práticas	93
5.5.1 Estipulação de impedâncias reactivas, à frequência variável	93
5.5.2 Estipulação de resistências	94
5.5.2.1 Estipulação da componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, à frequência variável	94
5.5.2.2 Determinação da resistência combinada dos enrolamentos	96
5.5.2.3 Determinação da resistência suplementar, à frequência variável	96
5.6 Estipulação de parâmetros do transformador de ligação Dy, através do conceito de polinómios aproximantes (leis matemáticas)	98
5.6.1 Leis matemáticas representativas dos parâmetros do circuito magnético	98
5.6.2 Leis matemáticas representativas dos parâmetros do circuito eléctrico equivalente	99
5.7 Análise de valores	101
5.8 Síntese e Conclusões	103
Capítulo 6 Avaliação do Comportamento de um transformador em Carga	
Determinação do rendimento	
Validação dos Modelos Estipulados	104
6.1 Avaliação teórica	105
6.1.1 Representação esquemática do modelo equivalente de Kapp	105
6.1.2 Análise teórica do modelo equivalente de Kapp	105
6.1.2.1 Análise teórica do modelo em carga	106
6.1.2.1.1 Caracterização do modelo com uma carga Z_c indutiva	106
6.1.2.1.2 Caracterização do modelo com uma carga Z_c capacitiva	108
6.1.2.1.3 Caracterização do modelo com uma carga Z_c resistiva	109
6.2 Determinação do rendimento	110
6.3 Avaliação experimental do comportamento de um transformador em carga	
Validação do modelo experimental definido a partir dos ensaios económicos	
Validação dos modelos estabelecidos a partir de regras práticas e de leis matemáticas..	112
6.3.1 Estratégias adoptadas na realização dos ensaios	113
6.3.2 Avaliação experimental do comportamento em carga, do transformador de ligação Yy	113
6.3.2.1 Determinação da característica externa e de rendimento com cargas indutivas, à frequência de 45Hz e factor de potência 0.8	113
6.3.2.1.1 Representação gráfica das características externas provenientes de ensaios e de modelos estabelecidos	
Representações gráficas dos rendimentos	115

	Pág.
6.3.2.2 Determinação da característica externa e de rendimento com cargas capacitivas, à frequência de 45Hz e factor de potência 0.8	116
6.3.2.2.1 Representação gráfica das características externas provenientes de ensaios e de modelos estabelecidos	118
Representações gráficas dos rendimentos	118
6.3.2.3 Determinação da característica externa e de rendimento com cargas indutivas, à frequência de 60Hz e factor de potência 0.8	119
6.3.2.3.1 Representação gráfica das características externas provenientes de ensaios e de modelos estabelecidos	121
Representações gráficas dos rendimentos	121
6.3.3 Avaliação experimental do comportamento em carga, do transformador de ligação Dy	122
6.3.3.1 Determinação da característica externa e de rendimento com cargas indutivas, à frequência de 45Hz e factor de potência 0.85	122
6.3.3.1.1 Representação gráfica das características externas provenientes de ensaios e de modelos estabelecidos	124
Representações gráficas dos rendimentos	124
6.3.3.2 Determinação da característica externa e de rendimento com cargas resistivas, à frequência de 45Hz	126
6.3.3.2.1 Representação gráfica das características externas provenientes de ensaios e de modelos estabelecidos	127
Representações gráficas dos rendimentos	127
6.4 Síntese e conclusões	129
Capítulo 7 Harmónicos na Alimentação dos Transformadores	131
7.1 Os Efeitos dos harmónicos na alimentação dos transformadores	
Perdas devidas aos harmónicos da corrente, por efeito das correntes de Foucault	133
7.2 Métodos auxiliares para caracterização dos transformadores secos sob influência de harmónicos	135
7.2.1 Método Normalizado	135
7.2.1.1 Valores do factor K e aplicações típicas	137
7.2.2 Regra preconizada pela publicação UTE 52-114	138
7.2.3 Regra preconizada pelas normas CENELEC e BS	138
7.2.4 – Regra preconizada pela norma CEI	139
7.3 Comportamento dos transformadores em relação aos harmónicos de ordem elevada	142
7.3.1 Modelização dos transformadores em relação aos harmónicos de ordem elevada	142
7.3.2 Efeitos devidos aos harmónicos de ordem elevada nos transformadores	143

	Pág.
7.3.2.1 Efeitos pelicular nos condutores	143
7.3.2.2 Consequências devidas aos harmónicos de ordem elevada, nos transformadores	145
7.4 Regras práticas a considerar no desenvolvimento de transformadores para funcionamento em sistemas de energia com harmónicos	146
7.5 – Determinação experimental dos parâmetros do circuito equivalente do transformador, com harmónicos na alimentação, a frequência fundamental variável	
Comportamento térmico de um transformador com harmónicos na alimentação.....	147
7.5.1 Consecução do sistema de alimentação com harmónicos	148
7.5.2 Ensaio económicos realizados no transformador de ligação Yy, com indução constante	148
7.5.2.1 Ensaio em circuito aberto ou em vazio realizados no transformador em estudo	148
7.5.2.1.1 Montagem	149
7.5.2.1.2 Caracterização da tensão de alimentação do transformador	149
7.5.2.1.3 Valores impostos e medidos nos ensaios	153
7.5.2.1.4 Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio, com harmónicos, a frequência fundamental variável e indução constante	153
7.5.2.1.5 Representação gráfica da tendência dos valores numéricos das componentes resistiva e reactiva do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	154
7.5.2.2 Ensaio em curto circuito realizados no transformador em estudo	154
7.5.2.2.1 Montagem	155
7.5.2.2.2 Caracterização da tensão de alimentação do transformador	155
7.5.2.2.3 Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito, com presença de harmónicos na tensão de alimentação, a frequência fundamental variável e indução constante	159
7.5.2.2.4 Representação gráfica dos valores numéricos característicos do circuito eléctrico	159
7.5.2.3 Determinação de factores de desclassificação e de estipulação de potências	161
7.5.2.3.1 Cálculos para a frequência fundamental 45Hz	162
7.5.2.3.2 Cálculos para a frequência fundamental 50Hz	164
7.5.2.3.3 Cálculos para a frequência fundamental 65Hz	166
7.5.3 Comparações de perdas	167
7.5.3.1 Comparações de perdas em vazio	167
7.5.3.2 Comparações de perdas de Joule e suplementares	168
7.5.4 Característica externa e rendimento	168
7.5.4.1 Determinação experimental e teórica da característica externa e rendimento com cargas indutivas, à frequências de 45Hz, 50Hz, 60Hz e 65Hz, com factor de potência 0.8	168

	Pág.
7.5.5 Estudo do comportamento térmico da máquina	171
7.5.5.1 Aquecimento em vazio, com alimentação sinusoidal	172
7.5.5.1.1 Representação gráfica do aquecimento em vazio, na parte superior do enrolamento da fase W	173
7.5.5.2 Aquecimento em curto circuito, com alimentação sinusoidal	173
7.5.5.2.1 Representação gráfica do aquecimento em curto circuito, na parte superior do enrolamento da fase W	175
7.5.5.3 Aquecimento em vazio, com harmónicos na alimentação	175
7.5.5.3.1 Representação gráfica do aquecimento em vazio, com harmónicos na alimentação	176
7.5.5.4 Aquecimento em curto circuito, com harmónicos na alimentação	177
7.5.5.4.1 Representação gráfica do aquecimento em curto circuito, com harmónicos na alimentação	178
7.5.5.5 Comparações dos aquecimentos em vazio e em curto circuito, tendo em consideração as alimentações sinusoidal e com harmónicos	179
7.5.5.5.1 Comparações dos aquecimentos em vazio	179
7.5.5.5.2 Comparações dos aquecimentos em curto circuito	180
7.6 Síntese e conclusões	181
Capítulo 8 Conclusão Geral	182
Referências	189
Bibliografia	190
Anexo A Aproximação pelo Método dos Mínimos Quadrados	193
Anexo B Tabelas de validação dos Modelos estabelecidos para os transformadores	197
Anexo C Breves Conceitos acerca da Distribuição de Tensões ao Longo de um Enrolamento de um transformador, Sujeito a uma Sobretensão de Elevada Frequência	239
Anexo D Procedimentos recomendados para estimação de perdas e de potência de Transformadores com Cargas não lineares	248

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1: Curvas de magnetização	7
Figura 2.2: Bloco metálico num campo magnético variável	10
Figura 2.3 : Trajectória das correntes de Foucault	10
Figura 2.4 : Circuito de medida da resistência do isolamento superficial	16
Figura 2.5 : Montagem do circuito para determinação da resistência de um enrolamento	17
Figura 3.1 – Esquema de montagem clássica para ensaios em vazio	23
Figura 3.2 - Representação esquemática do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	26
Figura 3.3 – Esquema de montagem clássica para ensaios em curto circuito	28
Figura 3.4 – Circuito eléctrico equivalente por fase	33
Estudos realizados no transformador de ligação Yy	
Figura 4.1 : Representação gráfica das perdas no Ferro por Histerese e por efeito das correntes de Foucault	61
Figura 4.2 : Representação gráfica das componentes resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	62
Figura 4.3 : Representação gráfica da resistência suplementar, por fase, referida ao secundário	64
Figura 4.4 : Curvas da resistência combinada dos enrolamentos e reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referidos ao secundário	65

Estudos realizados no transformador de ligação Dy

Figura 4.5 : Representação gráfica das perdas no Ferro por Histerese e por efeito das correntes de Foucault	71
Figura 4.6 : Representação gráfica das componentes resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	72
Figura 4.7 : Representação gráfica da resistência suplementar, por fase, referida ao secundário	74
Figura 4.8 : Curvas da resistência combinada dos enrolamentos e reactância combinada de fuga dos enrolamentos, referidas ao secundário	75
Figura 5.1 : Curvas das resistências suplementares dos enrolamentos (Valores provenientes dos ensaios e do polinómio estimador)	92
Figura 5.2 : Curvas das resistências suplementares dos enrolamentos (Valores provenientes dos ensaios e do polinómio estimador)	101
Figura 6. 1 : Modelo equivalente de Kapp, por fase	105
Figura 6. 2 : Modelo equivalente de Kapp por fase, com uma carga Z_c	106
Figura 6.3 : Diagrama representativo das tensões no modelo de Kapp, com cargas indutivas	107
Figura 6.4 : Diagrama representativo das tensões no modelo de Kapp, com cargas capacitivas	108
Figura 6.5 : Diagrama representativo das tensões no modelo de Kapp, com carga resistiva	109
Avaliação experimental do comportamento em carga, do transformador de ligação Yy	
Figura 6.6 : Representação gráfica das características externas (com frequência 45Hz, carga indutiva e factor de potência 0,8)	115
Figura 6.7 : Representação gráfica dos rendimentos (com frequência 45Hz, carga indutiva e factor de potência 0,8)	116
Figura 6.8 : Representação gráfica das características externas (com frequência 45Hz, carga capacitiva e factor de potência 0,8)	118
Figura 6.9 : Representação gráfica dos rendimentos (com frequência 45Hz, carga capacitiva e factor de potência 0,8)	119
Figura 6.10 – Representação gráfica das características externas (com frequência 60Hz, carga indutiva e factor de potência 0,8)	121

Figura 6.11 : Representação gráfica dos rendimentos (com frequência 60Hz, carga indutiva	122
Avaliação experimental do comportamento em carga, do transformador de ligação Yy	
Figura 6.12 : Representação gráfica das características externas (com frequência 45Hz, carga indutiva e factor de potência 0,85)	124
Figura 6.13 : Representação gráfica dos rendimentos (com frequência 45Hz, carga indutiva e factor de potência 0,85)	125
Figura 6.14 : Representação gráfica das características externas (com frequência 45Hz, carga resistiva)	127
Figura 6.15 : Representação gráfica dos rendimentos (com frequência 45Hz, carga resistiva)	128
Figura 7.1 : Modelização de um enrolamento de três camadas	143
Figura 7.2 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em vazio, a frequência fundamental 45Hz	151
Figura 7.3 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em vazio, a frequência fundamental 50Hz	151
Figura 7.4 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em vazio, a frequência fundamental 60Hz	151
Figura 7.5 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em vazio, a frequência fundamental 65Hz	152
Figura 7.6 : Exemplo de um espectro de frequências da alimentação em vazio, a frequência fundamental 60Hz	152
Figura 7.7 : Representação gráfica das componentes resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	154
Figura 7.8 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em curto circuito, a frequência fundamental 45Hz	158
Figura 7.9 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em curto circuito, a frequência fundamental 50Hz	158
Figura 7.10 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em curto circuito, a frequência fundamental 65Hz	158
Figura 7.11 : Representação gráfica da resistência suplementar, por fase, referida ao secundário	160

	Pág.
Figura 7.12 : Curvas da resistência combinada dos enrolamentos e reactância combinada de fuga dos enrolamentos, referidos ao secundário	161
Figura 7.13 : Curvas de aquecimento em vazio e variação do aquecimento, da parte superior do enrolamento da fase W, durante a alimentação sinusoidal	173
Figura 7.14 : Curvas de aquecimento em curto circuito e variação do aquecimento, da parte superior do enrolamento da fase W, durante a alimentação sinusoidal	175
Figura 7.15 : Curvas de aquecimento em vazio e variação do aquecimento, da parte superior do enrolamento da fase W, durante a alimentação com harmónicos	176
Figura 7.16 : Curvas de aquecimento em curto circuito e variação do aquecimento, da parte superior do enrolamento da fase W, durante a alimentação com harmónicos	178
Figura 7.17 : Curvas de aquecimento em vazio e respectivas variações, durante as alimentações sinusoidal e com harmónicos	179
Figura 7.18 : Curvas de aquecimento em curto circuito e respectivas variações, durante as alimentações sinusoidal e com harmónicos	180
Figura C.1 : Modelização de um enrolamento	240
Figura C.2 : Representação gráfica da distribuição inicial de tensão num enrolamento com neutro ligado à terra, sujeito a uma sobretensão de alta frequência	242
Figura C.3 : Representação gráfica da distribuição inicial de tensão num enrolamento com neutro isolado em relação à terra, sujeito a uma sobretensão de alta frequência	244
Figura C.4 : Representação gráfica das repartições durante as etapas inicial, intermédia e final	246

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 : Perdas específicas de algumas chapas magnéticas	14
Transformador de ligação Yy	
Tabela 3.1 : Características nominais do transformador utilizado	34
Tabela 3.2 : Grandezas impostas e valores medidos no ensaio em vazio	35
Tabela 3.3 : Grandezas e parâmetros relativos ao ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	37
Tabela 3.4 : Grandezas impostas e valores medidos no ensaio em curto circuito	38
Tabela 3.5 : Grandezas e parâmetros referentes ao circuito eléctrico equivalente ao transformador	42
Transformador de ligação Dy	
Tabela 3.6 : Características nominais do transformador utilizado	42
Tabela 3.7 : Grandezas impostas e valores medidos no ensaio em vazio	42
Tabela 3.8 : Grandezas e parâmetros relativos ao ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	45
Tabela 3.9 : Grandezas impostas e valores medidos no ensaio em curto circuito	45
Tabela 3.10 : Grandezas e parâmetros referentes ao circuito eléctrico equivalente ao transformador	48
Estudo com frequência variável - Transformador de ligação Yy	
Tabela 4.1 : Valores impostos e medidos nos ensaios em vazio	54
Tabela 4.2 : Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio	58

Tabela 4.3 : Tabela resumo de cálculos dos coeficientes K_1 e K_2	59
---	----

Tabela 4.4 : Comparação de desvios entre perdas no ferro medidas e calculadas após a decomposição por efeitos de Histerese e por efeitos das correntes de Foucault	60
--	----

Tabela 4.5 – Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito	63
---	----

Estudo com frequência variável - Transformador de ligação Dy

Tabela 4.6 – Valores impostos e medidos nos ensaios em vazio	66
--	----

Tabela 4.7 : Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio	68
--	----

Tabela 4.8 : Tabela resumo de cálculos dos coeficientes K_1 e K_2	69
---	----

Tabela 4.9 : Comparação de desvios entre perdas no ferro medidas e calculadas após a decomposição por efeitos de Histerese e por efeitos das correntes de Foucault	70
--	----

Tabela 4.10 : Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito	73
--	----

Estudo com frequência variável - Parâmetros dos transformadores

Tabela 5.1 : Parâmetros do transformador, por fase, referidos ao secundário, a frequência nominal (transformador de ligação Yy)	84
---	----

Tabela 5.2 : Reactâncias estipuladas a partir dos valores à frequência nominal ($f=50\text{Hz}$)	85
--	----

Tabela 5.3 : Estipulação das Componentes resistivas dos ramos dos circuitos eléctricos equivalentes aos circuitos magnéticos. Com λ estabelecido a partir dos pares de valores:	
---	--

$(f'; R'_0)=(45\text{Hz}; 259,95\Omega)$	
$(f; R_0)=(50\text{Hz}; 282,61\Omega)$	87

Tabela 5.4 : Estipulação da resistência suplementar, por fase (R_{12_Sup}). Com a regra estabelecida a partir dos pares de valores:	
--	--

$(f''; R''_{12_Sup})=(80\text{Hz}; 52,86\Omega)$	
$(f'; R'_{12_Sup})=(45\text{Hz}; 51,69\Omega)$	89

Tabela 5.5 : Comparação de valores numéricos das componentes, resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, com os valores obtidos através dos polinómios obtidos	90
---	----

Tabela 5.6 : Comparação de valores numéricos das resistências suplementares e reactâncias de fuga dos enrolamentos, com os valores obtidos através dos polinómios aproximantes	92
--	----

Tabela 5.7 : Reactâncias estipuladas a partir da frequência nominal ($f = 50\text{Hz}$)	94
Tabela 5.8 : Estipulação das Componentes resistivas dos ramos dos circuitos eléctricos equivalentes aos circuitos magnéticos. Com λ estabelecido a partir dos pares de valores: (f' ; R'_0)=(45Hz ; 424,65 Ω) (f ; R_0)=(50Hz ; 454,61 Ω)	96
Tabela 5.9 : Estipulação da resistência suplementar, por fase (R_{12_Sup}), com a regra estabelecida	97
Tabela 5.10 : Comparação de valores numéricos das componentes, resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, com os valores obtidos através dos polinómios obtidos	99
Tabela 5.11 : Comparação de valores numéricos das resistências suplementares e reactâncias de fuga dos enrolamentos, com os valores obtidos através dos polinómios	100
Tabela 5.12 : Comparação dos desvios apresentados pelos dois métodos na estipulação da componente resistiva (R_{02}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	102
Tabela 5.13 : Comparação dos desvios apresentados pelos dois métodos na estipulação da componente reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético	102
Tabela 5.14 : Comparação dos desvios apresentados pelos dois métodos na estipulação da reactância de fuga dos enrolamentos (X_{eq_2})	102
Tabela 5.15 : Comparação dos desvios apresentados pelos dois métodos na estipulação da resistência suplementar por fase (R_{12_Sup})	103
Tabela 6.1 : Grandezas impostas e parâmetros do modelo (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)	114
Tabela 6.2 : Tabela resumo das características externas e desvios (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)	114
Tabela 6.3 : Tabela resumo dos rendimentos e desvios (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)	115
Tabela 6.4 : Grandezas impostas e parâmetros do modelo (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,8; carga capacitiva)	117

	Pág.
Tabela 6.5 : Tabela resumo das características externas e desvios (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)	117
Tabela 6.6 : Tabela resumo dos rendimentos e desvios (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)	118
Tabela 6.7 : Grandezas impostas e parâmetros do modelo (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 60Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)	120
Tabela 6.8 : Tabela resumo das características externas e desvios (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 60Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)	120
Tabela 6.9 : Tabela resumo dos rendimentos e desvios (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 60Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)	121
Tabela 6.10 : Grandezas impostas e parâmetros do modelo (Transformador de ligação Dy)(Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,85; carga indutiva)	123
Tabela 6.11 : Tabela resumo das características externas e desvios (Transformador de ligação Dy) (Frequência; 60Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)	123
Tabela 6.12 : Tabela resumo dos rendimentos e desvios (Frequência; 60Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)	123
Tabela 6.13 : Grandezas impostas e parâmetros do modelo (Transformador de ligação Dy)(Frequência; 45Hz; carga resistiva)	126
Tabela 6.14 : Tabela resumo das características externas e desvios (Transformador de ligação Dy) (Frequência; 45Hz; carga resistiva)	126
Tabela 6.15 : Tabela resumo dos rendimentos e desvios (Frequência; 45Hz; carga resistiva)	126
Harmónicos na alimentação dos transformadores	
Tabela 7.1 : Cálculo do factor K através do método Normalizado	137
Tabela 7.2 : Factor K e aplicações típicas	137
Tabela 7.3 : Registo numérico dos espectros das tensões de alimentação em vazio .	149
Tabela 7.4 : Registo numérico dos espectros das correntes em vazio	150
Tabela 7.5 : Grandezas impostas e Valores medidos nos ensaios em vazio	153
Tabela 7.6 : Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio	153

	Pág.
Tabela 7.7 : Registo numérico dos espectros das tensões de alimentação em curto circuito	156
Tabela 7.8 : Registo numérico de alguns espectros da corrente em curto circuito ...	157
Tabela 7.9 : Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito	159
Tabela 7.10 : Factores de desclassificação e de estipulação de potência para regime de correntes não sinusoidal, com frequência fundamental 45Hz	162
Tabela 7.11 : Factores de desclassificação e de estipulação de potência para regime de correntes não sinusoidal, com frequência fundamental 50Hz	164
Tabela 7.12 : Factores de desclassificação e de estipulação de potência para regime de correntes não sinusoidal, com frequência fundamental 65Hz	166
Tabela 7.13 : Comparações de perdas em vazio nos regimes de alimentação sinusoidal e alimentação com harmónicos (Transformador de ligação Yy)	167
Tabela 7.14 : Comparações de perdas em curto circuito nos regimes de alimentação sinusoidal e alimentação com harmónicos (Transformador de ligação Yy)	168
Tabela 7.15 : Grandezas impostas e parâmetros do modelo (Transformador de ligação Yy) (Alimentação com harmónicos. Frequências: 45Hz , 50Hz ; 60Hz e 65Hz. Factor de potência 0,8; carga indutiva)	169
Tabela 7.16 : Tabela resumo das características externas e desvios (Transformador de ligação Yy) (Frequências 45Hz, 50Hz, 60Hz, 65Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)	169
Tabela 7.17 : Tabela resumo dos rendimentos (Transformador de ligação Yy) (Frequências 45Hz, 50Hz, 60Hz e 65Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva) ...	170
Tabela 7.18 : Tabela de comparações dos rendimentos com alimentação sinusoidal e alimentação com harmónicos (Transformador de ligação Yy) (Frequências 45Hz, 60Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)	170
Tabela 7.19 : Tabela de registo e valores numéricos referentes ao ensaio de aquecimento em vazio, com alimentação sinusoidal , a frequência 50Hz; (Transformador de ligação Yy)	172
Tabela 7.20 : Tabela de registo e valores numéricos referentes ao ensaio de aquecimento em curto circuito, com alimentação sinusoidal , a frequência 50Hz; (Transformador de ligação Yy)	174

Tabela 7.21 : Tabela de registo e valores numéricos referentes ao ensaio de aquecimento em vazio, com harmónicos na alimentação, a frequência fundamental 50Hz; (Transformador de ligação Yy)	176
---	-----

Tabela 7.22 : Tabela de registo e valores numéricos referentes ao ensaio de aquecimento em curto circuito, com harmónicos na alimentação, a frequência fundamental 50Hz; (Transformador de ligação Yy)	177
--	-----

Anexo B

Tabela B.1 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas indutivas; factor de potência 0,8).	200
---	-----

Tabela B.2 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo de base experimental (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	201
--	-----

Tabela B.3 – Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental	201
--	-----

Tabela B.4 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	202
--	-----

Tabela B.5 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	203
---	-----

Tabela B.6 : Valores extremos da característica externa e rendimentos (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	203
--	-----

Tabela B.7 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	204
--	-----

Tabela B.8 : Característica externa e rendimentos calculados com base no modelo experimental (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,8)	205
--	-----

Tabela B.9 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental	205
--	-----

Tabela B.10 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas capacitivas; factor de potência 0,8)	206
---	-----

Tabela B.11 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,8)	207
---	-----

Tabela B.12 : Valores extremos da característica externa e rendimentos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,8)	207
--	-----

Tabela B.13 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)	208
--	-----

	Pág.
Tabela B.14 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)	209
Tabela B.15 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental	209
Tabela B.16 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)	210
Tabela B.17 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido pelas leis matemáticas (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)	210
Tabela B.18 : Valores extremos da característica externa e rendimentos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)	211
Tabela B.19 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	212
Tabela B.20 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	212
Tabela B.21 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental	213
Tabela B.22 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado pelas regras práticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8) .	214
Tabela B.23 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	214
Tabela B.24 : Valores extremos da característica externa e rendimentos (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	215
Tabela B.25 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas capacitivas; factores de potência próximos de 0,8 e 0,9)	216
Tabela B.26 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas capacitivas; factores de potência próximos de 0,8 e 0,9)	216
Tabela B.27 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental	217
Tabela B.28 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas capacitivas; factores de potência próximos de 0,8 e 0,9)	217

	Pág.
Tabela B.29 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas capacitivas; factores de potência próximos de 0,8 e 0,9)	218
Tabela B.30 : Valores extremos da característica externa e rendimentos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,8)	219
Tabela B.31 : Valores extremos da característica externa e rendimentos (carga capacitiva; factor de potência próximo de 0,9)	219
Tabela B.32 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)	220
Tabela B.33 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)	220
Tabela B.34 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental	221
Tabela B.35 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas capacitivas; factor de potência próximos de 0)	221
Tabela B.36 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)	222
Tabela B.37 : Valores extremos da característica externa e rendimentos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)	223
Tabela B.38 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	223
Tabela B.39 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	224
Tabela B.40 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental	224
Tabela B.41 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	225
Tabela B.42 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	225
Tabela B.43 : Valores extremos da característica externa e rendimentos (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	226

	Pág.
Tabela B.44 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas indutivas; factor de potência 0,85)	227
Tabela B.45 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas indutivas; factor de potência 0,85)	227
Tabela B.46 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental	227
Tabela B.47 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas indutivas; factor de potência 0,85) ..	228
Tabela B.48 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas indutivas; factor de potência 0,85) ..	228
Tabela B.49 : Valores extremos da característica externa e rendimentos (cargas indutivas; factor de potência 0,85)	229
Tabela B.50 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas resistivas)	229
Tabela B.51 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas resistivas)	230
Tabela B.52 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental	230
Tabela B.53 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas resistivas)	231
Tabela B.54 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas resistivas)	231
Tabela B.55 : Valores extremos da característica externa e rendimentos (cargas resistivas)	232
Tabela B.56 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas indutivas; factor de potência 0,85)	232
Tabela B.57 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo de base experimental (cargas indutivas; factor de potência 0,85)	233
Tabela B.58 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental	233
Tabela B.59 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas indutivas; factor de potência 0,85) ..	233

	Pág.
Tabela B.60 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8)	234
Tabela B.61 : Valores extremos da característica externa e rendimentos (cargas indutivas; factor de potência 0,85)	234
Tabela B.62 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,85)	235
Tabela B.63 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,85)	235
Tabela B.64 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental	236
Tabela B.65 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas capacitivas; factor de potência 0,85)	236
Tabela B.66 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,85)	237
Tabela B.67 : Valores extremos da característica externa e rendimentos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,85)	237
Tabela B.68 : Tabela resumo da característica externa e rendimentos dos diversos modelos comparados com os resultados experimentais	238

LISTA DE SÍMBOLOS

A

a_j Coeficientes do polinómio aproximante

B

B Indução Magnética [T]

B_m Indução Magnética máxima [T]

C

c Capacidade à terra, por unidade de comprimento [F/m]

C Capacidade total à terra [F]

C_h Conteúdo de harmónico por unidade da fundamental [pu]

$\cos(\varphi_{cc})$ Factor de potência no funcionamento em curto circuito

$\cos(\varphi_0)$ Factor de potência no funcionamento em vazio

c_s Capacidade série entre os pontos A e B, por unidade de comprimento [F/m]

C_s Capacidade total série entre os pontos A e B [F]

D

dy Espessura infinitesimal [m]

E

e Força electromotriz

e_p Razão entre as perdas suplementares e as perdas de Joule em regime sinusoidal

F

f Frequência em regime nominal [Hz]

f_h Frequência do harmónico de corrente (de ordem h) [Hz]

f_r Frequência própria de ressonância de cada um dos circuitos elementares [Hz]

f Frequência da tensão de alimentação [Hz]

F_d	Factor de desclassificação de transformadores
H	
h	Ordem do harmónico
H	Campo magnético [A/m]
h_l	Comprimento da laminação na direcção do fluxo;
I	
I	Componente fundamental da corrente [A]
I_{a2}	Componente de perdas da corrente em vazio, por fase [A]
I_{ct}	Componente contínua da corrente de carga [A]
I_h	Harmónico da corrente, de ordem h [A]
I_L	Corrente eficaz total, com harmónicos [A]
I_{m2}	Componente magnetizante da corrente em vazio, por fase [A]
I_n	Valor eficaz da corrente sinusoidal, por fase, pedida pela carga [A]
I_{ns}	Valor eficaz da corrente não sinusoidal, por fase, pedida pela carga [A]
I_{rms}	Valor eficaz da corrente [A]
I_{1_ens}	Corrente no enrolamento primário, no ensaio em curto circuito [A]
I_{12}	Corrente do enrolamento primário, referido ao secundário [A]
I_2	Corrente no enrolamento secundário [A]
I_{2_ens}	Corrente no enrolamento secundário, no ensaio em curto circuito [A]
I_0	Componente contínua da corrente de carga [A]
I_{02}	Corrente secundária, no ensaio em vazio [A]
K	
K	Factor para estimação de perdas suplementares em regimes não sinusoidais
k_c	Factor de carga
K_F	Coeficiente de perdas por correntes de Foucault [$W/T^2.Hz^2$]
K_H	Coeficiente de perdas por efeitos de Histerese [$W/T^2.Hz$]
K_{PS}	Factor para estipulação de perdas suplementares em regime não sinusoidal
k'_0	Coeficiente de proporcionalidade
K_1	Constante auxiliar de cálculo
K_2	Constante auxiliar de cálculo
L	
l	Comprimento do condutor [m]
L	Indutância de uma bobina [H]
l_e	Comprimento do enrolamento [m]
L_i	Indutância interior [H]
L_{uc}	Inductância, por unidade de comprimento [H/m]
M	
m	Razão de transformação de tensões
m_d	Declive da recta das perdas suplementares estipuladas por regras práticas

N

n	Grau do polinómio aproximante
N	Número de espiras do enrolamento

P

P_{cc}	Potência absorvida à fonte, no ensaio em curto circuito [W]
P_F	Perdas por Foucault no circuito magnético [W]
P_{ff}	Perdas devidas aos fluxos de fuga que atingem a estrutura metálica da cuba dos transformadores imersos [W]
P_{FB}	Perdas por correntes de Foucault nos enrolamentos [W]
P_{Fe}	Perdas no circuito magnético [W]
P_H	Perdas por Histerese no circuito magnético [W]
P_J	Perdas de Joule [W]
P_{Lg}	Perdas por efeito de Foucault nas ligações dos enrolamentos [W]
P_{Lh}	Perdas totais em regime não sinusoidal [W]
P_{Ln}	Perdas totais em curto circuito e regime nominal (correntes sinusoidais) [W]
P_0	Potência absorvida à fonte , em vazio [W]
P_s	Perdas suplementares por fase, devidas a uma corrente sinusoidal com valor eficaz igual ao de I_{ns} [W]
P_{sup}	Perdas suplementares no regime sinusoidal [W]
P_s	Perdas suplementares no regime não sinusoidal [W]
P_{ts}	Perdas totais para um transformador sujeito a um regime sinusoidal [W]
P_1	Potência absorvida pela máquina [kW ou W]
P_2	Potência fornecida pela máquina [kW ou W]

Q

q	Factor auxiliar nos cálculos para desclassificação de transformadores e estipulação de potências no regime não sinusoidal, dependente do tipo de enrolamento secundário
-----	---

R

R	Resistência do condutor quando percorrido por uma corrente alternada [Ω]
$R_{entre-fases}$	Componente activa da impedância dos enrolamentos, entre fases [Ω]
R_{eq_1}	Resistência combinada dos enrolamentos, por fase, referida ao primário [Ω]
R_{eq_2}	Resistência combinada dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário [Ω]
R_{ES}	Função resíduo
r_{i_sup}	Resistência suplementar, por fase [Ω]
R_{sup}	Resistência suplementar
$r_{y_equivalente}$	Resistência de fase da estrela equivalente ao conjunto de enrolamentos primário [Ω]
r_{y2}	Resistência equivalente por fase, de um enrolamento secundário [Ω]
r_0	Raio do condutor [m]
R_0	Resistência determinada utilizando a corrente contínua [Ω]
r_{12}	Resistência por fase, do primário referida ao secundário [Ω]

R_{12_Sup}	Resistência por fase, associada às perdas suplementares, referida ao secundário [Ω]
R''_{oi}	Componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, genérico, a frequência f''
R_{02}	Componente activa da impedância de magnetização, por fase [Ω]
R_2	Resistência equivalente da série de resistências, formada pela resistência por fase associada às perdas suplementares, referida ao secundário e pela resistência combinada dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário [Ω]
S	
S	Secção útil do circuito magnético [m^2].
S_K	Potência a considerar, tendo em conta o nível de harmónicos na rede onde o transformador for inserido [VA]
S_s	Potência estipulada para o transformador com correntes e tensões nominais, sinusoidais [VA]
T	
t_1	Espessura da laminação de metal, para o cálculo de perdas no circuito magnético [m]
U	
U	Tensão entre fases [V]
U_A	Amplitude da onda [V]
$u(x,t)$	Distribuição da tensão ao longo do enrolamento [V]
U_{1_ens}	Tensão de alimentação do enrolamento primário, no ensaio em curto circuito [V]
U_{1n}	Tensão nominal primária [V]
U_{2n}	Tensão nominal secundária [V]
U_{12_ens}	Tensão de alimentação do enrolamento primário num ensaio, referida ao secundário [V]
U_{12}	Tensão de alimentação do enrolamento primário referida ao secundário [V]
U_{02}	Tensão do enrolamento secundário em vazio [V]
W	
w	Largura da laminação [m]
X	
x	Comprimento medido a partir da entrada do enrolamento [m]
$X_{entre-fases}$	Componente reactiva da impedância dos enrolamentos, entre fases [Ω]
x_i	Abcissas de uma tabela de pontos
X_{m2}	Componente reactiva da impedância de magnetização, por fase [Ω]
X_{eq_1}	Reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao primário [Ω]
X_{eq_2}	Reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário [Ω]
X_L	Reactância de uma bobina [Ω]

Y	
y	Metade da largura da trajectória [m]
y_i	Ordenadas de uma tabela de pontos
$y(x)$	Polinómio aproximante
Z	
Z_{eq_1}	Impedância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao primário [Ω]
Z_{eq_2}	Impedância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário [Ω]
Z_{02}	Impedância de magnetização por fase [Ω]
α	
α	Relação entre a capacidade total à terra e a capacidade total série entre os pontos A e B
ε	
ε	Erro calculado entre a tensão secundária em vazio e a tensão secundária em carga [%]
ϕ	
ϕ	Ângulo de desfasamento entre U_{20} e U_2 [°]
ϕ_{mg}	Fluxo magnético [Tm^2] ou [Wb]
γ	
γ	Condutividade do material condutor [Ω^{-1}/m];
Γ	Designação do modelo equivalente do transformador, referido ao secundário
η	
η	Rendimento [%]
φ	
φ_{cc}	Ângulo de fase entre a tensão e a corrente no funcionamento em curto circuito [°]
φ_o	Ângulo de fase entre a tensão e a corrente no funcionamento em vazio [°]
λ	
λ	Constante auxiliar de cálculo
μ	
μ	Permeabilidade do vazio [H/m]
ρ	
ρ	Resistividade do material [$\Omega.mm^2/m$]

σ		
σ	Massa específica [kg/m ³]	
ω		
ω	Frequência angular [rad/s]	

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os transformadores são máquinas de grande importância nos sistemas de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica, estando muitas vezes sujeitas a regimes de funcionamento diferentes dos nominais. Por esta razão, é de extrema importância a sua caracterização em diversos regimes de funcionamento.

Actualmente, existem diversas ferramentas informáticas auxiliares no diagnóstico de avarias, desenvolvimento, projecto e concepção de transformadores específicos para determinados regimes de funcionamento. Contudo, a eficácia das referidas ferramentas de simulação, depende do rigor da modelização da máquina.

É neste âmbito que surge o presente estudo, como um trabalho constituído pela síntese da teoria, regras e práticas correntes, confrontados com resultados experimentais.

Esta dissertação está organizada em sete capítulos, sendo o primeiro a introdução ao contexto do trabalho.

O segundo capítulo é dedicado ao circuito magnético, apresentando o material constituinte e o método que será utilizado para a decomposição das perdas no referido circuito.

No terceiro capítulo apresenta-se a teoria para a determinação dos parâmetros do modelo, bem como a modelização dos dois exemplares de transformadores utilizados na presente dissertação, em regime nominal.

O quarto capítulo evidencia o comportamento dos transformadores com a frequência de alimentação variável, apresentando a evolução dos parâmetros da máquina sob a forma de representações gráficas e tabelas.

No quinto capítulo, com base nos resultados obtidos no capítulo quatro, estabelecem-se regras e leis matemáticas representativas dos parâmetros do modelo obtido à frequência variável.

O sexto capítulo apresenta as comparações entre as características externas das máquinas obtidas através do método experimental e dos modelos matemáticos.

O capítulo sétimo trata da influência dos harmônicos na alimentação dos transformadores. Inicia-se com a abordagem das normas no sentido de desclassificação e estipulação de potências de transformadores sob a referida situação de alimentação. Numa segunda parte introduz-se a modelização, e comportamento térmico da máquina.

No fim apresentam-se as conclusões finais do presente trabalho de investigação, bem como as perspectivas para futura continuação.

CAPÍTULO 2

PERDAS NOS CIRCUITOS MAGNÉTICOS

As propriedades eléctricas das chapas constituintes dos circuitos magnéticos, influenciam o desempenho das máquinas eléctricas (motores; geradores; transformadores). Nos circuitos magnéticos ocorrem perdas dependentes da indução máxima de funcionamento, espessura e qualidade da chapa magnética utilizada.

A quantificação das perdas (no circuito magnético e nos enrolamentos) é uma das grandes vertentes na optimização de uma máquina eléctrica, pois permite estimar o rendimento e o aquecimento da máquina. Também, o conhecimento da distribuição das perdas é importante para se prevenir o aparecimento de pontos-quentes e obter as melhores condições de funcionamento térmico de modo a estar em conformidade com as normas internacionais e assegurar uma maior longevidade da máquina.

Nos transformadores, as perdas no circuito magnético podem representar entre 14% a 28% das perdas electromagnéticas totais na máquina.

As perdas magnéticas das máquinas eléctricas podem ser decompostas nas duas seguintes componentes: Perdas por efeito de Histerese e Perdas devidas às correntes de Foucault.

Neste capítulo far-se-á um pequeno preâmbulo das propriedades das chapas magnéticas e de seguida dedicar-se-á especial atenção aos métodos de estimação das perdas no circuito magnético dos transformadores.

2.1 - Propriedades das chapas magnéticas

Para se ter uma ideia geral acerca da variedade de chapa magnéticas existentes, é de extrema utilidade descreverem-se as propriedades e os fenómenos que determinam a qualidade das mesmas.

2.1.1 - Generalidades acerca da chapa magnética

As chapas de boas características magnéticas, são apresentadas em folhas finas, geralmente de espessura compreendida entre 0.15 e 1mm, com revestimento isolante superficial.

Segundo a designação da COGENT⁽¹⁾, o referido isolante poderá ser Magnite ou Magnite-S consoante a qualidade de isolamento pretendida.

As principais características a verificar no isolante superficial são:

- Boa resistência eléctrica;
- Boa resistência ao funcionamento a altas temperaturas;
- Boa aderência, permitindo a furação por punçõagem e corte por guilhotina;
- Boa resistência à corrosão.

A referida camada superficial geralmente tem aproximadamente 3 μm de espessura.

Actualmente, no fabrico de circuitos magnéticos de máquinas eléctricas para fins industriais, as espessuras de chapa mais utilizadas são 0.2mm e 0.28mm. Quanto à sua construção, existem basicamente dois tipos de chapa magnética: Chapas de cristais orientados e chapas sem cristais orientados.

2.1.2 - Chapas de cristais orientados

As chapas de cristais orientados são magneticamente anisotrópicas, e têm excelentes propriedades magnéticas na direcção da laminagem. Estas qualidades especiais são devidas às combinações químicas dos materiais constituintes da chapa, laminagem e tratamentos térmicos. Entre vários tratamentos aplicados durante a fase de fabrico das chapas, destacam-se o

⁽¹⁾ COGENT – Fabricante de chapas magnéticas

cozimento sob influência de um campo magnético e tratamento superficial a laser.

As chapas de cristais orientados são mais caras que as vulgares sem cristais orientados.

Quanto à aplicação, podem ser encontradas nos circuitos magnéticos de transformadores de distribuição, de transformadores de potência e em casos pontuais de máquinas rotativas.

2.1.3 - Chapas sem cristais orientados

São chapas geralmente isotrópicas, tendo as mesmas propriedades magnéticas e mecânicas em qualquer direcção.

São muitas vezes utilizadas no circuito magnético de máquinas rotativas de baixa potência.

Quanto à existência de silício na sua composição, as chapas sem domínios orientados são apresentadas em duas variantes: Chapas semi-processadas e chapas completamente processadas.

As chapas semi-processadas podem ser fornecidas sob a forma pura ou com uma combinação de baixa percentagem de silício na sua composição.

É de salientar que as chapas com grande percentagem de silício na sua composição (até 6.5%), são muito duras e quebradiças. Consequentemente, devido às dificuldades de furação (por punção) e cortes precisos, as técnicas convencionais de fabrico de circuitos magnéticos não são aplicáveis nestas chapas. Para estes casos, os fabricantes de máquinas eléctricas devem optar por processos sofisticados e caros, tais como cortes por LASER.

As chapas semi-processadas são de fácil furação por punção, mas o processo requer um posterior recozimento e tratamento superficial das zonas de corte. O recozimento das chapas afecta a estrutura interna e a composição das chapas de forma a restituir as propriedades magnéticas nas zonas de corte. Por sua vez, o tratamento superficial tem por objectivo formar uma camada de isolamento entre as chapas nas zonas afectadas pelo corte (usualmente trata-se de deposição de um óxido de ferro).

2.1.4 - Perdas por Histerese

Suponhamos que se aplica o seguinte ciclo num provete de chapa magnética: Se iniciarmos com o material não magnetizado, a magnetização aumenta à medida que se incrementar o campo magnético de $H = 0$ a H_m (ver figura 2.1). A indução magnética, B , seguirá a curva de magnetização até alcançar o valor B_m correspondente a H_m . Reduz-se o valor do campo magnético para $H = 0$. Repara-se que o valor da indução não se reduz segundo a curva obtida, mas sim segundo a nova curva indicada na referida figura. Obtemos assim um valor B_R correspondente ao $H = 0$. Este valor, B_R , é conhecido como densidade de fluxo residual ou remanescente. Conclui-se que a curva $B = f(H)$ é diferente conforme se trata de incremento ou decréscimo do campo magnético H . O referido efeito é conhecido por Histerese. Para se reduzir a indução a $B = 0$, é necessário aplicar um campo no sentido inverso, $-H_c$; esse valor, H_c , é designado por campo coercivo (ver figura 2.1).

Num circuito magnético homogêneo, com o incremento da indução B , a energia específica acumulada varia proporcionalmente com a área limitada entre a curva $B_i = f(H_i)$ e o eixo das ordenadas B ; Se a curva descendente de indução coincidir com a ascendente, o campo magnético restituirá ao circuito eléctrico a energia acumulada, proporcionalmente às mesmas áreas num e noutro sentido. Segundo este conceito, não haveria quaisquer perdas durante o ciclo. Tal fenómeno acontece por exemplo se o meio for ar.

Contudo, o fenómeno de Histerese provoca nos materiais ferromagnéticos, como acima referido, um ciclo de magnetização no qual, as curvas ascendentes e descendentes (ver figura 2.1) não são coincidentes, definindo assim, entre elas uma dada superfície, A_h .

A referida superfície indica, à escala estabelecida, a diferença entre a potência absorvida durante a fase de acumulação de energia e a restituição da mesma. Esta diferença traduz-se em perdas convertidas em calor no seio do material submetido ao ciclo de magnetização alternada. Esta dissipação de energia é tecnicamente explicada pelo efeito Barkhausen que se baseia no movimento molecular originado pelas orientações dos dipolos magnéticos da chapa magnética.

Ainda relativamente à figura 2.1 (Curvas de magnetização), estão representados alguns ciclos de Histerese simétricos. Estes ciclos são obtidos quando a chapa magnética encontra-se submetida a um campo magnético

alternado suficientemente intenso para levar a indução magnética ao máximo; De seguida, se o campo magnético é progressivamente diminuído, a chapa magnética apresentará os ciclos de histerese de área progressivamente menor. Nestes casos, para cada indução máxima positiva, existirá a recíproca negativa. O mesmo acontece com o campo magnético. As extremidades dos ciclos definem uma curva designada por curva de magnetização normal. Chama-se a atenção de que esta curva difere da curva de magnetização sem Histerese.

É de salientar que por vezes, para substâncias que nunca foram magnetizadas, são necessários vários ciclos de magnetização até se obter um ciclo fechado. O ciclo obtido com o valor máximo de campo magnético, H_m , é conhecido como ciclo limite de Histerese.

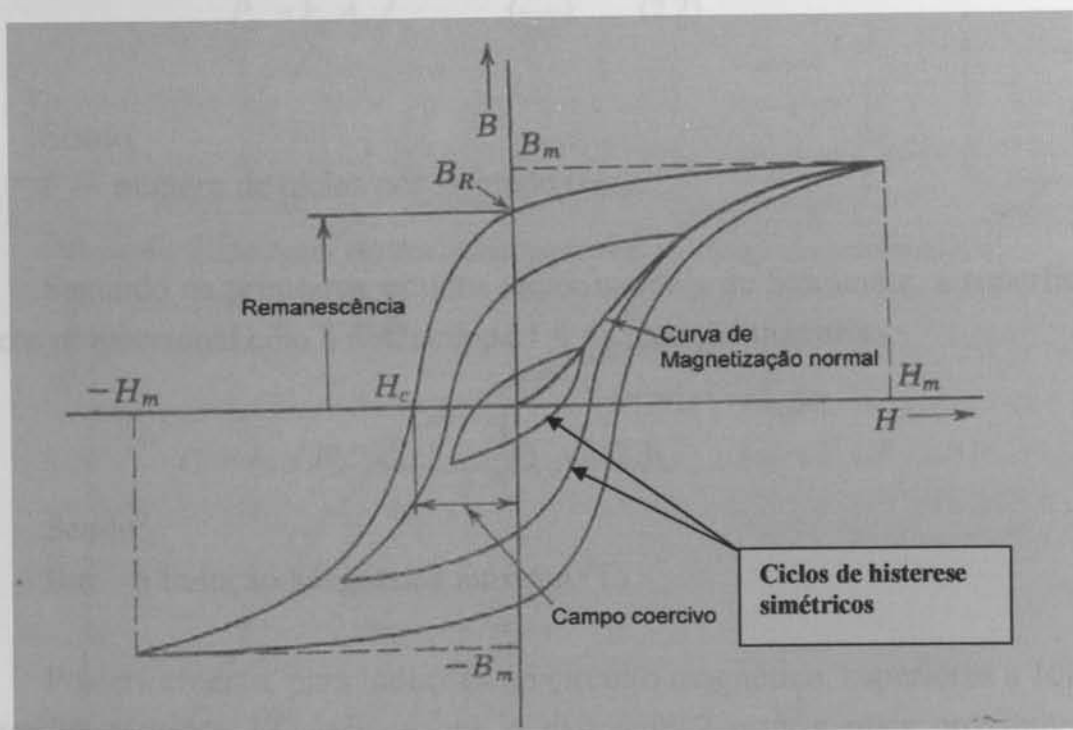


Figura 2.1 : Curvas de magnetização [Seely, 58, p. 197]

As perdas específicas por unidade de volume e por ciclo de magnetização, são expressas por:

$$j_h = k'_0 \cdot A_h \left(\frac{J}{m^3 \cdot ciclo} \right) \quad (2.1)$$

Onde:

k'_0 : coeficiente de proporcionalidade.

Se o número de ciclos por segundo é f (frequência), a potência dissipada será:

$$P_H = k'_0 \cdot A_H f \left(\frac{W}{m^3} \right) \quad (2.2)$$

Sendo:

f -- número de ciclos por segundo (Hz).

Segundo os primeiros estudos experimentais de Steinmetz, a superfície A_h era proporcional com a potência de 1.6 da indução máxima:

$$P_H = k_0 \cdot f \cdot B_m^{1.6} \left(\frac{W}{m^3} \right) \quad (2.3)$$

Sendo:

B_m – a Indução Magnética máxima (T)

Posteriormente, para induções no circuito magnético, superiores a 10kG (aproximadamente 1T), viu-se que o expoente 2 estaria mais próximo da realidade. Passando então a expressão (2.3) à seguinte forma:

$$P_H = k_0 \cdot f \cdot B_m^2 \left(\frac{W}{m^3} \right) \quad (2.4)$$

Contudo, em vez de se prever as perdas devidas ao fenómeno de Histerese, referidas à unidade de volume, é mais prático considerá-las por unidade de massa. Assim, as referidas perdas poderão ser estimadas pela seguinte expressão:

$$P_H = k_h \cdot f \cdot B_m^2 \quad \left(\frac{W}{kg}\right) \quad (2.5)$$

O coeficiente k_h representa as perdas por Histerese em cada kg do circuito magnético quando submetido a um fluxo alternado, de indução máxima 1T, à frequência de 1 ciclo por segundo.

2.1.5 - Perdas por correntes de Foucault

As perdas por correntes de Foucault são produzidas pelos fluxos magnéticos alternados que, induzindo uma força electromotriz no circuito magnético, causa correntes de circulação em trajetórias fechadas através do circuito magnético, no sentido perpendicular ao campo magnético aplicado.

As correntes de Foucault geradas, originam dois efeitos no circuito magnético:

- A redução da capacidade de circulação do fluxo magnético.

As correntes de Foucault produzem uma força magnetomotriz o qual tende a produzir fluxo magnético oposto ao do campo magnético aplicado. Este fluxo oposto, varia entre o máximo ao centro do material até se anular à superfície do mesmo. Este princípio causa um incremento de fluxo (do campo magnético aplicado) à superfície do material.

- Perdas (devido às correntes de Foucault).

As correntes de Foucault causam perdas no material, as quais são dissipadas em forma de calor.

Da presença de um circuito magnético fechado, num campo magnético variável, resulta um fluxo de corrente devido à força electromotriz induzida. Assim, um bloco metálico num campo magnético variável terá correntes a circular formando percursos fechados idênticos ao indicado na figura 2.2 .

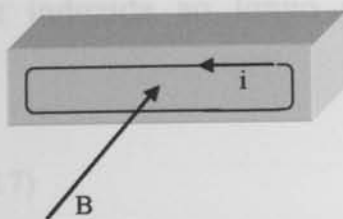


Figura 2.2: Bloco metálico num campo magnético variável

Para estimar as perdas pelas correntes de Foucault, vai-se supor estar perante um modelo em que:

- O fluxo é uma função sinusoidal no tempo;
- A largura do bloco imerso no campo magnético aplicado, é muito maior que a sua espessura;
- As correntes de Foucault não modificam a distribuição do fluxo magnético.

Considerando uma placa de metal como o da figura 2.3, assumindo que o fluxo nela é uniforme, mas variável sinusoidalmente com o tempo, de acordo com a expressão:

$$B = B_m \cdot \sin(\omega t) \quad (T) \quad (2.6)$$

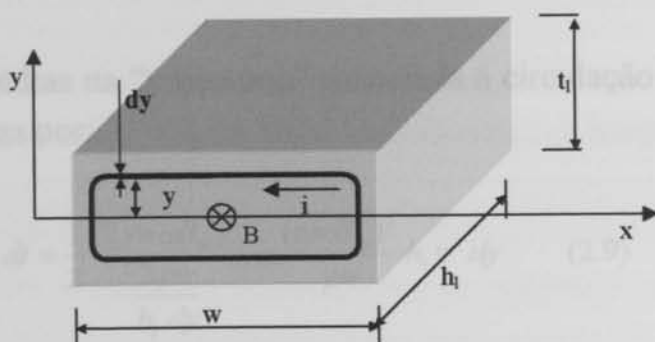


Figura 2.3 : Trajectória das correntes de Foucault

A força electromotriz induzida ao longo da “trajectória fechada”, indicada na figura 2.3, será:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.7)$$

Tendo em consideração que $\phi = B.S$; a área da trajectória fechada é aproximadamente $S = 2yw$.

$$\text{Vem que: } e = -\frac{d\phi}{dt} = -2ywB_m\omega \cos(\omega t) \quad (2.8)$$

A resistência da “trajectória fechada” ao longo da qual circula a corrente de Foucault, será aproximadamente:

$$R \cong \frac{2\rho w}{h_l dy}$$

Onde:

h_l é o comprimento da laminação na direcção do fluxo;
 dy a espessura infinitesimal da referida “trajectória fechada”;
 ρ a resistividade do material.

As perdas médias na “trajectória” associada à circulação da corrente de Foucault serão dadas por:

$$dP_F = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{e^2}{R} dt = \frac{1}{2} \frac{(2yw\omega B_m)^2}{\frac{2\rho w}{h_l dy}} = \frac{(\omega w B_m)^2}{\rho w} h_l y^2 dy \quad (2.9)$$

Integrando a expressão (2.9) obtém-se as perdas totais na placa da figura 2.3. Vem que:

$$P_F = \int_0^t \frac{\omega^2 h_l w B_m^2}{\rho} y^2 dy \quad (W) \quad (2.9)$$

$$P_F = \frac{4\pi^2 h_l w B_m^2 f^2}{\rho} \frac{t^3}{24} \quad (W) \quad (2.10)$$

Sabendo que o volume do bloco ou laminação (Ver figura 2.3) é htw , e que a massa específica é σ , vem que:

$$P_F = \frac{\pi^2 B_m^2 f^2 t^2}{6\rho\sigma} \left(\frac{W}{kg}\right) \quad (2.10)$$

2.1.6 – Perdas no circuito magnético

As perdas totais estimadas num circuito magnético ou perdas combinadas, P_{FE} , são dadas pela soma das perdas por Histerese (P_H) e perdas por correntes de Foucault (P_F):

$$P_{FE} = P_H + P_F \quad (W) \quad (2.11)$$

Assim, das expressões (2.5), (2.10) e (2.11) dos parágrafos 2.1.4, 2.1.5 e 2.1.6, tem-se:

$$P_{FE} = k_h \cdot f \cdot B_m^2 + \frac{\pi^2 B_m^2 f^2 t^2}{6\rho\sigma} \left(\frac{W}{kg}\right) \quad (2.12)$$

2.1.7 – Princípios para redução de perdas nos circuitos magnéticos

As componentes das perdas nos circuitos magnéticos podem ser reduzidas se, durante o projecto da máquina, as seguintes vertentes forem consideradas:

a) Redução das perdas por Foucault:

- Redução da espessura de laminagem.
- Aumento da resistividade do material do circuito magnético através de aumento da percentagem de silício.

- Redução da dimensão do grão da constituição da chapa magnética.
- Redução da tensão interna e superficial.

b) Redução das perdas por Histerese:

- Melhoramento da pureza do material constituinte da chapa magnética.
- Redução da tensão interna e superficial.

É de salientar que para satisfazer estes princípios básicos, é necessário consultar os vários fabricantes de chapa magnética e fazer uma escolha criteriosa da qualidade de chapa, adequada aos requisitos do projecto.

2.1.8 – Perdas específicas de algumas chapas magnéticas

Para evidenciar a variedade da qualidade de chapa magnética existente no mercado, a tabela 2.1 indica as perdas específicas de diferentes graus de chapa, de acordo com a avaliação da ORB Electrical Steel.

Tabela 2.1 : Perdas específicas de algumas chapas magnéticas

Designação	Grau	Espessura [mm]	Perdas específicas totais a 50Hz e $B_{max}=1.5T$ [W/kg]
TRANSIL	270-35-A5	0,35	2,70
	330-35-A5	0,35	3,30
	290-50-A5	0,50	2,90
	330-50-A5	0,50	3,30
	350-50-A5	0,50	3,50
LOSIL	400-50-A5	0,50	4,00
	530-50-A5	0,50	5,30
	600-50-A5	0,50	6,00
	700-50-A5	0,50	7,00
	800-50-A5	0,50	8,00
	530-65-A5	0,65	5,30
	600-65-A5	0,65	6,00
	700-65-A5	0,65	7,00
	800-65-A5	0,65	8,00
	1000-65-A5	0,65	10,00

Da tabela 2.1, constata-se que as perdas específicas variam de 2.7W/kg a 10W/kg. Significa que no projecto de uma máquina, a escolha criteriosa do tipo de chapa magnética a utilizar é um factor importante quando as perdas em vazio são capitalizadas ou mesmo para se obter melhor rendimento. A escolha de chapa magnética deverá ser criteriosa porque, por vezes aquelas que apresentam baixas perdas específicas podem ter baixa permeabilidade o

que origina o aumento da corrente de magnetização e consequentemente tem-se um aumento das perdas no cobre.

2.1.9 - Determinação das perdas específicas das chapas magnéticas

As perdas específicas das chapas magnéticas são indicadas em catálogos dos fabricantes de chapas; contudo, elas podem ser determinadas através do aparelho de Epstein (também conhecido pelo quadrado de Epstein). Este consiste em quatro pacotes de tiras de chapa magnéticas de igual largura, intercaladas e ligeiramente apertadas nos cantos, a formar um circuito magnético quadrado. O exemplar é excitado por quatro pares de enrolamentos (sendo cada par formado por enrolamento primário e secundário). O fluxo é induzido pelas correntes do primário. A indução medida no provete deriva da forma de onda medida nos terminais secundários. A forma de onda é assumida ser sinusoidal, mas por vezes, quando a indução excede 0.7T apresenta-se diferente de uma senoide. As perdas no ferro são obtidas da diferença entre as perdas da potência fornecida e as perdas de Joule.

Vantagem deste método:

- a) A simplicidade da montagem que permite a análise rápida de um provete.

Desvantagens do método:

- a) A indução não é distribuída uniformemente devido aos fluxos de fuga à volta das junções e à saturação.
- b) As rebarbas nos bordos das chapas, devido ao corte das mesmas, aumentam as perdas.
- c) Pelos motivos acima indicados e devido ao facto de trabalhar com modelo reduzido, deve-se fazer vários testes com diferentes larguras de chapa para se obter um valor médio de leitura.
- d) Para circuitos magnéticos de dimensões muito reduzidas, os efeitos das rebarbas tornam-se importantes e as perdas em vazio, reais, da máquina projectada podem ser muito diferentes daquelas estimadas com base nas medidas do aparelho de Epstein.

2.1.10 – Determinação da resistência do isolamento superficial

Como já anteriormente referido, o isolamento superficial é uma das características importantes da chapa magnética. Os fabricantes de máquinas eléctricas, normalmente, na altura da recepção dos lotes de chapa magnética fazem ensaios em conformidade com as normas, para determinar a resistência do referido isolamento. Como exemplo de normas que regem a determinação da resistência de isolamento das chapas magnéticas, pode-se citar a EURONORM 107-86. A referida norma preconiza a utilização de um provete de chapa magnética de área superior a 645mm^2 . De seguida são colocados 10 contactos. Em série com cada um dos referidos contactos, dever-se-à ligar uma resistência de 5Ω , conforme indicado na figura 2.4

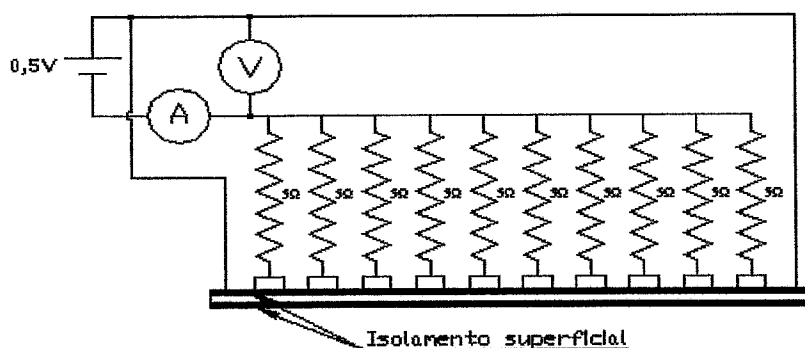


Figura 2.4 : Circuito de medida da resistência do isolamento superficial

A soma das correntes que passam pelos dez contactos permite avaliar a eficiência do isolamento superficial na limitação da corrente através da superfície.

As referidas correntes circulam entre os contactos e o substrato metálico e assim sendo, não se efectua uma verdadeira medida de isolamento entre as folhas de chapa magnética. Este ensaio não deverá ser efectuado com o intuito de obter uma medida quantitativa. Contudo, é aceitável quando se trata da determinação de um índice útil para avaliação da qualidade do isolamento superficial.

2.2 – Princípios teóricos para separação das perdas no ferro nas suas componentes por Histerese e por correntes de Foucault

Num transformador, as perdas no ferro são estimadas a partir dos resultados obtidos do ensaio da máquina em circuito aberto (ensaio em vazio). As referidas perdas estão relacionadas com a potência absorvida em vazio, através da seguinte expressão matemática:

$$P_0 = 3r_i I_0 + P_{FE} \quad (W) \quad (2.13)$$

Sendo:

- r_i a resistência do enrolamento alimentado (Ω);
- I_0 a corrente que circula no enrolamento alimentado. (A);
- P_0 a potência absorvida em vazio (W);
- P_{FE} as perdas no circuito magnético (W).

2.2.1 – Determinação da resistência do enrolamento alimentado

A resistência do enrolamento (r_i) deverá ser determinada através da lei de Ohm no circuito de corrente contínua, ligado ao enrolamento em causa, conforme a figura 2.5.

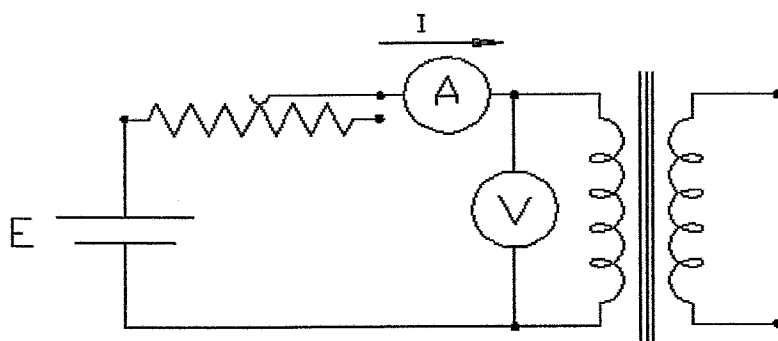


Figura 2.5 : Montagem do circuito para determinação da resistência de um enrolamento

Sendo:

- E uma fonte de tensão contínua (V)
- A um amperímetro (A)
- V um voltímetro (V)

2.2.2 –Separação das perdas no ferro nas suas componentes de Histerese e por correntes de Foucault

Conforme o indicado na expressão matemática (2.12) do parágrafo 2.1.6 (Perdas no circuito magnético), as duas componentes das perdas no ferro são função da indução magnética e da frequência. A expressão matemática (2.12) poderá ter a seguinte forma:

$$P_{FE} = K_H f B_m^2 + K_F f^2 B_m^2 \quad (W) \quad (2.14)$$

Fixando uma indução, vem que:

$$P_{Fe} = K_1 f + K_2 f^2 \quad (W) \quad (2.15)$$

Sendo:

$$K_1 = K_H \times B_m^2 \quad \left[\frac{W}{Hz} \right] \quad (2.16)$$

$$K_2 = K_F \times B_m^2 \quad \left[\frac{W}{Hz^2} \right] \quad (2.17)$$

As perdas por efeitos de Histerese serão representadas pela seguinte expressão matemática:

$$P_H = K_1 f \quad (W) \quad (2.18)$$

As perdas devidas às correntes de Foucault serão representadas pela seguinte expressão matemática:

$$P_F = K_2 f^2 \quad (W) \quad (2.19)$$

Na prática, para determinar os coeficientes K_1 K_2 , efectuam-se dois ensaios em vazio, à indução constante mas com frequências e tensões diferentes. Medindo as potências absorvidas em vazio (P_0 e P'_0). As perdas no ferro serão determinadas pelas expressões matemáticas:

$$P_0 = 3r_i I_0^2 + P_{Fe} \quad (W) \quad (2.20)$$

$$P'_0 = 3r_i I_0'^2 + P'_{Fe} \quad (W) \quad (2.21)$$

Onde:

- P_0 e P'_0 correspondem às potências absorvidas em vazio (W);
- P_{Fe} e P'_{Fe} correspondem às perdas no ferro (W);
- r_i corresponde à resistência do enrolamento alimentado. Este valor é conhecido através da lei de Ohm utilizando os parâmetros de corrente e tensão de leituras directas na montagem da figura 2.5 (Ω);
- I_0 corresponde à corrente em vazio, no enrolamento alimentado (A);

Assim sendo, determinam-se os valores de P_{Fe} e P'_{Fe} .

Com estes valores (P_{Fe} e P'_{Fe}) e através da expressão matemática (2.15), obtém-se o seguinte sistema com duas equações e duas incógnitas:

$$P_{Fe} = K_1 f + K_2 f^2$$

$$P'_{Fe} = K_1 f' + K_2 f'^2$$

Resolvendo o referido sistema em ordem a K_1 e K_2 tem-se que:

$$K_1 = \frac{P_{Fe}}{f} - f \cdot \left[\frac{P'_{Fe} - \left(\frac{f' P_{Fe}}{f} \right)}{f' (f' - f)} \right] \quad K_2 = \frac{P'_{Fe} - \left(\frac{f' P_{Fe}}{f} \right)}{f' (f' - f)}$$

2.3 – Síntese e Conclusões

- 1) As perdas por correntes de Foucault são inversamente proporcionais à resistividade do material, o que justifica o interesse de utilizar materiais de alta resistividade. No caso de máquinas eléctricas rotativas e transformadores, é muito vantajoso utilizar chapa de alta resistividade, daí o uso geral de chapas com silício.
- 2) As perdas por correntes de Foucault, variam com o quadrado da espessura da laminagem. Esta característica é importante no fabrico de máquinas eléctricas rotativas e transformadores (reduzindo a espessura de laminagem de um circuito magnético de t para t/n , há um decréscimo das perdas por correntes de Foucault no valor de n^2).
- 3) Devido às aproximações consideradas no desenvolvimento do modelo apresentado (figuras 2.2 e 2.3), a expressão das perdas (2.10) não conduz a resultados precisos. Contudo, este facto não é preocupante pois estas perdas, (perdas por correntes de Foucault), representam uma baixa percentagem em comparação com as perdas totais no ferro (será verificado no capítulo 3).
- 4) Os principais inconvenientes no método apresentado para a separação das perdas no ferro, nas suas duas componentes de Histerese e por correntes de Foucault:
 - Obrigatoriamente devem ser feitos, no mínimo, dois ensaios em vazio, à frequência variável para a determinação dos coeficientes K_1 e K_2 .
 - É indispensável ter equipamento capaz de funcionar à frequência variável.

Estes princípios vão ser aplicados no capítulo 4.

CAPÍTULO 3

DETERMINAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM TRANSFORMADOR

Este estudo, realizado com base em transformadores trifásicos, tem por objectivo a determinação dos parâmetros de um circuito eléctrico equivalente ao transformador, em regime nominal.

Na prática, para a determinação dos respectivos parâmetros, recorre-se aos ensaios económicos do transformador.

A representação esquemática do referido circuito equivalente, será por fase.

3.1 – Ensaios económicos

Nestes ensaios, o transformador é submetido a regimes de funcionamento em circuito aberto ou em curto circuito e portanto sem fornecimento de energia pelo lado contrário à alimentação. A potência absorvida à rede de alimentação corresponde apenas às perdas medidas.

3.1.1 – Ensaios em circuito aberto ou em vazio

3.1.1.1 – Procedimentos e objectivo para o ensaio

O referido ensaio consiste em alimentar a máquina através dos enrolamentos de um dos lados, secundário ou primário, à tensão nominal com o enrolamento do lado contrário em circuito aberto.

Neste ensaio, deverão ser medidas e registadas as seguintes grandezas:

- A corrente no enrolamento alimentado [A];
- A tensão de alimentação [V];
- A tensão no lado contrário à alimentação [V];
- A potência absorvida à rede [W];

Com as referidas grandezas medidas, devem ser calculados os seguintes parâmetros, valores e grandezas, referentes ao regime de funcionamento em causa:

- A razão de transformação de tensões do transformador;
- O factor de potência em vazio;
- As componentes magnetizante e de perdas da corrente em vazio [A];
- A impedância de magnetização [Ω];
- As componentes activa e reactiva da impedância de magnetização [Ω];
- As perdas no ferro [W].

3.1.1.2 – Condições particulares para realização do ensaio

Num transformador, a um determinado regime de funcionamento, o nível de indução é aproximadamente constante quer se alimente a máquina pelos enrolamentos primários ou pelos secundários. Consequentemente, no referido regime, as perdas no ferro são aproximadamente constantes seja qual for o lado alimentado. Assim sendo, no ensaio em vazio seja qual for o lado alimentado as perdas no ferro são consideradas constantes.

Neste caso, optou-se por realizar este ensaio com a alimentação no lado secundário e o primário em circuito aberto.

Neste ensaio, a alimentação deverá ser à tensão nominal e à frequência estipulada na chapa característica da máquina.

3.1.2 – Montagens

3.1.2.1 – Montagem clássica para ensaios em vazio

Na montagem clássica, utilizam-se: dois voltímetros para medidas das tensões primárias e secundárias; um amperímetro para medir a corrente no enrolamento alimentado e dois Wattímetros para medida da potência absorvida à fonte, conforme indicado na figura 3.1 (Esquema de montagem clássica para ensaios em vazio). A potência absorvida à fonte será então a soma algébrica das potências medidas nos Wattímetros W_1 e W_2 .

Neste caso, utilizar-se-á um analisador de potência designado por Power Analyser (da NORMA) que no lado primário ou secundário, onde estiver inserido, além de indicar o factor de potência, também integra os seguintes aparelhos de medida: Voltímetro, Amperímetro e Wattímetro.

- Esquema da montagem clássica:

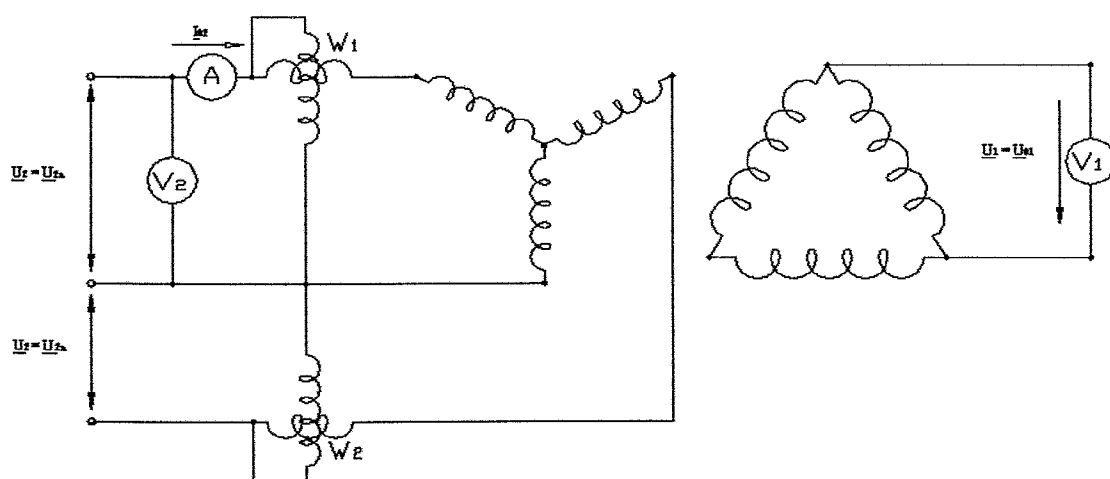


Figura 3.1 : Esquema de montagem clássica para ensaios em vazio

3.1.2.2 – Montagem para determinação da resistência dos enrolamentos

Para a decomposição das perdas em vazio, em perdas no ferro e perdas por efeito de Joule no enrolamento alimentado, deve-se para além de fazer o ensaio em vazio, determinar a resistência do referido enrolamento.

Através do circuito indicado na figura 2.5 (Montagem do circuito para determinação da resistência de um enrolamento), do parágrafo 2.1 - capítulo 2, composto por uma fonte de alimentação (tensão contínua), um voltímetro, um reóstato e um amperímetro ligados aos enrolamentos do transformador, e pela aplicação da lei de Ohm, é possível determinar os valores das resistências entre fases (ou das fases quando se tem acesso ao neutro).

É de salientar que a impedância dos enrolamentos é composta por uma componente activa e uma componente reactiva.

Conforme o indicado na referida figura, a tensão aplicada aos enrolamentos é contínua. Neste caso a frequência é nula e consequentemente a componente reactiva da referida impedância anula-se, ficando expressa apenas pela componente activa. O referido procedimento, possibilita determinar a componente activa (resistência) de um enrolamento primário ou secundário.

O valor da resistência entre fases (ou da fase) a considerar, a uma determinada temperatura, deverá ser a média dos valores calculados para as três fases.

3.1.2.3 – Cálculos de grandezas e parâmetros

3.1.2.3.1 – Determinação do Ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

A potência absorvida em vazio (supondo alimentação pelo enrolamento secundário), relaciona-se com as perdas no ferro através da seguinte expressão matemática :

$$P_0 = 3 \times (r_{y_2} \times I_{02}^2) + P_{FE} \quad [W] \quad (3.1)$$

Onde:

- r_{y2} , corresponde à resistência equivalente por fase, de um enrolamento secundário [Ω];
- P_{FE} são as perdas no circuito magnético [W];
- I_{02} corresponde à corrente em vazio medida por fase [A].

Por sua vez, as perdas no circuito magnético poderão ser determinadas pela seguinte expressão matemática:

$$P_{FE} = 3 \times \left[\frac{U_{2n}}{\sqrt{3}} \times I_{02} \times \cos \varphi_0 \right] \quad [W] \quad (3.2)$$

Através da expressão anterior determina-se o factor de potência em vazio:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{FE}}{3 \times \left(\frac{U_{2n}}{\sqrt{3}} \times I_{02} \right)} \quad (3.3)$$

Com o referido valor do factor de potência em vazio, poder-se-à determinar as seguintes grandezas e parâmetros do ramo do circuito eléctrico equivalente simplificado:

- As componentes magnetizante e de perdas da corrente em vazio, por fase:

$$I_{m2} = I_{02} \times \sin \varphi_0 \quad [A] \quad (3.4)$$

$$I_{a2} = I_{02} \cos \varphi_0 \quad [A] \quad (3.5)$$

- A impedância de magnetização por fase:

$$Z_{02} = \frac{\frac{U_{02}}{\sqrt{3}}}{I_{02}} \quad [\Omega] \quad (3.6)$$

- As componentes activa e reactiva da impedância de magnetização, por fase:

$$R_{02} = \frac{\frac{U_{02}}{\sqrt{3}}}{I_{a2}} \quad [\Omega] \quad (3.7)$$

$$X_{m2} = \frac{\frac{U_{02}}{\sqrt{3}}}{I_{m2}} \quad [\Omega] \quad (3.8)$$

3.1.2.3.2 – Representação esquemática do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

O circuito magnético será representado por um ramo de circuito eléctrico, composto por uma parte resistiva (R_{02}) e uma parte reactiva (X_{m2}) em paralelo, conforme indicado na seguinte figura (figura 3.2):

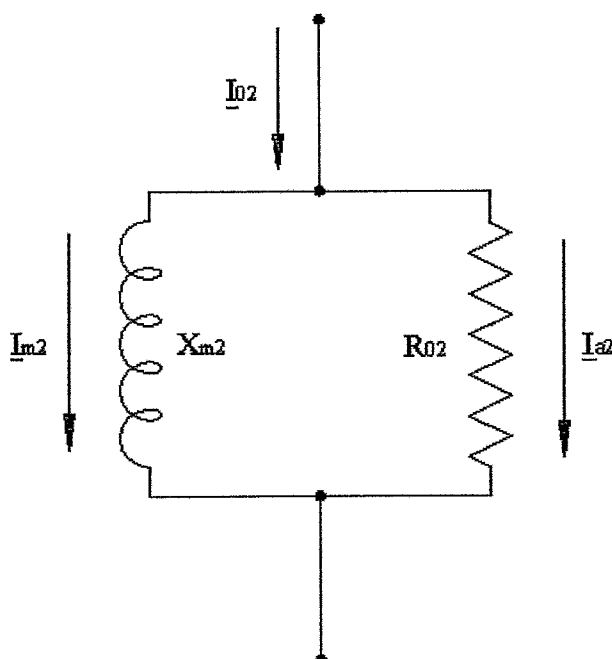


Figura 3.2 : Representação esquemática do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

3.1.3 – Ensaio em curto circuito

3.1.3.1 - Procedimentos e objectivo do ensaio

Para este ensaio, deve-se alimentar a máquina através dos enrolamentos de um dos lados, secundário ou primário, com o enrolamento do lado contrário em curto circuito, circulando neste, a corrente nominal.

Neste ensaio, deverão ser registados os seguintes valores:

- As correntes no enrolamento alimentado e no enrolamento em curto circuito;
- A tensão de alimentação;
- A potência absorvida à rede.

Com os valores registados, devem ser calculados os seguintes parâmetros e valores referentes ao regime de funcionamento em causa:

- O factor de potência em curto circuito;
- A impedância de curto circuito [Ω];
- As componentes activa e reactiva da impedância de curto circuito [Ω];
- As perdas e resistência suplementares [W];
- As perdas em curto circuito [W].

3.1.3.2 - Condições particulares para realização do ensaio

Neste caso, a alimentação será feita do lado primário, com o lado secundário em curto circuito.

O amperímetro inserido em série no circuito secundário deverá registar uma corrente de valor igual ou próximo à corrente nominal secundária. Se a corrente secundária registada não for exactamente igual à nominal, poder-se-á extrapolar os resultados para a situação nominal.

3.1.3.3 – Montagens

3.1.3.3.1 – Montagem clássica para ensaios em curto circuito

Os instrumentos de medida utilizados na montagem clássica são: um voltímetro para medida da tensão primária; dois amperímetros para medir as correntes no enrolamento alimentado e no enrolamento curto-circuitado; dois Wattímetros para medida da potência absorvida à fonte, conforme indicado na figura 3.3 (Esquema de montagem clássica para ensaios em curto circuito). A potência absorvida à fonte será então a soma algébrica das potências medidas nos Wattímetros W1 e W2.

Neste caso, utilizar-se-á o analisador de potência (Power Analyser da NORMA), já referido no parágrafo 3.1.2.1 (Montagem clássica para ensaios em vazio).

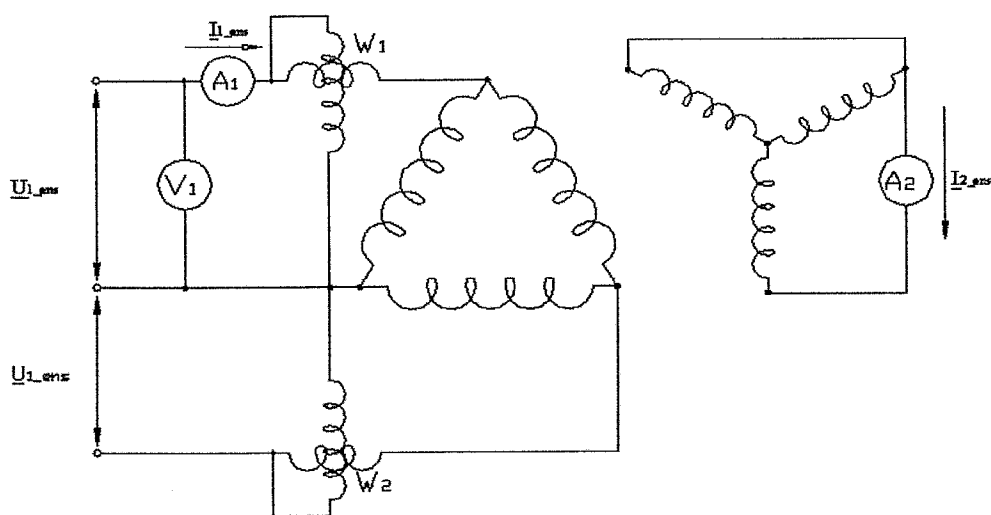


Figura 3.3 : Esquema de montagem clássica para ensaios em curto circuito

3.1.3.3.2 – Montagem para determinação da resistência dos enrolamentos

Para efectuar os cálculos de perdas por efeito de Joule nos enrolamentos, é necessário determinar os valores das resistência dos enrolamentos do primário e do secundário. Para tal, recorre-se ao circuito e

método já referidos no parágrafo 3.1.2.2 (Montagem do circuito para determinação da resistência de um enrolamento).

3.1.3.4 – Cálculos de grandezas e parâmetros

3.1.3.4.1 – Caracterização do circuito eléctrico equivalente

Por se tratar de um estudo com interesse para aplicação das leis de Kirchoff no sentido de simplificação de circuitos compostos por transformadores e cargas, optou-se por apresentar o modelo equivalente em gama (Γ), referido ao secundário.

O referido modelo, por vezes é ainda simplificado, desprezando o ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, tendo neste caso a designação de circuito equivalente de Kapp.

Após o ensaio e registo de grandezas impostas e valores medidos, deve-se, através de cálculos matemáticos determinar os seguintes parâmetros e grandezas:

- As perdas de Joule, P_J , expressas em [W];
- As perdas suplementares, P_{sup} , expressas em [W];
- A resistência suplementar, por fase, r_{i_sup} , expressa em [Ω];
- O factor de potência;
- A resistência combinada dos enrolamentos, por fase, referida ao primário ou secundário, R_{eq_i} ($i=1$ se for referida ao primário; $i=2$ se for referida ao secundário), expressa em [Ω];
- A reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao primário ou secundário, X_{eq_i} ($i=1$ se for referida ao primário; $i=2$ se for referida ao secundário), expressa em [Ω];
- A impedância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao primário ou secundário, Z_{eq_i} ($i=1$ se for referida ao primário; $i=2$ se for referida ao secundário), expressa em [Ω].

As perdas por efeito de Joule deverão ser calculadas pela seguinte expressão matemática:

$$P_J = 3 \times (r_{Y_equivalente_1} \times I_{1_ens}^2 + r_{Y_2} \times I_{2_ens}^2) \quad [W] \quad (3.9);$$

Onde:

- $r_{y_equivalente_1}$, corresponde à resistência de fase da estrela equivalente ao conjunto de enrolamentos primário [Ω];
- r_{y_2} , corresponde à resistência de fase de um enrolamento secundário [Ω];
- I_{1_ens} , corresponde à corrente de fase na estrela equivalente ao conjunto de enrolamentos do primário [A];
- I_{2_ens} , corresponde à corrente de fase de um enrolamento secundário (para enrolamentos de ligação em triângulo, esta corrente será numa fase da estrela equivalente) [A].

As perdas suplementares deverão ser calculadas pela seguinte expressão matemática:

$$P_{Sup} = P_{cc} - P_J \quad [W] \quad (3.10);$$

Onde:

- P_{cc} , corresponde à potência absorvida à fonte, no ensaio em curto circuito, expressas em [W];
- P_J corresponde às perdas de Joule, expressas em [W].

A resistência por fase, associada às perdas suplementares é calculada pela seguinte expressão matemática:

$$r_{i_Sup} = \frac{\frac{P_{Sup}}{3}}{I_{i_ens}^2} \quad [W] \quad (3.11);$$

Sendo:

- r_{i_Sup} , a resistência suplementar por fase ($i=1$ se for referida ao primário; $i=2$ se for referida ao secundário) [Ω];

Determinação da razão de transformação de tensões:

A razão de transformação de tensões é um valor numérico que poderá ser determinado através das seguintes alternativas:

- a) Relação aproximada de espiras dos enrolamentos primários e secundários, tendo em consideração os tipos de ligações dos referidos enrolamentos;
- b) Quociente entre as tensões nominais primária e secundária.

Neste caso, por não se conhecer o número de espiras dos enrolamentos, a referida razão será determinada pela alternativa (b):

$$m = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad (3.12)$$

Onde:

- U_{1n} , corresponde à tensão nominal primária [V];
- U_{2n} , corresponde à tensão nominal secundária [V].

A resistência por fase, associada às perdas suplementares, referida ao secundário será determinada pela seguinte expressão matemática:

$$R_{12_sup} = \frac{r_{1_sup}}{m^2} \quad [\Omega] \quad (3.13)$$

A resistência por fase, do primário referida ao secundário será determinada pela seguinte expressão matemática:

$$r_{12} = \frac{r_{y_equivalente_1}}{m^2} \quad [\Omega] \quad (3.14)$$

A resistência combinada dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário, R_{eq_2} será calculada através da seguinte expressão matemática:

$$R_{eq_2} = r_{12} + r_{y_2} \quad [\Omega] \quad (3.15)$$

Cálculo do factor de potência em curto circuito:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 \times \frac{U_{1_ens}}{\sqrt{3}} \times I_{1_ens}} \quad (3.16)$$

Cálculo da tensão de alimentação do enrolamento primário, referida ao secundário:

$$U_{12_ens} = \frac{U_{1_ens}}{m} \quad [V] \quad (3.17)$$

Cálculo da impedância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário:

$$Z_{eq_2} = \frac{\frac{U_{12_ens}}{\sqrt{3}}}{I_{2_ens}} \quad [\Omega] \quad (3.18)$$

Cálculo da reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário:

$$X_{eq_2} = \sqrt{Z_{eq_2}^2 - (R_{eq_2} + R_{12_Sup})^2} \quad [\Omega] \quad (3.19)$$

3.2 – Modelo equivalente em gama (Γ) referido ao secundário

Com os parâmetros e grandezas preconizados nos parágrafos 3.1.2.3.1 (Determinação do Ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético) e 3.1.3.4.1 (Caracterização do circuito eléctrico equivalente) poder-se-à estabelecer o seguinte modelo equivalente em gama (Γ), referido ao secundário:

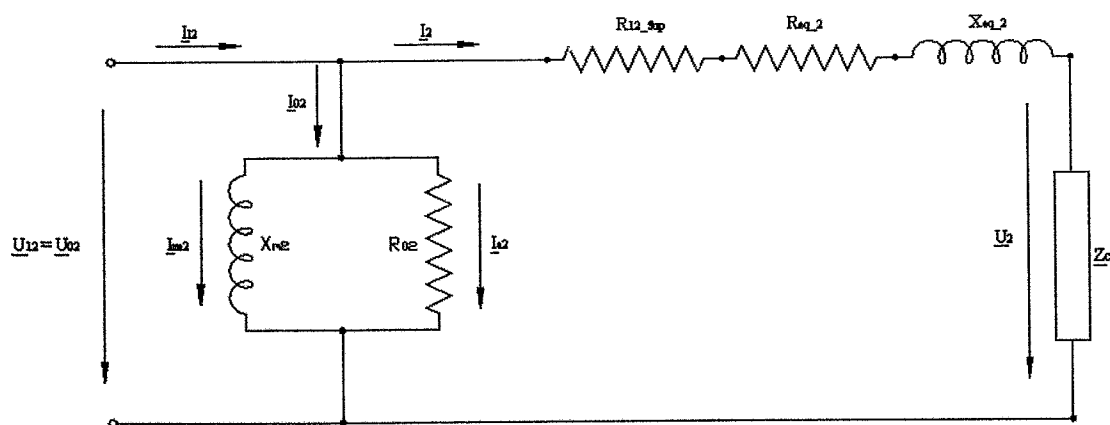


Figura 3. 4 : Circuito eléctrico equivalente por fase

3.3 - Determinação experimental do circuito equivalente

Este estudo realizado com base em dois exemplares de transformadores trifásicos do tipo seco, tem por objectivo a determinação dos respectivos circuitos eléctricos equivalentes.

3.3.1 – Estudo com o Primeiro Transformador - Características do Transformador

Tabela 3.1 : Características nominais do transformador utilizado

Número de fases: 3 ; Ligação: Yy					
Potência (kVA)	f (Hz)	Tensões nominais		Correntes nominais	
		Primária (V)	Secundária (V)	Primária (A)	Secundária (A)
10	50	380	190	15,19	30,39
Tipo de Arrefecimento: AN					

3.3.1.1 – Determinação do Ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético em regime nominal

Antes de qualquer outro ensaio, fez-se a verificação da relação de transformação. Alimentou-se a máquina pelo lado primário, 380V e fez-se a leitura da tensão no lado secundário. Para este transformador, a tensão secundária medida em vazio foi de 181.6V , o que corresponde a um desvio de -4.42% na relação de transformação.

O ensaio em vazio foi realizado em conformidade com o parágrafo 1.1 do presente capítulo (Ensaio em circuito aberto ou em vazio).

Na tabela seguinte, tabela 3.2, encontram-se registados as grandezas impostas e valores medidos no referido ensaio.

Tabela 3.2 : Grandezas impostas e valores medidos no ensaio em vazio

Grandezas impostas		Valores medidos		
U_{02} (V)	f (Hz)	P_0 (W)	I_{02} (A)	U_{1n} (V)
181,6	50	117	1,532	380

Sendo:

- U_{02} , a tensão de alimentação do enrolamento secundário (V);
- U_{1n} , a tensão medida no enrolamento primário (V);
- f , a frequência da tensão de alimentação do enrolamento secundário (Hz);
- P_0 , a potência absorvida à fonte, no ensaio em vazio (W);
- I_{02} , a corrente secundária, no ensaio em vazio (A).

Através do circuito indicado na figura 2.5 do parágrafo 2.1, capítulo 2 (Montagem do circuito para determinação da resistência de um enrolamento), aplicado ao secundário do transformador, determinou-se pela aplicação da lei de Ohm, os valores das resistências entre fases.

O valor médio calculado para as três resistências entre fases do secundário, à temperatura ambiente de 21°C, é de:

$$R_{\text{entre_fases_secundário}} = 100,2m\Omega;$$

3.3.1.2 – Cálculo da resistência de fase

Por se tratar de um sistema trifásico equilibrado, o valor da resistência de uma fase será:

$$r_{y_2} = \frac{R_{\text{entre_fases_secundário}}}{2} \quad [\Omega]$$

$$r_{y_2} = \frac{100,2}{2} = 50,1m\Omega \quad (\text{À temperatura ambiente } 21^\circ\text{C})$$

3.3.1.3 – Cálculos de parâmetros e grandezas

Neste parágrafo, os cálculos são efectuados recorrendo às expressões matemáticas do parágrafo 1.2.3.1 (Determinação do Ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético) do presente capítulo.

Cálculo das perdas no ferro, P_{FE}

Da expressão matemática (3.1) parágrafo 1.2.3.1, determinam-se as perdas no ferro:

$$P_{FE} = P_0 - 3 \times (r_{y_2} \times I_{02}^2) \quad [W]$$

Substituindo os valores na referida expressão obtém-se:

$$P_{FE} = 117 - 3 \times (50,1 \times 10^{-3}) \times 1,532^2 = 116,65W$$

Como era de esperar, as perdas de Joule nos enrolamentos são desprezáveis.

Cálculo do factor de potência em vazio $[\cos \varphi_0]$:

Na expressão matemática (3.3) (do referido parágrafo 1.2.3.1), substituindo o valor calculado de perdas no ferro, o valor medido da corrente em vazio e o valor da tensão secundária, obtém-se:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{FE}}{3 \times \left(\frac{U_{2n}}{\sqrt{3}} \times I_{02} \right)} = \frac{116,65}{3 \times \left(\frac{181,6}{\sqrt{3}} \times 1,532 \right)} = 0,2421$$

Corresponde ao ângulo de esfasamento: $\varphi_0 = 75,99^\circ$

Cálculo das componentes magnetizante e de perdas da corrente em vazio, por fase:

Das expressões matemáticas 3.4 e 3.5 (do referido parágrafo 1.2.3.1, podem-se determinar,

$$I_{m2} = 1,532 \times \sin 75,99^\circ = 1,486 A = 1486 mA$$

$$I_{a2} = 1,532 \times \cos 75,99^\circ = 0,371 A = 371 mA$$

Cálculo das componentes activa e reactiva da impedância de magnetização, por fase:

Os referidos parâmetros são determinados através das expressões matemáticas (3.7) e (3.8) (do parágrafo 1.2.3.1). Os valores numéricos obtidos são:

$$R_{02} = \frac{\frac{U_{02}}{\sqrt{3}}}{I_{a2}} = \frac{\frac{181,6}{\sqrt{3}}}{0,371} = 282,61 \Omega \quad X_{m2} = \frac{\frac{U_{02}}{\sqrt{3}}}{I_{m2}} = \frac{\frac{181,6}{\sqrt{3}}}{1,486} = 70,56 \Omega$$

Cálculo da impedância de magnetização, por fase:

Através da expressão matemática (3.6), do mesmo parágrafo, determina-se que:

$$Z_{02} = \frac{\frac{U_{02}}{\sqrt{3}}}{I_{02}} = \frac{\frac{181,6}{\sqrt{3}}}{1,532} = 68,44 \Omega$$

3.3.1.4 – Grandezas e parâmetros do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

Os parâmetros calculados para o ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, bem como as grandezas referentes ao mesmo circuito encontram-se apresentados na tabela seguinte (tabela 3.3):

Tabela 3.3 : Grandezas e parâmetros relativos ao ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

Valores medidos	Grandezas e parâmetros calculados (por fase)				
I_{02} (mA)	I_{a2} (mA)	I_{m2} (mA)	R_{02} (Ω)	X_{m2} (Ω)	Z_{02} (Ω)
1532	371	1486	282,61	70,56	68,44

3.3.1.5 – Determinação dos restantes parâmetros do circuito eléctrico equivalente ao transformador em regime nominal

O ensaio em curto circuito foi realizado em conformidade com o parágrafo 1.3 (Ensaio em curto circuito) do presente capítulo.

Na tabela 3.4, abaixo indicada, encontram-se as grandezas impostas e valores medidos no referido ensaio.

Tabela 3.4 : Grandezas impostas e valores medidos no ensaio em curto circuito

Grandezas impostas			Valores medidos	
I_{1_ens} (A)	f (Hz)	U_{1_ens} (V)	I_{2_ens} (A)	P_{cc} (W)
14,162	50	16,1	29,51	323,9

Sendo:

- I_{1_ens} , a corrente no enrolamento primário [A];
- f , a frequência da tensão de alimentação do enrolamento primário [Hz];
- U_{1_ens} , a tensão de alimentação do enrolamento primário [V];
- I_{2_ens} , a corrente no enrolamento secundário [A];
- P_{cc} , a potência absorvida à fonte, no ensaio em curto circuito [W].

3.3.1.6 – Cálculo da resistência de fase

Para a determinação da resistência entre fases, efectuou-se uma montagem conforme o indicado na figura 2.5 (Montagem do circuito para determinação da resistência de um enrolamento –parágrafo 2.1, Capítulo 2). Com os resultados medidos, foi calculado o valor médio das três resistências primárias entre fases, à temperatura ambiente de 21°C. O valor obtido encontra-se abaixo indicado:

$$r_{entre_fases_primário} = 183,7m\Omega;$$

O primário corresponde a um sistema trifásico equilibrado, logo, o valor da resistência de uma fase será:

$$r_{y_equivalente_1} = \frac{r_{entre_fases_primário}}{2} = \frac{183,7 \times 10^{-3}}{2} = 0,09185\Omega = 91,85m\Omega;$$

No parágrafo 3.1.1 (Determinação do Ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético em regime nominal) deste capítulo, ficou determinado que:

$$r_{Y_2} = 50,1 \times 10^{-3} \Omega$$

3.3.1.7 – Caracterização do circuito eléctrico equivalente

Pela expressão matemática 3.9, do parágrafo 1.3.4.1, deste capítulo, determinam-se as perdas por efeito de Joule:

$$P_J = 3 \times (91,85 \times 10^{-3} \times 14,162^2 + 50,1 \times 10^{-3} \times 29,51^2) = 186,2W$$

Pela expressão matemática 3.10 do referido parágrafo, as perdas suplementares serão:

$$P_{Sup} = 323,9 - 186,2 = 137,7W$$

É de salientar que no regime de curto circuito, as perdas no ferro são insignificantes. Assim sendo, elas não foram consideradas nos cálculos das perdas suplementares.

Quantificação das perdas no ferro neste regime: As perdas no ferro, variam em função do quadrado da tensão de alimentação do enrolamento. No nosso caso, a tensão de ensaio (tensão de alimentação do primário no ensaio em curto circuito) indicada na tabela 3.4, é de 16,1V. Por sua vez, a tensão nominal do primário, conforme já referido na tabela 3.2, é de 380V.

Neste caso, a percentagem do valor das perdas no ferro que deveriam ser consideradas nos cálculos de perdas suplementares seria:

$$\left(\frac{16,1}{380}\right)^2 \times 100 = 0,18\%$$

Como seria de esperar, a referida percentagem corresponde a perdas insignificantes (o valor neste caso seria aproximadamente 0,21W).

Em conformidade com a expressão matemática 3.11, parágrafo 1.3.4.1 do presente capítulo, a resistência por fase, associada às perdas suplementares será :

$$r_{1_Sup} = \frac{\frac{P_{Sup}}{3}}{I_{1_ens}^2} = \frac{\frac{137,7}{3}}{14,162^2} = 228,86m\Omega$$

A razão de transformação de tensões, calculada segundo a expressão matemática 3.12 do parágrafo 1.3.4.1 deste capítulo, utilizando a tensão secundária medida em vazio, será:

$$m = \frac{380}{181,6} = 2,0925$$

A resistência por fase, associada às perdas suplementares, referida ao secundário determinada segundo a expressão matemática 3.13 do referido parágrafo, será:

$$R_{12_Sup} = \frac{228,86 \times 10^{-3}}{2,0925^2} = 5,227 \times 10^{-2} \Omega = 52,27m\Omega$$

A resistência por fase, do primário referida ao secundário é determinada segundo a expressão matemática 3.14 do mesmo parágrafo:

$$r_{12} = \frac{91,85 \times 10^{-3}}{2,0925^2} = 20,98m\Omega$$

A resistência combinada dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário, R_{eq_2} , será calculada através da expressão matemática 3.15 do referido parágrafo:

$$R_{eq_2} = 20,98 + 50,1 = 71,08m\Omega$$

Em conformidade com a expressão matemática 3.16 do mesmo parágrafo, o cálculo do factor de potência em curto circuito será:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{323,9}{3 \times \frac{16,1}{\sqrt{3}} \times 14,162} = 0,8202$$

A tensão de alimentação do enrolamento primário no ensaio de curto circuito, referida ao secundário, de acordo com a expressão matemática 3.17 do referido parágrafo, será:

$$U_{12_ens} = \frac{16,1}{2,0925} = 7,69V$$

Da expressão 3.18 do parágrafo 1.3.4.1, obtém-se a impedância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário:

$$Z_{eq_2} = \frac{\frac{7,69}{\sqrt{3}}}{29,51} = 0,15045\Omega = 150,45m\Omega$$

A reactância combinada de fugas dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário será de acordo com a expressão matemática 3.19 do mesmo parágrafo:

$$X_{eq_2} = \sqrt{(150,45 \times 10^{-3})^2 - (71,08 \times 10^{-3} + 52,27 \times 10^{-3})^2} = 86,14m\Omega$$

3.3.1.8 – Parâmetros do circuito equivalente por fase, em gama (Γ) referido ao secundário

Na tabela abaixo indicada, encontram-se as grandezas e parâmetros do circuito eléctrico equivalente (conforme a figura 3.4, parágrafo 2 do presente capítulo), determinados para o transformador de ligação Yy.

Tabela 3.5 : Grandezas e parâmetros referentes ao circuito eléctrico equivalente ao transformador

Medidos	Numéricos							
I_{02} (mA)	I_{a2} (mA)	I_{m2} (mA)	R_{02} (Ω)	X_{m2} (Ω)	Z_{02} (Ω)	R_{eq_2} (m Ω)	R_{12_Sup} (m Ω)	X_{eq_2} (m Ω)
1532	371	1486	282,61	70,56	68,44	71,08	52,27	86,14

3.3.2 – Estudo com o Segundo Transformador

Características do Transformador

Tabela 3.6 : Características nominais do transformador utilizado

Número de fases: 3 ; Ligação: Dy					
Potência (kVA)	f (Hz)	Tensões nominais		Correntes nominais	
		Primária (V)	Secundária (V)	Primária (A)	Secundária (A)
10	50	400	200	14,43	28,87
Tipo de Arrefecimento: AN					

3.3.2.1 – Determinação do Ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético em regime nominal

Para este transformador, também foi verificada a relação de transformação. Neste caso, a tensão primária medida em vazio foi de 385V, o que corresponde a um desvio de -3.75% na relação de transformação.

Para este caso, o ensaio em vazio também foi realizado de acordo com o preconizado no parágrafo 1.1 do presente capítulo (Ensaio em circuito aberto ou em vazio).

Na tabela 3.7, abaixo indicada, encontram-se as grandezas impostas e valores medidos no referido ensaio.

Tabela 3.7 : Grandezas impostas e valores medidos no ensaio em vazio

Grandezas nominais impostas		Valores medidos		
U_{02} (V)	f (Hz)	P_0 (W)	I_{02} (A)	U_{1n} (V)
200	50	88,07	0,414	385

Os valores das resistências entre fases do secundário, foram determinadas por cálculos numéricos utilizando os valores medidos através do circuito preconizado na figura 2.5 (Montagem do circuito para determinação da resistência de um enrolamento) do parágrafo 2.1, capítulo 2.

O valor médio calculado para as três resistências entre fases do secundário, à temperatura ambiente de 19°C, é de:

$$R_{\text{entre_fases_secundário}} = 188,67m\Omega;$$

3.3.2.2 – Cálculo da resistência de fase

O sistema é trifásico e equilibrado, logo, o valor da resistência de uma fase será:

$$r_{y_2} = \frac{R_{\text{entre_fases_secundário}}}{2} \quad [\Omega]$$

$$r_{y_2} = \frac{188,67}{2} = 94,335m\Omega \quad (\text{À temperatura ambiente } 19^{\circ}\text{C})$$

3.3.2.3 – Cálculos de parâmetros e grandezas

Para o cálculo de parâmetros e grandezas do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, recorre-se às expressões matemáticas do parágrafo 1.2.3.1 (Determinação do Ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético) do presente capítulo.

Cálculo das perdas no ferro, P_{FE} :

Da expressão matemática 3.1 determinam-se as seguintes perdas no ferro,

$$P_{Fe} = 88,07 - 3 \times (94,335 \times 10^{-3}) \times 0,414^2 = 88,02W$$

Como era de esperar, as perdas de Joule nos enrolamentos são insignificantes.

Cálculo do factor de potência em vazio [$\cos \varphi_0$]:

Na expressão matemática 3.3 referido parágrafo, considerando o valor calculado de perdas no ferro, o valor medido da corrente em vazio e o valor da tensão secundária, obtém-se:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{FE}}{3 \times \left(\frac{U_{2n}}{\sqrt{3}} \times I_{02} \right)} = \frac{88,02}{3 \times \left(\frac{200}{\sqrt{3}} \times 0,414 \right)} = 0,6137$$

Corresponde ao ângulo de esfasamento: $\varphi_0 = 52,14^\circ$

Cálculo das componentes magnetizante e de perdas da corrente em vazio, por fase:

Das expressões matemáticas 3.4 e 3.5 do parágrafo acima mencionado podem-se determinar,

$$I_{a2} = 0,414 \times \cos 52,14^\circ = 0,254 A = 254 mA$$

$$I_{m2} = 0,414 \times \sin 52,14^\circ = 0,327 A = 327 mA$$

Cálculo das componentes activa e reactiva da impedância de magnetização, por fase:

Recorrendo às expressões matemáticas (3.7) e (3.8), obtém-se respectivamente:

$$R_{02} = \frac{\frac{U_{02}}{\sqrt{3}}}{I_{a2}} = \frac{\frac{200}{\sqrt{3}}}{0,254} = 454,61 \Omega \quad X_{m2} = \frac{\frac{U_{02}}{\sqrt{3}}}{I_{m2}} = \frac{\frac{200}{\sqrt{3}}}{0,327} = 353,12 \Omega$$

Cálculo da impedância de magnetização, por fase:

O referido parâmetro é calculado através da expressão matemática 3.6, conforme abaixo indicado:

$$Z_{02} = \frac{\frac{U_{02}}{\sqrt{3}}}{I_{02}} = \frac{\frac{200}{\sqrt{3}}}{0,414} = 278,91 \Omega$$

3.3.2.4 – Grandezas e parâmetros do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

Os parâmetros e grandezas referentes ao ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, encontram-se apresentados na tabela seguinte (tabela 3.8):

Tabela 3.8 : Grandezas e parâmetros relativos ao ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

Valores medidos	Grandezas e parâmetros calculados (por fase)				
I_{02} (mA)	I_{a2} (mA)	I_{m2} (mA)	R_{02} (Ω)	X_{m2} (Ω)	Z_{02} (Ω)
414	254	327	454,61	353,12	278,91

3.3.2.5 – Determinação dos restantes parâmetros do circuito eléctrico equivalente ao transformador em regime nominal

Para a determinação dos restantes parâmetros, baseou-se nos valores medidos no ensaio em curto-circuito. Este ensaio foi realizado conforme o indicado no parágrafo 1.3 (Ensaio em curto circuito), deste capítulo.

As grandezas impostas e valores medidos no referido ensaio, encontram-se indicados na tabela 3.9 .

Tabela 3.9 : Grandezas impostas e valores medidos no ensaio em curto circuito

Grandezas impostas			Valores medidos	
I_{1_ens} (A)	f (Hz)	U_{1_ens} (V)	I_{2_ens} (A)	P_{cc} (W)
14,78	50	18,7	28,45	432,7

3.3.2.6 – Cálculo da resistência de fase

Determinou-se a resistência entre fases, através dos valores medidos num circuito conforme o indicado na figura 2.5 (Montagem do circuito para determinação da resistência de um enrolamento –parágrafo 2.1, Capítulo 2). O

valor médio calculado para as três resistências primárias entre fases, à temperatura ambiente de 19°C, é de:

$$r_{\text{entre_fases_primário}} = 564,14 \text{ m}\Omega;$$

O valor da resistência por fase será :

$$r_{y_equivalente_1} = \frac{r_{\text{entre_fases_primário}}}{2} = \frac{564,14}{2} = 282,07 \text{ m}\Omega;$$

No parágrafo 3.2.1 deste capítulo, foi determinado que:

$$r_{Y_2} = 94,335 \times 10^{-3} \Omega$$

3.3.2.7 – Caracterização do circuito eléctrico equivalente

As perdas por efeito de Joule são determinadas através da expressão matemática 3.9 do parágrafo 1.3.4.1, do presente capítulo:

$$P_J = 3 \times (282,07 \times 10^{-3} \times 14,78^2 + 94,335 \times 10^{-3} \times 28,45^2) = 413,9 \text{ W}$$

As perdas suplementares são calculadas através da expressão matemática 3.10 do referido parágrafo. O valor numérico será:

$$P_{\text{Sup}} = 432,7 - 413,9 = 18,8 \text{ W}$$

É de salientar que, pelas mesmas razões indicadas no parágrafo 3.1.7 deste capítulo, as perdas suplementares foram calculadas desprezando as perdas no ferro.

De acordo com a expressão matemática 3.11 do parágrafo 1.3.4.1 deste capítulo, a resistência por fase, associada às perdas suplementares corresponde a:

$$r_{1_Sup} = \frac{\frac{P_{\text{Sup}}}{3}}{I_{1_ens}^2} = \frac{\frac{18,8}{3}}{14,78^2} = 28,69 \text{ m}\Omega$$

A razão de transformação de tensões, foi determinada através da expressão matemática 3.12 do parágrafo 1.3.4.1), com a tensão primária conforme o valor de medida indicado no parágrafo 3.2.1 do presente capítulo. O seu valor numérico será:

$$m = \frac{385}{200} = 1,925$$

A resistência por fase, associada às perdas suplementares, referida ao secundário será determinada conforme a expressão matemática 3.13 deste capítulo. O seu valor numérico neste caso será:

$$R_{12_sup} = \frac{28,69 \times 10^{-3}}{1,925^2} = 7,74 m\Omega$$

A resistência por fase, do primário referida ao secundário de acordo com o preconizado na expressão matemática 3.14, terá o seguinte valor numérico:

$$r_{12} = \frac{282,07 \times 10^{-3}}{1,925^2} = 76,12 m\Omega$$

Em conformidade com a expressão matemática 3.15 do presente parágrafo, a resistência combinada dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário, R_{eq_2} , será:

$$R_{eq_2} = 76,12 + 94,335 = 170,46 m\Omega$$

Em conformidade com a expressão matemática 3.16, o factor de potência em curto circuito será:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{432,7}{3 \times \frac{18,7}{\sqrt{3}} \times 14,78} = 0,9039$$

De acordo com a expressão matemática 3.17 deste capítulo, a tensão de alimentação do enrolamento primário no ensaio de curto-circuito, referida ao secundário, será:

$$U_{12_ens} = \frac{18,7}{1,925} = 9,71V$$

A impedância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário, é calculada segundo a expressão 3.18 do parágrafo 1.3.4.1 . O seu valor numérico será:

$$Z_{eq_2} = \frac{\frac{9,71}{\sqrt{3}}}{28,45} = 197,05m\Omega$$

A reactância combinada de fugas dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário é determinada conforme o preconizado na expressão matemática 3.19 do referido parágrafo.

$$X_{eq_2} = \sqrt{(197,05 \times 10^{-3})^2 - (170,46 \times 10^{-3} + 7,74 \times 10^{-3})^2} = 84,1m\Omega$$

3.3.2.8 – Parâmetros do circuito equivalente por fase, em gama (Γ) referido ao secundário

As grandezas e parâmetros do circuito eléctrico equivalente (conforme a figura 3.4 do parágrafo 2), determinadas para o transformador de ligação Dy, encontram-se indicados na tabela seguinte (tabela 3.10).

Tabela 3.10 : Grandezas e parâmetros referentes ao circuito eléctrico equivalente ao transformador

Medidos	Numéricos							
I_{02} (mA)	I_{a2} (mA)	I_{m2} (mA)	R_{02} (Ω)	X_{m2} (Ω)	Z_{02} (Ω)	R_{eq_2} (m Ω)	R_{12_Sup} (m Ω)	X_{eq_2} (m Ω)
414	254	327	454,61	353,12	278,91	170,46	7,74	84,1

3.4 – Síntese e conclusões

Neste capítulo constatou-se que as perdas no ferro, P_{Fe} , são muito próximas do valor da potência absorvidas em vazio, P_0 . Este resultado já era esperado pois no ensaio em vazio a corrente absorvida pela máquina é baixa e destina-se essencialmente à magnetização da chapa magnética e perdas no circuito magnético. Por outro lado, a referida corrente em vazio origina perdas de Joule insignificantes nos enrolamentos. Dos ensaios no transformador Yy, conclui-se que $P_{FE} = 116,65W$ e $P_0 = 117W$. No transformador Dy os referidos valores foram: $P_{FE} = 88,02W$ e $P_0 = 88,07W$.

Dos ensaios e cálculos efectuados, também se constata que:

- a) A corrente necessária para a magnetização do circuito magnético é superior à corrente responsável pelas perdas magnéticas. Para o transformador Yy foi demonstrado que as referidas correntes têm os seguintes valores respectivamente : $I_{m2}=1,486A \approx 1,5A$ e $I_{a2}=0,371A \approx 0,37A$. Para o transformador Dy obteve-se, $I_{m2}=0,327A \approx 0,33A$ e $I_{a2}=0,254A \approx 0,25A$
- b) A componente activa da impedância de magnetização (R_{02}) é significativamente maior que a componente reactiva da mesma (X_{m2}). Para o transformador Yy estes parâmetros correspondem respectivamente a: $R_{02}=282,61\Omega$ e $X_{m2}=70,56\Omega$. Para o transformador Dy os referidos parâmetros correspondem a: $R_{02}=454,61\Omega$ e $X_{m2}=353,12\Omega$. Estes parâmetros confirmam a veracidade das grandezas indicadas na alínea (a) deste parágrafo (parágrafo 3.4 – Síntese e conclusões).
- c) O facto de aparecer uma componente activa (R_{02}) no ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, traduz o efeito de perdas no circuito magnético.
- d) Nestes transformadores, a relação entre as perdas no circuito magnético e as perdas totais são: 17% no transformador Dy; 26%, no transformador Yy.

e) Comparação dos restantes parâmetros e grandezas:

Transformadores do estudo	U_{1_ens} (V)	R_{eq_2} (m Ω)	R_{12_Sup} (m Ω)	X_{eq_2} (m Ω)	Z_{eq_2} (m Ω)	Pcc (W)
Yy	16,1	71,08	52,27	86,14	150,45	323,9
Dy	18,7	170,46	7,74	84,1	197,05	432,7

Constata-se que o transformador de ligação Dy tem maior impedância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário (Z_{eq_2}). As reactâncias combinadas de fuga dos enrolamentos, por fase, referidas ao secundário (X_{eq_2}), dos dois transformadores, apresentam valores semelhantes. Logo, a impedância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, do transformador de ligação Dy foi conseguida através de um incremento acentuado da resistência combinada dos enrolamentos por fase (R_{eq_2}). O referido incremento traduz-se em aplicação de material condutor de menor secção nos enrolamentos. Esta prática acarreta maiores perdas de Joule nos enrolamentos, resultando maiores custos de energia numa instalação eléctrica. Contudo, este transformador (o transformador objecto do presente estudo (de ligação Dy)) tem a vantagem de apresentar melhor comportamento aos esforços electrodinâmicos de curto circuito.

CAPÍTULO 4

.ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO COM A FREQUÊNCIA DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO VARIÁVEL

.DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE

Este estudo tem por objectivo a determinação dos parâmetros do circuito equivalente da máquina quando se varia a frequência da tensão de alimentação, mantendo a indução constante. Para a determinação dos referidos parâmetros, recorre-se aos ensaios económicos e cálculos, conforme já enunciados, do parágrafo 1 ao parágrafo 2 do capítulo 3.

O tema do presente capítulo será abordado com base em estudos realizados nos dois transformadores trifásicos, também, indicados nos parágrafos 3.1 e 3.2 do capítulo 3.

4.1 – Condições de ensaios a realizar nos transformadores

4.1.1 – Condições particulares para os ensaios em circuito aberto ou em vazio

Como já referido na introdução, estes ensaios são os mesmos já indicados no parágrafo 1.1 do capítulo 3. Contudo, visto tratar-se de ensaios à frequência variável, surge a necessidade de adoptar estratégias de controlo de certas grandezas impostas, de forma a manter a indução constante. A referida estratégia encontra-se preconizada no parágrafo seguinte (parágrafo 1.1.1 deste capítulo).

4.1.1.1 – Determinação da razão de variação tensão e frequência de modo a manter a indução constante

Neste ensaios, como já referido na introdução, a indução deverá ser constante.

Num transformador, a indução poderá ser calculada através da seguinte expressão Matemática:

$$B = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{2\pi \cdot f \cdot N \cdot S} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi \cdot N \cdot S} \cdot \frac{U}{f} \quad [T] \quad (4.1)$$

Onde:

- U corresponde à tensão no enrolamento [V];
- f é a frequência da tensão de alimentação [Hz];
- N é o número de espiras do enrolamento;
- S é a secção útil do circuito magnético [m²].

Da análise da expressão matemática acima indicada (4.1), depreende-se que a indução varia em função das seguintes alternativas:

- a) Parâmetros de constituição da máquina : secção útil do circuito magnético e número de espiras do enrolamento primário ou secundário, conforme o considerado nos cálculos;

b) Grandezas impostas à máquina: tensão e frequência da alimentação.

Para o controlo da indução, devido à impossibilidade de alterar a constituição física da máquina (não é do âmbito deste estudo), só nos resta a alternativa (b) ou seja variar as grandezas, tensão e frequência.

A estratégia a adoptar a fim de se manter a indução constante, em regimes de alimentação à frequência variável, consiste em manter constante a relação entre as grandezas: tensão de alimentação e a respectiva frequência. Logo, qualquer par de valores Tensão e Frequência deverá verificar a seguinte expressão matemática:

$$\frac{U_i}{U_i'} = \frac{f_i}{f_i'} \quad (4.2)$$

4.1.2 – Condições para a realização dos ensaios em curto circuito

Os procedimentos para este tipo de ensaios foram oportunamente abordados nos parágrafos 1.3.1 e 1.3.2 do capítulo 3. Recapitula-se que o referido ensaio consiste em alimentar a máquina através dos enrolamentos de um dos lados, secundário ou primário, com o enrolamento do lado contrário em curto circuito, circulando neste, a corrente nominal.

Neste estudo, adoptou-se o caso da alimentação feita do lado primário, com o lado secundário em curto circuito.

O amperímetro inserido em série no circuito secundário deverá registar uma corrente de valor igual ou próximo à corrente nominal secundária. Se a corrente secundária registada não for exactamente igual à nominal, poder-se-á extrapolar os resultados para a situação nominal.

Ficou evidenciado que o ensaio em curto circuito tem como condição particular a circulação da corrente nominal no enrolamento que estiver em curto-circuito. Logo, seja qual for a frequência de alimentação do enrolamento primário, o que prevalece é a corrente. Também, salienta-se que, conforme foi abordado no parágrafo 3.1.7 do capítulo 3, as perdas no ferro, mesmo sendo incrementadas a baixas frequências, são desprezáveis neste regime de funcionamento.

4.2 – Estudos realizados no transformador Yy

4.2.1 – Registo de valores impostos e medidos nos ensaios em vazio (ou em circuito aberto)

Os ensaios foram realizados, iniciando-se com a frequência de alimentação a 80Hz. Por decrementos sucessivos, obtiveram-se as outras frequências até um valor mínimo de 45Hz. Os valores de frequência, tensão secundária aplicada, perdas em vazio absorvidas à fonte e correntes em vazio, foram medidos e registados conforme o indicado na tabela 4.1 .

Tabela 4.1 : Valores impostos e medidos nos ensaios em vazio (transformador de ligação Yy)

Valores impostos		Valores medidos	
U_{02} (V)	f (Hz)	P_0 (W)	I_{02} (A)
163,4	45	103,2	1,513
170,7	47	108,2	1,517
181,6	50	117,0	1,532
188,8	52	122,3	1,532
199,5	55	130,5	1,532
210,7	58	139,7	1,543
217,7	60	145,2	1,540
236,2	65	160,7	1,554
243,4	67	166,8	1,556
254,3	70	176,0	1,562
265,1	73	185,1	1,563
272,5	75	191,7	1,568
283,1	78	200,7	1,563
290,6	80	207,7	1,574

Sendo:

- U_{02} , a tensão aplicada ao enrolamento secundário (V);
- f , a frequência da tensão de alimentação, U_{20} ;
- P_0 , a potência absorvida em vazio (W);
- I_{02} , a corrente secundária em vazio (A).

4.2.1.1 – Separação das perdas no ferro nas suas duas componentes – Perdas por efeito de Histerese e perdas devidas às correntes de Foucault

Conforme já indicado no parágrafo 2 do Capítulo 2, as perdas no circuito magnético (as duas componentes das perdas no ferro) são função da indução magnética e da frequência da alimentação, variando segundo a seguinte expressão:

$$P_{FE} = K_H \times f \times B_m^2 + K_F \times f^2 \times B_m^2 \quad [W] \quad (4.3)$$

A indução é constante e dado que os coeficientes de perdas por efeito de Histerese (K_H) e de perdas por correntes de Foucault (K_F) são constantes, logo os termos:

$$K_1 = K_H \times B_m^2 \quad \left[\frac{W}{Hz} \right] \quad (4.4)$$

$$K_2 = K_F \times B_m^2 \quad \left[\frac{W}{Hz^2} \right] \quad (4.5)$$

representam grandezas constantes para qualquer frequência.

Assim, a expressão (4.3) poderá ter a seguinte forma:

$$P_{FE} = K_1 \times f + K_2 \times f^2 \quad [W] \quad (4.6)$$

No caso de indução constante, à frequência variável, para a separação das perdas no ferro nas suas duas componentes (por Histerese e devidas às correntes de Foucault), deve-se efectuar, pelo menos, dois ensaios em vazio, com frequências (f e f') e respectivas tensões (U_{02} e U'_{02}) segundo a expressão matemática (4.2). De seguida medir as potências absorvidas em vazio (P_0 e P'_0).

Por sua vez, as perdas no ferro serão determinadas pela expressões matemáticas:

$$P_{FE} = P_0 - 3 \times (R_{fase_sec\ undário} \times I_{02}^2) \quad [W] \quad (4.7)$$

$$P'_{FE} = P'_0 - 3 \times (R_{fase_sec\ undário} \times I'^2_{02}) \quad [W] \quad (4.8)$$

I_{02} e I'_{02} correspondem às correntes primárias em vazio, nos ensaios às frequências f e f' respectivamente.

Com os pares de valores $(P_{Fe}; f)$ e $(P'_{Fe}; f')$ forma-se um sistema de duas equações a duas incógnitas, K_1 e K_2 . A sua solução permitirá determinar as Perdas por Histerese e perdas devidas às correntes de Foucault, através das seguintes expressões matemáticas:

$$P_H = K_1 \times f \quad [W]$$

$$P_F = K_2 \times f^2 \quad [W]$$

Como exemplo, foram considerados os ensaios em vazio realizados às frequências 45Hz e 50Hz.

Da tabela 4.1 (Valores medidos e resultados de cálculos provenientes dos ensaios em vazio) temos os referidos valores medidos:

Para frequência 50Hz

$$P_o = 117W \quad I_{02} = 1,532A$$

Para frequência 45Hz

$$P_o = 103,2W \quad I'_{02} = 1,513A$$

Para o primeiro caso, as perdas no ferro já tinham sido determinadas no parágrafo 3.1.3 do capítulo 3.

$$P_{FE} = 116,65W$$

Para o segundo caso, as perdas no ferro serão determinadas conforme abaixo indicado:

$$R_{fase_secundário} = \frac{100,2}{2} = 50,1m\Omega \quad (\text{À temperatura ambiente } 21^\circ C)$$

Da equação 4.8 obtém-se:

$$P'_{FE} = 103,2 - 3 \times (50,1 \times 10^{-3}) \times 1,513^2 = 102,86W$$

Forma-se assim, a partir das expressões matemáticas 4.7 e 4.8, o seguinte sistema de equações:

$$116,65 = K_1 \times 50 + K_2 \times 50^2 \quad (\text{Para a frequência } f = 50 \text{ Hz})$$

$$102,86 = K_1 \times 45 + K_2 \times 45^2 \quad (\text{Para a frequência } f' = 45 \text{ Hz})$$

Resolvendo o referido sistema em ordem a K_1 e K_2 tem-se que:

$$K_1 = 1,8608 \frac{W}{Hz} \quad K_2 = 0,00944 \frac{W}{Hz^2}$$

Para a frequência $f = 45 \text{ Hz}$:

- As perdas por efeito de Histerese são determinadas numericamente por:

$$P_H = K_H \times B_m^2 \times f = K_1 \times f = 1,8608 \times 45 = 83,74 W$$

- As perdas devidas às correntes de Foucault são determinadas numericamente por:

$$P_F = K_F \times B_m^2 \times f^2 = K_2 \times f^2 = 0,00944 \times 45^2 = 19,12 W$$

Para a frequência $f = 50 \text{ Hz}$:

- As perdas por Histerese são determinadas numericamente por:

$$P_H = K_H \times B_m^2 \times f = K_1 \times f = 1,8608 \times 50 = 93,04 W$$

- As perdas devidas às correntes de Foucault são determinadas numericamente por:

$$P_F = K_F \times B_m^2 \times f^2 = K_2 \times f^2 = 0,00944 \times 50^2 = 23,6 W$$

4.2.1.2 – Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio, à frequência variável e indução constante

Dos ensaios em vazio, à frequência variável e indução constante, foram registados os valores das perdas e correntes em vazio. Através das expressões matemáticas preconizadas no parágrafo 1.2.3.1 do capítulo 3, foram calculados os restantes valores numéricos que se encontram registados na tabela 4.2 (Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio).

Tabela 4.2 : Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio

f (Hz)	P ₀ (W)	U ₀₂ (V)	I ₀₂ (A)	R ₀₂ (Ω)	I _{a2} (A)	X _{m2} (Ω)	I _{m2} (A)	cosφ ₀	φ ₀ (°)	P _H (W)	P _F (W)
45	103,2	163,4	1,513	259,95	0,363	64,24	1,469	0,2401	76,11	85,59	17,25
47	108,2	170,7	1,517	270,01	0,365	66,95	1,472	0,2405	76,08	89,39	18,81
50	117,0	181,6	1,532	282,61	0,371	70,56	1,486	0,2421	75,99	95,10	21,29
52	122,3	188,8	1,532	292,24	0,373	73,35	1,486	0,2435	75,91	98,90	23,03
55	130,5	199,5	1,532	305,52	0,377	77,56	1,485	0,2458	75,77	104,61	25,76
58	139,7	210,7	1,543	318,45	0,382	81,37	1,495	0,2474	75,68	110,32	28,65
60	145,2	217,7	1,540	327,32	0,384	84,30	1,491	0,2494	75,56	114,12	30,66
65	160,7	236,2	1,554	347,88	0,392	90,67	1,504	0,2522	75,39	123,63	35,98
67	166,8	243,4	1,556	355,76	0,395	93,37	1,505	0,2537	75,30	127,43	38,23
70	176,0	254,3	1,562	367,97	0,399	97,23	1,510	0,2552	75,21	133,14	41,73
73	185,1	265,1	1,563	380,74	0,402	101,36	1,510	0,2574	75,08	138,84	45,39
75	191,7	272,5	1,568	388,46	0,405	103,85	1,515	0,2585	75,02	142,65	47,91
78	200,7	283,1	1,563	400,61	0,408	108,32	1,509	0,2613	74,85	148,35	51,82
80	207,7	290,6	1,574	407,23	0,412	110,45	1,519	0,2616	74,83	152,16	54,51

Sendo:

- R₀₂, a componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético (Ω);
- X_{m2}, a componente reactiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético (Ω);
- I_{a2}, a componente de perdas da corrente no ensaio em vazio (A);
- I_{m2}, componente magnetizante da corrente no ensaio em vazio (A);
- cosφ₀, factor de potência em vazio;
- φ₀, ângulo de esfasamento no ensaio em vazio (°);
- P_H, Perdas por Histerese no circuito magnético (W);

- P_F , Perdas devidas às correntes de Foucault no circuito magnético (W).

Os valores das perdas por efeitos de Histerese e por correntes de Foucault foram determinados com a média dos coeficientes K_1 e K_2 obtidos em cada par de valores, frequência - perdas no ferro.

A tabela 4.3 abaixo indicada apresenta o resumo dos cálculos dos referidos coeficientes, para cada par de valores frequência - perdas no ferro bem como a referida média dos coeficientes K_1 e K_2 .

Tabela 4.3 : Tabela resumo de cálculos dos coeficientes K_1 e K_2
(transformador de ligação Yy)

Frequências		P ₀	I ₀	R _{Fase_secundário}	P _{Fe}	K ₁	K ₂	P _H	P _F
	(Hz)	(W)	(A)	(Ω)	(W)			(W)	(W)
f	45	103,2	1,513	0,0501	102,86	2,0855	0,0045	93,85	9,11
f'	47	108,2	1,517		107,85				
f	47	108,2	1,533		107,85	1,6943	0,0128	79,63	28,28
f'	50	117,0	1,532		116,65				
f	50	117,0	1,532		116,65	2,0282	0,0061	101,41	15,25
f'	52	122,3	1,532		121,95				
f	52	122,3	1,532		121,95	1,9782	0,0071	102,87	19,20
f'	55	130,5	1,532		130,15				
f	55	130,5	1,532		130,15	1,7054	0,0120	93,80	36,30
f'	58	139,7	1,543		139,34				
f	58	139,7	1,543		139,34	2,0664	0,0058	119,85	19,51
f'	60	145,2	1,540		144,84				
f	60	145,2	1,540		144,84	1,7808	0,0106	106,85	38,16
f'	65	160,7	1,554		160,34				
f	65	160,7	1,554		160,34	1,9178	0,0084	124,66	35,49
f'	70	176,0	1,562		175,63				
f	70	176,0	1,562		175,63	2,0062	0,0072	140,43	35,28
f'	73	185,1	1,563		184,73				
f	73	185,1	1,563		184,73	1,7816	0,0103	130,06	54,89
f'	75	191,7	1,568		191,33				
f	75	191,7	1,568		191,33	2,1194	0,0058	158,96	32,63
f'	78	200,7	1,563		200,33				
f	78	200,7	1,563		200,33	1,6600	0,0116	129,48	70,57
f'	80	207,7	1,574		207,33				
K _{1 médio} =1,90198 W/Hz ; K _{2 médio} =0,008517 W/Hz ²									

Assim sendo, os valores de perdas no ferro calculadas têm um desvio em relação às perdas no ferro provenientes dos valores de ensaios. Os referidos desvios encontram-se indicados na tabela seguinte (tabela 4.4). Constata-se que os desvios não são significativos.

Tabela 4.4 : Comparação de desvios entre perdas no ferro medidas e calculadas após a decomposição por efeitos de Histerese e por efeitos das correntes de Foucault
(transformador de ligação Yy)

f (Hz)	Po (W)	R _{fase_secundário} (Ω)	Io (A)	Valores provenientes de Ensaio	Valores de Cálculos	Desvios De P _{FE} (%)
				P _{FE} (W)	P _{FE} (W)	
45	103,2	0,0501	1,513	102,9	102,8	-0,097
47	108,2		1,517	107,9	108,2	0,278
50	117,0		1,532	116,6	116,4	-0,172
52	122,3		1,532	121,9	121,9	0,000
55	130,5		1,532	130,1	130,4	0,231
58	139,7		1,543	139,3	139,0	-0,215
60	145,2		1,54	144,8	144,8	0,000
65	160,7		1,554	160,3	159,6	-0,437
67	166,8		1,556	166,4	165,7	-0,421
70	176,0		1,562	175,6	174,9	-0,399
73	185,1		1,563	184,7	184,2	-0,271
75	191,7		1,568	191,3	190,6	-0,366
78	200,7		1,563	200,3	200,2	-0,050
80	207,7		1,574	207,3	206,7	-0,289

4.2.1.3 – Representação gráfica dos Valores numéricos das perdas por efeitos de Histerese e por efeitos das correntes de Foucault

Dos valores numéricos da tabela 4.2 (Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio), fizeram-se as seguintes representações gráficas das perdas por Histerese e por efeitos das correntes de Foucault (ver Figura 4.1).

Parâmetros do circuito magnético

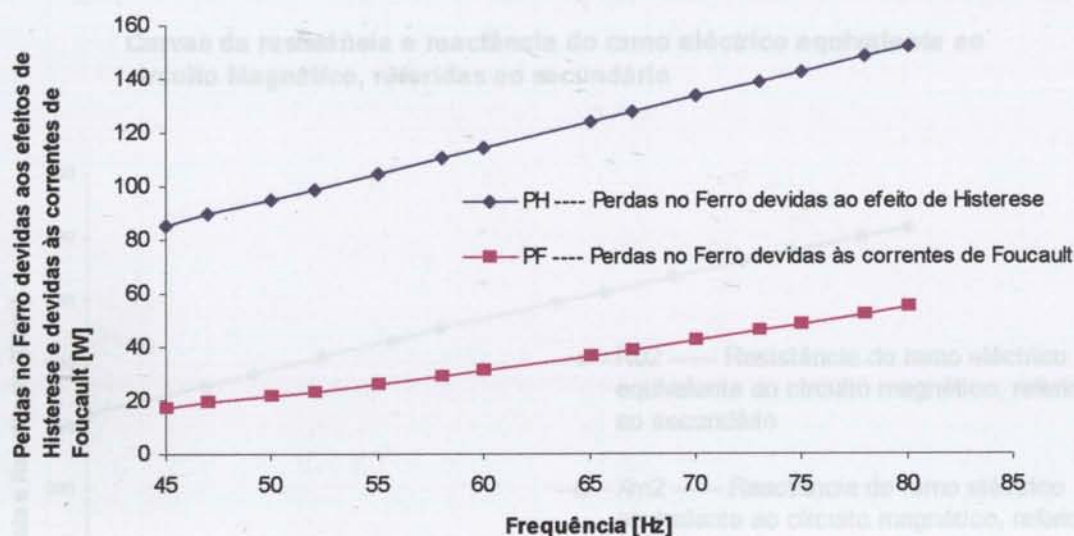


Figura 4.1 : Representação gráfica das perdas no Ferro por Histerese e por efeito das correntes de Foucault

4.2.1.4 – Representação gráfica dos Valores numéricos das componentes resistiva e reactiva do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

As componentes, resistivas (R_{02}) e reactivas (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético indicados na tabela 4.2, encontram-se representados graficamente na figura 4.2 .

4.2.2 – Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito, à frequência variável e indução constante

Foram realizados ensaios em curto circuito, à frequência variável e indução constante, no transformador de ligação Yy.

Dos referidos ensaios, foram registados os valores das potências, correntes e tensões de curto circuito. Através das expressões matemáticas preconizadas no parágrafo 1.3.4.1 do capítulo 3, foram calculados os restantes valores numéricos que se encontram registados na tabela 4.5 (Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito).

Tabela 4.5 – Valores médios e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito (transformador de ligação Yy)

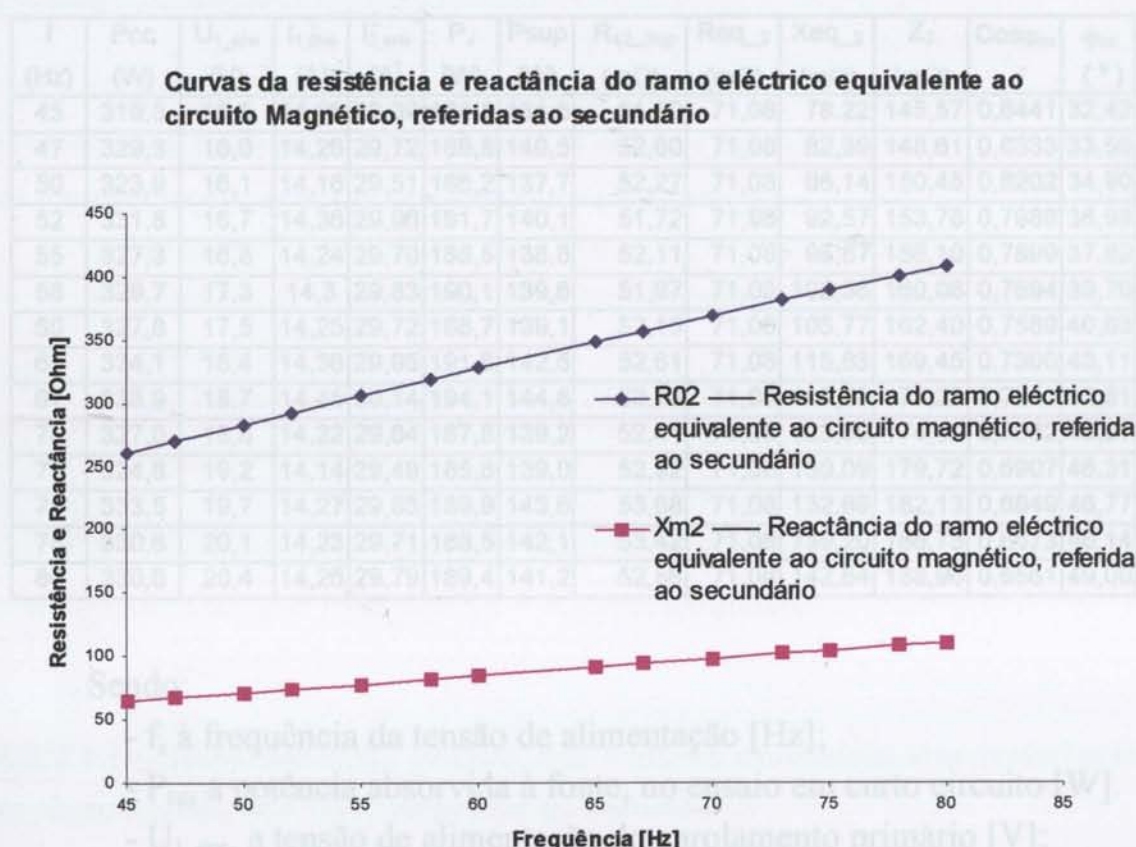


Figura 4.2 : Representação gráfica das componentes resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

4.2.2 – Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito, à frequência variável e indução constante

Foram realizados ensaios em curto circuito, à frequência variável e indução constante, no transformador de ligação Yy.

Dos referidos ensaios, foram registados os valores das potências, correntes e tensões de curto circuito. Através das expressões matemáticas preconizadas no parágrafo 1.3.4.1 do capítulo 3, foram calculados os restantes valores numéricos que se encontram registados na tabela 4.5 (Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito).

Tabela 4.5 – Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito (transformador de ligação Yy)

f (Hz)	P _{cc} (W)	U _{1_ens} (V)	I _{1_ens} (A)	I _{2_ens} (A)	P _J (W)	P _{sup} (W)	R _{12_Sup} (mΩ)	Req_2 (mΩ)	Xeq_2 (mΩ)	Z ₂ (mΩ)	Cosφ _{cc}	φ _{cc} (°)
45	319,3	15,5	14,09	29,39	184,5	134,8	51,69	71,08	78,22	145,57	0,8441	32,42
47	329,3	16,0	14,26	29,72	188,8	140,5	52,60	71,08	82,39	148,61	0,8333	33,56
50	323,9	16,1	14,16	29,51	186,2	137,7	52,27	71,08	86,14	150,45	0,8202	34,90
52	331,8	16,7	14,36	29,96	191,7	140,1	51,72	71,08	92,57	153,78	0,7988	36,98
55	327,3	16,8	14,24	29,70	188,5	138,8	52,11	71,08	95,87	156,10	0,7899	37,82
58	329,7	17,3	14,3	29,83	190,1	139,6	51,97	71,08	102,36	160,06	0,7694	39,70
60	327,8	17,5	14,25	29,72	188,7	139,1	52,15	71,08	105,77	162,40	0,7589	40,63
65	334,1	18,4	14,36	29,95	191,6	142,5	52,61	71,08	115,83	169,45	0,7300	43,11
67	338,9	18,7	14,45	30,14	194,1	144,8	52,79	71,08	118,25	171,25	0,7241	43,61
70	327,0	18,8	14,22	29,64	187,8	139,2	52,41	71,08	123,89	174,92	0,7062	45,07
73	324,8	19,2	14,14	29,49	185,8	139,0	52,92	71,08	130,09	179,72	0,6907	46,31
75	333,5	19,7	14,27	29,83	189,9	143,6	53,68	71,08	132,69	182,13	0,6849	46,77
78	330,6	20,1	14,23	29,71	188,5	142,1	53,42	71,08	139,20	186,75	0,6673	48,14
80	330,6	20,4	14,26	29,79	189,4	141,2	52,86	71,08	142,64	188,96	0,6561	49,00

Sendo:

- f, a frequência da tensão de alimentação [Hz];
- P_{cc}, a potência absorvida à fonte, no ensaio em curto circuito [W].
- U_{1_ens}, a tensão de alimentação do enrolamento primário [V];
- I_{1_ens}, a corrente no enrolamento primário [A];
- P_J, as perdas de Joule expressas em [W];
- P_{sup}, as perdas suplementares por fase, expressas em [W];
- R_{12_Sup}, a resistência suplementar, por fase, referida ao secundário, expressa em [Ω];
- Req_2, a resistência combinada dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário, expressa em [Ω];
- Xeq_2, a reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário, expressa em [Ω];
- Zeq_2, a impedância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário, expressa em [Ω];
- cosφ_{cc}, o factor de potência no ensaio em curto circuito;
- φ_{cc}, ângulo de esfasamento entre a tensão e a corrente, no ensaio em curto circuito.

4.2.2.1 – Representação gráfica dos Valores numéricos característicos do Circuito eléctrico

Com base nos valores numéricos da tabela 4.5 (Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito), fizeram-se as representações gráficas dos seguintes parâmetros:

- Resistência suplementar, por fase, referida ao secundário (R_{12_Sup});
- Resistência combinada dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário (R_{eq2});
- Reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário (X_{eq2}).

As representações gráficas dos referidos parâmetros encontram-se abaixo indicadas, nas figuras 4.3 e 4.4 respectivamente.

4.2.2.1.1 – Representação gráfica dos Valores numéricos das resistências suplementares, por fase, referidas ao secundário

Figura 4.3 : Curvas da resistência combinada dos enrolamentos e reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referidas ao secundário

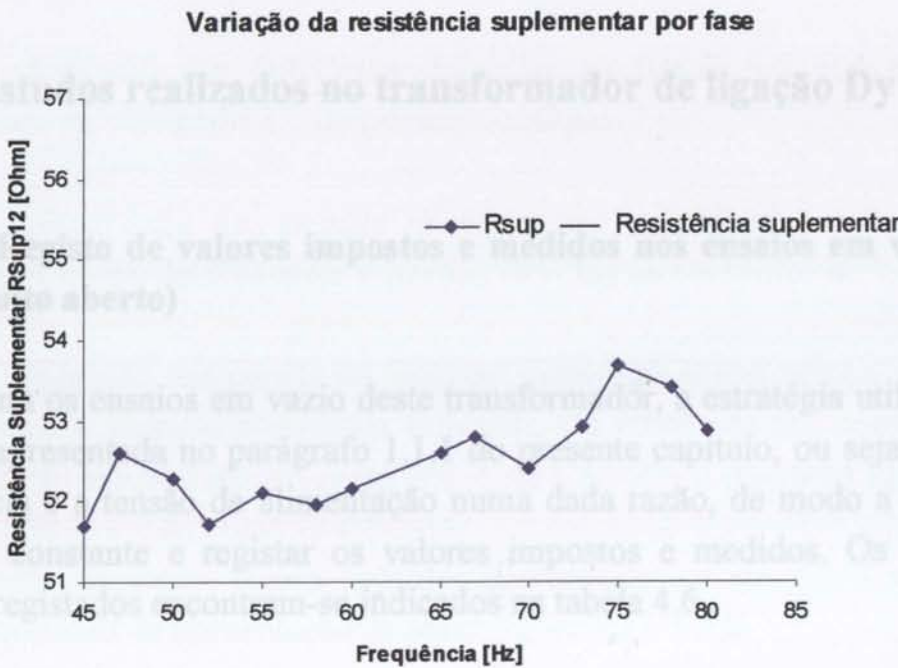
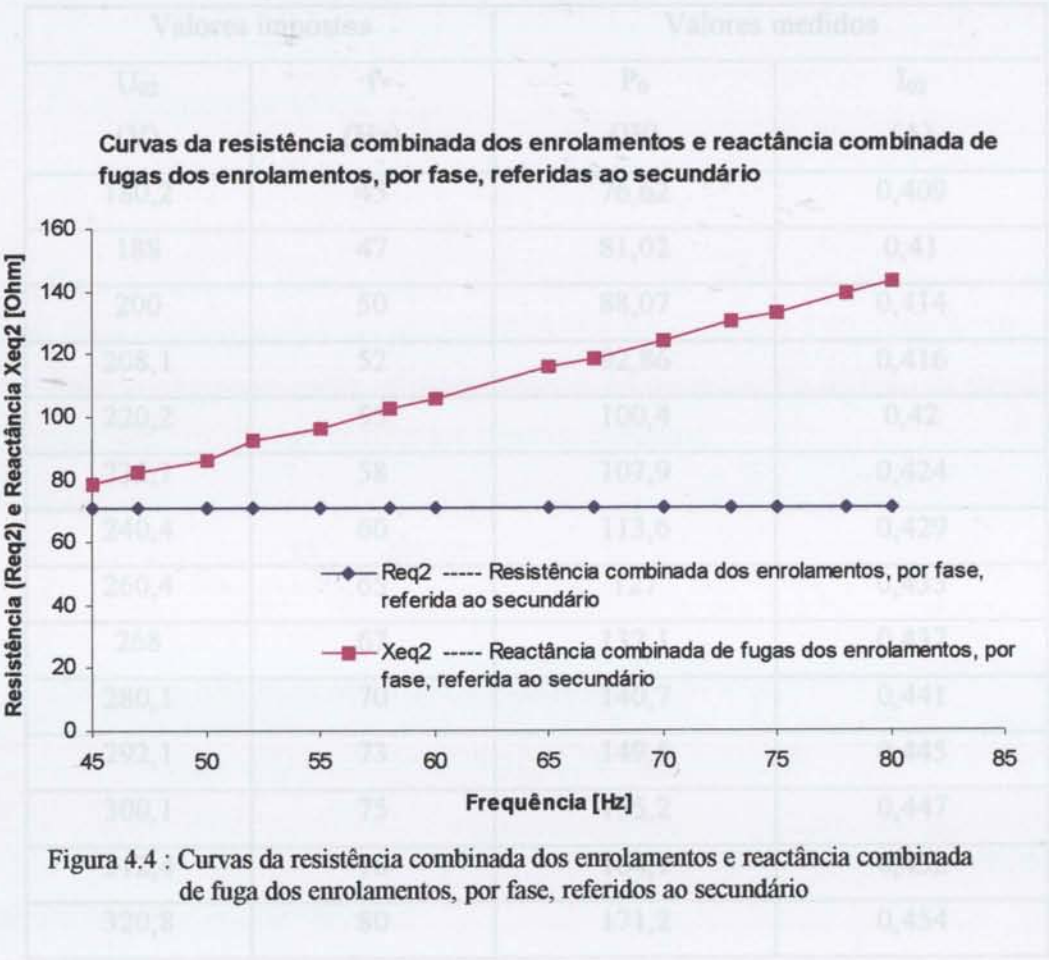


Figura 4.3 : Representação gráfica da resistência suplementar, por fase, referida ao secundário

4.2.2.1.2 – Representação gráfica dos Valores numéricos das resistências e reactâncias combinadas, por fase, referidas ao secundário



4.3 – Estudos realizados no transformador de ligação Dy

4.3.1 – Registo de valores impostos e medidos nos ensaios em vazio (ou em circuito aberto)

Para os ensaios em vazio deste transformador, a estratégia utilizada é a mesma apresentada no parágrafo 1.1.1 do presente capítulo, ou seja, variar a frequência e a tensão de alimentação numa dada razão, de modo a manter a indução constante e registar os valores impostos e medidos. Os referidos valores registados encontram-se indicados na tabela 4.6 .

Da tabela 4.6 (Valores impostos e medidos nos ensaios em vazio) temos os referidos valores medidos:

Tabela 4.6 – Valores impostos e medidos nos ensaios em vazio (transformador de ligação Dy).

Valores impostos		Valores medidos	
U_{02} (V)	f (Hz)	P_0 (W)	I_{02} (A)
180,2	45	76,62	0,409
188	47	81,02	0,41
200	50	88,07	0,414
208,1	52	92,86	0,416
220,2	55	100,4	0,42
232,1	58	107,9	0,424
240,4	60	113,6	0,429
260,4	65	127	0,435
268	67	132,1	0,437
280,1	70	140,7	0,441
292,1	73	149,5	0,445
300,1	75	155,2	0,447
312,4	78	164,7	0,452
320,8	80	171,2	0,454

A descrição das grandezas indicadas na tabela 4.6 é a mesma já apresentada no parágrafo 2.1 do presente capítulo.

4.3.1.1 – Separação das perdas no ferro nas suas duas componentes – Perdas por efeito de Histerese e perdas devidas às correntes de Foucault

A separação das perdas no ferro em suas duas componentes, por efeito de Histerese e pelas correntes de Foucault, foi efectuada em conformidade com a teoria apresentada no parágrafo 2 do Capítulo 2 (também foi referido no parágrafo 2.1.1 do presente capítulo).

Como exemplo, foram considerados os ensaios em vazio realizados com frequências de alimentação da máquina: 45Hz e 50Hz.

Da tabela 4.6 (Valores impostos e medidos nos ensaios em vazio) temos os referidos valores medidos:

Para frequência 50Hz

$$P_o = 88,07W \quad I_{o2} = 0,414A$$

Para frequência 45Hz

$$P'_o = 76,62W \quad I'_{o2} = 0,409A$$

Para o caso de alimentação à frequência de 50Hz, as perdas no ferro já tinham sido determinadas no parágrafo 3.2.3 do capítulo 3: $P_{Fe}=88,02W$

Para o segundo caso, alimentação à frequência de 45Hz, as perdas no ferro serão determinadas conforme abaixo indicado:

$$R_{fase_secundário} = \frac{188,67}{2} = 94,335m\Omega \quad (\text{À temperatura ambiente } 19^\circ C)$$

Da expressão matemática 4.8 obtém-se:

$$P'_{FE} = 76,62 - 3 \times (94,335 \times 10^{-3}) \times 0,409^2 = 76,57W$$

Forma-se assim, a partir das expressões matemáticas 4.7 e 4.8, o seguinte sistema de equações:

$$88,02 = K_1 \times 50 + K_2 \times 50^2 \quad (\text{Para a frequência } f = 50 \text{ Hz})$$

$$76,57 = K_1 \times 45 + K_2 \times 45^2 \quad (\text{Para a frequência } f' = 45 \text{ Hz})$$

Resolvendo o referido sistema em ordem a K_1 e K_2 tem-se que:

$$K_1 = 1,17196 \frac{W}{Hz} \quad K_2 = 0,01176 \frac{W}{Hz^2}$$

Para a frequência $f=45Hz$:

- As perdas por efeito de Histerese são determinadas numericamente por:

$$P_H = K_H \times B_m^2 \times f = K_1 \times f = 1,17196 \times 45 = 52,74W$$

- As perdas devidas às correntes de Foucault são determinadas por:

$$P_F = K_F \times B_m^2 \times f^2 = K_2 \times f^2 = 0,01176 \times 45^2 = 23,83W$$

Para a frequência f= 50Hz:

- As perdas por efeito de Histerese são determinadas por:

$$P_H = K_H \times B_m^2 \times f = K_1 \times f = 1,17196 \times 50 = 58,6W$$

- As perdas devidas às correntes de Foucault são determinadas por:

$$P_F = K_F \times B_m^2 \times f^2 = K_2 \times f^2 = 0,01176 \times 50^2 = 29,43W$$

4.3.1.2 – Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio, à frequência variável e indução constante

Os valores das perdas e correntes em vazio indicados na tabela seguinte (tabela 4.7), foram medidos durante os ensaios em vazio, à frequência variável e indução constante. Através das expressões matemáticas do parágrafo 1.2.3.1 do capítulo 3, foram calculados os restantes valores numéricos.

Tabela 4.7 : Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio

f (Hz)	Po (W)	U ₀₂ (V)	I ₀₂ (A)	R ₀₂ (Ω)	Ia ₂ (A)	Xm ₂ (Ω)	Im ₂ (A)	cosφ ₀	φ ₀ (°)	P _H (W)	P _F (W)
45	76,62	180,2	0,409	424,65	0,245	318,16	0,327	0,6003	53,11	51,55	24,94
47	81,02	188,0	0,410	435,96	0,249	332,99	0,326	0,6061	52,69	53,84	27,21
50	88,07	200,0	0,414	454,61	0,254	353,12	0,327	0,6137	52,14	57,28	30,79
52	92,86	208,1	0,416	465,57	0,258	367,33	0,327	0,6185	51,79	59,57	33,31
55	100,4	220,2	0,42	483,28	0,263	387,51	0,328	0,6263	51,22	63,01	37,26
58	107,9	232,1	0,424	499,99	0,268	408,53	0,328	0,6326	50,76	66,44	41,43
60	113,6	240,4	0,429	508,41	0,273	418,06	0,332	0,6351	50,57	68,74	44,34
65	127,0	260,4	0,435	535,02	0,281	452,84	0,332	0,6462	49,74	74,46	52,04
67	132,1	268,0	0,437	542,91	0,285	467,46	0,331	0,6518	49,32	76,76	55,29
70	140,7	280,1	0,441	557,64	0,29	487,10	0,332	0,6579	48,86	80,19	60,35
73	149,5	292,1	0,445	571,67	0,295	507,96	0,332	0,6643	48,37	83,63	65,64
75	155,2	300,1	0,447	579,47	0,299	521,88	0,332	0,6684	48,06	85,92	69,28
78	164,7	312,4	0,452	593,3	0,304	540,01	0,334	0,6739	47,63	89,36	74,94
80	171,2	320,8	0,454	601,34	0,308	554,53	0,334	0,6784	47,28	91,65	78,83

Tabela 4.9 : Comparação de desvios entre perdas no ferro medidas e calculadas após a decomposição por efeitos de Histerese e por efeitos das correntes de Foucault (transformador de ligação Dy)

f (Hz)	Po (W)	R _{fase_secundário} (Ω)	I _o (A)	Valores provenientes de Ensaio	Valores de Cálculos	Desvios de P _{FE} (%)
				P _{FE} (W)	P _{FE} (W)	
45	76,62	0,094335	0,4087	76,6	76,5	-0,131
47	81,02		0,4102	81,0	81,1	0,123
50	88,07		0,4140	88,0	88,1	0,114
52	92,86		0,4164	92,8	92,9	0,108
55	100,40		0,4202	100,4	100,3	-0,100
58	107,88		0,4240	107,8	107,9	0,093
60	113,57		0,4293	113,5	113,1	-0,352
65	126,95		0,4354	126,9	126,5	-0,315
67	132,14		0,4366	132,1	132,1	0,000
70	140,69		0,4406	140,6	140,5	-0,071
73	149,46		0,4445	149,4	149,3	-0,067
75	155,23		0,4466	155,2	155,2	0,000
78	164,73		0,4516	164,7	164,3	-0,243
80	171,20		0,4540	171,1	170,5	-0,351

Da leitura da tabela 4.9, nota-se, que as perdas no ferro calculadas apresentam desvios em relação às perdas no ferro provenientes dos valores de ensaios. Constata-se que os referidos desvios não são significativos.

4.3.1.3 – Representação gráfica dos Valores numéricos das perdas por efeitos de Histerese e por efeitos das correntes de Foucault

A figura seguinte, figura 4.5, trata-se da representação gráfica dos valores numéricos das perdas por Histerese e por efeitos das correntes de Foucault indicados na tabela 4.7 deste capítulo (Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio).

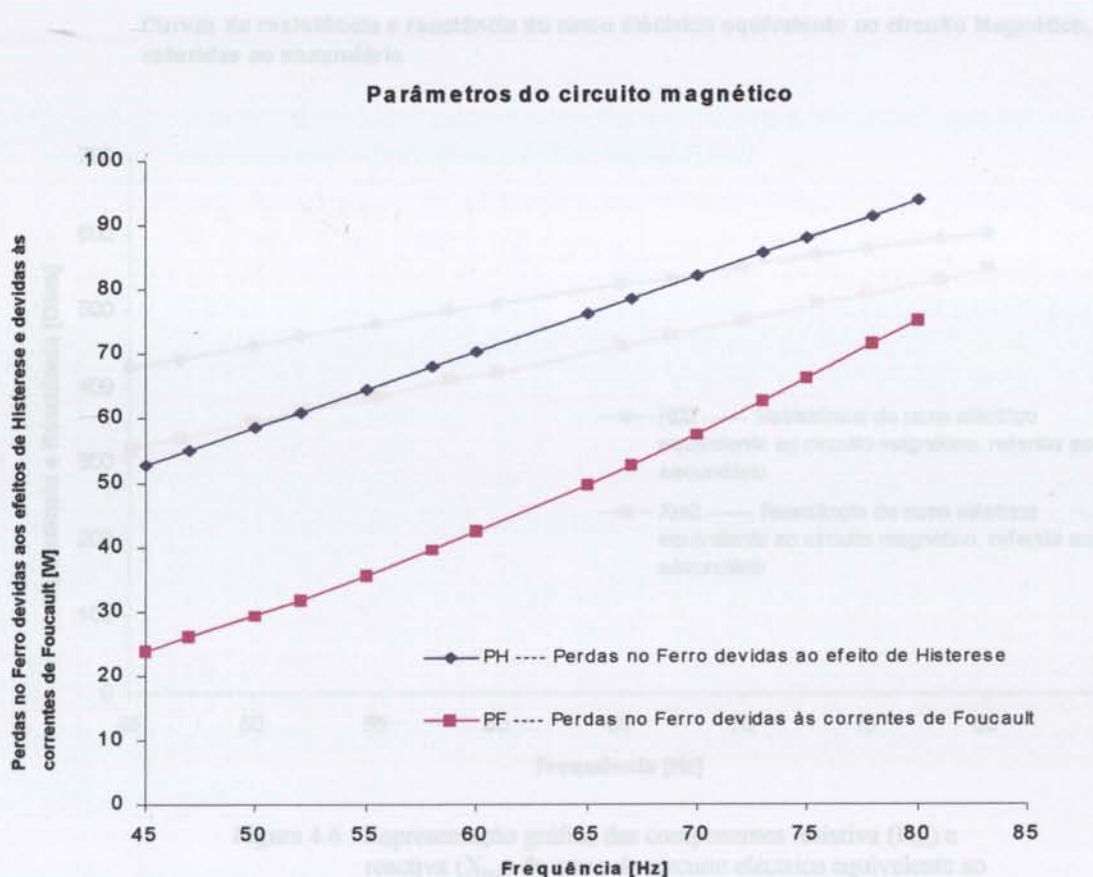


Figura 4.5 : Representação gráfica das perdas no Ferro por Histerese e por efeito das correntes de Foucault

4.3.1.4 – Representação gráfica dos Valores numéricos das componentes resistiva e reactiva do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

A figura 4.6 trata-se da representação gráfica das componentes, resistivas (R_{02}) e reactivas (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético.

Curvas da resistência e reactância do ramo eléctrico equivalente ao circuito Magnético, referidas ao secundário

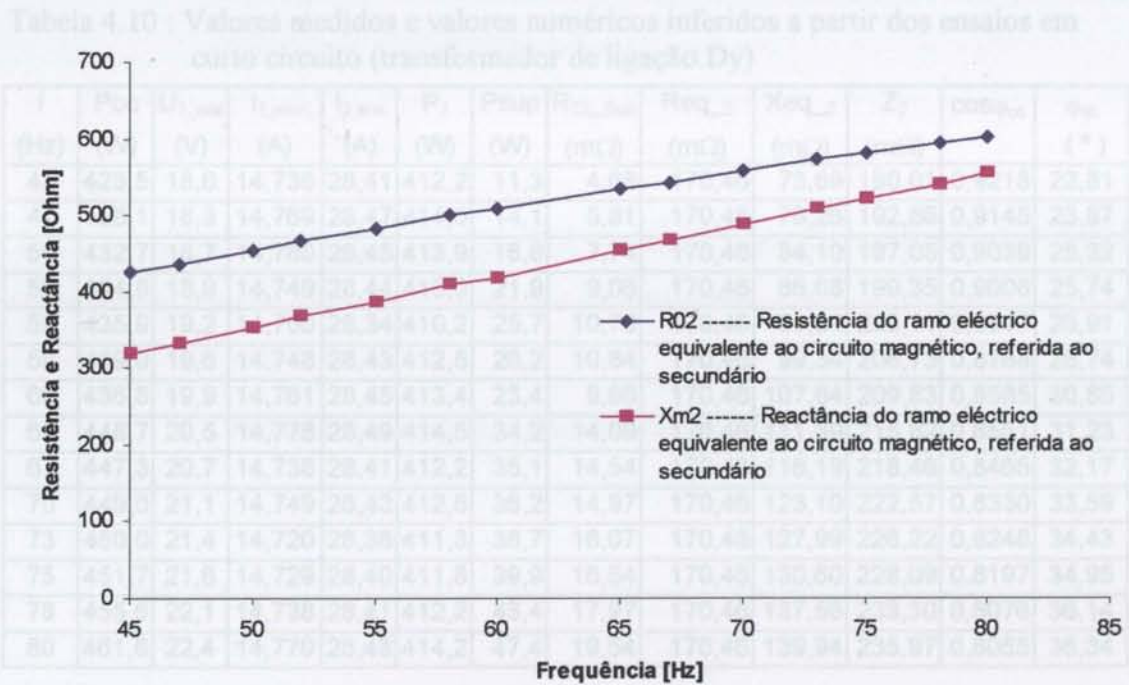


Figura 4.6 : Representação gráfica das componentes resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

4.3.2 – Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito, a frequência variável e indução constante

Neste transformador, de ligação Dy, também foram efectuados ensaios em curto circuito, à frequência variável e indução constante. Dos referidos ensaios, foram registados os valores das potências, correntes e tensões de curto circuito. Os restantes parâmetros indicados na tabela 4.9, foram determinados através da aplicação das expressões matemáticas indicadas no parágrafo 1.3.4.1 do capítulo 3.

Tabela 4.10 : Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito (transformador de ligação Dy)

f (Hz)	P _{cc} (W)	U _{1_ens} (V)	I _{1_ens} (A)	I _{2_ens} (A)	P _J (W)	P _{sup} (W)	R _{12_Sup} (mΩ)	Req _{L2} (mΩ)	Xeq _{L2} (mΩ)	Z ₂ (mΩ)	cosφ _{cc}	φ _{cc} (°)
45	423,5	18,0	14,736	28,41	412,2	11,3	4,68	170,46	73,69	190,01	0,9218	22,81
47	428,1	18,3	14,769	28,47	414,0	14,1	5,81	170,46	78,26	192,86	0,9145	23,87
50	432,7	18,7	14,780	28,45	413,9	18,8	7,74	170,46	84,10	197,05	0,9039	25,32
52	434,9	18,9	14,749	28,44	413,0	21,9	9,06	170,46	86,68	199,35	0,9008	25,74
55	435,9	19,2	14,700	28,34	410,2	25,7	10,70	170,46	91,84	203,11	0,8917	26,91
58	439,0	19,6	14,748	28,43	412,8	26,2	10,84	170,46	99,34	206,73	0,8768	28,74
60	436,8	19,9	14,761	28,45	413,4	23,4	9,66	170,46	107,64	209,83	0,8585	30,85
65	448,7	20,5	14,778	28,49	414,5	34,2	14,09	170,46	111,89	215,82	0,8551	31,23
67	447,3	20,7	14,738	28,41	412,2	35,1	14,54	170,46	116,19	218,46	0,8465	32,17
70	449,0	21,1	14,749	28,43	412,8	36,2	14,97	170,46	123,10	222,57	0,8330	33,59
73	450,0	21,4	14,720	28,38	411,3	38,7	16,07	170,46	127,99	226,22	0,8248	34,43
75	451,7	21,6	14,729	28,40	411,8	39,9	16,54	170,46	130,60	228,09	0,8197	34,95
78	455,6	22,1	14,738	28,41	412,2	43,4	17,97	170,46	137,56	233,30	0,8076	36,14
80	461,6	22,4	14,770	28,48	414,2	47,4	19,54	170,46	139,94	235,97	0,8055	36,34

A descrição dos parâmetros e grandezas desta tabela é a mesma indicada no parágrafo 2.2 do presente capítulo.

4.3.2.1 – Representação gráfica dos Valores numéricos característicos do Circuito eléctrico

A figuras abaixo indicadas contêm as representações gráficas dos seguintes parâmetros, indicados na tabela 4.9 (Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito):

- Resistência suplementar, por fase, referida ao secundário (R_{12_Sup});
- Resistência combinada dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário (R_{eq2});
- Reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário (X_{eq2}).

As referidas representações gráficas encontram-se abaixo indicadas, nas figuras 4.7 e 4.8 respectivamente.

4.3.2.1.1 – Representação gráfica dos Valores numéricos das resistências suplementares, por fase, referidas ao secundário

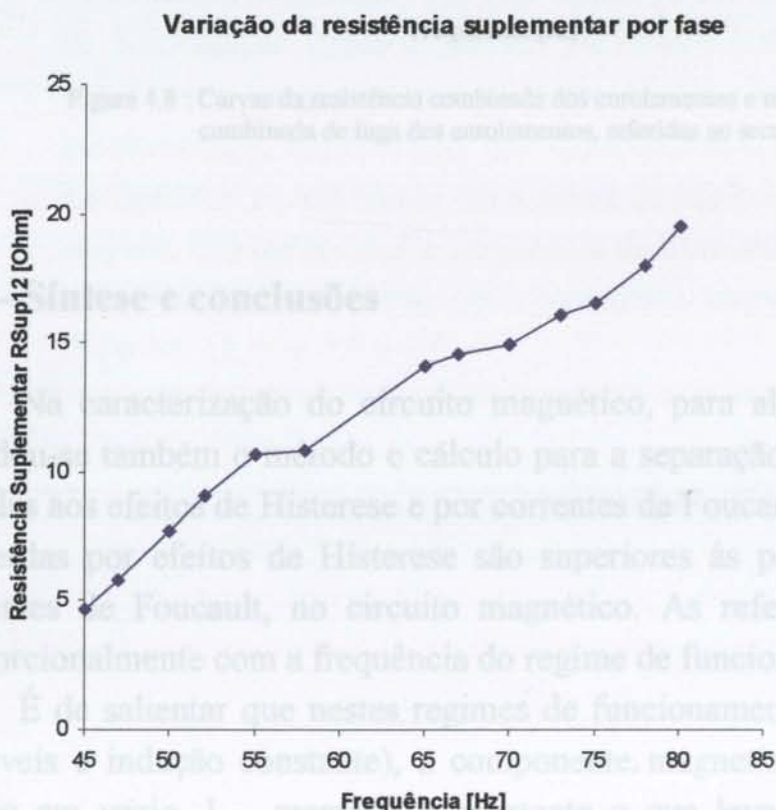


Figura 4.7 : Representação gráfica da resistência suplementar, por fase, referida ao secundário

4.3.2.1.2 – Representação gráfica dos Valores numéricos das resistências e reactâncias combinadas, por fase, referidas ao secundário

Curvas da resistência combinada dos enrolamentos e reactância combinada de fugas dos enrolamentos, referida ao secundário

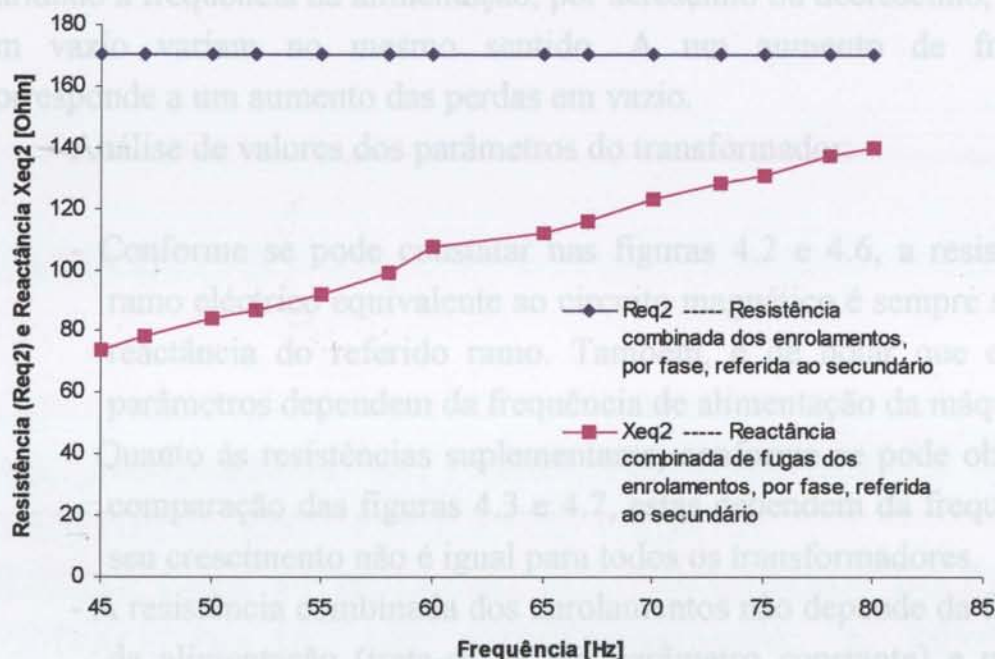


Figura 4.8 : Curvas da resistência combinada dos enrolamentos e reactância combinada de fuga dos enrolamentos, referidas ao secundário

4.4 – Síntese e conclusões

Na caracterização do circuito magnético, para além da equivalência, abordou-se também o método e cálculo para a separação das perdas no ferro devidas aos efeitos de Histerese e por correntes de Foucault. Constatou-se que as perdas por efeitos de Histerese são superiores às perdas por efeito das correntes de Foucault, no circuito magnético. As referidas perdas variam proporcionalmente com a frequência do regime de funcionamento.

É de salientar que nestes regimes de funcionamento (com frequências variáveis e indução constante), a componente magnetizante da corrente no ensaio em vazio, I_{m2} , mantém-se constante o que leva a concluir que nos

referidos regimes de funcionamento, o nível de magnetização da chapa do circuito magnético é constante.

A componente activa da corrente no ensaio em vazio tende a aumentar com o incremento da frequência.

Pelas experiências descritas neste capítulo, e demonstrado pelos valores obtidos (registados nas Tabelas 4.1 e 4.6), mantendo a indução constante e variando a frequência da alimentação, por acréscimo ou decréscimo, as perdas em vazio variam no mesmo sentido. A um aumento de frequência, corresponde a um aumento das perdas em vazio.

Análise de valores dos parâmetros do transformador:

- Conforme se pode constatar nas figuras 4.2 e 4.6, a resistência do ramo eléctrico equivalente ao circuito magnético é sempre superior à reactância do referido ramo. Também, é de notar que estes dois parâmetros dependem da frequência de alimentação da máquina.
- Quanto às resistências suplementares, conforme se pode observar na comparação das figuras 4.3 e 4.7, estas dependem da frequência e o seu crescimento não é igual para todos os transformadores.
- A resistência combinada dos enrolamentos não depende da frequência de alimentação (trata-se de um parâmetro constante) e poderá ter valor maior ou menor que o da reactância combinada de fuga dos enrolamentos, dependendo das características dos transformadores em questão. A reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por sua vez, é proporcional à frequência da alimentação da máquina. Os referidos factos poderão ser constatados através das comparações feitas nas figuras 4.4 e 4.8 .

CAPÍTULO 5

.ESTABELECIMENTO DE LEIS MATEMÁTICAS REPRESENTATIVAS DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM TRANSFORMADOR, A FREQUÊNCIA VARIÁVEL

.REGRAS PARA ESTIPULAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM TRANSFORMADOR, A FREQUÊNCIA VARIÁVEL

Este estudo tem por objectivo a preconização de leis matemáticas e regras práticas representativas dos parâmetros do circuito eléctrico equivalente ao transformador a frequência variável, a partir dos valores resultantes dos ensaios.

O circuito eléctrico equivalente do transformador, em regimes de frequências relativamente próximas das nominais, é basicamente constituído por malhas eléctricas formadas por resistências e reactâncias (Ver Capítulo 3, parágrafo 2 – Modelo equivalente em gama (Γ) referido ao secundário). Assim sendo, deve-se estipular leis e regras que possibilitem a determinação dos referidos parâmetros.

5.1 – Estabelecimento de Leis Matemáticas

Um dos métodos possíveis a utilizar com o intuito de estabelecer leis matemáticas capazes de uma representação muito próxima dos valores reais, é o dos Mínimos Quadrados.

Para tal, devem-se efectuar todos os ensaios económicos e determinar uma tabela com os respectivos parâmetros, num dado intervalo de frequências. Numa Segunda fase, aplicam-se os conceitos do referido método em busca de uma regressão polinomial ou não, que represente a curva descrita pelos parâmetros, em função da frequência. Os desvios entre os valores numéricos dados pelas regressões polinomiais ou não polinomiais aproximantes e os reais dependem do número de pontos determinados pelos ensaios.

A escolha do tipo de regressão a utilizar depende da configuração da curva apresentada pelos valores reais.

O referido método encontra-se descrito detalhadamente no Anexo A.

Após a realização dos ensaios numa gama de frequências, em conformidade com o capítulo 3, poder-se-à determinar, para cada frequência, os valores numéricos dos seguintes parâmetros:

- R_{02} , a componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético (Ω);
- X_{m2} , a componente reactiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético (Ω);
- R_{12_Sup} , a resistência suplementar, por fase, referida ao secundário, expressa em [$m\Omega$];
- X_{eq_2} , a reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário, expressa em [$m\Omega$];

Todos os parâmetros acima indicados, estão relacionados com a frequência da alimentação da máquina. Neste caso, poder-se-à aplicar o Método dos Mínimos Quadrados para estabelecer as referidas leis matemáticas.

Porém, nem todos os parâmetros são dependentes da frequência da alimentação da máquina. A resistência combinada dos enrolamentos, por fase (R_{eq_i}), como seria de esperar, não depende da frequência do regime de

funcionamento, quando se trata de baixas gamas de frequências. Este parâmetro é constante – no capítulo 4, ver tabela 4.5 do parágrafo 2.2 e tabela 4.10 do parágrafo 3.2 – Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito, a frequência variável e indução constante. Este parâmetro deverá ser determinado conforme o preconizado no parágrafo 1.3.4.1 do capítulo 3.

5.2 – Regras práticas para estipulação dos Parâmetros, a frequência variável

5.2.1 – Introdução teórica

O módulo da impedância de uma reactância (X_L) é dado pela expressão matemática:

$$X_L = \omega L \quad [\Omega] \quad (5.1)$$

Onde:

ω é a frequência angular $[\text{rad/s}]$;
 L é a indutância da bobina $[\text{H}]$.

Por sua vez:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad [\text{rad/s}] \quad (5.2)$$

Onde:

- T é o período da onda de corrente que percorre a bobina $[\text{s}]$;
- f é a frequência da onda de corrente que percorre a bobina $[\text{Hz}]$.

Assim sendo, substituindo a expressões (5.2) na equação (5.1), obtém-se:

$$X_L = 2\pi f L \quad [\Omega] \quad (5.3)$$

Salienta-se desta forma que o módulo da impedância de uma bobina, é directamente proporcional á frequência.

5.2.1.1 – Regra para determinação das reactâncias

Conclui-se que a estipulação das reactâncias, á frequência variável, é dada pela seguinte expressão matemática:

$$X_{L_2} = X_{L_1} \times \frac{f_2}{f_1} \quad [\Omega] \quad (5.4)$$

Onde:

- X_{L1} é a reactância da bobina à frequência nominal $[\Omega]$
- f_1 é a frequência nominal $[\text{Hz}]$
- X_{L2} é a reactância da bobina à frequência do novo regime de funcionamento $[\Omega]$
- f_2 é a frequência no novo regime de funcionamento $[\text{Hz}]$

Esta regra é aplicável quer se trata da determinação, da componente reactiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, à frequência variável $X_{m2}(f')$ ou da determinação da reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, à frequência variável $X_{eq,2}(f')$.

5.2.2 – Regra para determinação das resistências

As resistências a determinar são:

- R_{0i} , a componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético (com $i=1$ para redução ao primário; $i=2$ para redução ao secundário), expressa em $[\Omega]$;
- $R_{eq,i}$, a resistência combinada dos enrolamentos, por fase (com $i=1$ para o primário; $i=2$ para redução ao secundário), expressa em $[\text{m}\Omega]$;
- R_{Sup} , a resistência suplementar, por fase, expressa em $[\text{m}\Omega]$.

5.2.2.1 – Regras para determinação da componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, a frequência variável

A componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético (R_{0i} ; com $i=1$ para redução ao primário; $i=2$ para redução ao secundário), varia consoante a frequência do regime de funcionamento da máquina. Esta característica poderá ser verificada nos resultados dos ensaios indicados no capítulo 4, tabelas 4.2 do parágrafo 2.1.2 e tabela 4.7 do parágrafo 3.1.2 .

A alternativa para estabelecer uma regra será efectuar dois conjuntos de ensaios económicos a duas frequências diferentes e determinar todos os parâmetros subsequentes.

Assim sendo, tem-se para a frequência, f :

R_{0i} - a componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, à frequência f ;

Para a frequência, f' :

R'_{0i} - a componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, à frequência f' ;

Da análise dos resultados indicados nas tabelas 4.2 e 4.7 do capítulo 4, nota-se que existe uma razão entre as componentes resistiva dos ramos dos circuitos eléctricos equivalentes ao circuito magnético bem como entre as respectivas frequências.

Com dois pares de valores “frequência - componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético” poder-se-à estabelecer a seguinte igualdade matemática:

$$\left(\frac{f'}{f} \right)^\lambda = \frac{R'_{0i}}{R_{0i}}$$

Resolvendo esta expressão em ordem a λ teremos:

$$\lambda = \frac{\ln \left[\frac{R'_{0i}}{R_{0i}} \right]}{\ln \left[\frac{f'}{f} \right]}$$

O coeficiente λ é constante. Assim sendo, poder-se-à desenvolver a seguinte expressão genérica⁽¹⁾:

$$R_{0i}'' = \left(\frac{f''}{f} \right)^\lambda \times R_{0i} \quad [\Omega] \quad (5.5)$$

Com:

$$\lambda = \frac{\ln \left(\frac{R_{0i}'}{R_{0i}} \right)}{\ln \left(\frac{f'}{f} \right)} \quad (5.6)$$

Onde:

R_{0i}' - Corresponde a uma componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, genérico, a frequência f' ;

5.2.2.2 – Determinação da resistência combinada dos enrolamentos

A resistência combinada dos enrolamentos, por fase (R_{eq_i}), como seria de esperar, não depende da frequência do regime de funcionamento. Conforme já foi referido no parágrafo 1 deste capítulo, trata-se de um parâmetro constante que deverá ser determinado conforme o preconizado no parágrafo 1.3.4.1 do capítulo 3.

5.2.2.3 – Regra prática para determinação da resistência suplementar, a frequência variável

A resistência suplementar por fase (R_{Sup}), varia consoante a frequência do regime de funcionamento da máquina.

Na falta de um melhor método, na prática determinam-se duas resistências a diferentes frequências (de preferência, correspondentes aos dois valores extremos da gama de frequência da alimentação) e traça-se uma recta de resistências suplementares por fase. Com este método, haverá algum erro cometido, de valor insignificante, pois entre o primeiro e o último ponto das

⁽¹⁾ Dave LeVasseur em “Midcom Tecnical Note#82” obteve a mesma expressão matemática.

curvas das resistências suplementares haverá uma pequena flutuação de valores. Para aplicar o referido método, deve-se efectuar dois conjuntos de ensaios económicos a duas frequências diferentes e determinar todos os parâmetros subsequentes.

Assim sendo, tem-se para o ensaio à frequência, f' :

R'_{sup} - a resistência suplementar por fase, para o ensaio à frequência f ;

Para o ensaio à frequência nominal, f'' :

R''_{sup} - a resistência suplementar por fase, para o ensaio à frequência f'' ;

Com os pares de valores “frequência - resistências suplementar por fase” poder-se-à estabelecer a seguinte regra genérica:

$$R_{Sup} = m_d f - m_d f' + R'_{Sup} \quad [m\Omega] \quad (5.7)$$

Com:

$$m_d = \frac{R''_{Sup} - R'_{Sup}}{f'' - f'} \quad (5.8)$$

Onde:

R_{Sup} - Corresponde à resistência suplementar genérica, por fase, à frequência f .

5.3 – Estipulação de parâmetros de um transformador a frequência variável – Casos práticos

O presente estudo tem por objectivo a estipulação dos parâmetros do circuito eléctrico equivalente ao transformador, à frequência variável, aplicando os conceitos indicados nos parágrafos 1 a 2.2.3 deste capítulo. Em

conformidade com os referidos parágrafos, este assunto será abordado sob duas alternativas possíveis:

- Estipulação dos parâmetros através das Regras práticas;
- Estipulação dos parâmetros através das leis de variação dos mesmos (utilizando polinómios aproximantes).

Este estudo será realizado, utilizando os mesmos transformadores considerados nos capítulos anteriores (o transformador de ligação Yy e o de ligação Dy).

5.3.1 – Estipulação de parâmetros do transformador de ligação Yy, aplicando os conceitos das regras práticas

Após a realização dos ensaios à frequência nominal, em conformidade com o capítulo 3, ficaram determinados os seguintes parâmetros:

Tabela 5.1 : Parâmetros do transformador, por fase, referidos ao secundário, à frequência nominal
(transformador de ligação Yy)

R_{02} (Ω)	X_{m2} (Ω)	R_{12_Sup} ($m\Omega$)	R_{eq_2} ($m\Omega$)	X_{eq_2} ($m\Omega$)
282,61	70,56	52,27	71,08	86,14

5.3.1.1 – Estipulação de impedâncias reactivas a frequência variável

A estipulação da componente reactiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético e da reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase será baseada nos respectivos valores determinados à frequência nominal, consoante a expressão matemática 5.4 do parágrafo 2.1.1 (Regra para determinação das reactâncias), do presente capítulo.

Aplicando a expressão matemática nas referidas componentes à frequência nominal, obtém-se a seguinte tabela de parâmetros (Tabela 5.2 – Reactâncias estipuladas a partir da frequência nominal ($f=50\text{Hz}$)):

Tabela 5.2 : Reactâncias estipuladas a partir dos valores à frequência nominal ($f=50\text{Hz}$)

Frequência (Hz)	X_{m2} (Ω)	X_{eq_2} ($m\Omega$)	Desvios (%)	
			X_{m2}	X_{eq_2}
45	63,50	77,53	-1,15	-0,88
47	66,32	80,97	0,93	-1,72
50	70,56	86,14		
52	73,38	89,59	0,04	-3,22
55	77,61	94,75	0,08	-1,17
58	81,85	99,92	0,59	-2,38
60	84,67	103,37	0,44	-2,27
65	91,72	111,98	1,17	-3,32
67	94,55	115,43	1,26	-2,38
70	98,78	120,60	1,59	-2,66
73	103,01	125,76	1,64	-3,33
75	105,83	129,21	1,92	-2,62
78	110,07	134,38	1,62	-3,46
80	112,89	137,82	2,22	-3,38

Nas duas últimas colunas da tabela 5.2, estão evidenciados os desvios entre os valores estipulados e os valores inferidos a partir dos ensaios indicados nas tabelas 4.2 e 4.5 – Capítulo 4. Para a componente reactiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético (X_{m2}), o desvio em valor absoluto está compreendido entre 0,04% e 2,22%. Para a reactância combinada de fuga dos enrolamentos por fase, referida ao secundário (X_{eq_2}), o desvio em valor absoluto, está compreendido entre 0,88% e 3,46%. Estes desvios são relativamente baixos, logo, a regra de estipulação é aceitável.

5.3.1.2 – Estipulação de resistências

5.3.1.2.1 – Estipulação da componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, a frequência variável

A componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético (R_0), como já foi indicado no parágrafo 5.2.2.1 (Regras para determinação da componente resistiva do ramo do circuito eléctrico

equivalente ao circuito magnético, a frequência variável), varia consoante a frequência do regime de funcionamento da máquina. Também, no referido parágrafo, foi estabelecido que a estipulação seria efectuada a partir das expressões matemáticas (5.5) e (5.6), com base em dois pares de valores, “frequência - componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético”, provenientes de ensaios.

Para aplicar o referido método, foram utilizados os seguintes pares de valores da tabela 4.2 do parágrafo 2.1.2 do Capítulo 4:

Pares de valores	Frequência (Hz)	R_{02} (Ω)
Par 1	50	282,61
Par 2	45	259,95

Para os referidos pares de valores, determina-se o expoente λ :

$$\lambda = \frac{\ln\left(\frac{R_0'}{R_0}\right)}{\ln\left(\frac{f'}{f}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{259,95}{282,61}\right)}{\ln\left(\frac{45}{50}\right)} = 0,793$$

Com os valores $\lambda = 0,793$ e $R_{02} = 282,61$ constantes (R_{02} corresponde à componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, à frequência 50Hz), poder-se-à estipular qualquer componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, variando a frequência f'' .

Como exemplo, se pretender o valor estipulado para a componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, à frequência $f'' = 60\text{Hz}$, teria:

$$R_0'' = \left(\frac{f''}{f}\right)^{\lambda} \times R_0 = \left(\frac{60}{50}\right)^{0,793} \times 282,61 = 326,57\Omega$$

Onde R''_0 - Corresponde a uma componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, à frequência f'' ; indicado no parágrafo 3.3.4.1 do capítulo 3. Para o transformador de ligação Yy, o valor

Para as diversas frequências, obtém-se a seguinte tabela de valores numéricos:

Tabela 5.3 : Estipulação das Componentes resistivas dos ramos dos circuitos eléctricos equivalentes aos circuitos magnéticos. Com λ estabelecido a partir dos pares de valores:

$(f''; R'_0) = (45\text{Hz}; 259,95 \Omega)$

$(f; R_0) = (50\text{Hz}; 282,61 \Omega)$

Frequência (Hz)	λ	R_{02} (Ω)	Desvios (%)
45	0,793	259,95	
47	0,793	269,07	-0,35
50	0,793	282,61	
52	0,793	291,53	-0,24
55	0,793	304,79	-0,24
58	0,793	317,90	-0,17
60	0,793	326,57	-0,23
65	0,793	347,97	0,03
67	0,793	356,43	0,19
70	0,793	369,03	0,29
73	0,793	381,52	0,21
75	0,793	389,78	0,34
78	0,793	402,10	0,37
80	0,793	410,25	0,74

Na última coluna da tabela 5.3, estão indicados os desvios entre os valores estipulados e os valores inferidos a partir dos ensaios indicados na tabela 4.2 do Capítulo 4. O desvio em valor absoluto, está compreendido entre 0,17% e 0,74%. Estes desvios são relativamente baixos, logo, a regra de estipulação é aceitável.

5.3.1.2.2 – Determinação da resistência combinada dos enrolamentos

A resistência combinada dos enrolamentos, por fase (R_{eq}), como preconizado no parágrafo 2.2.2 (Determinação da resistência combinada dos

enrolamentos) – do presente capítulo, não depende da frequência do regime de funcionamento. Este parâmetro deverá ser calculado conforme o indicado no parágrafo 1.3.4.1 do capítulo 3. Para o transformador de ligação Yy, o valor do referido parâmetro foi determinado no parágrafo 3.1.7 do capítulo 3 e corresponde a: $R_{eq_2} = 71,08m\Omega$.

5.3.1.2.3 – Estipulação da resistência suplementar, a frequência variável

Conforme já referido neste capítulo, a resistência suplementar, por fase (R_{12_Sup}), varia consoante a frequência do regime de funcionamento da máquina. Este facto poderá ser verificado nos valores numéricos resultantes dos ensaios, indicados na tabela 4.5 parágrafo 2.2, do Capítulo 4.

No parágrafo 2.2.3 do presente capítulo, foi estabelecida uma regra prática para o cálculo da resistência suplementar por fase (R_{12_Sup}).

Para aplicar a referida regra, foram utilizados os seguintes pares de valores provenientes da tabela 4.5 do parágrafo 2.2 do Capítulo 4:

Pares de valores	Resistências (mΩ)	Frequências (Hz)
Par 1	$R'_{12_Sup} = 52,86$	$f' = 80$
Par 2	$R'_{12_Sup} = 51,69$	$f' = 45$

Da expressão matemática (5.8) vem:

$$m_d = \frac{R'_{12_Sup} - R'_{12_Sup}}{f'' - f'} = \frac{52,86 - 51,69}{80 - 45} = 3,343 \times 10^{-2} \quad \left[\frac{\Omega}{Hz} \right]$$

Da expressão matemática (5.7) vem:

$$R_{12_Sup} = m_d f - m_d f' + R'_{12_Sup} = 3,343 \times 10^{-2} f + 50,186 \quad [\Omega] \quad (5.9)$$

Para as diversas frequências, obtém-se a seguinte tabela de valores numéricos:

Tabela 5.4 : Estipulação da resistência suplementar, por fase (R_{12_Sup}). Com a regra estabelecida a partir dos pares de valores: $(f''; R''_{12_Sup}) = (80\text{Hz}; 52,86 \Omega)$ $(f'; R'_{12_Sup}) = (45\text{Hz}; 51,69 \Omega)$

Frequência (Hz)	m (Ω/Hz)	R_{12_Sup} (m Ω)	Desvios (%)
45	$3,343 \times 10^{-2}$	51,69	
47	$3,343 \times 10^{-2}$	51,76	-1,60
50	$3,343 \times 10^{-2}$	51,86	-0,78
52	$3,343 \times 10^{-2}$	51,92	0,39
55	$3,343 \times 10^{-2}$	52,02	-0,17
58	$3,343 \times 10^{-2}$	52,12	0,29
60	$3,343 \times 10^{-2}$	52,19	0,08
65	$3,343 \times 10^{-2}$	52,36	-0,48
67	$3,343 \times 10^{-2}$	52,43	-0,68
70	$3,343 \times 10^{-2}$	52,53	0,23
73	$3,343 \times 10^{-2}$	52,63	-0,55
75	$3,343 \times 10^{-2}$	52,69	-1,84
78	$3,343 \times 10^{-2}$	52,79	-1,18
80	$3,343 \times 10^{-2}$	52,86	

Na última coluna da tabela 5.4, estão evidenciados os desvios entre os valores estipulados e os valores inferidos a partir dos ensaios apresentados na tabela 4.5 do capítulo 4. O desvio em valor absoluto, está compreendido entre 0,08% e 1,84%. Estes desvios são relativamente baixos, logo, a regra de estipulação é aceitável.

5.4 – Estipulação de parâmetros do transformador de ligação Yy, através do conceito de Polinómios aproximantes (leis matemáticas)

5.4.1 – Leis matemáticas representativas dos parâmetros do Circuito Magnético

Neste parágrafo, o objectivo é determinar as expressões matemáticas representativas das componentes resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético.

Para obter as referidas expressões, optou-se por aplicar o critério dos mínimos quadrados aos valores discretos provenientes dos ensaios, (aplicado a todos os pontos), ou seja, a determinação matemática de uma função que

torna mínima a soma dos quadrados dos resíduos em todos os pontos registados.

Através da teoria dos mínimos quadrados do Anexo A, foram obtidas as seguintes expressões matemáticas:

Para as componentes resistivas (R_{02}) dos ramos dos circuitos eléctricos equivalentes ao circuito magnético:

$$R_{02} = -233,8506 + 23,0593f - 437 \times 10^{-3} f^2 + 455 \times 10^{-5} f^3 - 1,8 \times 10^{-5} f^4 \quad [\Omega] \quad (5.10)$$

Para as componentes reactivas (X_{m2}) dos ramos dos circuitos eléctricos equivalentes ao circuito magnético:

$$X_{m2} = -126,9456 + 9,4039f - 18,48 \times 10^{-2} f^2 + 187 \times 10^{-5} f^3 - 7 \times 10^{-6} f^4 \quad [\Omega] \quad (5.11)$$

A tabela abaixo apresentada, contém as comparações entre valores inferidos a partir dos ensaios, registados na tabela 4.2 do capítulo 4 e valores obtidos através dos polinómios aproximantes (Ver: Tabela 5.5 --- Comparação de valores numéricos das componentes, resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético provenientes de ensaios, com os valores obtidos através dos polinómios).

Tabela 5.5 : Comparação de valores numéricos das componentes, resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético provenientes de ensaios, com os valores obtidos através dos polinómios obtidos

Valores numéricos provenientes dos ensaios			Valores provenientes dos polinómios		Desvios	
Frequências (Hz)	R_{02} (Ω)	X_{m2} (Ω)	R_{02} (Ω)	X_{m2} (Ω)	R_{02} (%)	X_{m2} (%)
45	259,95	64,24	259,70	63,71	-0,10	-0,82
47	270,01	66,95	269,16	66,81	-0,31	-0,21
50	282,61	70,56	282,86	71,25	0,09	0,98
52	292,24	73,35	291,74	74,11	-0,17	1,03
55	305,52	77,56	304,78	78,32	-0,24	0,98
58	318,45	81,37	317,58	82,46	-0,27	1,34
60	327,32	84,30	326,03	85,21	-0,39	1,08
65	347,88	90,67	346,91	92,12	-0,28	1,60
67	355,76	93,37	355,18	94,92	-0,16	1,66
70	367,97	97,23	367,47	99,15	-0,14	1,97
73	380,74	101,36	379,56	103,41	-0,31	2,02
75	388,46	103,85	387,47	106,27	-0,26	2,33
78	400,61	108,32	399,01	110,54	-0,40	2,05
80	407,23	110,45	406,41	113,37	-0,20	2,64

Nas duas últimas colunas da tabela 5.5, apresentam-se os desvios entre os valores obtidos através dos polinômios aproximantes e os valores inferidos a partir dos ensaios, indicados na tabela 4.2 do Capítulo 4. Para as componentes reactivas dos ramos dos circuitos eléctricos equivalentes ao circuito magnético, (X_{m2}), o desvio em valor absoluto, está compreendido entre 0,21% e 2,64%. Para as componentes resistivas dos ramos dos circuitos eléctricos equivalentes ao circuito magnético, (R_{02}), o desvio em valor absoluto, está compreendido entre 0,09% e 0,4%. Estes desvios são relativamente baixos, logo, os polinômios aproximantes são aceitáveis.

5.4.2 – Leis matemáticas representativas dos parâmetros do Circuito Eléctrico equivalente

A resistência combinada dos enrolamentos, por fase (R_{eq}), como anteriormente preconizado no parágrafo 1, deste capítulo, trata-se de um parâmetro constante cujo valor corresponde a: $R_{eq2} = 71,08m\Omega$.

Quanto aos restantes parâmetros X_{eq2} e R_{Sup12} , serão determinadas as respectivas expressões matemáticas representativas. Através do método dos mínimos quadrados, aplicado aos valores numéricos, registados na tabela 4.5 do capítulo 4, resultantes dos ensaios, obtiveram-se as seguintes expressões matemáticas representativas:

$$X_{eq_2} = 169 - 9,8799f + 29,27 \times 10^{-2} f^2 - 32 \times 10^{-4} f^3 + 1,29 \times 10^{-5} f^4 \quad [m\Omega] \quad (5.12)$$

$$R_{12_Sup} = -194,8311 + 16,9128f - 428,44 \times 10^{-3} f^2 + 475 \times 10^{-5} f^3 - 1,94 \times 10^{-5} f^4 \quad [m\Omega] \quad (5.13)$$

A tabela 5.6 estabelece comparações entre os valores inferidos a partir dos ensaios e valores obtidos através dos polinômios aproximantes.

Tabela 5.6 : Comparação de valores numéricos das resistências suplementares e reactâncias de fuga dos enrolamentos, com os valores obtidos através dos polinómios aproximantes

Valores numéricos provenientes dos ensaios			Valores provenientes dos polinómios		Desvios	
Frequências (Hz)	R_{12-Sup} (m Ω)	X_{eq-2} (m Ω)	R_{12-Sup} (m Ω)	X_{eq-2} (m Ω)	R_{12-Sup} (%)	X_{eq-2} (%)
45	51,69	78,22	51,95	78,42	0,26	0,26
47	52,60	82,39	52,14	81,93	-0,46	-0,56
50	52,27	86,14	52,21	87,38	-0,06	1,44
52	51,72	92,57	52,18	91,08	0,46	-1,61
55	52,11	95,87	52,10	96,67	-0,01	0,83
58	51,97	102,36	52,08	102,23	0,11	-0,13
65	52,61	115,83	52,51	114,94	-0,10	-0,77
67	52,79	118,25	52,75	118,48	-0,04	0,19
70	52,41	123,89	53,16	123,77	0,75	-0,10
73	52,92	130,09	53,55	129,05	0,63	-0,80
75	53,68	132,69	53,73	132,61	0,05	-0,06
78	53,42	139,20	53,77	138,08	0,35	-0,80
80	52,86	142,64	53,55	141,87	0,69	-0,54

Na figura 5.1, abaixo indicada encontram-se as representações gráficas das resistências suplementares provenientes dos resultados dos ensaios e do polinómio aproximante.

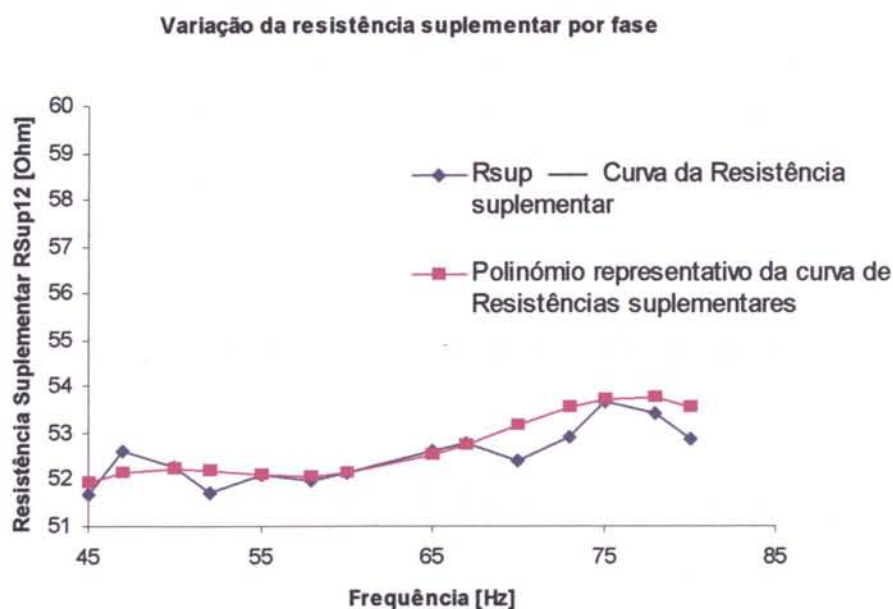


Figura 5.1 : Curvas das resistências suplementares dos enrolamentos (Valores provenientes dos ensaios e do polinómio estimador)

Nas duas últimas colunas da tabela 5.6, estão evidenciados os desvios entre os valores obtidos através dos polinômios aproximantes e os valores inferidos a partir dos ensaios registados na tabela 4.5 do capítulo 4. As resistências suplementares, (R_{12_Sup}), apresentam desvios em valor absoluto, compreendido entre 0,01% e 0,75%. No caso das reactâncias de fuga dos enrolamentos, (X_{eq2}), o desvio em valor absoluto, está compreendido entre 0,06% e 1,61%. Estes desvios não são significativos, logo, os polinômios aproximantes são aceitáveis.

5.5 – Estipulação de parâmetros do transformador de ligação Dy, aplicando os conceitos das regras práticas

Os parâmetros abaixo indicados, foram determinados a partir dos ensaios realizados a frequência nominal, em conformidade com o capítulo 3:

R_{02} (Ω)	X_{m2} (Ω)	R_{12_Sup} ($m\Omega$)	R_{eq_2} ($m\Omega$)	X_{eq_2} ($m\Omega$)
454,61	353,12	7,74	170,46	84,10

5.5.1 – Estipulação de impedâncias reactivas, a frequência variável

Através do especificado no parágrafo 2.1.1 (Regra para determinação das reactâncias) do presente capítulo, aplicando a expressão matemática (5.4) obtém-se a seguinte tabela de reactâncias (Tabela 5.7 – Reactâncias estipuladas a partir da frequência nominal ($f=50Hz$)):

Tabela 5.7 : Reactâncias estipuladas a partir da frequência nominal ($f = 50\text{Hz}$)

Frequência (Hz)	X_{m2} (Ω)	X_{eq_2} ($m\Omega$)	Desvios (%)	
			X_{m2}	X_{eq2}
45	317,81	75,69	-0,11	2,71
47	331,93	79,05	-0,32	1,01
50	353,12	84,10		
52	367,24	87,46	-0,02	0,90
55	388,43	92,51	0,24	0,73
58	409,62	97,56	0,27	-1,79
65	459,06	109,33	1,37	-2,29
67	473,18	112,69	1,22	-3,01
70	494,37	117,74	1,49	-4,35
73	515,55	122,79	1,49	-4,06
75	529,68	126,15	1,50	-3,41
78	550,87	131,20	2,01	-4,62
80	564,99	134,56	1,89	-3,84

Nas duas últimas colunas da tabela 5.7, estão indicados os desvios entre os valores estipulados e os valores inferidos a partir dos ensaios registados nas tabelas 4.7 e 4.10 do Capítulo 4. Para a componente reactiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético (X_{m2}), o desvio em valor absoluto, está compreendido entre 0,11% e 2,01%. Para a reactância combinada de fuga dos enrolamentos por fase, referida ao secundário (X_{eq_2}), o desvio em valor absoluto, está compreendido entre 1,01% e 4,62%. Estes desvios são relativamente baixos, logo, a regra de estipulação é aceitável.

5.5.2 – Estipulação de resistências

5.5.2.1 – Estipulação da componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, a frequência variável

A componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético (R_0), como já foi indicado no parágrafo 2.2.1 (Regras para determinação da componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, a frequência variável) deste capítulo, varia consoante a frequência do regime de funcionamento da máquina. Também, no referido parágrafo, foi estabelecido que a estipulação seria efectuada a partir das expressões matemáticas (5.5 e 5.6 do presente capítulo), com base em

dois pares de valores, “frequência - componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético”, provenientes de ensaios.

Para aplicar o referido método, foram utilizados os seguintes pares de valores provenientes da tabela 4.7, parágrafo 3.1.2 do capítulo 4:

Pares de valores	Frequência (Hz)	R ₀₂ (Ω)
Par 1	50	454,61
Par 2	45	424,65

$$\lambda = \frac{\ln\left(\frac{R'_0}{R_0}\right)}{\ln\left(\frac{f'}{f}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{424,65}{454,61}\right)}{\ln\left(\frac{45}{50}\right)} = 0,647$$

Com os valores $\lambda = 0,647$ e $R_{02} = 454,61$ constantes (R_{02} corresponde à componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, à frequência 50Hz), poder-se-à estipular componentes resistivas do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, variando a frequência f' .

Como exemplo, se pretender o valor estipulado para a componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, à frequência $f' = 55\text{Hz}$, teria:

$$R''_0 = \left(\frac{f''}{f}\right)^\lambda \times R_0 = \left(\frac{55}{50}\right)^{0,647} \times 454,61 = 483,53\Omega$$

Onde:

R''_0 - Corresponde a uma componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, à frequência f'' ;

Para as diversas frequências, obtém-se a seguinte tabela:

Tabela 5.8 : Estipulação das Componentes resistivas dos ramos dos circuitos eléctricos equivalentes aos circuitos magnéticos. Com λ estabelecido a partir dos pares de valores:
 $(f'; R'_0)=(45\text{Hz} ; 424,65 \Omega)$
 $(f ; R_0)=(50\text{Hz} ; 454,61 \Omega)$

Frequência (Hz)	λ	R_{02} (Ω)	Desvios (%)
45	0,647	424,65	
47	0,647	436,77	0,19
50	0,647	454,61	
52	0,647	466,29	0,15
55	0,647	483,53	0,05
58	0,647	500,43	0,09
65	0,647	538,71	5,96
67	0,647	549,38	2,68
70	0,647	565,17	4,10
73	0,647	580,73	4,14
75	0,647	590,97	3,38
78	0,647	606,16	4,61
80	0,647	616,17	3,85

Na última coluna da tabela 5.8, estão indicados os desvios entre os valores estipulados e os valores inferidos a partir dos ensaios registados na tabela 4.7 do capítulo 4. O desvio em valor absoluto, está compreendido entre 0,05% e 4,61%. Os referidos desvios são relativamente baixos, logo, a regra de estipulação é aceitável.

5.5.2.2 – Determinação da resistência combinada dos enrolamentos

O parâmetro, resistência combinada dos enrolamentos, por fase (R_{eq}), como preconizado no parágrafo 2.2.2 (Determinação da resistência combinada dos enrolamentos) deste capítulo, é constante. O valor deste parâmetro para este transformador, foi determinado no parágrafo 3.2.7 do capítulo 3 e corresponde a: $R_{eq,2} = 170,46\text{m}\Omega$.

5.5.2.3 – Determinação da resistência suplementar, à frequência variável

No parágrafo 2.2.3 do presente capítulo, foram estabelecidas as regras para determinar a resistência suplementar por fase.

Para a aplicação das referidas regras, foram utilizados os seguintes pares de valores da tabela 4.10, parágrafo 3.2 do capítulo 4:

Pares de valores	Resistências (mΩ)	Frequências (Hz)
Par 1	$R'_{12_Sup} = 19,54$	$f'' = 80$
Par 2	$R'_{12_Sup} = 4,68$	$f' = 45$

Da expressão matemática (5.8) vem:

$$m_d = \frac{R'_{12_Sup} - R'_{12_Sup}}{f'' - f'} = \frac{19,54 - 4,68}{80 - 45} = 4,246 \times 10^{-1}$$

Da expressão matemática (5.7) vem:

$$R_{12_Sup} = m_d f - m_d f' + R'_{12_Sup} = 4,246 \times 10^{-1} f - 14,427 \quad [m\Omega] \quad (5.14)$$

Para as diversas frequências, obtém-se a seguinte tabela de valores numéricos:

Tabela 5.9 : Estipulação da resistência suplementar, por fase (R_{12_Sup}). Com a regra estabelecida a partir dos pares de valores:

$(f''; R'_{12_Sup}) = (80\text{Hz} ; 19,54 \Omega)$

$(f'; R'_{12_Sup}) = (45\text{Hz} ; 4,68 \Omega)$

Frequência (Hz)	m	R_{12_Sup} (mΩ)	Desvios (%)
45	$4,246 \times 10^{-1}$	4,68	
47	$4,246 \times 10^{-1}$	5,53	-4,82
50	$4,246 \times 10^{-1}$	6,80	-12,03
52	$4,246 \times 10^{-1}$	7,65	-15,56
55	$4,246 \times 10^{-1}$	8,93	-16,54
58	$4,246 \times 10^{-1}$	10,20	-5,90
60	$4,246 \times 10^{-1}$	11,05	14,39
65	$4,246 \times 10^{-1}$	13,17	-6,53
67	$4,246 \times 10^{-1}$	14,02	-3,58
70	$4,246 \times 10^{-1}$	15,30	2,20
73	$4,246 \times 10^{-1}$	16,57	3,11
75	$4,246 \times 10^{-1}$	17,42	5,32
78	$4,246 \times 10^{-1}$	18,69	4,01
80	$4,246 \times 10^{-1}$	19,54	

Na última coluna da tabela 5.9, estão indicados os desvios entre os valores estipulados e os valores inferidos a partir dos ensaios conforme a tabela 4.10 do capítulo 4. O desvio em valor absoluto, está compreendido entre 2,2% e 16,54%. Estes desvios são elevados, logo, a regra prática de estipulação poderá não ser aceitável. A validação ou não, desta estipulação será efectuada após a comparação das características externas e rendimento do transformador no capítulo 6.

5.6 – Estipulação de parâmetros do transformador de ligação Dy, através do conceito de Polinómios aproximantes (leis matemáticas)

5.6.1 – Leis matemáticas representativas dos parâmetros do Circuito Magnético

O objectivo deste parágrafo é estabelecer as expressões matemáticas representativas das componentes resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, através da aplicação do critério dos mínimos quadrados nos valores discretos provenientes dos ensaios (aplicado a todos os pontos). Na prática, consiste na determinação matemática de uma função que torna mínima a soma dos quadrados dos resíduos em todos os pontos registados.

Para as componentes, resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético obtiveram-se as seguintes expressões em função da frequência da alimentação:

$$R_{02} = 340,6648 - 9,4693f + 0,4575f^2 - 0,00566f^3 + 2,41 \times 10^{-5}f^4 \quad [\Omega] \quad (5.15)$$

$$X_{m2} = -492,7169 + 38,9064f - 0,7521f^2 + 0,00773f^3 - 2,95 \times 10^{-5}f^4 \quad [\Omega] \quad (5.16)$$

A tabela seguinte (tabela 5.10), contém as comparações entre valores inferidos a partir dos ensaios e valores obtidos através dos polinómios estimadores.

Tabela 5.10 : Comparação de valores numéricos das componentes, resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, com os valores obtidos através dos polinómios obtidos

Valores numéricos provenientes dos ensaios			Valores provenientes dos polinómios		Desvios	
Frequências (Hz)	R_{02} (Ω)	X_{m2} (Ω)	R_{02} (Ω)	X_{m2} (Ω)	R_{02} (%)	X_{m2} (%)
45	424.65	318.16	424.04	318.50	-0.14	0.11
47	435.96	332.99	436.19	333.10	0.05	0.03
50	454.61	353.12	454.07	354.23	-0.12	0.31
52	465.57	367.33	465.71	367.94	0.03	0.17
55	483.28	387.51	482.64	388.17	-0.13	0.17
58	499.99	408.53	498.87	408.17	-0.22	-0.09
60	508.41	418.06	509.28	421.47	0.17	0.82
65	535.02	452.84	533.92	454.83	-0.21	0.44
67	542.91	467.46	543.26	468.27	0.06	0.17
70	557.64	487.10	556.82	488.54	-0.15	0.30
73	571.67	507.96	569.98	508.86	-0.30	0.18
75	579.47	521.88	578.63	522.40	-0.15	0.10
78	593.30	540.01	591.59	542.55	-0.29	0.47
80	601.34	554.53	600.34	555.80	-0.17	0.23

Conforme se pode constatar os desvios cometidos (em percentagem) são insignificantes, logo, as curvas dadas pelos valores inferidos a partir dos ensaios e as curvas dadas pelos polinómios são coincidentes. Conclui-se que os polinómios sugeridos são bons estimadores dos referidos parâmetros.

5.6.2 – Leis matemáticas representativas dos parâmetros do Circuito Eléctrico equivalente

Neste parágrafo, o objectivo é determinar as expressões matemáticas representativas dos parâmetros do circuito eléctrico equivalente.

A resistência combinada dos enrolamentos, por fase (R_{eq}), como anteriormente referida, corresponde a: $R_{eq_2} = 170,46m\Omega$.

Através do método dos mínimos quadrados, aplicado aos valores discretos provenientes dos ensaios, obtiveram-se as seguintes expressões matemáticas representativas dos parâmetros X_{eq_2} , R_{12_Sup} :

$$X_{eq_2} = -170,9567 + 13,5424f - 0,3134f^2 + 0,00368f^3 - 1,59 \times 10^{-5} f^4 \quad [m\Omega] \quad (5.17)$$

$$R_{12_Sup} = 99,8202 - 9,1078f + 0,28153f^2 - 0,00351f^3 + 1,57 \times 10^{-5} f^4 \quad [m\Omega] \quad (5.18)$$

A tabela 5.11 apresenta as comparações entre valores inferidos a partir dos ensaios e valores obtidos através dos polinômios estimadores.

Tabela 5.11 : Comparação de valores numéricos das resistências suplementares e reactâncias de fuga dos enrolamentos, com os valores obtidos através dos polinômios

Valores numéricos provenientes dos ensaios			Valores provenientes dos polinômios		Desvios	
Frequências (Hz)	R_{12_Sup} (mΩ)	X_{eq_2} (mΩ)	R_{12_Sup} (mΩ)	X_{eq_2} (mΩ)	R_{12_Sup} (%)	X_{eq_2} (%)
45	4,68	73,69	4,60	73,96	-1,71	0,37
47	5,81	78,26	5,85	77,72	0,69	-0,69
50	7,73	84,10	7,63	83,29	-1,29	-0,96
52	9,06	86,68	8,73	87,00	-3,64	0,37
55	10,70	91,84	10,21	92,61	-4,58	0,84
58	10,84	99,34	11,46	98,30	5,72	-1,05
65	14,09	111,89	13,60	111,98	-3,48	0,08
67	14,54	116,19	14,08	115,94	-3,16	-0,22
70	14,97	123,10	14,80	121,83	-1,14	-1,03
73	16,07	127,99	15,63	127,58	-2,74	-0,32
75	16,54	130,60	16,32	131,26	-1,33	0,51
78	17,97	137,56	17,70	136,44	-1,50	-0,81
80	19,54	139,94	18,94	139,57	-3,07	-0,26

Conforme se pode constatar os desvios cometidos (em percentagem) são relativamente baixos. A curva dada pelos valores das reactâncias combinadas de fuga dos enrolamentos inferidos a partir dos ensaios e a curva dadas pelos polinómios são praticamente coincidentes.

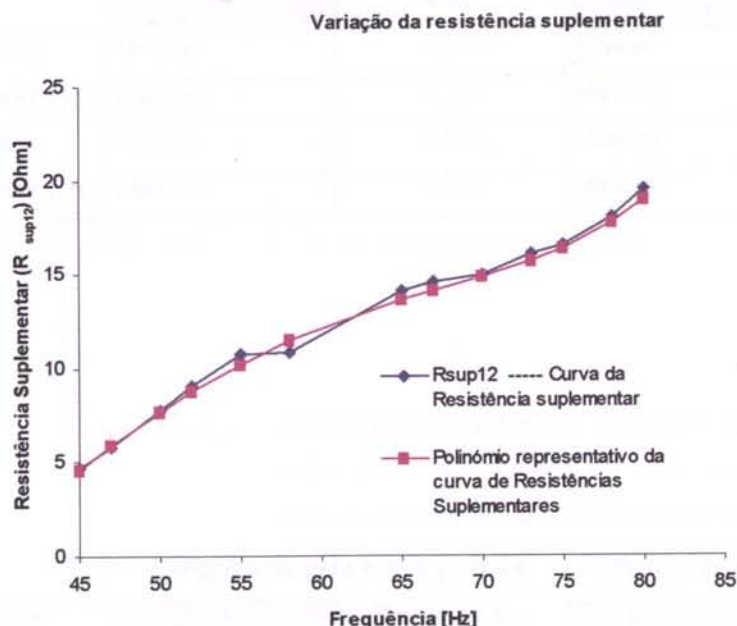


Figura 5.2 : Curvas das resistências suplementares dos enrolamentos (Valores provenientes dos ensaios e do polinómio estimador)

Relativamente às curvas das resistências suplementares indicadas na figura 5.2, os desvios variam, em valor absoluto, de 0.69% a 5.72%, logo, elas não são coincidentes. No entanto, verifica-se, que o desvio não é muito significativo e portanto o polinómio aproximante apresentado é aceitável.

5.7– Análise de valores

Nas tabelas 5.12 , 5.13, 5.14 e 5.15, encontram-se representados os limites mínimos e máximos dos valores absolutos dos desvios cometidos entre os valores dos diversos parâmetros provenientes de ensaios e aqueles estipulados pela regra prática e pelas leis matemáticas.



Tabela 5.12 : Comparação dos desvios absolutos apresentados pelos dois métodos na estipulação da componente resistiva (R_{02}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

Amostras	Estipulação pela regra prática		Estipulação pelas leis matemáticas	
		Desvio de R_{02} (%)		Desvio de R_{02} (%)
Primeiro transformador (Yy)	Mínimo	0,03	Mínimo	0,09
	Máximo	0,74	Máximo	0,40
Segundo transformador (Dy)	Mínimo	0,05	Mínimo	0,03
	Máximo	4,61	Máximo	0,30

Tabela 5.13 : Comparação dos desvios absolutos apresentados pelos dois métodos na estipulação da componente reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

Amostras	Estipulação pela regra prática		Estipulação pelas leis matemáticas	
		Desvio de X_{m2} (%)		Desvio de X_{m2} (%)
Primeiro transformador (Yy)	Mínimo	0,04	Mínimo	0,21
	Máximo	2,21	Máximo	2,64
Segundo transformador (Dy)	Mínimo	0,02	Mínimo	0,03
	Máximo	2,01	Máximo	0,82

Tabela 5.14 : Comparação dos desvios absolutos apresentados pelos dois métodos na estipulação da reactância de fuga dos enrolamentos (X_{eq_2})

Amostras	Estipulação pela regra prática		Estipulação pelas leis matemáticas	
		Desvio de X_{eq_2} (%)		Desvio de X_{eq_2} (%)
Primeiro transformador (Yy)	Mínimo	0,88	Mínimo	0,06
	Máximo	3,46	Máximo	1,61
Segundo transformador (Dy)	Mínimo	0,73	Mínimo	0,08
	Máximo	4,62	Máximo	1,05

Tabela 5.15 : Comparação dos desvios absolutos apresentados pelos dois métodos na estipulação da resistência suplementar por fase (R_{12_Sup})

Amostras	Estipulação pela regra prática		Estipulação pelas leis matemáticas	
		Desvio de R_{12_Sup} (%)		Desvio de R_{12_Sup} (%)
Primeiro transformador (Yy)	Mínimo	0,08	Mínimo	0,01
	Máximo	1,84	Máximo	0,75
Segundo transformador (Dy)	Mínimo	2,20	Mínimo	0,69
	Máximo	16,54	Máximo	5,72

É de notar, como seria de esperar, que de modo geral o desvios provenientes da estipulação por leis matemáticas são inferiores àqueles provenientes da regra prática.

5.8 – Síntese e Conclusões

Neste capítulo foram abordados dois métodos possíveis para estipulação dos parâmetros do circuito eléctrico equivalente dos transformadores. Qualquer destes métodos requer ensaios prévios do transformador em estudo, embora o método prático exija apenas dois conjuntos de ensaios económicos a duas frequências distintas. O método denominado por determinação de leis matemáticas (determinação de polinómios aproximantes) requer conjuntos de ensaios económicos em todas as frequências dos regimes de funcionamento previstos. Este método é muito trabalhoso mas em contrapartida apresenta valores muito satisfatórios, com erros esperados inferiores quando comparado com o método prático.

Os modelos estipulados neste capítulo serão objecto de estudo no capítulo de avaliação do comportamento de um transformador em carga (Capítulo 6), com o intuito de serem validados ou não.

CAPÍTULO 6

.AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UM TRANSFORMADOR EM CARGA, A FREQUÊNCIA VARIÁVEL

.DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO

.VALIDAÇÃO DOS MODELOS ESTIPULADOS

Neste capítulo, far-se-à uma abordagem teórica com o intuito de determinar a característica externa $U_2(I_2)$ e rendimento de um transformador trifásico. Para a determinação das expressões matemáticas que definem a referida característica externa, recorre-se ao modelo equivalente do transformador, já definido no capítulo 3, parágrafo 2 (Modelo equivalente em gama (Γ) referido ao secundário).

De seguida, na segunda parte deste capítulo, apresenta-se a avaliação experimental. Na referida parte, faz-se a abordagem à validação dos diversos modelos estipulados, com a apresentação de alguns casos de características externas das máquinas, rendimentos e desvios em relação aos valores medidos. No anexo B encontram-se registados mais exemplos de regimes de carga, com os respectivos valores de características externas, rendimento e desvios, possibilitando assim verificar a validação dos modelos. Também no referido anexo encontram-se indicações para a sequência dos cálculos efectuados.

6.1 – Avaliação teórica

6.1.1 – Representação esquemática do modelo equivalente de Kapp

O presente estudo será desenvolvido com base no modelo equivalente de Kapp, que é uma simplificação feita ao modelo equivalente em gama (Γ), conforme a figura abaixo indicada (figura 6.1):

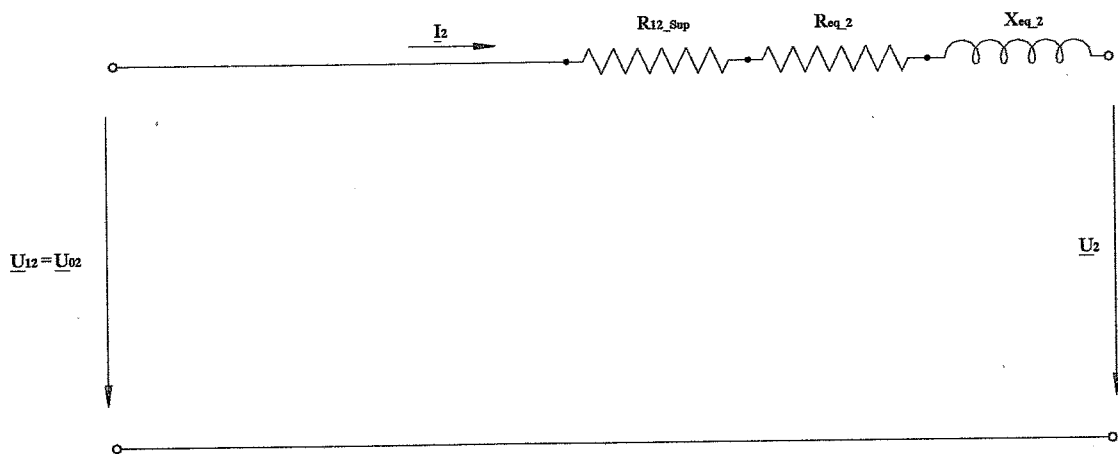


Figura 6. 1 : Modelo equivalente de Kapp, por fase.

6.1.2 – Análise teórica do modelo equivalente de Kapp

Considerando a figura 6.1, o funcionamento da máquina reduz-se a uma equação de tensões como abaixo indicado:

$$\underline{U}_{12} = (R_{12_sup} + R_{eq_2}) \times \underline{I}_2 + jX_{eq_2} \times \underline{I}_2 + \underline{U}_2 \quad [V] \quad (6.1)$$

Assim sendo, a diferença entre a tensão secundária em vazio (ou tensão primária reduzida ao secundário) e a tensão em carga, será a queda de tensão na impedância equivalente reduzida ao secundário.

$$\underline{U}_{12} - \underline{U}_2 = (R_{12_sup} + R_{eq_2}) \times \underline{I}_2 + jX_{eq_2} \times \underline{I}_2 \quad [V] \quad (6.2)$$

Como

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_{02} \quad [V] \quad (6.3)$$

Vem que

$$\underline{U}_{02} - \underline{U}_2 = (R_{12_sup} + R_{eq_2}) \times \underline{I}_2 + jX_{eq_2} \times \underline{I}_2 \quad [V] \quad (6.4)$$

6.1.2.1 – Análise teórica do modelo em carga

A figura 6.2 abaixo indicada, corresponde ao modelo equivalente de Kapp com uma carga Z_c . Este será o modelo utilizado na caracterização da máquina em carga, no presente capítulo.

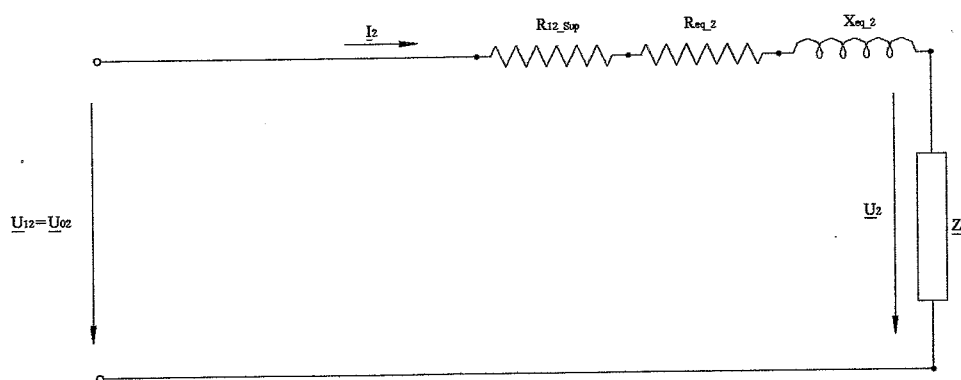


Figura 6. 2 : Modelo equivalente de Kapp por fase, com uma carga Z_c .

6.1.2.1.1 – Caracterização do modelo com uma carga Z_c indutiva

Considera-se que a alimentação do circuito primário é constante ($\underline{U}_1$ é constante), logo, a tensão secundária em vazio também é constante ($\underline{U}_{02}$ é constante).

A figura 6.3, abaixo indicada, representa a expressão matemática de tensões (6.4):

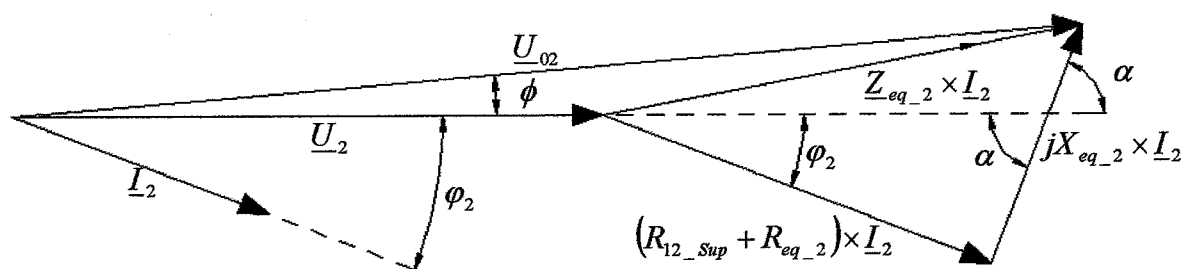


Figura 6.3 : Diagrama representativo das tensões no modelo de Kapp, com cargas indutivas

(Nota: O diagrama não se encontra à escala. Na realidade, as quedas de tensão na série de resistências $(R_{12_sup} + R_{eq_2})$ e na reactância combinada de fuga dos enrolamentos X_{eq_2} , apresentam valores extremamente baixos)

Da projecção dos vectores que representam os termos da expressão matemática (6.4), segundo a direcção do vector $\underline{U}_2$, resulta a seguinte expressão(6.5):

$$U_{02} \cos \phi - U_2 = (R_{12_sup} + R_{eq_2}) \times I_2 \times \cos \phi_2 + X_{eq_2} \times I_2 \times \sin \phi_2 \quad [V] \quad (6.5)$$

Onde:

$$(R_{12_sup} + R_{eq_2}) \times I_2 \quad [V] \quad (6.6)$$

$$X_{eq_2} \times I_2 \quad [V] \quad (6.7)$$

representam as quedas de tensão nas resistências suplementar e combinada dos enrolamentos, bem como a queda de tensão na reactância combinada de fuga nos enrolamentos, por fase.

Nos transformadores, normalmente, as referidas quedas de tensão (6.6) e (6.7) são muito pequenas quando comparadas com U_{02} e U_2 . Consequentemente, o ângulo de desfasamento entre U_{02} e U_2 também é pequeno, o que permite considerar que $\cos \phi = 1$ (aproximação de Kapp).

Com a referida aproximação, a expressão matemática (6.5) poderá ser simplificada conforme abaixo indicado (6.8) e (6.9), traduzindo assim a queda de tensão no modelo teórico com carga indutiva:

$$U_{02} - U_2 = (R_{12_sup} + R_{eq_2}) \times I_2 \times \cos \phi_2 + X_{eq_2} \times I_2 \times \sin \phi_2 \quad [V] \quad (6.8)$$

$$U_{02} - U_2 = [(R_{12_Sup} + R_{eq_2}) \times \cos \varphi_2 + X_{eq_2} \times \sin \varphi_2] \times I_2 \quad [V] \quad (6.9)$$

6.1.2.1.2 – Caracterização do modelo com uma carga $\underline{Z}_c$ capacitiva

Para este tipo carga, tal como foi referido para as cargas indutivas, considera-se que a alimentação do circuito primário é constante ($\underline{U}_1$ é constante), logo, a tensão secundária em vazio também é constante ($\underline{U}_{02}$ é constante).

Para este tipo de carga, a representação gráfica da expressão matemática de tensões (6.4), será conforme o indicado na seguinte figura (figura 6.4) :

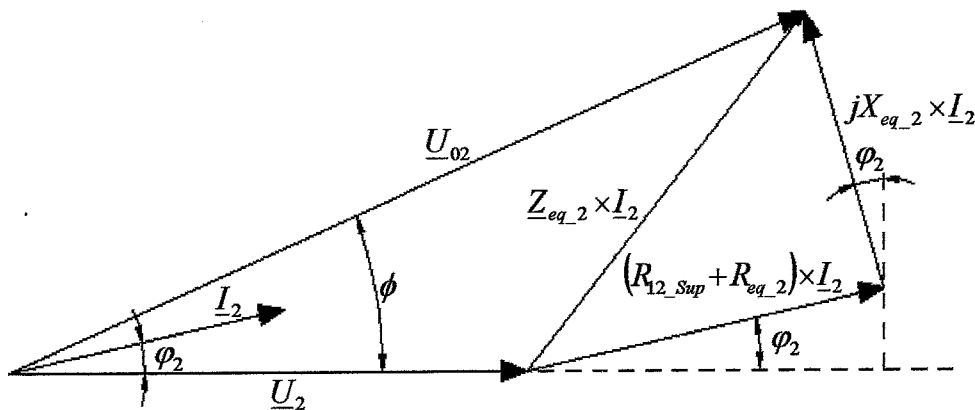


Figura 6.4 : Diagrama representativo das tensões no modelo de Kapp, com cargas capacitivas.

(Nota: O diagrama não se encontra à escala. Ver notas da figura 6.3)

Também para este caso, determina-se a projecção dos vectores que representam os termos da expressão matemática (6.4), segundo a direcção do vector $\underline{U}_2$. Da referida projecção resulta:

$$U_{02} \cos \phi - U_2 = (R_{12_Sup} + R_{eq_2}) \times I_2 \times \cos \varphi_2 - X_{eq_2} \times I_2 \times \sin \varphi_2 \quad [V] \quad (6.10)$$

Pelas mesmas razões já apresentadas no parágrafo 1.2.1.1 (Caracterização do modelo com uma carga $\underline{Z}_c$ indutiva) do presente capítulo, o ângulo de esfasamento entre $\underline{U}_{02}$ e $\underline{U}_2$ é muito pequeno, o que permite considerar que $\cos \phi = 1$.

Introduzindo na expressão matemática (6.10) a referida aproximação, obtém-se a expressão matemática (6.11) que traduz a queda de tensão no modelo teórico, com carga capacitiva:

$$\underline{U}_{02} - \underline{U}_2 = [(R_{12_Sup} + R_{eq_2}) \times \cos \phi_2 - X_{eq_2} \times \sin \phi_2] \times I_2 \quad [V] \quad (6.11)$$

6.1.2.1.3 – Caracterização do modelo com uma carga $\underline{Z}_c$ resistiva

Para este tipo carga, tal como foi referido para os outros casos, nos parágrafos 1.2.1.1 (Caracterização do modelo com uma carga $\underline{Z}_c$ indutiva) e 1.2.1.2 (Caracterização do modelo com uma carga $\underline{Z}_c$ capacitiva) deste capítulo, considera-se que a alimentação do circuito primário é constante ($\underline{U}_1$ é constante), logo, a tensão secundária em vazio também é constante ($\underline{U}_{02}$ é constante).

A figura 6.5, abaixo indicado, trata-se da representação gráfica da expressão matemática de tensões (expressão matemática 6.4):

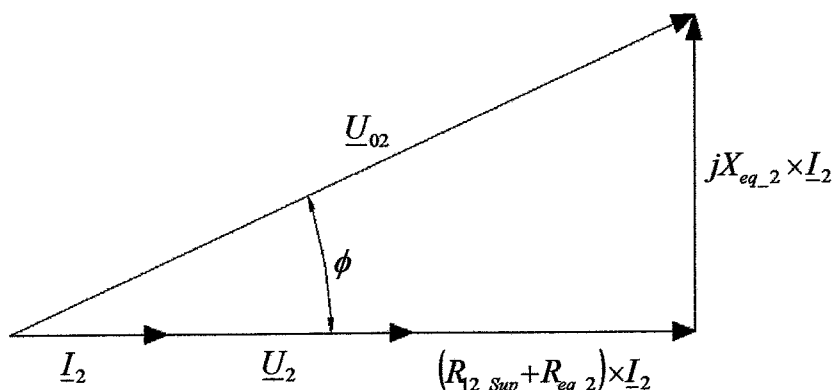


Figura 6.5 : Diagrama representativo das tensões no modelo de Kapp, com carga resistiva.

(Nota: O diagrama não se encontra à escala; ver notas na figura 6.3)

Neste caso, a projecção dos vectores que representam os termos da expressão matemática (6.4), segundo a direcção do vector $\underline{U}_2$, resulta a seguinte expressão:

$$\underline{U}_{02} \cos \phi - \underline{U}_2 = (R_{12_Sup} + R_{eq_2}) \times I_2 \quad [V] \quad (6.12)$$

Pelas mesmas razões já apresentadas nos parágrafos 1.2.1.1 (Caracterização do modelo com uma carga Z_c indutiva) e 1.2.1.2 (Caracterização do modelo com uma carga Z_c capacitiva) do presente capítulo, o ângulo de esfasamento entre U_{02} e U_2 é muito pequeno, o que permite considerar que $\cos \phi = 1$.

Introduzindo a referida aproximação na expressão (6.12), obtém-se a expressão matemática (6.13) que traduz a queda de tensão no modelo teórico, com carga resistiva:

$$U_{02} - U_2 = (R_{12_sup} + R_{eq_2}) \times I_2 \quad [V] \quad (6.13)$$

6.2 – Determinação do rendimento

O rendimento de uma máquina eléctrica, η , é definido pela razão entre a potência P_2 fornecida pela máquina e a potência absorvida P_1 (com P_1 e P_2 expressos em unidades de potência activa, kW ou W). Assim sendo, tem-se:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad [\%] \quad (6.14)$$

No caso dos transformadores de potência, devido ao facto do rendimento ser muito elevado, não se aplica o método de determinação directa do rendimento, através da medida directa das referidas potências, P_1 e P_2 , pois os erros de medida ocasionam grandes erros na determinação do rendimento. Nestes casos, o rendimento é determinado através do método indirecto, que consiste em expressar cada potência pela outra e pelas perdas. Sejam, P_{FE} as perdas no ferro, P_{cc} as perdas no cobre, vem que:

$$P_1 = P_2 + P_{FE} + P_{cc} \quad W \quad (6.15)$$

Obtém-se então:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{FE} + P_{cc}} \times 100 \quad [\%] \quad (6.16)$$

No presente estudo, pelo facto de serem já conhecidos os valores de corrente e tensões, provenientes de capítulos anteriores, é vantajoso expressar o rendimento em função de tensões correntes e factores de carga, como se indica na expressão matemática (6.17):

$$\eta = \frac{3 \times U_2 \times I_{2n} \times k_c \times \cos \varphi}{3 \times U_2 \times I_{2n} \times k_c \times \cos \varphi + P_f + k_c^2 \times P_{cc}} \times 100 \quad [\%] \quad (6.17)$$

Onde:

- k_c representa o factor de carga, definido como sendo o quociente entre a corrente pedida pela carga e a corrente nominal do transformador

$$k_c = \frac{I_2}{I_{2n}}$$

- U_2 é a tensão secundária em carga [V]
- $\cos \varphi$ é o factor de potência imposto pela carga

6.3 – Avaliação experimental do comportamento de um transformador em carga

Validação do modelo experimental definido a partir dos ensaios económicos

Validação dos modelos estabelecidos a partir de regras práticas e de leis matemáticas

Este estudo tem por objectivo a determinação experimental das características de um transformador trifásico, no funcionamento em carga, com indução constante e validação dos modelos estabelecidos, por comparação das características externas e rendimentos.

Para a avaliação experimental, foram aplicadas cargas no secundário do transformador (enrolamentos de menor tensão) e a alimentação feita pelo lado primário (enrolamentos de maior tensão). Para se manter a indução constante, a frequência e o valor eficaz da tensão de alimentação foram estipulados segundo a relação estabelecida no parágrafo 1.1.1 (Determinação da razão de variação tensão e frequência de modo a manter a indução constante) do Capítulo 4.

As cargas aplicadas foram de predominância: Indutiva; Capacitiva e Resistiva.

Para a determinação das características externas, tendo em consideração o tipo de carga aplicada, foram utilizadas as expressões matemáticas (6.9), (6.11) e (6.13), estabelecidas nos parágrafos 1.2.1.1, 1.2.1.2 e 1.2.1.3 do capítulo 6.

Para a determinação dos rendimentos, utilizou-se a expressão matemática (6.17) preconizada no parágrafo 2, do presente capítulo.

No caso de cargas capacitivas, devido ao facto do banco de condensadores utilizado não possuir uma variação de capacidades de forma contínua, mas sim por escalões de valores, não foi possível obter os factores de potência com valores iguais aos previstos. Contudo, as aproximações foram boas, conforme se pode verificar nas tabelas de valores, indicadas neste capítulo.

6.3.1 – Estratégias adoptadas na realização dos ensaios

Para a realização dos ensaios, com o transformador a alimentar cargas de predominância indutiva, capacitiva ou resistiva, foram adoptadas as seguintes estratégias:

- Variar a frequência e a tensão de alimentação segundo a relação (4.2) preconizada no parágrafo 1.1.1 do Capítulo 4, de modo a manter a indução constante;
- Variar a carga (indutiva, capacitiva ou resistiva) de modo a absorver uma dada corrente ao secundário do transformador, mantendo o factor de potência pretendido.
- Efectuar as experiências como se tratasse de uma rede primária de capacidade infinita, ou seja, não admitir quedas da tensão da rede. Para tal, após estabelecer a tensão de alimentação, a carga necessária para absorver a corrente pretendida e o factor de potência, deve-se verificar se houve alguma queda de tensão primária. Caso houver a referida queda, deve-se reajustar a tensão de alimentação, a corrente e o factor de potência para os valores pretendidos.

6.3.2 – Avaliação experimental do comportamento em carga, do transformador de ligação Yy

6.3.2.1 – Determinação da característica externa e de rendimento com cargas indutivas, à frequência de 45Hz e factor de potência 0.8

Na tabela 6.1, encontram-se os parâmetros da máquina que serviram de base para a determinação dos valores numéricos indicados nas tabelas 6.2 e 6.3.

Nas referidas tabelas, também estão registados os valores das características externas medidas nos ensaios em carga, valores numéricos de características externas e valores numéricos de rendimento.

Tabela 6.1 : Grandezas impostas e parâmetros do modelo (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)

Grandezas impostas nos ensaios					Parâmetros e grandezas do modelo				Grandeza experimental
f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	Cos φ ₂	Sin φ ₂	R _{12_Sup} (mΩ)	R _{eq} (mΩ)	X _{eq} (mΩ)		U _{2_carga} (V)
45	163,4	1,628	0,8	0,6	51,69	71,08	78,22		162,6
45	163,4	5,200	0,8	0,6	51,69	71,08	78,22		161,9
45	163,4	6,731	0,8	0,6	51,69	71,08	78,22		161,4
45	163,4	10,367	0,8	0,6	51,69	71,08	78,22		160,8
45	163,4	13,557	0,8	0,6	51,69	71,08	78,22		160,1
45	163,4	15,102	0,8	0,6	51,69	71,08	78,22		159,6
45	163,4	18,563	0,8	0,6	51,69	71,08	78,22		158,8
45	163,4	22,576	0,8	0,6	51,69	71,08	78,22		157,9
45	163,4	25,160	0,8	0,6	51,69	71,08	78,22		157,4
45	163,4	30,570	0,8	0,6	51,69	71,08	78,22		156,1

Tabela 6.2 : Tabela resumo das características externas e desvios (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)

f (Hz)	I ₂ (A)	Ensaio U ₂ (I ₂) (V)	Pelo modelo Experimental		Por Regras Práticas		Pelas Leis Matemáticas	
			U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)
45	1.628	162.6	163.16	0.34	163.16	0.34	163.16	0.34
45	5.200	161.9	162.65	0.46	162.65	0.46	162.64	0.45
45	6.731	161.4	162.42	0.63	162.43	0.63	162.42	0.63
45	10.367	160.8	161.9	0.68	161.9	0.68	161.89	0.67
45	13.557	160.1	161.43	0.82	161.44	0.83	161.43	0.82
45	15.102	159.6	161.21	1	161.21	1.00	161.20	0.99
45	18.563	158.8	160.71	1.19	160.71	1.19	160.70	1.18
45	22.576	157.9	160.12	1.39	160.13	1.39	160.12	1.39
45	25.160	157.4	159.75	1.47	159.76	1.48	159.74	1.46
45	30.570	156.1	158.96	1.8	158.98	1.81	158.95	1.79

Onde:

U₂(I₂) – Representa a característica externa da máquina [V];

Tabela 6.3 : Tabela resumo dos rendimentos e desvios (Transformador de ligação Yy)
(Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)

f (Hz)	I_2 (A)	Ensaio η (%)	Pelo modelo Experimental		Por Regras Práticas		Pelas Leis Matemáticas	
			η (%)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	1.628	77.88	78.02	0.18	78.02	0.18	78.00	0.15
45	5.200	91.15	91.23	0.09	91.23	0.09	91.22	0.08
45	6.731	92.62	92.69	0.08	92.69	0.08	92.69	0.08
45	10.367	94.17	94.23	0.06	94.23	0.06	94.23	0.06
45	13.557	94.62	94.68	0.06	94.68	0.06	94.67	0.05
45	15.102	94.68	94.76	0.08	94.76	0.08	94.75	0.07
45	18.563	94.66	94.74	0.08	94.74	0.08	94.73	0.07
45	22.576	94.43	94.52	0.10	94.52	0.10	94.51	0.08
45	25.160	94.21	94.31	0.11	94.31	0.11	94.30	0.10
45	30.570	93.65	93.78	0.14	93.78	0.14	93.76	0.12

6.3.2.1.1 – Representação gráfica das características externas provenientes de ensaios e de modelos estabelecidos

Representações gráficas dos rendimentos

A figura 6.6 abaixo indicada, corresponde à representação gráfica das características externas apresentadas.

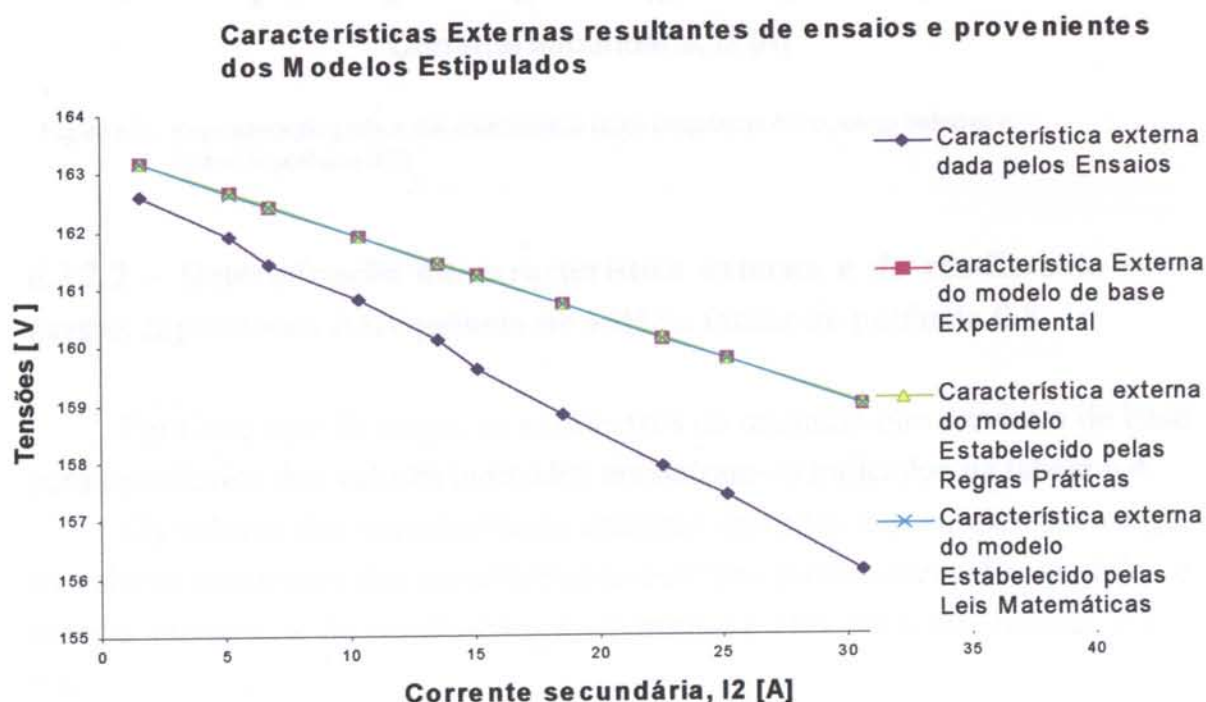


Figura 6.6 : Representação gráfica das características externas (com frequência 45Hz, carga indutiva e factor de potência 0,8)

A figura 6.7 abaixo indicada, corresponde à representação gráfica dos rendimentos apresentados na tabela 6.3.

Curvas de Rendimentos provenientes de ensaios e dos Modelos Estabelecidos

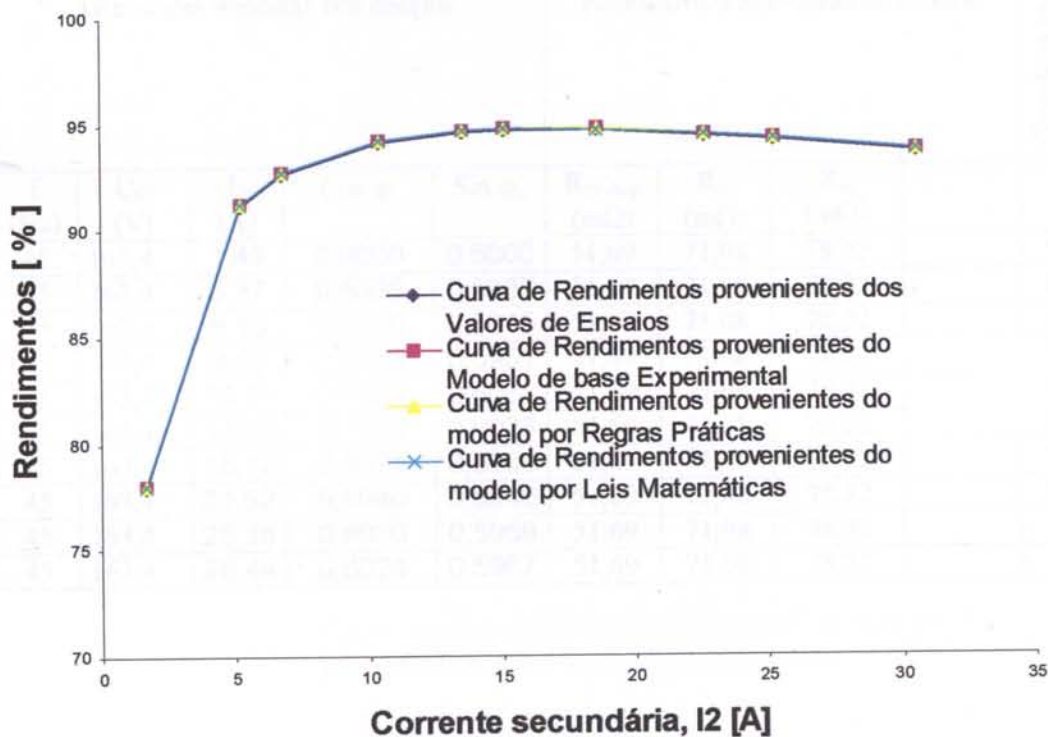


Figura 6.7 : Representação gráfica dos rendimentos (com frequência 45Hz, carga indutiva e factor de potência 0,8)

6.3.2.2 – Determinação da característica externa e de rendimento com cargas capacitivas, à frequência de 45Hz e factor de potência 0.8

Para este tipo de carga, os parâmetros da máquina que serviram de base para os cálculos dos valores indicados encontram-se indicados na tabela 6.4.

Os valores das características externas medidas nos ensaios em carga, os valores numéricos das características externas provenientes dos modelos e valores numéricos de rendimento encontram-se indicados nas tabelas 6.5 e 6.6.

Tabela 6.4 : Grandezas impostas e parâmetros do modelo (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,8; carga capacitiva)

Grandezas impostas nos ensaios					Parâmetros e grandezas do modelo				Grandeza experimental (medida na carga)
f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	Cos φ ₂	Sin φ ₂	R _{l2_Sup} (mΩ)	R _{eq} (mΩ)	X _{eq} (mΩ)		U ₂ (V)
45	163,4	1,49	0,8000	0,6000	51,69	71,08	78,22		163,1
45	163,4	5,37	0,8025	0,5967	51,69	71,08	78,22		162,8
45	163,4	6,18	0,8135	0,5815	51,69	71,08	78,22		162,6
45	163,4	9,66	0,8036	0,5951	51,69	71,08	78,22		162,4
45	163,4	13,15	0,7956	0,6058	51,69	71,08	78,22		162,3
45	163,4	14,98	0,7982	0,6023	51,69	71,08	78,22		162,1
45	163,4	18,12	0,8074	0,5900	51,69	71,08	78,22		161,8
45	163,4	21,92	0,8040	0,5946	51,69	71,08	78,22		161,5
45	163,4	25,15	0,8030	0,5959	51,69	71,08	78,22		161,2
45	163,4	28,44	0,8024	0,5967	51,69	71,08	78,22		161,1

Tabela 6.5 : Tabela resumo das características externas e desvios (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,8; carga capacitiva)

f (Hz)	I ₂ (A)	Ensaio U ₂ (I ₂) (V)	Pelo modelo Experimental		Por Regras Práticas		Pelas Leis Matemáticas	
			U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)
45	1.490	163.1	163.32	0.13	163.32	0.13	163.32	0.13
45	5.370	162.8	163.12	0.2	163.12	0.2	163.12	0.2
45	6.180	162.6	163.06	0.28	163.08	0.29	163.06	0.28
45	9.660	162.4	162.9	0.31	162.9	0.31	162.9	0.31
45	13.150	162.3	162.74	0.27	162.72	0.26	162.74	0.27
45	14.980	162.1	162.64	0.33	162.63	0.33	162.64	0.33
45	18.120	161.8	162.44	0.39	162.46	0.41	162.44	0.39
45	21.920	161.5	162.26	0.47	162.27	0.47	162.25	0.46
45	25.150	161.2	162.09	0.55	162.1	0.56	162.09	0.55
45	28.440	161.1	161.93	0.51	161.93	0.51	161.92	0.51

Tabela 6.6 : Tabela resumo dos rendimentos e desvios (Transformador de ligação Yy)
(Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,8; carga capacitiva)

f (Hz)	I ₂ (A)	Ensaio η (%)	Pelo modelo Experimental		Por Regras Práticas		Pelas Leis Matemáticas	
			η (%)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	1.490	76.4	76.51	0.14	76.51	0.14	76.49	0.12
45	5.370	91.43	91.48	0.05	91.46	0.03	91.48	0.05
45	6.180	92.35	92.4	0.05	92.28	-0.08	92.39	0.04
45	9.660	94.07	94.11	0.04	94.09	0.02	94.1	0.03
45	13.150	94.62	94.66	0.04	94.69	0.07	94.65	0.03
45	14.980	94.75	94.78	0.03	94.79	0.04	94.78	0.03
45	18.120	94.81	94.85	0.04	94.8	-0.01	94.84	0.03
45	21.920	94.61	94.66	0.05	94.63	0.02	94.65	0.04
45	25.150	94.36	94.41	0.05	94.39	0.03	94.4	0.04
45	28.440	94.06	94.11	0.05	94.09	0.03	94.1	0.04

6.3.2.2.1 – Representação gráfica das características externas provenientes de ensaios e de modelos estabelecidos

Representações gráficas dos rendimentos

Na figura 6.8 apresenta-se a representação gráfica das características externas apresentadas na tabela 6.5.

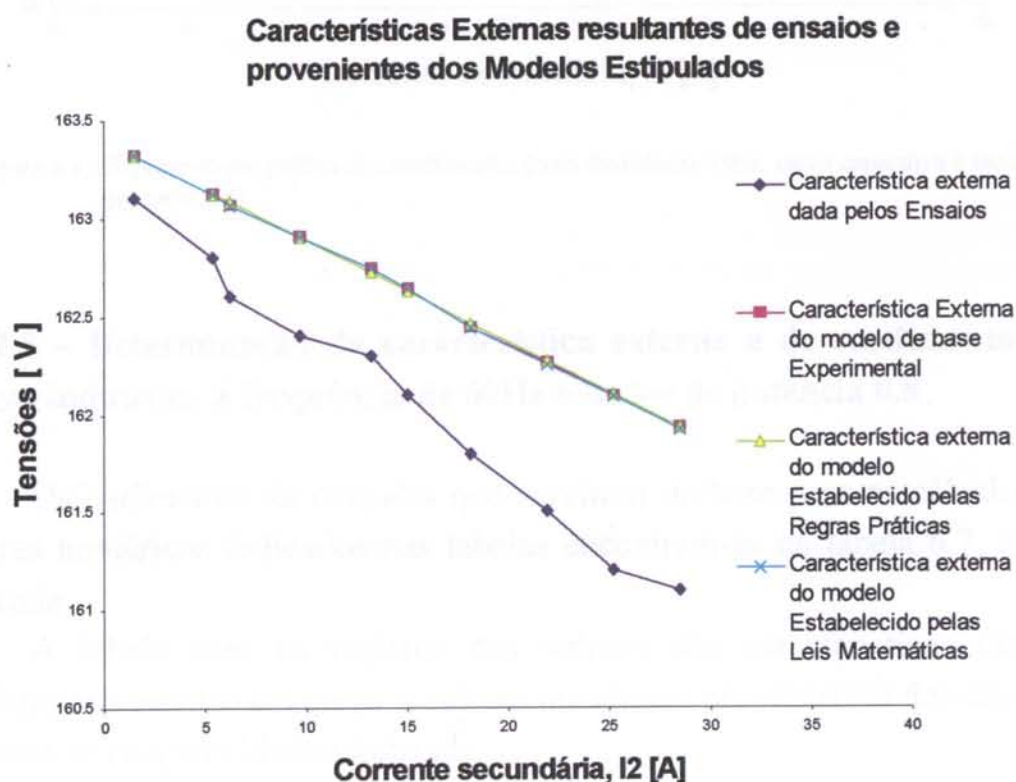


Figura 6.8 : Representação gráfica das características externas (com frequência 45Hz, carga capacitiva e factor de potência 0,8)

Os rendimentos apresentados na tabela 6.6, encontram-se sob a forma gráfica na figura 6.9 abaixo indicada.

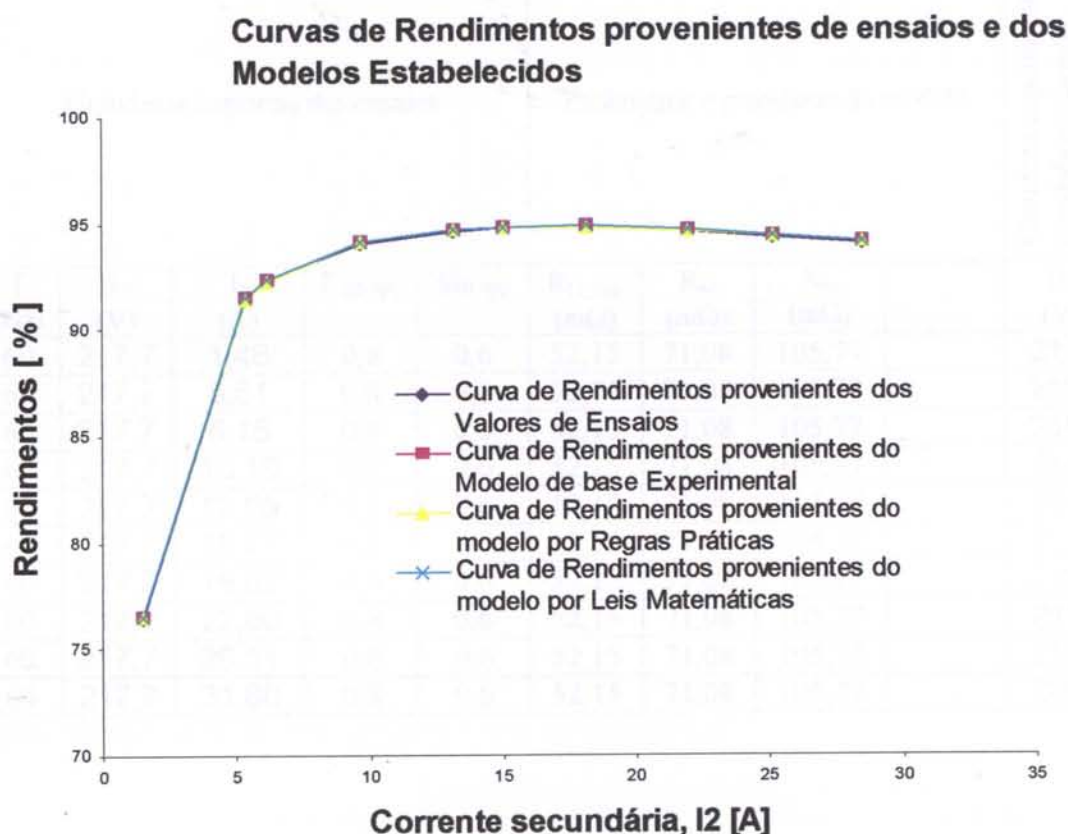


Figura 6.9 : Representação gráfica dos rendimentos (com frequência 45Hz, carga capacitiva e factor de potência 0,8)

6.3.2.3 – Determinação da característica externa e de rendimento com cargas indutivas, à frequência de 60Hz e factor de potência 0.8

Os parâmetros da máquina que serviram de base para os cálculos dos valores numéricos indicados nas tabelas encontram-se na tabela 6.7, abaixo indicada:

A tabela com os registos dos valores das características externas medidas nos ensaios em carga e valores numéricos provenientes dos modelos, também se encontra abaixo indicada.

Tabela 6.7 : Grandezas impostas e parâmetros do modelo (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 60Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)

Grandezas impostas nos ensaios					Parâmetros e grandezas do modelo				Grandeza experimental (medida na carga)
f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	Cos φ ₂	Sin φ ₂	R _{12_Sup} (mΩ)	R _{eq} (mΩ)	X _{eq} (mΩ)		
60	217,7	1,48	0,8	0,6	52,15	71,08	105,77		217,1
60	217,7	5,51	0,8	0,6	52,15	71,08	105,77		216,2
60	217,7	6,15	0,8	0,6	52,15	71,08	105,77		216,0
60	217,7	10,19	0,8	0,6	52,15	71,08	105,77		214,9
60	217,7	13,06	0,8	0,6	52,15	71,08	105,77		214,2
60	217,7	15,77	0,8	0,6	52,15	71,08	105,77		213,3
60	217,7	19,02	0,8	0,6	52,15	71,08	105,77		212,6
60	217,7	22,86	0,8	0,6	52,15	71,08	105,77		211,6
60	217,7	26,11	0,8	0,6	52,15	71,08	105,77		210,7
60	217,7	31,80	0,8	0,6	52,15	71,08	105,77		209,0

Tabela 6.8 : Tabela resumo das características externas e desvios (Transformador de ligação Yy) (Frequência; 60Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)

f (Hz)	I ₂ (A)	Ensaio U ₂ (I ₂) (V)	Pelo modelo Experimental		Por Regras Práticas		Pelas Leis Matemáticas	
			U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)
60	1,480	217,1	217,46	0,17	217,46	0,17	217,46	0,17
60	5,510	216,2	216,81	0,28	216,81	0,28	216,81	0,28
60	6,150	216	216,7	0,32	216,71	0,33	216,7	0,32
60	10,190	214,9	216,05	0,53	216,06	0,54	216,05	0,53
60	13,060	214,2	215,58	0,64	215,6	0,65	215,58	0,64
60	15,770	213,3	215,14	0,86	215,17	0,87	215,14	0,86
60	19,020	212,6	214,62	0,94	214,64	0,95	214,62	0,94
60	22,860	211,6	214	1,12	214,03	1,14	213,99	1,12
60	26,110	210,7	213,47	1,3	213,51	1,32	213,47	1,3
60	31,800	209	212,55	1,67	212,59	1,69	212,54	1,67

Tabela 6.9 : Tabela resumo dos rendimentos e desvios (Transformador de ligação Yy)
(Frequência; 60Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)

f	I ₂	Ensaio	Pelo modelo Experimental		Por Regras Práticas		Pelas Leis Matemáticas	
			η	Desvio	η	Desvio	η	Desvio
(Hz)	(A)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
60	1,480	75,3	75,39	0,12	75,34	0,05	75,31	0,01
60	5,510	91,34	91,39	0,05	91,37	0,03	91,36	0,02
60	6,150	92,04	92,08	0,04	92,07	0,03	92,06	0,02
60	10,190	94,29	94,34	0,05	94,33	0,04	94,32	0,03
60	13,060	94,9	94,94	0,04	94,93	0,03	94,93	0,03
60	15,770	95,15	95,21	0,06	95,2	0,05	95,2	0,05
60	19,020	95,25	95,31	0,06	95,3	0,05	95,3	0,05
60	22,860	95,18	95,25	0,07	95,25	0,07	95,24	0,06
60	26,110	95,04	95,11	0,07	95,11	0,07	95,11	0,07
60	31,800	94,65	94,75	0,11	94,75	0,11	94,75	0,11

6.3.2.3.1 – Representação gráfica das características externas provenientes de ensaios e de modelos estabelecidos

Representações gráficas dos rendimentos

A figura 6.10 abaixo indicada, corresponde à representação gráfica das características externas apresentadas na tabela 6.8.

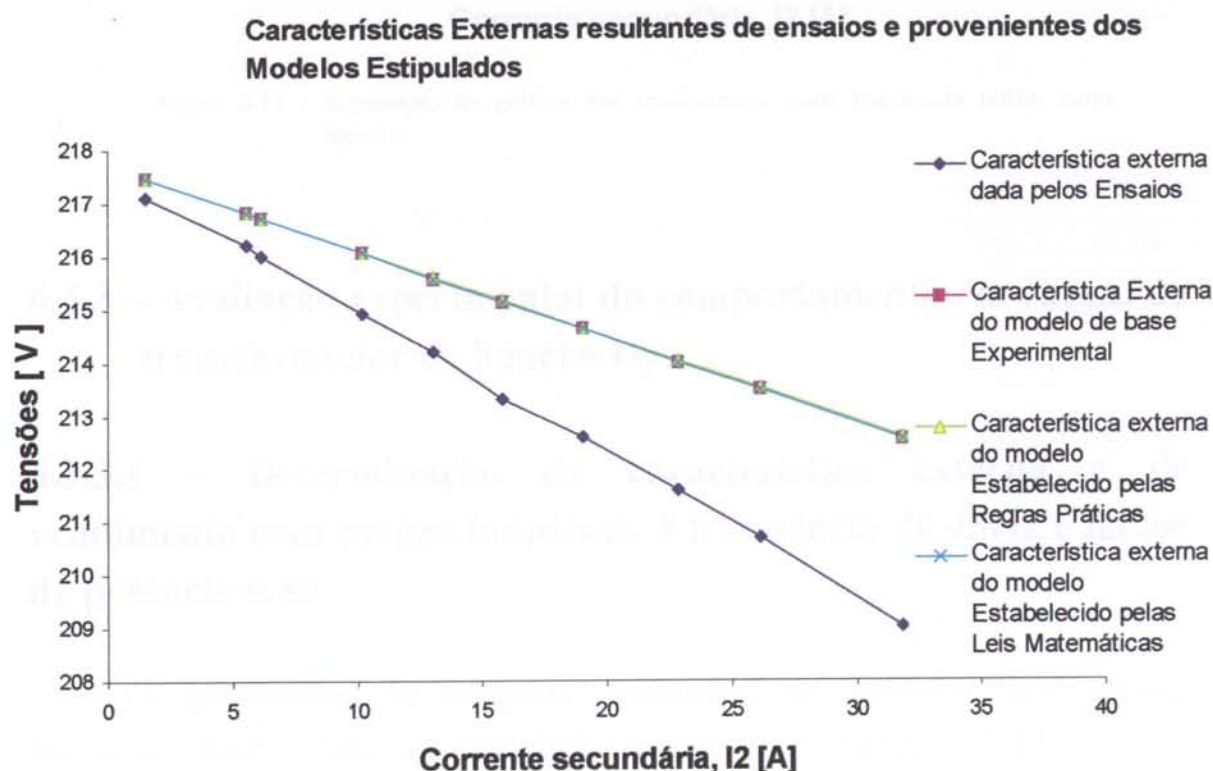


Figura 6.10 – Representação gráfica das características externas (com frequência 60Hz, carga indutiva e factor de potência 0,8)

A figura 6.11 abaixo indicada, corresponde à representação gráfica dos rendimentos apresentados na tabela 6.9.

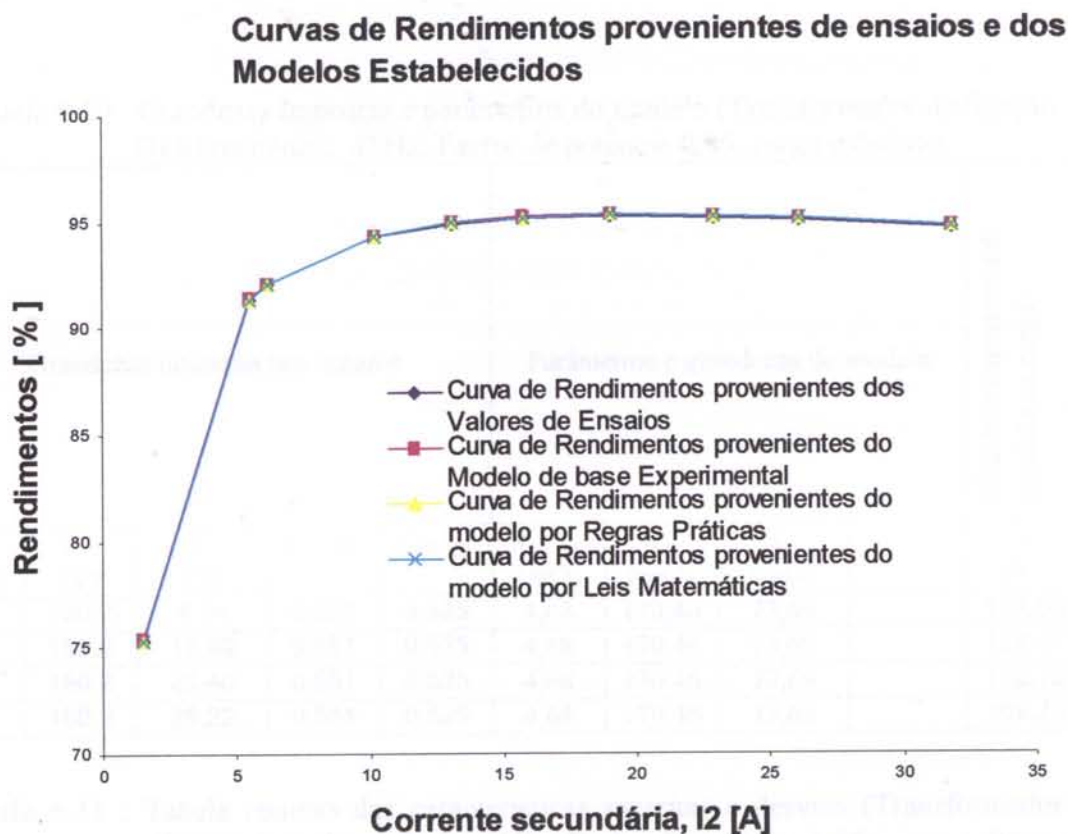


Figura 6.11 : Representação gráfica dos rendimentos (com frequência 60Hz, carga indutiva)

6.3.3 – Avaliação experimental do comportamento em carga, do transformador de ligação Dy

6.3.3.1 – Determinação da característica externa e de rendimento com cargas indutivas, à frequência de 45Hz e factor de potência 0.85

Os parâmetros da máquina, utilizados nos cálculos dos valores numéricos abaixo indicados nas tabelas, encontram-se na tabela 6.10.

Neste parágrafo, também se encontra a tabela com os registro dos valores das características externas medidas nos ensaios em carga e valores numéricos provenientes dos modelos.

Tabela 6.10 : Grandezas impostas e parâmetros do modelo (Transformador de ligação Dy)(Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,85; carga indutiva)

Grandezas impostas nos ensaios					Parâmetros e grandezas do modelo			Grandeza experimental (medida na carga)
f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	Cos φ_2	Sin φ_2	R _{12, Sup} (m Ω)	R _{eq} (m Ω)	X _{eq} (m Ω)	
45	180,2	4,14	0,851	0,525	4,68	170,46	73,69	177,50
45	180,2	18,99	0,851	0,525	4,68	170,46	73,69	172,87
45	180,2	21,40	0,851	0,525	4,68	170,46	73,69	172,15
45	180,2	28,22	0,851	0,525	4,68	170,46	73,69	169,79

Tabela 6.11 : Tabela resumo das características externas e desvios (Transformador de ligação Dy) (Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,85; carga indutiva)

f (Hz)	I ₂ (A)	Ensaio U ₂ (I ₂) (V)	Pelo modelo Experimental		Por Regras Práticas		Pelas Leis Matemáticas	
			U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)
45	4.140	177.5	179.42	1.07	179.43	1.08	179.42	1.07
45	18.990	172.87	176.63	2.13	176.68	2.16	176.63	2.13
45	21.400	172.15	176.18	2.29	176.23	2.32	176.18	2.29
45	28.220	169.79	174.9	2.92	174.96	2.95	174.9	2.92

Tabela 6.12 : Tabela resumo dos rendimentos e desvios (Frequência; 45Hz; Factor de potência 0,85; carga indutiva)

f (Hz)	I ₂ (A)	Ensaio η (%)	Pelo modelo Experimental		Por Regras Práticas		Pelas Leis Matemáticas	
			η (%)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	4.140	92.67	92.76	0.1	92.33	-0.37	92.75	0.09
45	18.990	94.79	94.9	0.12	94.59	-0.21	94.89	0.11
45	21.400	94.49	94.6	0.12	94.28	-0.22	94.6	0.12
45	28.220	93.46	93.63	0.18	93.25	-0.23	93.63	0.18

6.3.3.1.1 – Representação gráfica das características externas provenientes de ensaios e de modelos estabelecidos

Representações gráficas dos rendimentos

A figura 6.12 abaixo indicada, corresponde à representação gráfica das características externas apresentadas na tabela 6.11.

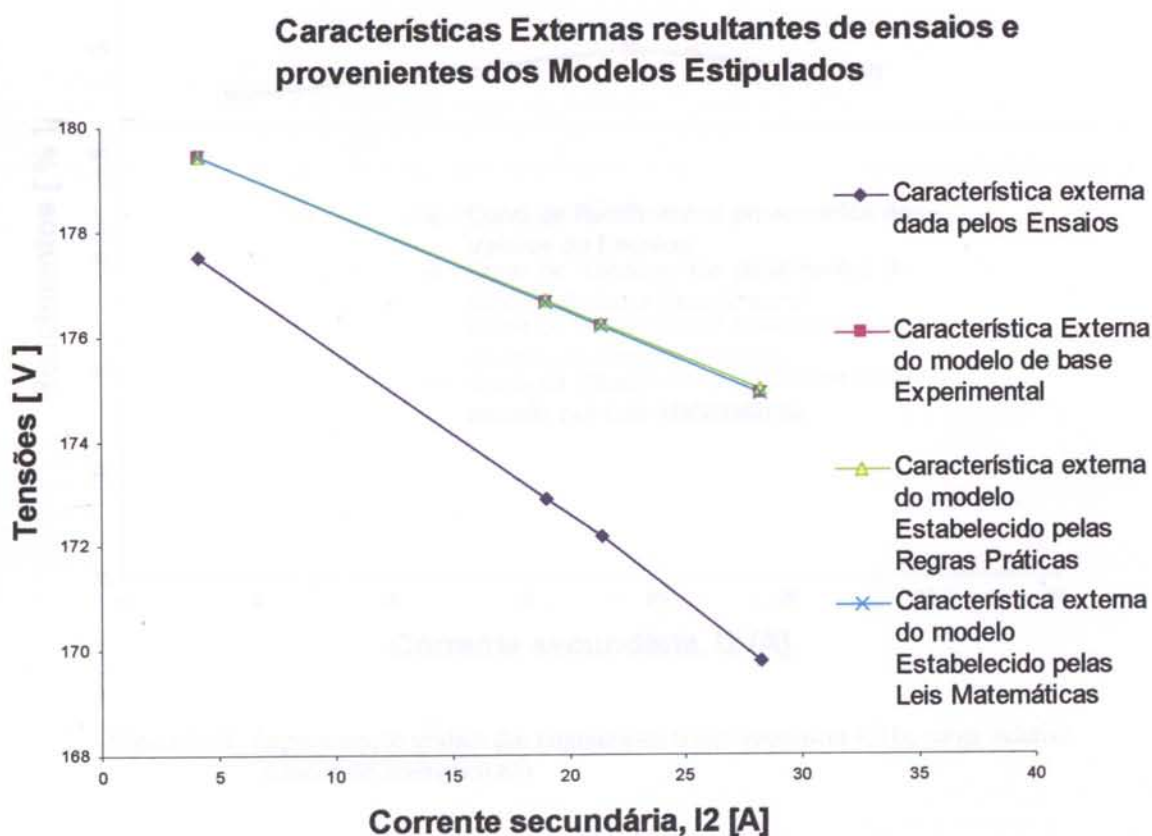


Figura 6.12 : Representação gráfica das características externas (com frequência 45Hz, carga indutiva e factor de potência 0,85)

A figura 6.13 abaixo indicada, corresponde à representação gráfica dos rendimentos apresentados na tabela 6.9.

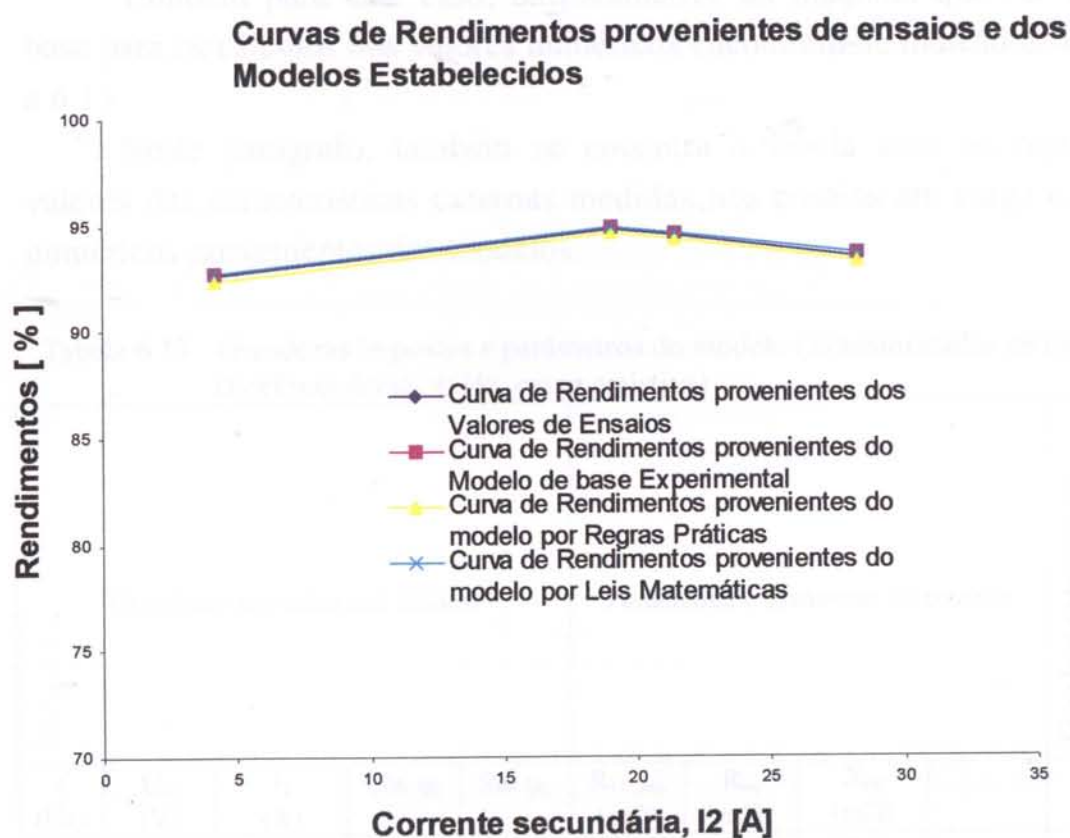


Figura 6.13 : Representação gráfica dos rendimentos (com frequência 45Hz, carga indutiva e factor de potência 0,85)

6.3.3.2 – Determinação da característica externa e de rendimento com cargas resistivas, à frequência de 45Hz

Também para este caso, os parâmetros da máquina que serviram de base para os cálculos dos valores numéricos encontram-se indicados na tabela a 6.13.

Neste parágrafo, também se encontra a tabela com os registro dos valores das características externas medidas nos ensaios em carga e valores numéricos provenientes dos modelos.

Tabela 6.13 : Grandezas impostas e parâmetros do modelo (Transformador de ligação Dy)(Frequência; 45Hz; carga resistiva)

Grandezas impostas nos ensaios					Parâmetros e grandezas do modelo				Grandeza experimental (medida na carga)
f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	Cos φ ₂	Sin φ ₂	R _{12_Sup} (mΩ)	R _{eq} (mΩ)	X _{eq} (mΩ)		U ₂ (V)
45	180,2	2,1	1	0	4,68	170,46	73,69		178,3
45	180,2	4,66	1	0	4,68	170,46	73,69		177,5
45	180,2	15,37	1	0	4,68	170,46	73,69		174,5

Tabela 6.14 : Tabela resumo das características externas e desvios (Transformador de ligação Dy) (Frequência; 45Hz; carga resistiva)

f (Hz)	I ₂ (A)	Ensaio U ₂ (I ₂) (V)	Pelo modelo Experimental		Por Regras Práticas		Pelas Leis Matemáticas	
			U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)
45	2,1	178,300	179,830	0,85	179,83	0,85	179,89	0,88
45	4,66	177,500	179,380	1,05	179,38	1,05	179,51	1,12
45	15,37	174,500	177,510	1,7	177,51	1,7	177,91	1,92

Tabela 6.15 : Tabela resumo dos rendimentos e desvios (Frequência; 45Hz; carga resistiva)

f (Hz)	I ₂ (A)	Ensaio η (%)	Pelo modelo Experimental		Por Regras Práticas		Pelas Leis Matemáticas	
			η (%)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	2,100	89,15	89,25	0,11	89,25	0,11	87,59	-1,78
45	4,660	94,21	94,28	0,07	94,28	0,07	93,34	-0,93
45	15,370	95,86	95,93	0,07	95,93	0,07	95,26	-0,63

6.3.3.2.1 – Representação gráfica das características externas provenientes de ensaios e de modelos estabelecidos

Representações gráficas dos rendimentos

A figura 6.14 abaixo indicada, corresponde à representação gráfica das características externas apresentadas na tabela 6.14.

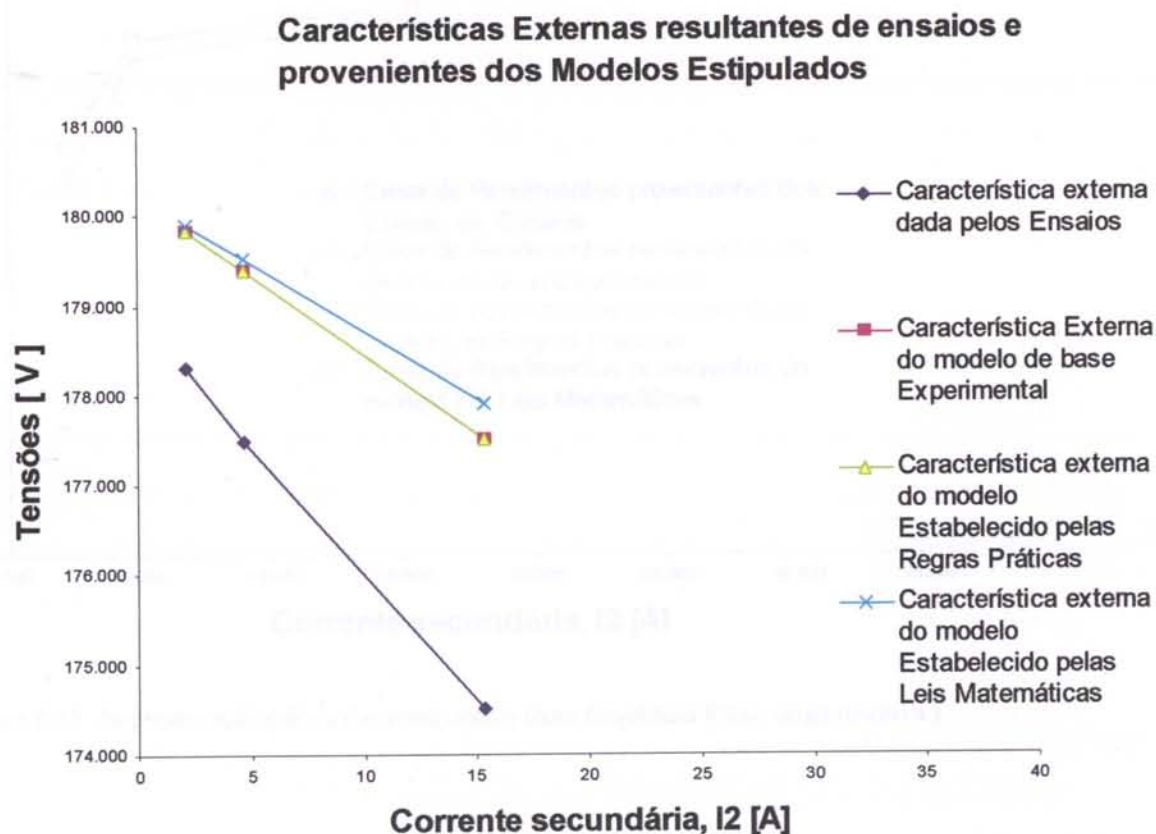


Figura 6.14 : Representação gráfica das características externas (com frequência 45Hz, carga resistiva)

A figura 6.15 abaixo indicada, corresponde à representação gráfica dos rendimentos apresentados na tabela 6.15.

Curvas de Rendimentos provenientes de ensaios e dos Modelos Estabelecidos

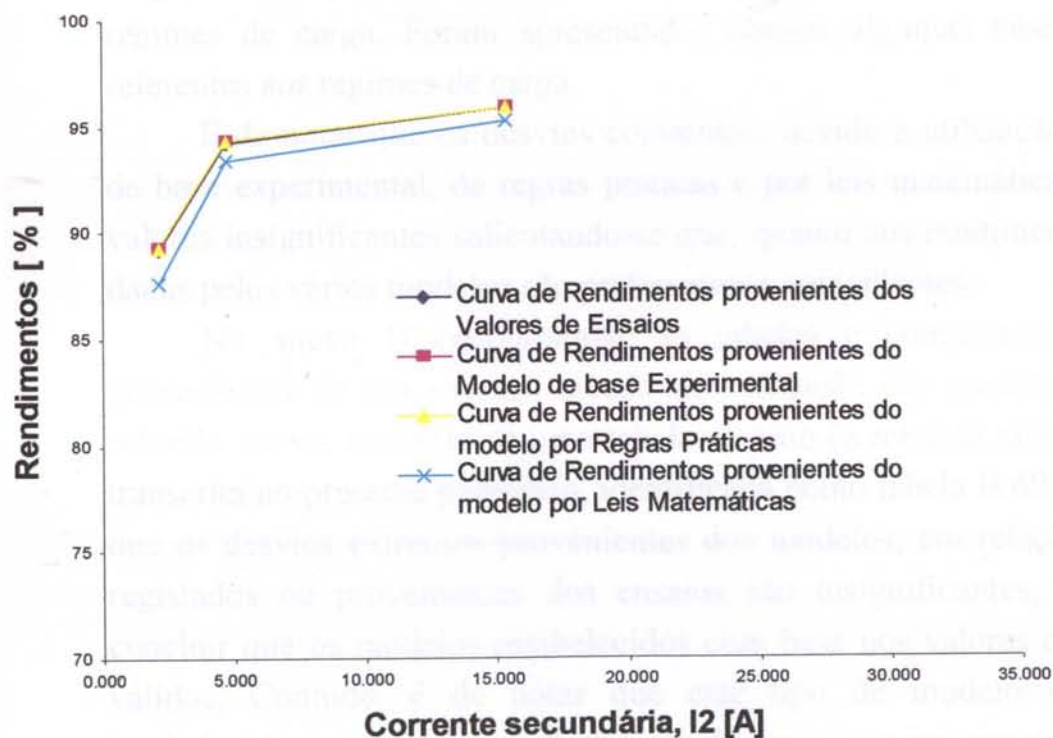


Figura 6.15 : Representação gráfica dos rendimentos (com frequência 45Hz, carga resistiva)

6.4 – Síntese e conclusões

Neste capítulo foram apresentadas comparações entre os valores medidos com o transformador em diversos regimes de funcionamento em carga e os valores numéricos obtidos através dos modelos nos referidos regimes de carga. Foram apresentados apenas algumas tabelas e gráficos referentes aos regimes de carga.

É de notar que os desvios cometidos, devido à utilização dos modelos de base experimental, de regras práticas e por leis matemáticas, apresentam valores insignificantes salientando-se que, quanto aos rendimentos, as curvas dadas pelos vários modelos são praticamente coincidentes.

No anexo B encontram-se as tabelas e comparações efectuadas, provenientes de um extenso estudo de validação dos modelos. No fim do referido anexo, encontra-se uma tabela resumo (a referida tabela encontra-se transcrita no presente parágrafo, identificada como tabela B.68), confirmando que os desvios extremos provenientes dos modelos, em relação aos valores registados ou provenientes dos ensaios são insignificantes, o que leva a concluir que os modelos estabelecidos com base nos valores de ensaios, são válidos. Contudo, é de notar que este tipo de modelo só poderá ser estabelecido a partir de resultados obtidos nos ensaios económicos ou seja, para estabelecer um modelo dever-se-à efectuar e registar valores de pelo menos um par de ensaios económicos. Os modelos estabelecidos por base experimental e os provenientes de leis matemáticas embora apresentem bons desvios em relação aos resultados dos ensaios, são muito trabalhosos. Na prática, o modelo estabelecido por regras práticas tem vantagens devido ao facto de ser mais simples e apresentar bons resultados.

Dos parágrafos 1.2.1.1 (Caracterização do modelo com uma carga $\underline{Z}_c$ indutiva) e 1.2.1.2 (Caracterização do modelo com uma carga $\underline{Z}_c$ capacitiva) deste capítulo, conclui-se, através das expressões matemáticas resultantes (6.9) e (6.11), que conhecendo a grandeza U_{02} (tensão secundária em vazio), I_2 (corrente de carga secundário), os parâmetros R_{12_Sup} , R_{eq_2} e X_{eq_2} , o factor de potência no secundário ($\cos \phi_2$), referentes a um dado transformador acoplado a uma carga indutiva ou capacitiva, poder-se-à determinar a característica externa da máquina.

Quando se tratar de carga resistiva, através da expressão matemática (6.13), do parágrafo 1.2.1.3 (Caracterização do modelo com uma carga Z_c resistiva) do presente capítulo, poder-se-à determinar as característica externa da máquina, desde que se conheça a grandeza U_{20} (tensão secundária em vazio), I_2 (corrente de carga secundário), e os parâmetros R_{12_Sup} , R_{eq_2} .

Tabela B.68 : Tabela resumo de desvios gerais das características externas e rendimentos dos diversos modelos comparados com os resultados experimentais

Transformador	Tipo de carga	Modelo	f (Hz)	cos φ_2	Desvios (%)			
					$U_{2_}(\text{medida na carga})$		η	
					Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Yy	Indutiva	Base experimental	45	0,8	0,34	1,83	0,06	0,18
Yy	Indutiva	Regras práticas	45	0,8	0,34	1,84	0,06	0,18
Yy	Indutiva	Leis Matemáticas	45	0,8	0,34	1,83	0,05	0,15
Yy	Capacitiva	Base experimental	45	0,8	0,13	0,55	0,03	0,14
Yy	Capacitiva	Regras práticas	45	0,8	0,13	0,56	-0,08	0,14
Yy	Capacitiva	Leis Matemáticas	45	0,8	0,13	0,55	0,03	0,12
Yy	Capacitiva	Base experimental	45	0	-0,55	0,18	-0,15	0,63
Yy	Capacitiva	Regras práticas	45	0	-0,56	0,18	-0,15	0,63
Yy	Capacitiva	Leis Matemáticas	45	0	-0,55	0,18	-0,26	0,63
Yy	Indutiva	Base experimental	60	0,8	0,17	1,7	0,04	0,12
Yy	Indutiva	Regras práticas	60	0,8	0,17	1,72	0,03	0,11
Yy	Indutiva	Leis Matemáticas	60	0,8	0,17	1,69	0,01	0,11
Yy	Capacitiva	Base experimental	60	0,8	0,07	0,23	0,02	0,10
Yy	Capacitiva	Regras práticas	60	0,8	0,07	0,22	0,01	0,04
Yy	Capacitiva	Leis Matemáticas	60	0,8	0,07	0,25	0,00	0,03
Yy	Capacitiva	Base experimental	60	0	-0,93	0,11	-0,47	0,33
Yy	Capacitiva	Regras práticas	60	0	-0,96	0,11	-0,52	0,16
Yy	Capacitiva	Leis Matemáticas	60	0	-0,93	0,11	-0,97	0,00
Yy	Indutiva	Base experimental	65	0,8	0,36	1,2	0,05	0,14
Yy	Indutiva	Regras práticas	65	0,8	0,36	1,21	0,06	0,14
Yy	Indutiva	Leis Matemáticas	65	0,8	0,36	1,2	0,04	0,07
Dy	Indutiva	Base experimental	45	0,85	1,08	3,01	0,10	0,18
Dy	Indutiva	Regras práticas	45	0,85	1,09	3,04	-0,37	-0,21
Dy	Indutiva	Leis Matemáticas	45	0,85	1,08	3,01	0,09	0,18
Dy	Resistiva	Base experimental	45	1	0,86	1,72	0,07	0,11
Dy	Resistiva	Regras práticas	45	1	0,86	1,72	0,07	0,11
Dy	Resistiva	Leis Matemáticas	45	1	0,89	1,95	0,08	0,11
Dy	Indutiva	Base experimental	60	0,85	0,97	2,56	0,06	0,13
Dy	Indutiva	Regras práticas	60	0,85	0,97	2,59	0,06	0,10
Dy	Indutiva	Leis Matemáticas	60	0,85	0,97	2,57	0,04	0,06
Dy	Capacitiva	Base experimental	60	0,85	0,80	1,29	0,05	0,05
Dy	Capacitiva	Regras práticas	60	0,85	0,79	1,25	0,03	0,07
Dy	Capacitiva	Leis Matemáticas	60	0,85	0,79	1,24	0,01	0,05

CAPÍTULO 7

HARMÓNICOS NA ALIMENTAÇÃO DOS TRANSFORMADORES

Um harmónico ¹é uma corrente ou tensão sinusoidal cuja frequência é múltipla inteira da frequência fundamental da corrente ou da tensão de alimentação. Nestes casos a forma de onda da alimentação não é sinusoidal ou apresenta-se como uma sinusóide deformada.

Os harmónicos de corrente e tensão são originados pelas cargas-não-lineares ligadas ao sistema de energia. Como exemplo, apontam-se as seguintes cargas: arrancadores de motores eléctricos, variadores de velocidade, computadores, iluminação com controlo electrónico, equipamentos de soldadura, fontes de tensão não interruptíveis, conversores de frequência e rectificadores.

As distorções harmónicas causadas pelas referidas cargas, são formas de poluição nas redes eléctricas que poderão causar problemas caso a soma dos harmónicos de corrente forem superiores a determinados valores limites para funcionamento dos equipamentos.

Genericamente, os efeitos dos harmónicos poderão ser aquecimentos excessivos nos transformadores, cabos, motores, geradores e condensadores quando ligados na mesma fonte de alimentação com carga não linear.

¹ Em conformidade com a norma UNE EN 50160:1996

Num sistema com elevado conteúdo de harmónicos, os visores electrónicos podem entrar em funcionamento num modo intermitente; os disjuntores por sua vez podem ter disparos intempestivos; os computadores podem falhar e os instrumentos de medida podem aludir os operadores com falsas medidas.

Quando a causa dos referidos sintomas não é conhecida surge a necessidade de investigar a distorção harmónica no sistema de distribuição de energia eléctrica. Nestes casos, o primeiro passo consiste em determinar e caracterizar os diferentes tipos de carga bem como os pontos de ligação comum (PLC).

No caso dos transformadores, como já foi referido, os harmónicos afectam o funcionamento da máquina, aumentando as perdas e consequentemente aumentando também os aquecimentos. É de salientar que o funcionamento de um transformador em condições de aquecimento (ou carga) fora dos limites estipulados pelos fabricantes, provoca uma gradual decomposição química dos isolantes (tais como: papeis, cartões, polímeros, líquidos isolantes), com libertação de gases. Para casos de transformadores herméticos integrais, os referidos gases poderão provocar disparos intempestivos de protecções. Seja qual for o tipo de transformador, a referida decomposição química dos isolantes, diminui a vida útil da máquina.

No passado, no Caderno de Encargos para aquisição de um transformador constava a potência, as tensões primárias e secundárias, tensão de curto-circuito e caracterização ambiental do local de funcionamento (temperatura, interior ou exterior, humidade, atmosfera corrosiva ou não). Porém, hoje devido ao elevado consumo de equipamentos electrónicos, esta prática não é suficiente. Torna-se necessário incluir a caracterização do sistema, indicando a presença ou não de cargas não lineares significativas, incluindo a indicação do ponto de ligação comum de cargas e determinação do espectro de harmónicos (em frequência e amplitude relativamente à fundamental). O referido estudo deverá ser apresentado ao fabricante do transformador para que este projecte uma máquina capaz de funcionar nas referidas condições, sem entrar em regimes de sobrecarga e sobreensões.

7.1 – Os Efeitos dos Harmônicos na Alimentação dos transformadores

Um dos efeitos importantes devido à presença de harmônicos na alimentação dos transformadores é o aumento das perdas totais, originando um sobre-aquecimento da máquina, em comparação com o funcionamento em regime nominal.

Perdas por efeito de Joule:

Os transformadores são dimensionados para quando ligados a uma carga, para uma dada tensão nominal, fornecer a potência necessária para o funcionamento da referida carga. Se os harmônicos do sistema não forem considerados, a corrente eficaz solicitada pela carga poderá ser maior que aquela estipulada para o regime nominal do transformador. Consequentemente, haverá aumento de perdas de Joule (ver a demonstração teórica no anexo D) e sobre-aquecimentos do transformador.

Perdas devidas aos harmônicos da corrente, por efeito das correntes de Foucault :

Qualquer acessório metálico colocado sob influência de um campo magnético variável, terá uma corrente circular com tendência a anular o campo no interior do metal. A força electromotriz induzida, responsável pela circulação da referida corrente será proporcional à variação temporal do fluxo magnético:

$$e = - \frac{\partial \phi_{mg}}{\partial t} \quad [V] \quad (7.1)$$

Assim sendo, pode-se afirmar que a força electromotriz induzida será proporcional à variação e à frequência do fluxo magnético. Por conseguinte, as corrente induzidas serão proporcionais à frequência do harmónico e as perdas por efeito de Joule correspondentes, serão proporcionais ao quadrado da frequência do referido harmónico. Neste caso, é de notar que um harmónico de ordem elevada, mesmo sendo de baixa amplitude, poderá gerar perdas consideráveis.

Perdas no ferro devidas aos harmônicos da corrente:

Actualmente, auxiliados pelo equipamento informático existente, os fabricantes, podem construir máquinas de baixo custo material, provenientes de soluções optimizadas, com funcionamento a uma indução nominal próxima

da zona de saturação. Os fluxos magnéticos criados pelos harmônicos da corrente tendem a sobrepor ao fluxo magnético fundamental, aumentando o valor de pico do fluxo magnético resultante, entrando em funcionamento na zona de saturação da chapa magnética. Assim sendo, haverá um aumento de perdas no ferro. Os referidos aumentos de perdas serão verificados na parte experimental do presente capítulo.

Os transformadores imersos vulgares tipo ONAN devido à inércia térmica da grande quantidade de líquido dielétrico / refrigerante existente na cuba, reagem lentamente ao referido aumento de perdas. Nestes casos, os efeitos do aumento das perdas só serão notórios quando se tratar de uma sobrecarga de longa duração.

Quanto aos transformadores secos, tipo ANAN, são mais sensíveis ao aumento de perdas, pois não apresentam um dielétrico/ refrigerante capaz de absorver o calor inicial libertado devido à sobrecarga. Por esta razão, surgiram algumas normas com o intuito de desclassificar ou de estipular potência destes transformadores, quando se prevê o funcionamento sob influência de harmônicos.

Nota:

Identificação de símbolos de acordo com os métodos de arrefecimento

As normas CEI-76 e CEI-726, preconizam códigos para identificação dos transformadores conforme os métodos de arrefecimento dos mesmos. O código de identificação é constituído por quatro letras, conforme abaixo indicado:

- Primeira letra (designação do fluido interno para arrefecimento e isolamento, em contacto com os enrolamentos):
 - A --- Ar;
 - O --- Óleo mineral ou líquido isolante sintético com ponto de ignição inferior ou igual a 300°C;
 - K --- Líquido isolante com ponto de ignição superior a 300°C;
 - L --- Líquido isolante com ponto de ignição não mensurável.
- Segunda letra (indica o mecanismo de circulação do fluido interno):
 - N --- Circulação natural, por desequilíbrio térmico;
 - F --- Circulação forçada;

D --- Circulação forçada, do fluido proveniente de permutadores de calor, directamente nos enrolamentos principais.

- Terceira letra (designação do fluido externo para arrefecimento):

A --- Ar;

W --- Água;

- Quarta letra (indica o mecanismo de circulação do fluido externo):

N --- Circulação natural, por desequilíbrio térmico;

F --- Circulação forçada;

7.2 – Métodos auxiliares para caracterização dos transformadores secos sob influência de harmónicos

No presente estudo, serão abordados alguns métodos de determinação dos seguintes factores:

- Factor de desclassificação, F_d ;
- Factor para estimação de perdas suplementares, K .

Os fundamentos para a determinação dos referidos factores, encontram-se no Anexo D.

7.2.1 – Método Normalizado

O método Normalizado, consiste em estabelecer um factor K , para estipulação de perdas suplementares em regime não sinusoidal. As referidas perdas suplementares, serão estimadas através da multiplicação do factor K pelas perdas suplementares no regime com correntes sinusoidais.

É de notar que nos Estados Unidos da América, utilizam a designação “K – Rated transformers” para transformadores cuja potência foi estipulada em conformidade com o factor K e projectados com algumas características de concepção específicas para funcionamento em regimes de correntes não sinusoidais. Chama-se a atenção que só a estipulação da potência através do

referido método, não significa que o transformador seja capaz de eliminar os harmónicos existentes na rede.

O Método Normalizado baseia-se na corrente fundamental da carga para a determinação do factor K. Para aplicação do referido método, deve-se caracterizar o espectro de frequências, com um analisador de harmónicos (é de notar que os analisadores de harmónicos existentes no mercado, geralmente indicam as componentes harmónicas da corrente, em percentagem da corrente fundamental). O referido factor é determinado através da seguinte expressão matemática:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^n C_h^2 \times h^2}{\sum_{h=1}^n C_h^2} \quad (7.2)$$

É de salientar que as perdas suplementares no regime não sinusoidal seriam determinadas através da seguinte expressão matemática:

$$P_s = P_{SUP} \times K \quad [W] \quad (7.3)$$

Variáveis utilizadas nas expressões matemática (7.2) e (7.3) :

C_h - Conteúdo de harmónico por unidade da fundamental (pu);

h - Ordem do harmónico;

P_s - Perdas suplementares a considerar, tendo em conta o nível de harmónicos na rede onde o transformador será inserido (W);

P_{SUP} - Perdas suplementares no regime sinusoidal (W);

Na tabela 7.1, apresenta-se um exemplo de aplicação do método para um dado espectro de harmónicos, registado na carga alimentada por um transformador de 1000kVA.

Tabela 7.1 : Cálculo do factor K através do método Normalizado

Ordem do Harmónico	C_h [pu]	C_h^2 [pu] ²	h^2	$C_h^2 h^2$ [pu ²]
1	1.00	1.000	1	1.000
3	0.72	0.518	9	4.662
5	0.43	0.185	25	4.625
7	0.35	0.123	49	6.027
9	0.21	0.044	81	3.564
11	0.10	0.010	121	1.210
13	0.07	0.005	169	0.845
K= 11.636				

Neste exemplo, o factor K teria o valor aproximado, 12. Contudo, uma regra prática é escolher da tabela 7.2, o factor superior mais próximo do calculado.

Neste caso, as perdas suplementares do transformador, no regime não sinusoidal seria:

$$P_s = 13 \times P_{SUP} \quad [W]$$

7.2.1.1 – Valores do factor K e aplicações típicas

Tabela 7.2 : Factor K e aplicações típicas

Factor K	Aplicações típicas
1	Transformador normal para cargas sinusoidais, com o factor de distorção harmónica menos que 0.05
4	Equipamentos de soldadura e aquecimentos por indução; lâmpadas fluorescente
9	Não especificado
13	Equipamentos de Telecomunicações; Escolas e instalações de saúde
20	Equipamento de processamento de dados; Controladores de velocidade ajustáveis
30	Não especificado
40	Não especificado
50	Não especificado

7.2.2 – Regra preconizada pela publicação UTE C 52-114

Neste estudo far-se-à a abordagem do método, preconizado pela publicação/norma experimental UTE 52-114, para desclassificação de um transformador em funcionamento sob influência de harmónicos.

Como referido no parágrafo 2.1 do presente capítulo, também para aplicar este método, deve-se caracterizar o espectro de frequências, com um analisador de harmónicos. De seguida, deve-se efectuar o cálculo do factor F_d de acordo com a seguinte expressão matemática:

$$F_d = \left[1 + 0.1 \times \left(\sum_{h=1}^n h^{1,6} \times \left(\frac{C_h}{100} \right)^2 \right) \right]^{-0.5} \quad (7.4)$$

Onde:

C_h - é o conteúdo de harmónico em percentagem da fundamental (%);

h - como indicado no parágrafo 2.1, trata-se da ordem do harmónico;

A potência do transformador, adequada ao funcionamento numa rede com um dado espectro de frequências será:

$$S_k = S_s \times F_d \quad [VA] \quad (7.5)$$

Aplicando este método ao exemplo de espectro de frequência da tabela 7.1 e ao mesmo transformador apresentado no parágrafo 2.1 do presente capítulo, obtém-se um factor $F_d = 0,683$; logo, para o transformador funcionar neste regime, sem entrar em sobrecarga, deveria estar em funcionamento com a potência estipulada para 683kVA.

7.2.3 – Regra preconizada pelas Normas CENELEC e BS

As normas CENELEC (HD 428.4) e BS 7821- Parte 4, também preconizam a utilização de um método para desclassificação dos transformadores em funcionamento sob influência de harmónicos.

Também, para aplicação deste método, como já referido, deve-se previamente efectuar a caracterização harmónica da rede onde o

transformador deverá ser instalado. Segundo as referidas normas, o factor de desclassificação será então calculado através da seguinte expressão matemática:

$$F_d = \left[1 + \frac{e_p}{1 + e_p} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{n=2}^N h^q \left(\frac{I_h}{I} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (7.6)$$

Onde:

e_p – é a razão entre as perdas suplementares e as perdas de Joule em regime sinusoidal, conforme a expressão matemática D.25

do Anexo D : $e_p = \frac{P_{sn}}{RI_n^2}$

q - é um factor dependente do tipo de enrolamento secundário ($q=1,5$ para enrolamentos secundários em banda de cobre; $q=1,7$ para outros tipos de enrolamentos secundários – ver anexo D, parágrafo 3.1.2

I_h – é o harmónico da corrente, de ordem h (A);

I – é a componente fundamental da corrente (A);

É de notar que a desclassificação do transformador é efectuada conforme a expressão matemática (7.5) indicada no parágrafo 2.2 deste capítulo.

7.2.4 – Regra preconizada pela Norma CEI

A norma CEI 61378-1, apresenta o cálculo de perdas de um transformador sujeito a harmónicos na alimentação, por comparação com as perdas no regime sinusoidal.

Esta norma baseia-se no facto da corrente não sinusoidal aumentar as perdas por correntes de Foucault nos enrolamentos e perdas devidas aos fluxos de fuga que atingem a estrutura metálica da cuba dos transformadores imersos.

Neste caso, as perdas totais no transformador são divididas em várias parcelas conforme abaixo indicadas:

P_J - Perdas por efeito de Joule [W];

P_{FB} - Perdas por correntes de Foucault nos enrolamentos, [W];

P_{Lg} - Perdas nas ligações dos enrolamentos, [W];

P_{ff} - Perdas devidas aos fluxos de fuga que atingem a estrutura metálica da cuba dos transformadores imersos [W].

Definição das referidas parcelas de perdas em regime não sinusoidal:

- As Perdas por correntes de Foucault nos enrolamentos, no regime não sinusoidal, são calculadas através da seguinte expressão matemática:

$$P_{FB} = \sum_{h=1}^n P_{FBh} = P_{FB1} \times \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^2 \quad [W]$$

Onde:

P_{FBh} - Corresponde às perdas por efeito de Foucault devidas ao harmónico da corrente de ordem h, nos enrolamentos, [W];

P_{FB1} - Corresponde às perdas por efeito de Foucault devidas à corrente fundamental nos enrolamentos, [W];

I_h - Corresponde ao harmónico da corrente de ordem h, nos enrolamentos, [A];

I_1 - Corresponde à corrente fundamental, nos enrolamentos, [A].

h - Corresponde à ordem do harmónico da corrente.

- As Perdas por efeito de Foucault nas ligações dos enrolamentos, no regime não sinusoidal, são calculadas através da expressão matemática:

$$P_{Lg} = \sum_{h=1}^n P_{Lgh} = P_{Lg1} \times \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^{0.8} \quad [W]$$

Onde:

P_{Lgh} - Corresponde às perdas por efeito de Foucault nas ligações dos enrolamentos, devidas ao harmónico da corrente de ordem h , [W];

P_{Lg1} - Corresponde às perdas por efeito de Foucault nas ligações dos enrolamentos, devidas à corrente fundamental, [W];

- As Perdas devidas aos fluxos de fuga que atingem a estrutura metálica da cuba dos transformadores imersos no regime não sinusoidal, são determinadas através da expressão matemática :

$$P_{ff} = \sum_{h=1}^n P_{ffh} = P_{ff1} \times \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^{0.8} \quad [W]$$

Onde:

P_{ffh} - Corresponde às perdas devidas aos fluxos de fuga que atingem a estrutura metálica da cuba dos transformadores imersos no regime não sinusoidal, referentes ao harmónico da corrente de ordem h , [W];

P_{ff1} - Corresponde às perdas devidas aos fluxos de fuga que atingem a estrutura metálica da cuba dos transformadores imersos no regime não sinusoidal, referentes à corrente fundamental, [W];

Para um transformador sujeito a um regime sinusoidal, as perdas totais são calculadas pela seguinte expressão matemática:

$$P_{ts} = P_{J_1} + P_{FB_1} + P_{Lg_1} + P_{ff_1} \quad [W]$$

Para o caso de alimentação não sinusoidal de transformadores imersos, as perdas totais deverão ser calculadas conforme a seguinte expressão matemática:

$$P_{Lh} = P_{J_1} \times \left(\frac{I_L}{I_1} \right)^2 + P_{FB1} \times \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^2 + (P_{Lg1} + P_{ff1}) \times \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^{0.8} \quad [W]$$

Com:

$$I_L^2 = \sum_{h=1}^n I_h^2$$

Sendo I_L , a corrente eficaz total, com harmônicos [A].

Para transformadores secos, com alimentação não sinusoidal, as perdas por efeito de Foucault nas ligações dos enrolamentos (P_{Lg}) e as perdas devidas aos fluxos de fuga (P_{ff}), são consideradas nulas. Neste caso, as perdas totais são calculadas de acordo com a seguinte expressão matemática:

$$P_{Lh} = P_{J_1} \times \left(\frac{I_L}{I_1} \right)^2 + P_{FB1} \times \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^2 \quad [W]$$

7.3 – Comportamento dos transformadores em relação aos harmônicos de ordem elevada

7.3.1 – Modelização dos transformadores em relação aos harmônicos de ordem elevada

Para modelização dos transformadores a baixas frequências, considera-se um valor global para a impedância e desprezam-se as capacidades elementares dos enrolamentos.

Na modelização do transformador sob influência de harmônicos no sistema, consideram-se os seguintes parâmetros:

- A resistência dos condutores;
- As indutâncias próprias dos enrolamentos;
- As capacidades entre bobinas, entre espiras e em relação à massa.
- Indutancias elementares

Para casos com presença de altas frequências na alimentação, os efeitos das capacidades existentes são muito importantes e é conveniente modelizar o

transformador com circuitos elementares apresentando as resistências, indutâncias e capacidades.

Na figura abaixo indicada (figura 7.1), a título de exemplo, encontra-se modelizado um enrolamento simples com três camadas.

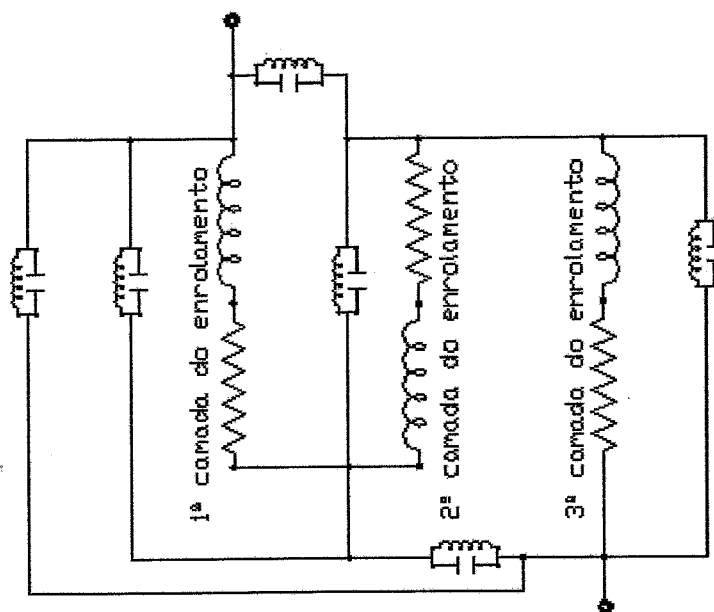


Figura 7.1 : Modelização de um enrolamento de três camadas

Pág. 34; Jean Pierre Bejot; Artigo: "Comportement d'un transformateur MT/BT en presence d'harmoniques de courant", RGE n° 7/92 – Julho de 1992 - GEC Alsthom

7.3.2 – Efeitos devidos aos harmônicos de ordem elevada nos transformadores

7.3.2.1 – Efeito pelicular nos condutores

Segundo o preconizado por Küpfmüller (1959, p.312 a 317), num condutor percorrido por uma corrente alternada, a densidade de corrente varia da seguinte forma:

- Para baixas frequências, a corrente se distribui uniformemente por toda a secção recta do condutor.
- Para altas frequências, a corrente tem a tendência de se distribuir junto à superfície do condutor.

O referido autor conclui que, para o caso de um condutor cilíndrico, percorrido por uma corrente de alta frequência, deve-se considerar a seguinte impedância : $R+jL_i\omega$

Onde:

R - traduz as perdas por efeito de Joule no condutor. Este parâmetro representa a resistência do condutor quando percorrido por uma corrente alternada;

L_i - é a indutância interior e traduz a contribuição do campo magnético para a indutância total.

O referido autor indica dois conjuntos de expressões matemáticas aproximadas, para a determinação de R e L_i , em função de um parâmetro designado por “ x ”.

O parâmetro “ x ” é calculado conforme a seguinte expressão:

$$x = \frac{1}{2} \times r_0 \sqrt{\pi f \gamma \mu}$$

Onde:

r_0 - é o raio do condutor [m];

f - é a frequência da corrente [Hz];

γ - é a condutividade do material condutor [Ω^{-1}/m];

μ - é a permeabilidade do vácuo [H/m];

Para $x < 1$ tem-se:

$$\frac{R}{R_0} = 1 + \frac{1}{3} \times x^4$$

$$\frac{L_i \omega}{R_0} = x^2 \times \left(1 - \frac{1}{6} \times x^4 \right)$$

Para $x > 1$ tem-se:

$$\frac{R}{R_0} = x + \frac{1}{4} + \frac{1}{64x}$$

$$\frac{L_i \omega}{R_0} = x - \frac{3}{64x} + \frac{3}{128x^2}$$

R_0 é a resistência determinada em corrente contínua, através da seguinte expressão matemática:

$$R_0 = \frac{l}{\pi \times r_0^2 \times \gamma}$$

Onde, l , representa o comprimento do condutor [m].

Salienta-se que estas variações de resistência e indutância, só apresentam valores significativos a partir da frequência 3000Hz o que corresponde a um harmónico da ordem 60. O analisador de harmónico utilizado (bem como os mais usuais no mercado) tem como limitação máxima a ordem de harmónico 25. Por esta razão, esta teoria apresentada no presente parágrafo não foi aplicada. Regista-se a ideia de que em caso de funcionamento a frequências superiores ao valor indicado, há que considerar os referidos efeitos na modelização dos transformadores.

7.3.2.2 – Consequências devidas aos harmónicos de ordem elevada, nos transformadores

Para altas frequências, os valores das reactâncias tornam-se muito superiores aos das resistências. Por esta razão, no estudo com altas frequências, é usual desprezar as resistências dos circuitos. Com esta simplificação, a impedância de cada um dos circuitos resultantes (ver figura 7.1), tende a ser infinita para a sua frequência própria de ressonância.

A frequência própria de ressonância de cada um dos referidos circuitos será:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i \times C_i}} \quad [Hz] \quad (7.7)$$

Neste caso, a passagem de uma corrente de frequência elevada e relativamente próxima da frequência própria de ressonância de um dos circuitos, origina uma tensão elevada nos terminais da referida impedância. Para os outros circuitos elementares, as suas impedâncias serão baixas, originando assim uma pequena tensão. Assim sendo, a tensão não se distribui

uniformemente pela bobina do transformador, podendo alcançar valores elevadíssimos entre dois condutores fisicamente próximos. Se a referida tensão for superior ou igual à tensão de disrupção dos materiais isolantes da referida região, ocorre uma avaria catastrófica no transformador.

Actualmente, não existe solução eficaz para este tipo de abordagem aos harmónicos. Contudo, alguns fabricantes de transformadores adoptaram critérios para reforço do isolamento entre camadas dos enrolamentos, conscientes de que este procedimento por sua vez irá alterar as referidas capacidades elementares da máquina, originando outros problemas. A variação das capacidades elementares da máquina influencia a distribuição de tensões de choque ou sobretensões ao longo dos enrolamentos, como evidenciado no desenvolvimento teórico do anexo C, do presente estudo.

A melhor solução será eliminar ou atenuar os harmónicos na fonte, através de filtros activos capazes de actuar nestas gamas de frequência. Contudo, esta solução implica uma boa caracterização dos harmónicos no local, bem como o conhecimento da impedância harmónica da rede.

7.4 – Regras práticas a considerar no desenvolvimento de transformadores para funcionamento em sistemas de energia com harmónicos

- Ligações de enrolamentos de transformadores trifásicos: Os harmónicos da corrente, de ordem múltipla de três, podem ser cancelados nas ligações de enrolamentos em triângulo. Contudo o transformador deverá ser capaz de suportar o aumento de perdas originadas pelos referidos harmónicos;
- No caso de ligações com neutro, deve-se aumentar a secção do condutor de fecho de neutro, de forma a diminuir as perdas e consequentemente, o aquecimento no referido condutor;
- Considerar um écran electrostático entre o primário e o secundário de cada fase;
- Desenvolver secundários divididos em pequenos enrolamentos em paralelo, de forma a minimizar o efeito pelicular nos condutores;

- Em caso de grandes transformadores com enrolamentos primários em triângulo, se as espiras forem constituídas por feixes de condutores, estes devem ser transpostos de forma a diminuir as perdas.
- Projectar um transformador com a impedância combinada de fuga reduzida, de forma a diminuir a distorção das tensões. Contudo, este procedimento deverá ser muito criterioso porque provoca grande aumento da corrente de curto circuito nos transformadores. Nestes casos, se houver um curto circuito nas linhas do sistema de alimentação do transformador, as forças axial e radial nos enrolamentos, terão valores muito elevados, destruindo o transformador. É de notar que a força axial de curto circuito é proporcional ao quadrado do produto entre o número de espiras do enrolamento e a corrente de curto circuito.

7.5 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR, COM HARMÔNICOS NA ALIMENTAÇÃO A FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL VARIÁVEL

.COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM TRANSFORMADOR COM HARMÔNICOS NA ALIMENTAÇÃO

O primeiro objectivo deste estudo, é a determinação dos parâmetros do circuito equivalente da máquina quando se varia a frequência da tensão de alimentação, mantendo a indução constante, com presença de harmónicos na alimentação. Para a determinação dos referidos parâmetros recorrem-se aos ensaios económicos do transformador, conforme referido no capítulo 3.

Outro objectivo, é efectuar a comparação entre os comportamentos térmicos do transformador para os casos de alimentação com tensão sinusoidal e alimentação com presença de harmónicos.

No presente estudo foi utilizado o mesmo transformador de ligação Yy, já anteriormente considerado.

7.5.1 – Consecução do sistema de alimentação com harmónicos

Para obter uma alimentação a frequência fundamental variável e com presença de harmónicos, recorreu-se a um conversor de frequência. Este equipamento foi utilizado para a alimentação directa do transformador.

7.5.2 – Ensaios económicos realizados no transformador de ligação Yy, com indução constante

Nos ensaios económicos, como já foi abordado no capítulo 3 (Determinação do Circuito Equivalente de um Transformador), o transformador é submetido a regimes de funcionamento que não envolvem fornecimento de energia pelo lado contrário à alimentação. A potência absorvida ao conversor de frequência corresponde apenas às perdas medidas.

Para manter a indução constante considerou-se que, a tensão de alimentação e a frequência fundamental da alimentação devem estar em conformidade com o descrito no parágrafo 1.1.1 do capítulo 4.

7.5.2.1 – Ensaios em circuito aberto ou em vazio realizados no transformador em estudo

Procedimentos e condições particulares para os ensaios:

- Fazer ensaios em vazio, com alimentação do transformador através do conversor de frequência;
- Alimentar o referido transformador pelos enrolamentos secundários ou primários, variando a frequência da alimentação, em conformidade com o descrito no parágrafo 1.1.1 do capítulo 4;
- Registar os resultados dos ensaios.

7.5.2.1.1 – Montagem

A montagem deverá ser de acordo com o referido no parágrafo 1.2.1 (Montagem clássica para ensaios em vazio) do Capítulo 3.

7.5.2.1.2 – Caracterização da tensão de alimentação do transformador

Os ensaios foram realizados, com as seguintes frequências fundamentais na tensão de alimentação: 45Hz; 50Hz; 60Hz; 65Hz.

Os espectros das tensões e correntes da alimentação do transformador foram registados utilizando um analisador numérico de harmónicos e encontram-se indicados nas tabelas 7.3 e 7.4.

Tabela 7.3 : Registo numérico dos espectros da tensão de alimentação em vazio				
Ordem dos Harmónicos	Frequências Fundamentais (Hz)			
	45Hz	50Hz	60Hz	65Hz
2	1.68	2.15	0.49	0.67
3	1.79	3.28	0.49	0.45
4	1.22	1.00	1.03	1.01
5	0.84	7.30	19.98	19.98
6	1.10	0.53	0.73	0.71
7	1.45	5.18	14.36	14.28
8	0.95	1.06	0.54	0.52
9	0.80	0.59	0.37	0.34
10	1.56	0.66	0.54	0.58
11	1.26	5.06	9.07	8.95
12	0.53	0.59	0.63	0.62
13	0.38	2.22	7.68	7.64
14	1.45	1.47	0.63	0.47
15	0.57	0.62	0.28	0.26
16	0.46	0.72	0.21	0.26
17	1.37	3.28	5.81	5.70
18	1.56	1.00	0.49	0.47
19	2.17	1.47	5.15	5.16
20	1.71	1.40	0.35	0.34
21	0.42	0.25	0.19	0.17
22	1.37	0.84	0.19	0.19
23	0.34	2.97	4.19	4.09
24	0.46	0.59	0.37	0.41
25	0.38	1.31	3.89	3.79

% da amplitude da fundamental

Tabela 7.4 : Registo numérico dos espectros da corrente em vazio				
Ordem dos Harmónicos	Frequências Fundamentais (Hz)			
	45Hz	50Hz	60Hz	65Hz
2	5.55	3.23	5.25	22.22
3	5.55	3.23	5.25	16.67
4	11.11	12.90	36.84	38.89
5	2.73	3.23	5.25	22.22
6	16.67	3.23	5.25	5.56
7	0.00	19.36	26.32	27.73
8	2.73	0.00	5.25	5.56
9	8.33	0.00	5.25	11.11
10	0.00	16.13	26.32	33.33
11	2.73	3.23	10.53	11.11
12	8.33	0.00	5.25	5.56
13	2.73	9.63	21.05	16.67
14	2.73	0.00	5.25	5.56
15	11.11	0.00	5.25	5.56
16	0.00	9.63	21.05	22.22
17	2.73	3.23	5.25	5.56
18	8.33	0.00	5.25	5.56
19	1.00	9.63	15.79	22.22
20	0.00	0.00	5.25	5.56
21	0.00	3.23	5.25	5.56
22	8.33	6.45	15.79	16.67
23	2.73	3.23	5.25	5.56
24	2.73	0.00	5.25	5.56
25	8.33	12.9	10.53	11.11

% da amplitude da fundamental

Através de outro analisador de harmónicos, com capacidade de representação gráfica, registaram-se alguns espectros de tensões de alimentação aplicados ao transformador, durante o ensaio em vazio, com as frequências fundamentais de 45Hz, 50Hz, 60Hz e 65Hz, conforme indicados nas figura 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5 .

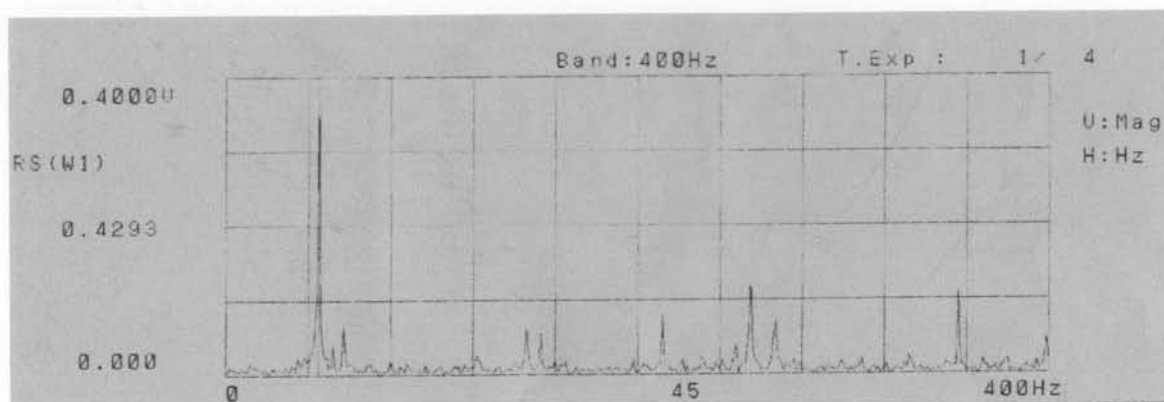


Figura 7.2 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em vazio, a frequência fundamental 45Hz

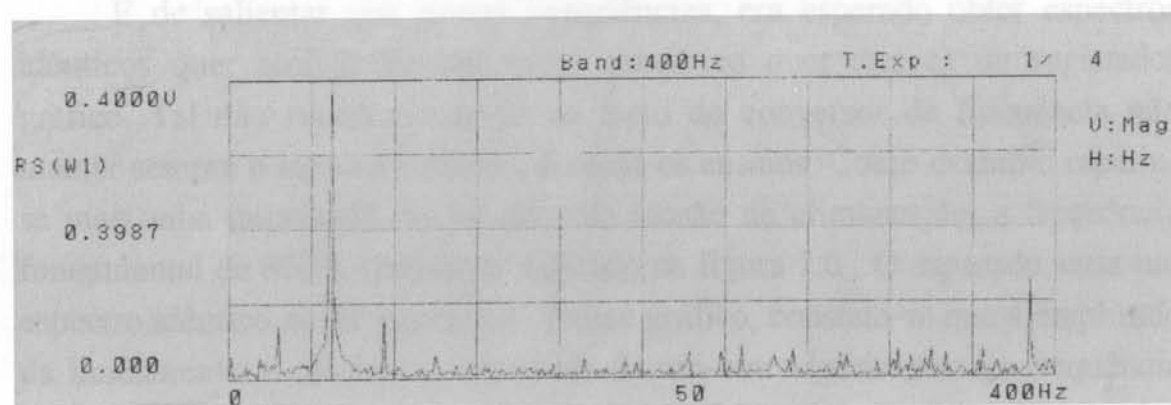


Figura 7.3 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em vazio, a frequência fundamental 50Hz

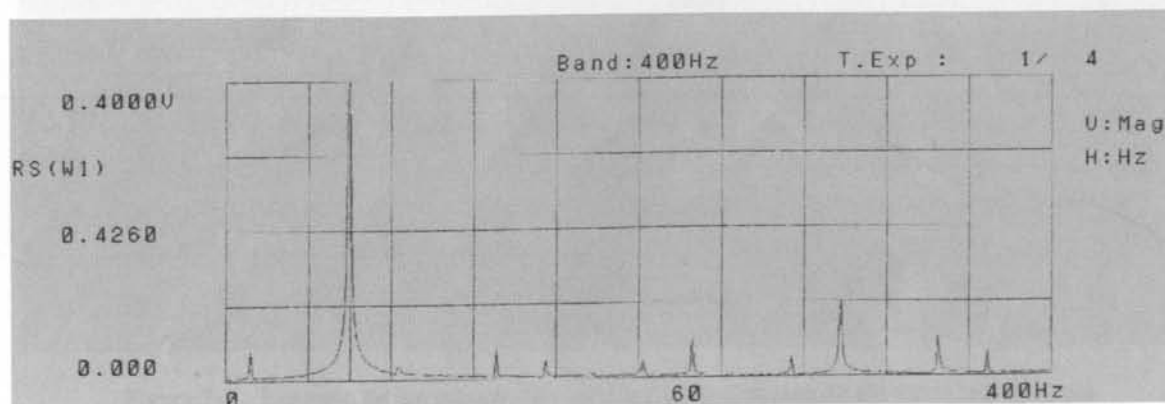


Figura 7.4 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em vazio, a frequência fundamental 60Hz

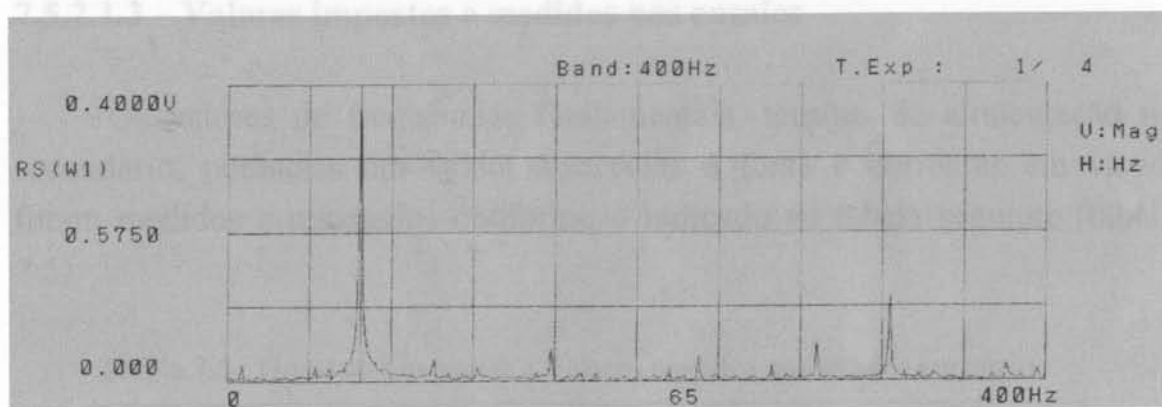


Figura 7.5 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em vazio, a frequência fundamental 65Hz

É de salientar que nestas experiências, era esperado obter espectros idênticos quer através do registador numérico quer através do registador gráfico. Tal não sucedeu, devido ao facto do conversor de frequência não manter sempre o mesmo espectro, durante os ensaios. Como exemplo repetiu-se mais uma impressão do espectro da tensão de alimentação, a frequência fundamental de 60Hz, conforme indicado na figura 7.6 . O esperado seria um espectro idêntico ao da figura 7.4 . Nesse gráfico, constata-se que a amplitude da fundamental é idêntica à amplitude de um outro harmónico de frequência elevada, o que não é correcto. O espectro da figura 7.6 não foi utilizado para nenhum cálculo neste trabalho.

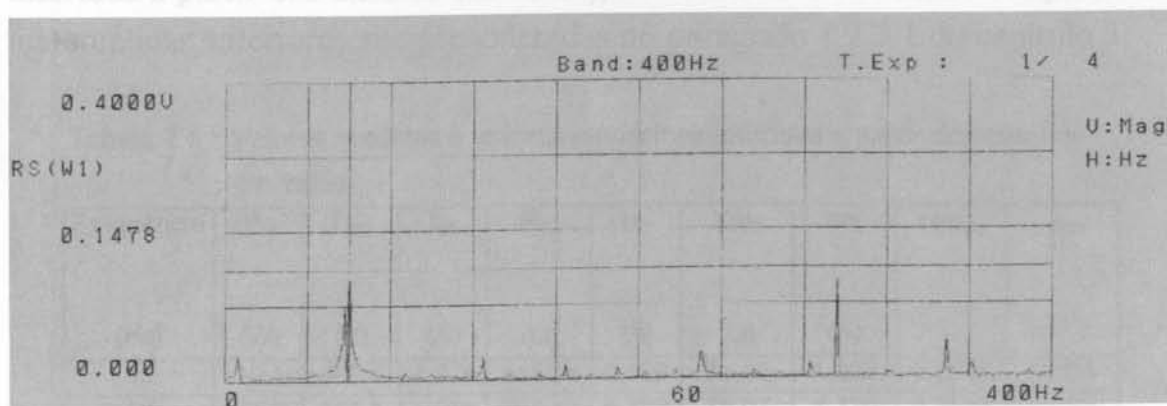


Figura 7.6 : Exemplo de um espectro de frequências da alimentação em vazio, a frequência fundamental 60Hz

7.5.2.1.3 – Valores impostos e medidos nos ensaios

Os valores de frequências fundamentais, tensões de alimentação no secundário, potências em vazio absorvidas à fonte e correntes em vazio, foram medidos e registados conforme o indicado na tabela seguinte (tabela 7.5).

Tabela 7.5 : Grandezas impostas e Valores medidos nos ensaios em vazio

Grandezas impostas		Valores medidos	
U_{02} (V)	f (Hz)	P_0 (W)	I_{02} (A)
163,4	45	110,10	1,378
181,6	50	126,00	1,385
217,9	60	153,78	1,398
236,3	65	168,18	1,400

7.5.2.1.4 – Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio, com harmónicos, a frequência fundamental variável e indução constante

Dos ensaios em vazio, à frequência variável foram registados os valores das potências absorvidas e correntes em vazio. Considerando as referidas grandezas e parâmetros, foram calculados os restantes valores numéricos que se encontram registados na tabela 7.6 (Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio), em conformidade com as expressões matemáticas anteriormente preconizadas no parágrafo 1.2.3.1 do capítulo 3.

Tabela 7.6 : Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em vazio

Frequência	P_0	U_{02}	I_{02}	R_{02}	I_{a2}	X_{m2}	I_{m2}	$\cos\varphi_0$	φ_0
(Hz)	(W)	(V)	(A)	(Ω)	(A)	(Ω)	(A)		($^\circ$)
45	110,10	163,4	1,378	243,14	0,388	71,36	1,322	0,2816	73,64
50	126,00	181,6	1,385	262,12	0,400	79,07	1,326	0,2886	73,23
60	153,78	217,9	1,398	309,10	0,407	94,02	1,338	0,2909	73,09
65	168,18	236,3	1,400	332,75	0,410	101,89	1,339	0,293	72,96

7.5.2.1.5 – Representação gráfica da tendência dos valores numéricos das componentes resistiva e reactiva do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

As componentes, resistivas (R_{02}) e reactivas (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético encontram-se representados na figura 7.7.

Curvas da resistência e reactância do ramo eléctrico equivalente ao circuito Magnético, referidas ao secundário

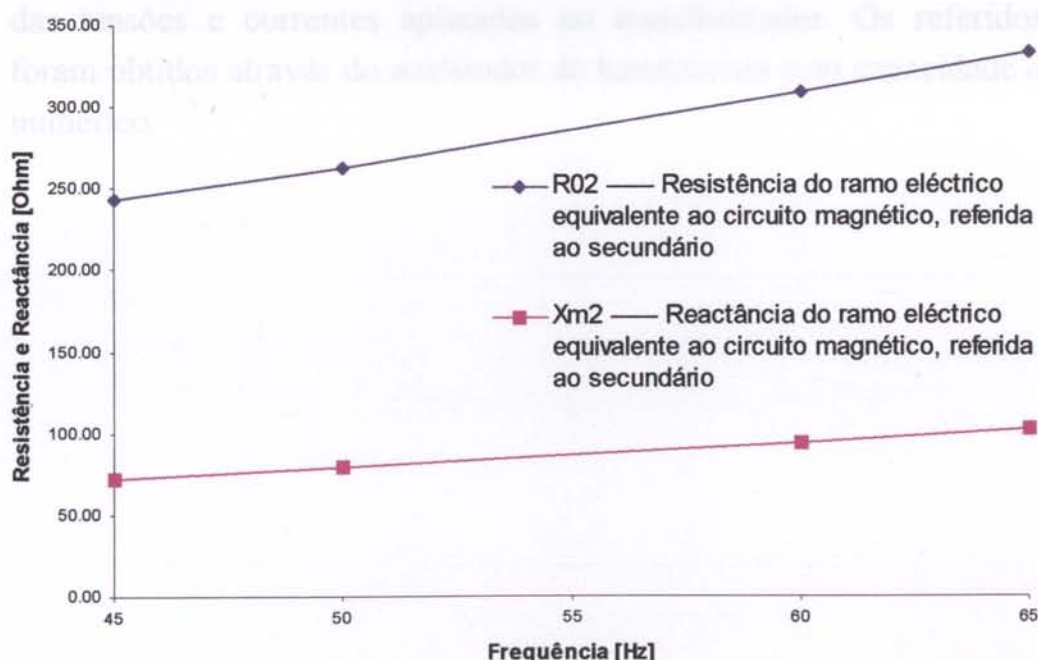


Figura 7.7 : Representação gráfica das componentes resistiva (R_{02}) e reactiva (X_{m2}) do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético

7.5.2.2 – Ensaio em curto circuito realizados no transformador em estudo

Procedimentos e condições particulares para os ensaios:

- Realizar os ensaios em curto circuito, em conformidade com o preconizado nos parágrafos 1.3.1 e 1.3.2 do capítulo 3, com alimentação do transformador através do conversor de frequência;
- Registar os resultados dos ensaios.

7.5.2.2.1 – Montagem

A montagem deverá ser de acordo com o indicado no parágrafo 1.3.3.1 (Montagem clássica para ensaios em curto circuito) do Capítulo 3.

7.5.2.2.2 – Caracterização da tensão de alimentação do transformador

Foram realizados os ensaios em curto circuito, com as seguintes frequências fundamentais na tensão de alimentação: 45Hz; 50Hz; 60Hz; 65Hz.

Nas tabelas 7.7 e 7.8 encontram-se os registos numéricos dos espectros das tensões e correntes aplicados ao transformador. Os referidos valores foram obtidos através do analisador de harmónicos com capacidade de registo numérico.

Tabela 7.7 : Registro numérico dos espectros da tensão de alimentação em curto circuito

Ordem dos Harmônicos	Frequências Fundamentais		
	45Hz	50Hz	65Hz
2	4,95	3,35	1,32
3	3,47	3,35	0,44
4	3,47	0,48	0,44
5	6,44	27,27	25,11
6	2,97	0,96	0,88
7	7,92	13,88	15,86
8	2,97	0,96	0,88
9	0,99	0,96	0,88
10	1,49	0,96	0,00
11	5,94	9,57	10,13
12	1,49	0,96	0,88
13	2,48	8,13	7,49
14	1,49	1,91	0,00
15	1,49	0,96	0,88
16	1,49	1,44	0,44
17	3,47	6,22	5,73
18	0,99	0,96	0,88
19	0,99	4,78	5,29
20	1,98	1,91	0,44
21	0,50	1,44	0,44
22	1,98	2,39	0,00
23	3,47	5,26	5,29
24	0,99	0,48	0,44
25	0,99	4,31	4,41

% da amplitude da fundamental

Tabela 7.8 : Registo numérico de alguns espectros da corrente em curto circuito

Ordem dos Harmónicos	Frequências Fundamentais			
	45Hz	50Hz	65Hz	
2	0,83	0,77	2,27	% da amplitude da fundamental
3	0,50	0,77	9,09	
4	0,63	0,77	4,55	
5	2,25	9,17	11,35	
6	0,25	0,22	0,00	
7	2,25	3,09	4,55	
8	0,50	0,22	0,00	
9	0,13	0,11	0,00	
10	0,25	0,22	0,00	
11	1,00	1,77	2,27	
12	0,13	0,11	0,00	
13	0,50	1,22	2,27	
14	0,25	0,22	0,00	
15	0,13	0,11	0,00	
16	0,25	0,22	2,27	
17	0,33	0,77	6,82	
18	0,13	0,11	2,27	
19	0,13	0,55	9,09	
20	0,25	0,22	0,00	
21	0,13	0,11	0,00	
22	0,25	0,22	2,27	
23	0,25	0,44	6,82	
24	0,13	0,11	0,00	
25	0,13	0,44	4,55	

Nas figuras seguintes (figuras 7.8, 7.9, 7.10), encontram-se alguns exemplos de representações gráficas de espectros de harmónicos das tensões de alimentação aplicados ao transformador.



Figura 7.8 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em curto circuito, a frequência fundamental 45Hz

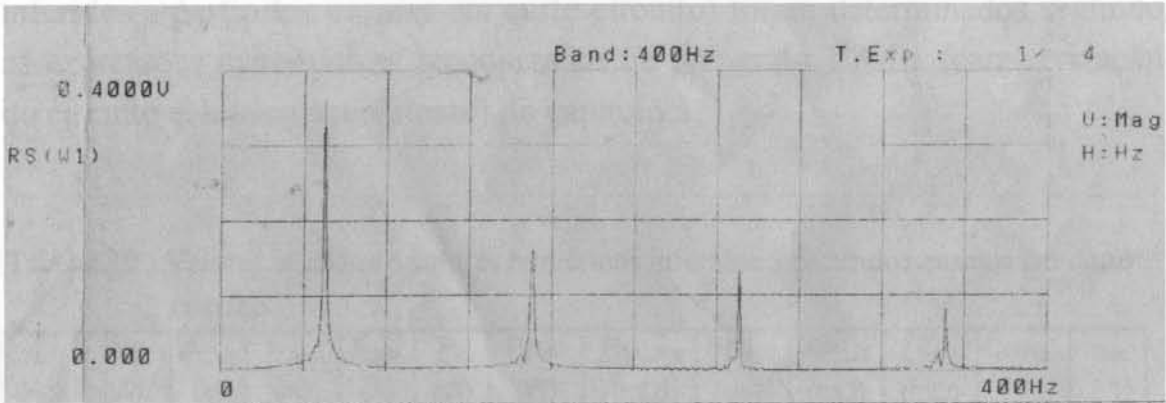


Figura 7.9 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em curto circuito, a frequência fundamental 50Hz

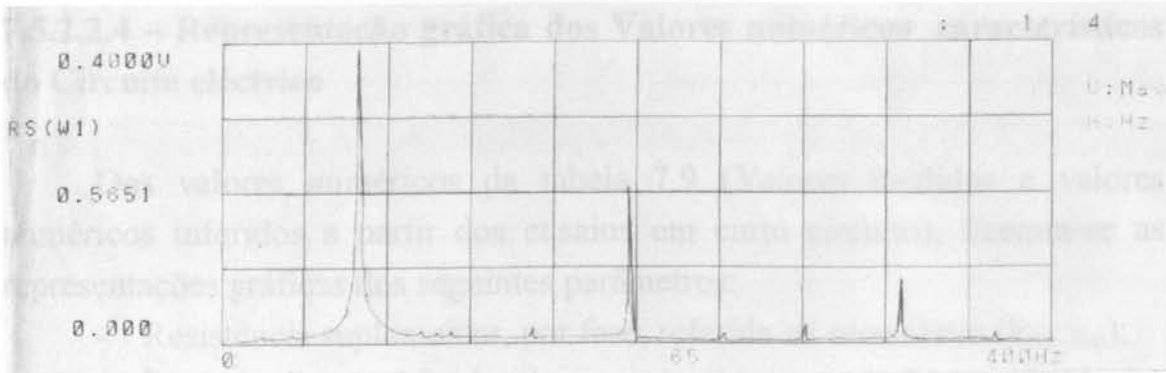


Figura 7.10 : Exemplo de um espectro de frequências da tensão de alimentação em curto circuito, a frequência fundamental 65Hz

Comparando os gráficos das figuras 7.8, 7.9 e 7.10 com as tabelas 7.7 e 7.8 constata-se que os valores indicados não são idênticos, pela mesma razão já referida no parágrafo 5.2.1.2 do presente capítulo.

7.5.2.2.3 – Valores impostos e numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito, com presença de harmônicos na tensão de alimentação, a frequência fundamental variável e indução constante

Dos ensaios em curto circuito, foram registados os valores das potências, correntes e tensões de curto circuito. Os restantes valores numéricos que se encontram registados na tabela 7.9 (Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito) foram determinados segundo as expressões matemáticas preconizadas no parágrafo 1.3.4.1 (caracterização do circuito eléctrico equivalente) do capítulo 3.

Tabela 7.9 : Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito

f (Hz)	P _{cc} (W)	U _{1_ens} (V)	I _{1_ens} (A)	I _{2_ens} (A)	P _J (W)	P _{sup} (W)	R _{12_Sup} (mΩ)	Req ₂ (mΩ)	Xeq ₂ (mΩ)	Z ₂ (mΩ)	Cosφ _{cc}	φ _{cc} (°)
45	479,34	26,50	15,226	31,74	215,3	264,04	86,70	71,08	167,75	230,29	0,6859	46,69
50	481,20	22,52	15,167	31,70	214,4	266,80	88,29	71,08	114,04	195,97	0,8134	35,57
60	477,00	23,26	15,240	31,79	215,9	261,10	85,58	71,08	127,44	201,95	0,7769	39,02
65	476,12	24,08	15,250	31,79	216,0	260,12	85,15	71,08	138,89	209,04	0,7486	41,53

7.5.2.2.4 – Representação gráfica dos Valores numéricos característicos do Circuito eléctrico

Dos valores numéricos da tabela 7.9 (Valores medidos e valores numéricos inferidos a partir dos ensaios em curto circuito), fizeram-se as representações gráficas dos seguintes parâmetros:

- Resistência suplementar, por fase, referida ao secundário (R_{12_Sup});
- Resistência combinada dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário (R_{eq_2});

- Reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário (X_{eq_2})

As referidas representações gráficas encontram-se abaixo indicadas, nas figuras 7.11 e 7.12 respectivamente.

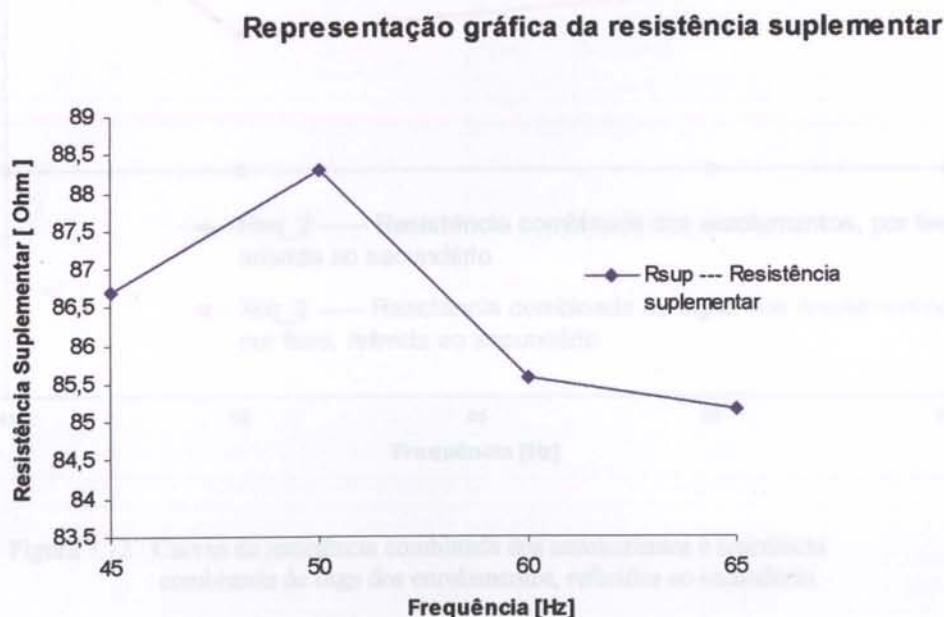


Figura 7.11 : Representação gráfica da resistência suplementar, por fase, referida ao secundário

É de salientar que talvez devido a algum erro de medida, os valores de R_{12_Sup} , X_{eq_2} e R_{eq_2} a 50Hz não estão coerentes com os restantes valores.

Curvas da resistência combinada dos enrolamentos e reactância combinada de fugas dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário

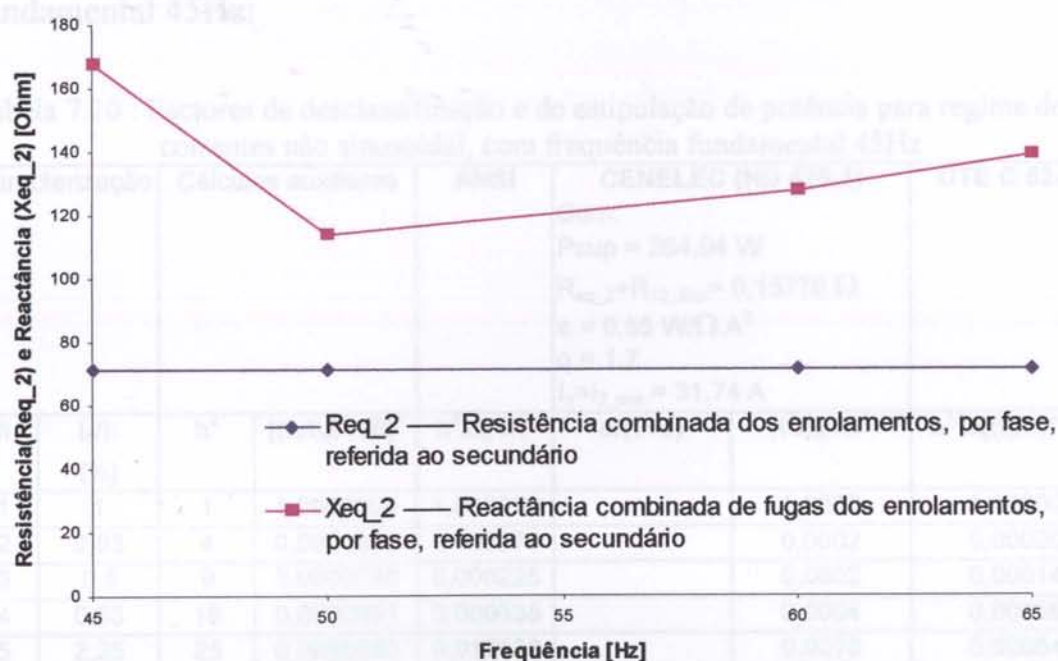


Figura 7.12 : Curvas da resistência combinada dos enrolamentos e reactância combinada de fuga dos enrolamentos, referidos ao secundário.

7.5.2.3 – Determinação de factores de desclassificação e de estipulação de potências

Em conformidade com o estabelecido no Anexo D, e no parágrafo 2 do presente capítulo, foram calculados os factores K e F_d . As caracterizações de harmónicos utilizadas neste estudo, foram os obtidos nos ensaios de curto circuito, considerando constante a distribuição de harmónicos na alimentação. A referidas distribuições encontram-se indicadas nas tabelas 7.8 do parágrafo 5.2.2.2 do presente capítulo. Estas distribuições de harmónicos correspondem a frequências fundamentais de corrente: 45, 50 e 65Hz.

Os cálculos foram efectuados em conformidade com os métodos preconizados pela ANSI, CENELEC e UTE. Encontram-se apresentados sob a forma de tabelas conforme abaixo indicadas.

7.5.2.3.1 – Cálculos para a frequência fundamental 45Hz

A tabela seguinte, tabela 7.10, apresenta os cálculos para a frequência fundamental 45Hz:

Tabela 7.10 : Factores de desclassificação e de estipulação de potência para regime de correntes não sinusoidal, com frequência fundamental 45Hz

Caracterização		Cálculos auxiliares		ANSI	CENELEC (HD 428.4)		UTE C 52-114
					Com: Psup = 264,04 W Req_2+R12_Sup= 0,15778 Ω e = 0,55 W/Ω.A ² q = 1,7 In=I2_ens = 31,74 A		
h	Ih/I1 (%)	h ²	[(Ih/I1)/100] ²	h ² ×Ih ² /I1 ²	e/(1+e)	h ⁴ ×Ih ² /I1 ²	h ^{1,6} ×[(Ih/I1)/100] ²
1	1	1	1,0000000	1,000000		1,0000	1,000000
2	0,83	4	0,0000689	0,000276		0,0002	0,000209
3	0,5	9	0,0000250	0,000225		0,0002	0,000145
4	0,63	16	0,0000397	0,000635		0,0004	0,000365
5	2,25	25	0,0005063	0,012658		0,0078	0,006649
6	0,25	36	0,0000063	0,000227		0,0001	0,000111
7	2,25	49	0,0005063	0,024809	0,35483871	0,0138	0,011391
8	0,5	64	0,0000250	0,001600		0,0009	0,000696
9	0,13	81	0,0000017	0,000138		0,0001	0,000057
10	0,25	100	0,0000063	0,000630		0,0003	0,000251
11	1	121	0,0001000	0,012100		0,0059	0,004637
12	0,13	144	0,0000017	0,000245		0,0001	0,000091
13	0,5	169	0,0000250	0,004225		0,0020	0,001514
14	0,25	196	0,0000063	0,001235		0,0006	0,000430
15	0,13	225	0,0000017	0,000383		0,0002	0,000129
16	0,25	256	0,0000063	0,001613		0,0007	0,000532
17	0,33	289	0,0000109	0,003150		0,0013	0,001014
18	0,13	324	0,0000017	0,000551		0,0002	0,000173
19	0,13	361	0,0000017	0,000614		0,0003	0,000189
20	0,25	400	0,0000063	0,002520		0,0010	0,000760
21	0,13	441	0,0000017	0,000750		0,0003	0,000222
22	0,25	484	0,0000063	0,003049		0,0012	0,000886
23	0,25	529	0,0000063	0,003333		0,0013	0,000951
24	0,13	576	0,0000017	0,000979		0,0004	0,000275
25	0,13	625	0,0000017	0,001063		0,0004	0,000293
		Soma:	1,0013648	1,077	Soma:	1,0397	Soma: 1,032
				K = 1,08 Fd = 0,93	Fd = 0,85		Fd = 0,95

Para este caso, em conformidade com a norma CENELEC HD 428.4 e de acordo com a expressão matemática (7.5) do parágrafo 2.2, a potência estipulada para o funcionamento sem perda da vida normal esperada, será:

$$S_k = S \times F_d = 10 \times 0,85 = 8,5 \quad [kVA]$$

7.5.2.3.2 – Cálculos para a frequência fundamental 50Hz

Para a referida frequência fundamental, os cálculos encontram-se registados na tabela seguinte (tabela 7.11) :

Tabela 7.11 : Factores de desclassificação e de estipulação de potência para regime de correntes não sinusoidal, com frequência fundamental 50Hz

Caracterização		Cálculos auxiliares		ANSI	CENELEC (HD 428.4)		UTE C 52-114
					Com: P _{sup} = 266,8 W R _{eq_2} +R _{12_Sup} = 0,15937 Ω e = 0,56 W/Ω.A ² q = 1,7 I _n =I _{2_ens} = 31,7 A		
h	I _n /I ₁ (%)	h ²	[(I _n /I ₁)/100] ²	h ² ×I _n ² /I ₁ ²	e/(1+e)	h ^q ×I _n ² /I ₁ ²	h ^{1,6} ×[(I _n /I ₁)/100] ²
1	1	1	1,0000000	1,000000		1,0000	1,000000
2	0,77	4	0,0000593	0,000237		0,0002	0,000180
3	0,77	9	0,0000593	0,000534		0,0004	0,000344
4	0,77	16	0,0000593	0,000949		0,0006	0,000545
5	9,17	25	0,0084089	0,210223		0,1297	0,110431
6	0,22	36	0,0000048	0,000173		0,0001	0,000084
7	3,09	49	0,0009548	0,046785	0,358974359	0,0261	0,021482
8	0,22	64	0,0000048	0,000307		0,0002	0,000134
9	0,11	81	0,0000012	0,000097		0,0001	0,000040
10	0,22	100	0,0000048	0,000480		0,0002	0,000191
11	1,77	121	0,0003133	0,037909		0,0185	0,014527
12	0,11	144	0,0000012	0,000173		0,0001	0,000064
13	1,22	169	0,0001488	0,025147		0,0116	0,009014
14	0,22	196	0,0000048	0,000941		0,0004	0,000327
15	0,11	225	0,0000012	0,000270		0,0001	0,000091
16	0,22	256	0,0000048	0,001229		0,0005	0,000405
17	0,77	289	0,0000593	0,017138		0,0073	0,005518
18	0,11	324	0,0000012	0,000389		0,0002	0,000122
19	0,55	361	0,0000303	0,010938		0,0045	0,003369
20	0,22	400	0,0000048	0,001920		0,0008	0,000579
21	0,11	441	0,0000012	0,000529		0,0002	0,000157
22	0,22	484	0,0000048	0,002323		0,0009	0,000675
23	0,44	529	0,0000194	0,010263		0,0040	0,002928
24	0,11	576	0,0000012	0,000691		0,0003	0,000194
25	0,44	625	0,0000194	0,012125		0,0046	0,003346
		Soma:	1,0101729	1,3818	Soma:	1,2116	Soma: 1,1747
				K = 1,38 Fd = 0,72	Fd = 0,83		Fd = 0,95

Segundo o preconizado na expressão matemática (7.5) do parágrafo 2.2, a potência estipulada para o funcionamento sem perda da vida normal esperada será:

$$S_k = S \times F_d = 10 \times 0,83 = 8,3 \quad [kVA]$$

7.5.2.3.3 – Cálculos para a frequência fundamental 65Hz

Na tabela 7.12, encontram-se os cálculos para a frequência fundamental 65Hz:

Tabela 7.12 : Factores de desclassificação e de estipulação de potência para regime de correntes não sinusoidal, com frequência fundamental 65Hz

Caracterização		Cálculos auxiliares		ANSI	CENELEC (HD 428.4)		UTE C 52-114
					Com: P _{sup} = 260,12 W R _{eq_2} +R _{12_Sup} = 0,15623 Ω e = 0,55 W/Ω.A ² q = 1,7 I _n =I _{2_ens} = 31,79 A		
h	I _h /I ₁ (%)	h ²	[(I _h /I ₁)/100] ²	h ² ×I _h ² /I ₁ ²	e/(1+e)	h ^q ×I _h ² /I ₁ ²	h ^{1,6} ×[(I _h /I ₁)/100] ²
1	1	1	1,0000000	1,000000		1,0000	1,000000
2	2,27	4	0,0005153	0,002061		0,0017	0,001562
3	9,09	9	0,0082628	0,074365		0,0535	0,047920
4	4,55	16	0,0020703	0,033125		0,0219	0,019025
5	11,35	25	0,0128823	0,322058		0,1987	0,169179
6	0	36	0,0000000	0,000000		0,0000	0,000000
7	4,55	49	0,0020703	0,101445	0,35483871	0,0566	0,046579
8	0	64	0,0000000	0,000000		0,0000	0,000000
9	0	81	0,0000000	0,000000		0,0000	0,000000
10	0	100	0,0000000	0,000000		0,0000	0,000000
11	2,27	121	0,0005153	0,062351		0,0304	0,023894
12	0	144	0,0000000	0,000000		0,0000	0,000000
13	2,27	169	0,0005153	0,087086		0,0403	0,031215
14	0	196	0,0000000	0,000000		0,0000	0,000000
15	0	225	0,0000000	0,000000		0,0000	0,000000
16	2,27	256	0,0005153	0,131917		0,0574	0,043516
17	6,82	289	0,0046512	1,344197		0,5746	0,432796
18	2,27	324	0,0005153	0,166957		0,0701	0,052541
19	9,09	361	0,0082628	2,982871		1,2331	0,918614
20	0	400	0,0000000	0,000000		0,0000	0,000000
21	0	441	0,0000000	0,000000		0,0000	0,000000
22	2,27	484	0,0005153	0,249405		0,0987	0,072433
23	6,82	529	0,0046512	2,460485		0,9605	0,701988
24	0	576	0,0000000	0,000000		0,0000	0,000000
25	4,55	625	0,0020703	1,293938		0,4926	0,357057
		Soma:	1,048013	10,3123	Soma:	4,8901	Soma: 3,9183
				K = 10,31 Fd = 0,1	Fd = 0,61		Fd = 0,85

Pelo indicado na expressão matemática (7.5) do parágrafo 2.2, a potência estipulada para o funcionamento sem perda da vida normal esperada será:

$$S_k = S \times F_d = 10 \times 0.61 = 6.1 \quad [kVA]$$

7.5.3 – Comparações de perdas

No presente parágrafo, serão apresentados os procedimentos para estimação de perdas suplementares e algumas tabelas de comparação de perdas, nos regimes de correntes sinusoidais e de correntes não sinusoidais.

7.5.3.1 – Comparações de perdas em vazio

Na tabela seguinte (tabela 7.13) encontram-se registados os valores de medida de perdas em vazio nos regimes com alimentação sinusoidal e alimentação não sinusoidal. Na última coluna encontram-se os valores correspondentes às variações em relação aos valores medidos nos regimes com alimentação sinusoidal.

Tabela 7.13 : Comparações de perdas em vazio nos regimes de alimentação sinusoidal e alimentação com harmónicos (Transformador de ligação Yy)

	Regime com alimentação sinusoidal	Regime com alimentação não sinusoidal	Variações de perdas (%)
f (Hz)	Po	Po	Po
45	103,2	110,10	6,69
50	117,0	126,00	7,69
65	160,7	168,18	4,65

Neste parágrafo, constata-se que, num regime de funcionamento com harmónicos na alimentação, as perdas no ferro aumentam conforme o preconizado na introdução do presente capítulo.

7.5.3.2 – Comparações de perdas de Joule e suplementares

Na tabela 7.14, indicam-se os valores de medida de perdas de Joule e suplementares nos regimes com alimentação sinusoidal e alimentação não sinusoidal. Também, na última coluna, estão apresentadas as variações em relação aos valores medidos nos regimes com alimentação não sinusoidal.

Tabela 7.14 : Comparações de perdas em curto circuito nos regimes de alimentação sinusoidal e alimentação com harmônicos (Transformador de ligação Yy)			
f (Hz)	Regime com alimentação sinusoidal	Regime com alimentação não sinusoidal	Variações de perdas (%)
	Psup (W)	Psup (W)	Psup
45	134,8	264,04	95,88
50	137,7	266,80	93,75
65	142,5	260,12	82,54

É de notar que este aumento de perdas era esperado, conforme o indicado na introdução deste capítulo.

7.5.4 – Característica externa e rendimento

Também , para este estudo, a alimentação do transformador foi efectuada através do referido conversor de frequências.

Foram realizados ensaios com cargas indutivas e factor de potência 0.8. Os resultados obtidos nos referidos ensaios encontram-se indicados na tabela 7.15 .

7.5.4.1 – Determinação experimental e teórica da característica externa e rendimento com cargas indutivas, à frequências de 45Hz, 50Hz, 60Hz e 65Hz, com factor de potência 0.8

A tabela 7.15, abaixo indicada, apresenta o resumo teórico e experimental do estudo da característica externa da máquina. Esta tabela é composta pelas seguintes partes: Grandezas impostas nos ensaios; Parâmetros

e grandezas do modelo; Grandeza proveniente dos cálculos e Grandeza experimental.

A secção de parâmetros e grandezas do modelo foi preenchida com os resultados apresentados na tabela 7.9 do presente capítulo. A secção designada por grandeza proveniente dos cálculos, foi obtida através da aplicação da expressão matemática 6.9 do parágrafo 1.2.1.1, capítulo 6.

Tabela 7.15 : Grandezas impostas e parâmetros do modelo (Transformador de ligação Yy) (Alimentação com harmónicos. Frequências: 45Hz , 50Hz ; 60Hz e 65Hz. Factor de potência 0,8; carga indutiva)

Grandezas impostas nos ensaios					Parâmetros e grandezas do modelo			Grandeza proveniente dos cálculos	Grandeza experimental
f (Hz)	U ₂₀ (V)	I ₂ (A)	Cos φ ₂	Sin φ ₂	R _{12_Sup} (mΩ)	R _{eq_2} (mΩ)	X _{eq_2} (mΩ)	U ₂ (I ₂) (V)	U ₂ (I ₂) (V)
45	163,4	25,06	0,800	0,600	86,70	71,08	167,75	157,75	140,8
50	181,6	31,41	0,800	0,600	88,29	71,08	114,04	175,45	168,3
60	217,7	31,80	0,805	0,593	85,58	71,08	127,44	211,28	207,4
65	236,2	16,88	0,809	0,587	85,15	71,08	138,89	232,68	230,0
65	236,2	31,72	0,800	0,600	85,15	71,08	138,89	229,59	225,3

As comparações entre a característica externa experimental e a característica externa teórica determinada através do modelo de base experimental, encontram-se resumidas na tabela seguinte (tabela 7.16):

Tabela 7.16 : Tabela resumo das características externas e desvios (Transformador de ligação Yy) (Frequências 45Hz, 50Hz, 60Hz, 65Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)

f (Hz)	I ₂ (A)	Valores provenientes dos Ensaios	Valores provenientes do modelo Experimental	
		U ₂ (I ₂) (V)	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)
45	25,06	140,8	157,75	12,04
50	31,41	168,3	175,45	4,25
60	31,80	207,4	211,28	1,87
65	16,88	230,0	232,68	1,17
65	31,72	225,3	229,59	1,90

É de notar que, para algumas situações de carga, o modelo experimental apresenta a característica externa com desvios elevados em relação aos valores experimentais.

Na tabela seguinte (tabela 7.17) apresentam-se valores de rendimentos calculados a partir dos resultados experimentais.

Tabela 7.17 : Tabela resumo dos rendimentos (Transformador de ligação Yy)
(Frequências 45Hz, 50Hz, 60Hz e 65Hz; Factor de potência 0,8;
carga indutiva)

f	I ₂	U ₂ (I ₂)	I _{2n}	P _{Ln}	k _c	cos φ	sin φ	P ₀	η
(Hz)	(A)	(V)	(A)	(W)				(W)	(%)
45	25,06	163,4	31,79	480,85	0,788	0,800	0,616	110,10	93,28
50	31,41	181,6		483,94	0,988	0,800	0,600	126,00	92,96
60	31,80	217,7		477,00	1,000	0,805	0,593	153,78	93,87
65	16,88	236,2		476,12	0,531	0,809	0,588	168,18	94,86
65	31,72	236,2		476,12	0,998	0,800	0,600	168,18	94,17

Onde:

P_{Ln} – corresponde às perdas nominais em curto circuito [W];

I₂ – é a corrente no secundário do transformador, imposta pela carga, [A].

A tabela abaixo indicada (tabela 7.18), apresenta algumas comparações de rendimentos, evidenciando que no caso de alimentação com harmónicos, esse valor decresce quando comparados com os rendimentos calculados para o caso de alimentação sinusoidal (os rendimentos para alimentação sinusoidal foram apresentados nas tabelas 6.3 e 6.7 do capítulo 6.

Tabela 7.18 : Tabela de comparações dos rendimentos com alimentação sinusoidal e alimentação com harmónicos (Transformador de ligação Yy) (Frequências 45Hz, 60Hz; Factor de potência 0,8; carga indutiva)

f	I ₂	Com alimentação sinusoidal	Com harmónicos na alimentação
(Hz)	(A)	η (%)	η (%)
45	25,06	94,21	93,28
60	31,80	94,65	93,87

A sequência para os cálculos dos valores apresentados na tabela 7.17, é a seguinte:

- a) Recolha de grandezas e parâmetros necessários para os cálculos:
 - a.1) Da tabela 7.6, em função da frequência, obtém-se o valor de P_0 .
 - a.2) Da tabela 7.15, em função da frequência, obtêm-se as grandezas I_2 , U_2 (I_2) e o factor de potência, $\cos \varphi$.
 - a.3) Da tabela 7.9, em função da frequência, obtêm-se os valores de perdas e correntes de curto circuito. Com estes valores calculam-se as perdas nominais em curto circuito, P_{cn} [W].
- b) Através da expressão matemática 6.17 do parágrafo 2, capítulo 6, determina-se o rendimento.

7.5.5 – Estudo do comportamento térmico da máquina

No presente capítulo, foi demonstrado que um transformador sob influência de harmónicos na alimentação (alimentação não sinusoidal), apresenta um acréscimo de perdas e um decréscimo de rendimento em relação ao funcionamento com alimentação sinusoidal. Para completar o estudo dos efeitos dos harmónicos nos transformadores, neste parágrafo far-se-à um estudo térmico da máquina nos dois regimes de funcionamento.

O referido estudo será elaborado em dois conjuntos de ensaios de aquecimento do transformador. O primeiro conjunto será formado pelos seguintes ensaios:

- a) Ensaio de aquecimento em vazio, com alimentação sinusoidal;
- b) Ensaio de aquecimento em curto circuito, com alimentação sinusoidal.

O segundo conjunto será formado pelos ensaios:

- c) Ensaio de aquecimento em vazio, com harmónicos na alimentação;
- d) Ensaio de aquecimento em curto circuito, com harmónicos na alimentação.

Os referidos conjuntos de ensaios serão realizados, pela seguinte ordem: Em primeiro, o ensaio em vazio e de seguida o ensaio em curto circuito.

7.5.5.1 – Aquecimento em vazio, com alimentação sinusoidal

Foi efectuado um ensaio de aquecimento do transformador em estudo, com alimentação sinusoidal, à frequência de 50Hz, obtida através de um sistema de alimentação baseado num gerador trifásico.

A sonda térmica foi colocada na parte superior do canal de refrigeração entre o circuito magnético e o interior do enrolamento secundário.

O critério adoptado para a determinação da estabilização do aquecimento foi o seguinte: Considerar que, a estabilização é obtida se em cada intervalo de registo, de 30 minutos, a variação do aquecimento na parte superior do enrolamento da fase W for inferior ou igual a 1°C.

Na tabela 7.19, abaixo indicada, estão apresentados os valores registados e os numéricos, proveniente do ensaio de aquecimento em vazio em regime sinusoidal.

A estabilização térmica ocorreu aos 75 minutos de ensaio. É de notar que estando próximo da estabilização térmica, se houver uma corrente de ar no recinto do ensaio, por exemplo, devido a abertura da porta do recinto para se efectuar o registo de valores, a variação do aquecimento será afectada significativamente. Por este motivo, para se ter a certeza da ocorrência da estabilização, após satisfazer o critério, deve-se prolongar o ensaio por mais um ou dois intervalos de registo.

Tabela 7.19 : Tabela de registo e valores numéricos referentes ao ensaio de aquecimento em vazio, com alimentação sinusoidal , a frequência 50Hz; (Transformador de ligação Yy)

Tempo (minutos)	Valores medidos		Resultados numéricos	
	Temp. ambiente (°C)	Temp. Superior (°C)	Aquecimentos	
			Superior (°C)	Variação (°C)
0	22,3	22,3	0	
15	23	24,3	1,3	1,3
30	23,2	25,4	2,2	0,9
45	23,4	26,8	3,4	1,2
60	23,6	28,3	4,7	1,3
75	23,8	29,1	5,3	0,6
90	24,0	30,3	6,3	1,0
105	24,0	31,3	7,3	1,0

7.5.5.1.1 – Representação gráfica do aquecimento em vazio, na parte superior do enrolamento da fase W

Na figura 7.13 encontram-se as curvas do aquecimento e variação do aquecimento medido na parte superior do enrolamento da fase W.

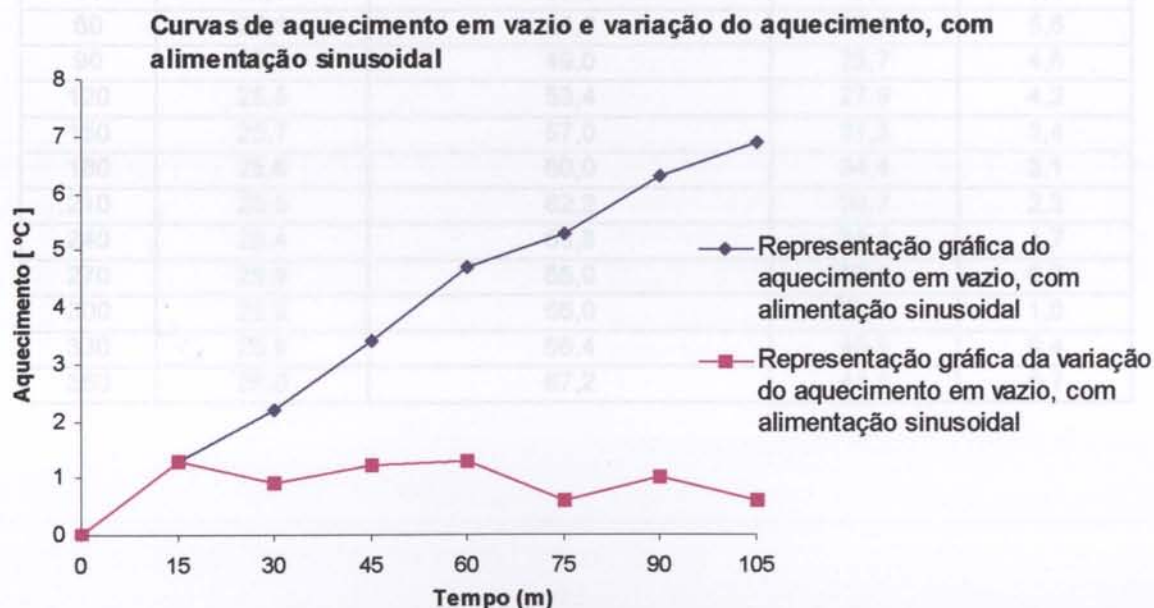


Figura 7.13 : Curvas de aquecimento em vazio e variação do aquecimento, da parte superior do enrolamento da fase W, durante a alimentação sinusoidal

7.5.5.2 – Aquecimento em curto circuito, com alimentação sinusoidal

Este ensaio foi realizado com o enrolamento secundário em curto circuito, impondo um regime de funcionamento à corrente nominal no secundário, à frequência de 50Hz.

Neste caso, considera-se que a estabilização ocorreu aos 300 minutos.

A tabela 7.20 apresenta os valores de registo e os numéricos provenientes dos resultados do ensaio.

Tabela 7.20 : Tabela de registo e valores numéricos referentes ao ensaio de aquecimento em curto circuito, com alimentação sinusoidal , a frequência 50Hz; (Transformador de ligação Yy)

Tempo (minutos)	Valores medidos		Resultados numéricos	
	Temp. ambiente (°C)	Temperatura na parte Superior (°C)	Aquecimentos	
			Superior (°C)	Variação (°C)
0	24,4	32,3	7,9	
30	24,7	38,2	13,5	5,6
60	25,1	44,2	19,1	5,6
90	25,3	49,0	23,7	4,6
120	25,5	53,4	27,9	4,2
150	25,7	57,0	31,3	3,4
180	25,6	60,0	34,4	3,1
210	25,5	62,2	36,7	2,3
240	25,4	63,8	38,4	1,7
270	25,9	65,0	39,1	0,7
300	25,9	66,0	40,1	1,0
330	25,9	66,4	40,5	0,4
360	26,0	67,2	41,2	0,7

7.5.5.2.1 – Representação gráfica do aquecimento em curto circuito, na parte superior do enrolamento da fase W

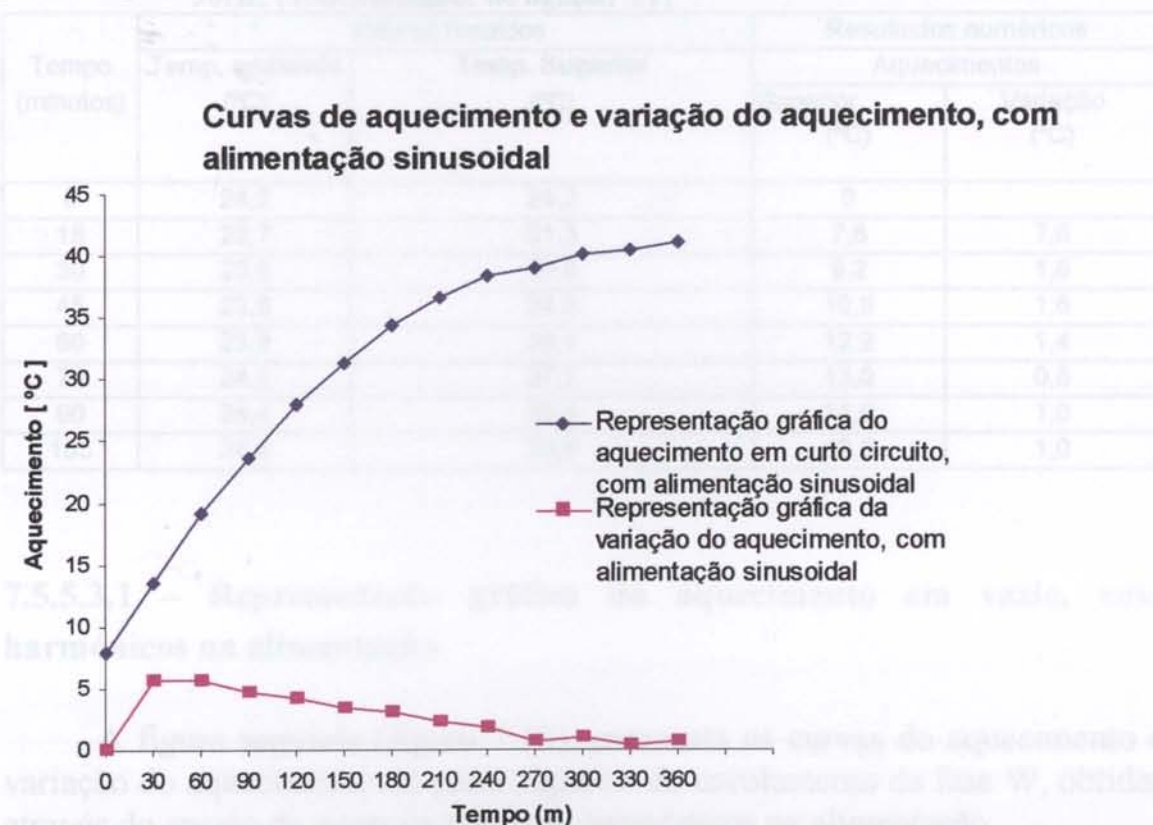


Figura 7.14 : Curvas de aquecimento em curto circuito e variação do aquecimento, da parte superior do enrolamento da fase W, durante a alimentação sinusoidal

7.5.5.3 – Aquecimento em vazio, com harmônicos na alimentação

Para este ensaio, o transformador foi alimentado através do conversor de frequências. A frequência fundamental foi de 50Hz.

Manteve-se a localização da sonda e o critério de estabilização, conforme o referido no parágrafo 5.5.1 .

Os valores registados e os numéricos, proveniente do ensaio de aquecimento em vazio com harmônicos na alimentação encontram-se indicados na tabela 7.21 .

A estabilização térmica ocorreu aos 75 minutos.

Tabela 7.21 : Tabela de registo e valores numéricos referentes ao ensaio de aquecimento em vazio, com harmónicos na alimentação, a frequência fundamental 50Hz, (Transformador de ligação Yy)

Tempo (minutos)	Valores medidos		Resultados numéricos	
	Temp. ambiente (°C)	Temp. Superior (°C)	Aquecimentos	
			Superior (°C)	Variação (°C)
0	24,2	24,2	0	
15	23,7	31,3	7,6	7,6
30	23,8	33,0	9,2	1,6
45	23,8	34,6	10,8	1,6
60	23,9	36,1	12,2	1,4
75	24,1	37,1	13,0	0,8
90	24,4	38,4	14,0	1,0
105	24,4	39,4	15,0	1,0

7.5.5.3.1 – Representação gráfica do aquecimento em vazio, com harmónicos na alimentação

A figura seguinte (figura 7.15), apresenta as curvas do aquecimento e variação do aquecimento da parte superior do enrolamento da fase W, obtidas através do ensaio de aquecimento com harmónicos na alimentação.

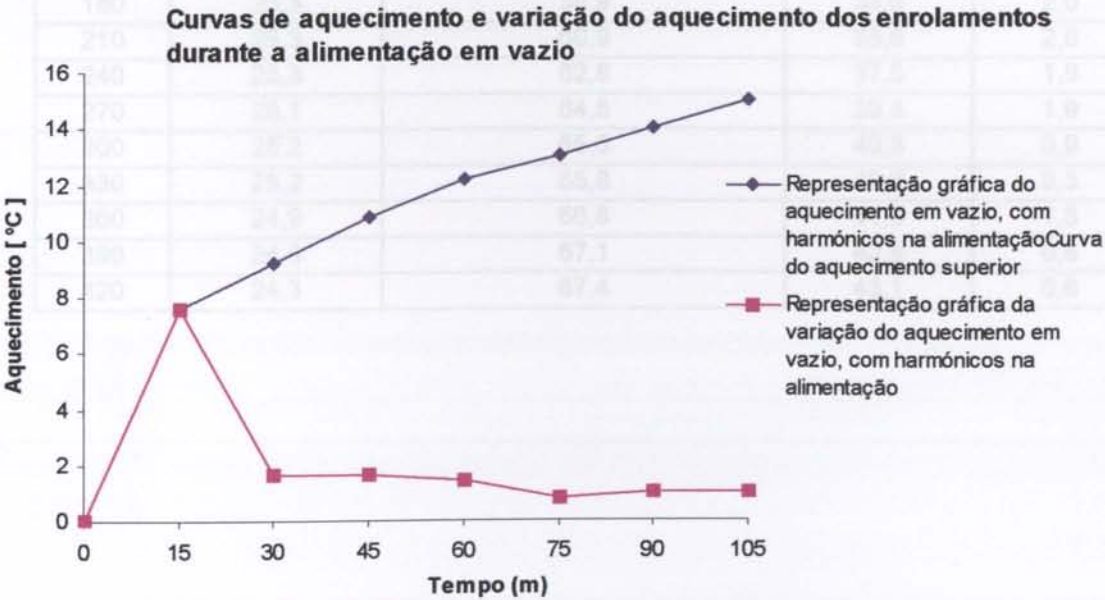


Figura 7.15 : Curvas de aquecimento em vazio e variação do aquecimento, da parte superior do enrolamento da fase W, durante a alimentação com harmónicos

7.5.5.4 – Aquecimento em curto circuito, com harmônicos na alimentação

O procedimento de ensaio em curto circuito foi o mesmo já referido, mas impondo uma corrente com harmônicos e de frequência fundamental 50Hz.

Na tabela 7.22, encontram-se os valores de medida e os valores numéricos provenientes de ensaio. Na referida tabela, constata-se que a estabilização ocorreu aos 300 minutos.

Tabela 7.22 : Tabela de registo e valores numéricos referentes ao ensaio de aquecimento em curto circuito, com harmônicos na alimentação, a frequência fundamental 50Hz; (Transformador de ligação Yy)

Tempo (minutos)	Valores medidos		Resultados numéricos	
	Temp. ambiente (°C)	Temperatura na parte Superior (°C)	Aquecimentos	
			Superior (°C)	Varição (°C)
0	24,4	37,2	12,8	
30	24,5	38,7	14,2	1,4
60	24,7	44,4	19,7	5,5
90	25,0	50,1	25,1	5,4
120	25,2	54,4	29,2	4,1
150	25,4	57,0	31,6	2,4
180	25,3	58,9	33,6	2,0
210	25,3	60,9	35,6	2,0
240	25,3	62,8	37,5	1,9
270	25,1	64,5	39,4	1,9
300	25,2	65,5	40,3	0,9
330	25,2	65,8	40,6	0,3
360	24,9	66,8	41,9	1,3
390	24,6	67,1	42,5	0,6
420	24,3	67,4	43,1	0,6

7.5.5.4.1 – Representação gráfica do aquecimento em curto circuito, com harmônicos na alimentação

Na figura 7.16 encontra-se a representação gráfica do aquecimento durante o ensaio em curto circuito, com harmônicos na alimentação.

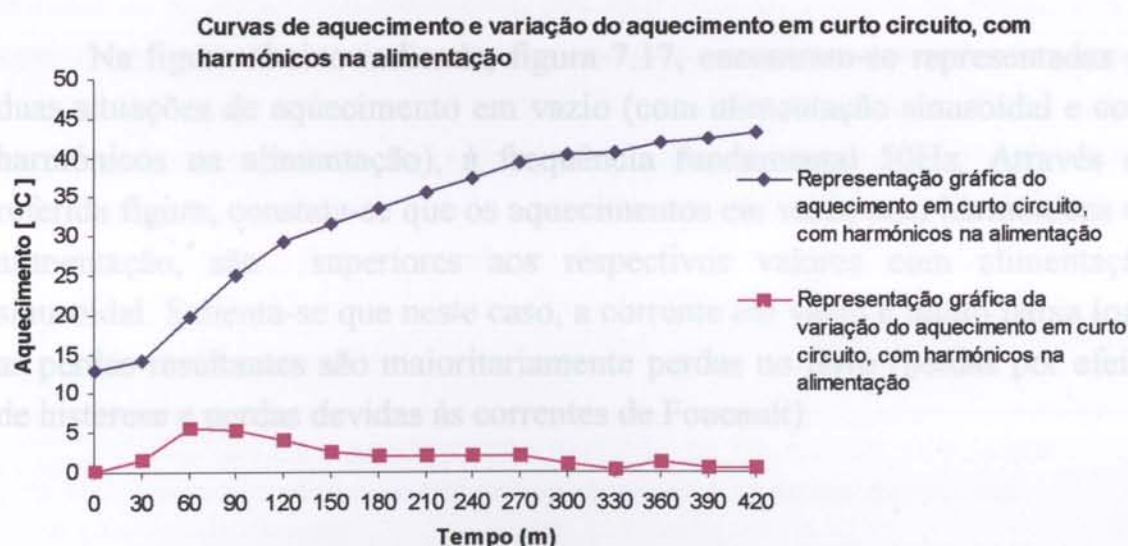


Figura 7.16 : Curvas de aquecimento em curto circuito e variação do aquecimento, da parte superior do enrolamento da fase W, durante a alimentação com harmônicos

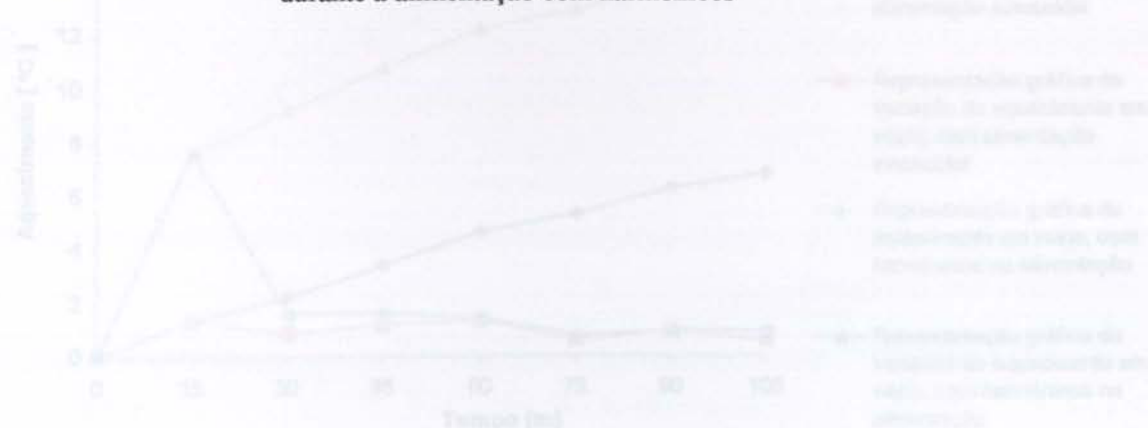


Figura 7.17 : Curvas de aquecimento em curto circuito e variação do aquecimento, da parte superior do enrolamento da fase W, durante a alimentação com harmônicos

7.5.5.5 – Comparações dos aquecimentos em vazio e em curto circuito, tendo em consideração as alimentações sinusoidal e com harmônicos

De seguida serão estabelecidas comparações gráficas, das diversas situações de aquecimento realizados neste capítulo.

7.5.5.5.1 – Comparações dos aquecimentos em vazio

Na figura abaixo indicada, figura 7.17, encontram-se representadas as duas situações de aquecimento em vazio (com alimentação sinusoidal e com harmônicos na alimentação), à frequência fundamental 50Hz. Através da referida figura, constata-se que os aquecimentos em vazio com harmônicos na alimentação, são superiores aos respectivos valores com alimentação sinusoidal. Salienta-se que neste caso, a corrente em vazio é muito baixa logo as perdas resultantes são maioritariamente perdas no ferro (perdas por efeito de histerese e perdas devidas às correntes de Foucault).

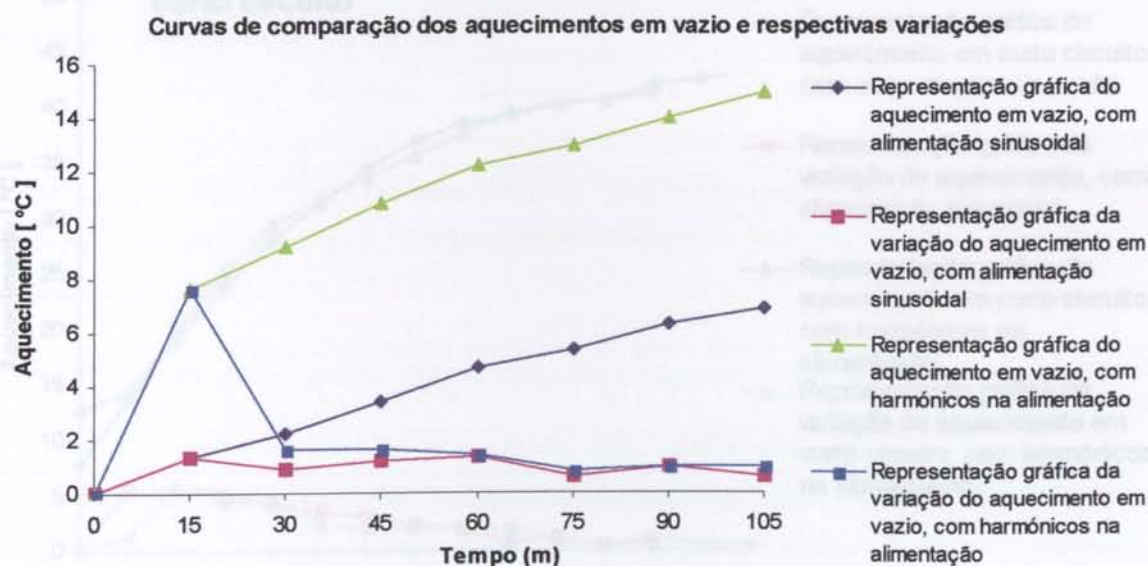


Figura 7.17 : Curvas de aquecimento em vazio e respectivas variações, durante as alimentações sinusoidal e com harmônicos

7.5.5.5.2 – Comparações dos aquecimentos em curto circuito

Na figura 7.18, estão representadas graficamente as duas situações de aquecimento em curto circuito (com alimentação sinusoidal e com harmónicos na alimentação), à frequência fundamental 50Hz. Na referida figura constata-se que o aquecimento com harmónicos na alimentação tem a tendência a ser superior ao aquecimento com alimentação sinusoidal. Neste capítulo, foi salientado o facto do conversor alterar o espectro de frequências durante os ensaios. Provavelmente, por este motivo, a curva de aquecimento com harmónicos intercepta a de aquecimento com alimentação sinusoidal, tomando valores inferiores durante 120 minutos de ensaio. De seguida constata-se uma subida no referido aquecimento passando a ter valores superiores ao aquecimento obtido com alimentação sinusoidal. Destes ensaios em curto circuito, fica registada a ideia de que os aquecimentos de um transformador com harmónicos na alimentação são superiores ao aquecimento com alimentação sinusoidal.

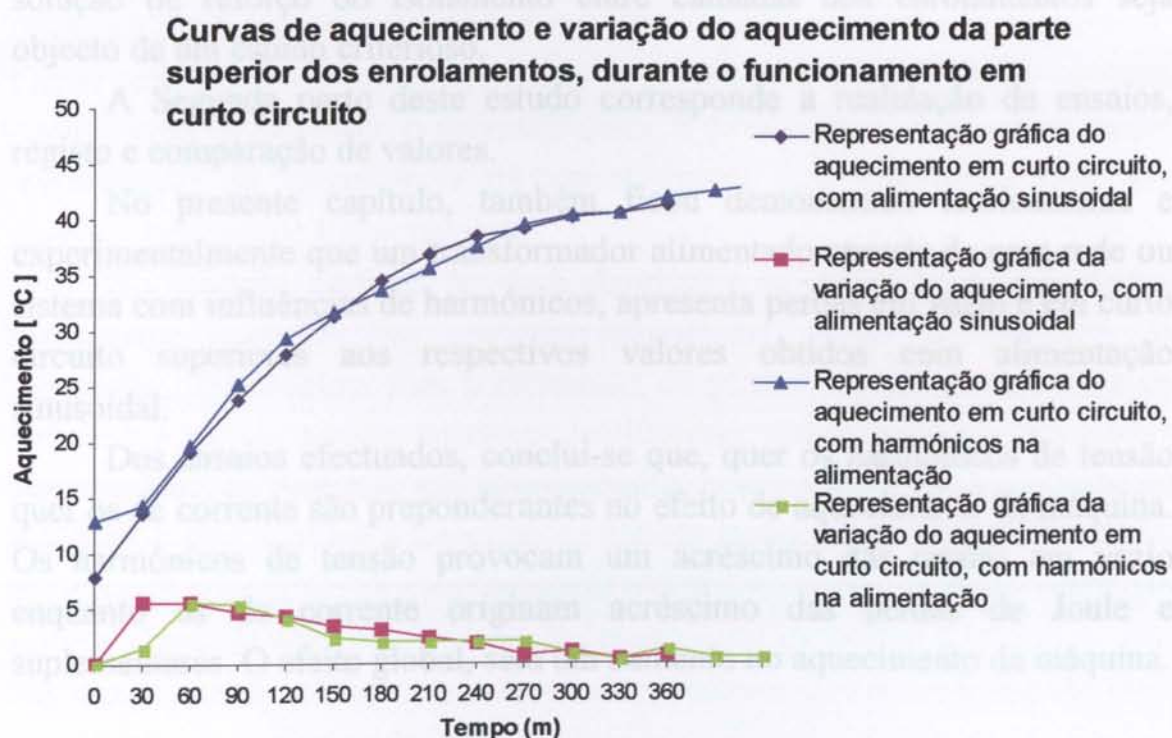


Figura 7.18 : Curvas de aquecimento em curto circuito e respectivas variações, durante as alimentações sinusoidal e com harmónicos

7.6 – Síntese e conclusões

No presente capítulo, foi realizado um estudo sobre os efeitos dos harmónicos nos transformadores. Numa primeira parte do referido estudo, abordou-se a problemática das estipulações preconizadas pelas diversas normas dedicadas ao assunto. Conclui-se que em todas as normas está subjacente a ideia de haver uma necessidade de estimar perdas, desclassificações ou estipulação das potências. Também foi constatado, no parágrafo 2 do presente capítulo, que os resultados provenientes da aplicação das diversas normas, são diferentes.

Foi também abordada a modelização de transformadores em relação aos harmónicos de ordem elevada. Ainda dentro desta temática, foram feitas algumas considerações sobre os possíveis efeitos catastróficos quando algumas frequências do espectro da corrente do regime de funcionamento, tiverem valores próximos ou iguais às de ressonância do transformador. Conclui-se este tema, remetendo para o anexo C, sensibilizando, para que a solução de reforço do isolamento entre camadas dos enrolamentos seja objecto de um estudo criterioso.

A Segunda parte deste estudo corresponde a realização de ensaios, registo e comparação de valores.

No presente capítulo, também ficou demonstrado teoricamente e experimentalmente que um transformador alimentado através de uma rede ou sistema com influências de harmónicos, apresenta perdas em vazio e em curto circuito superiores aos respectivos valores obtidos com alimentação sinusoidal.

Dos ensaios efectuados, conclui-se que, quer os harmónicos de tensão quer os de corrente são preponderantes no efeito de aquecimento da máquina. Os harmónicos de tensão provocam um acréscimo das perdas em vazio enquanto os de corrente originam acréscimo das perdas de Joule e suplementares. O efeito global, será um aumento no aquecimento da máquina.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÃO GERAL

Na presente dissertação pensa-se ter contribuído para o estudo do comportamento dos transformadores em funcionamento a frequência variável. Como referido inicialmente, este estudo foi basicamente realizado em sete capítulos distintos, sendo o primeiro deles, a introdução ao tema, bem como apresentação da importância da caracterização dos transformadores sob diversos regimes de funcionamento.

No segundo capítulo, fez-se a abordagem às propriedades das chapas magnéticas e perdas nos circuitos magnéticos. Foram evidenciadas as expressões matemáticas para a estimação de perdas devidas às correntes de Foucault e perdas devidas ao efeito de Histerese. Concluiu-se que, as perdas por correntes de Foucault são inversamente proporcionais à resistividade do material, o que justifica o interesse de utilizar materiais de alta resistividade. No caso de máquinas eléctricas rotativas e transformadores, é muito vantajoso utilizar chapa de alta resistividade, daí o uso geral de chapas com silício. Por sua vez, as perdas devidas aos efeitos das correntes de Foucault, variam com o quadrado da espessura da laminagem.

O terceiro capítulo trata da determinação do circuito eléctrico equivalente de um transformador. Neste capítulo, constatou-se que as perdas no ferro, P_{Fe} , são muito próximas do valor da potência absorvidas em vazio, P_0 . Este resultado já era esperado pois no ensaio em vazio a corrente

absorvida pela máquina é baixa e destina-se essencialmente à magnetização da chapa magnética e perdas no circuito magnético. Por outro lado, a referida corrente em vazio origina perdas de Joule insignificantes nos enrolamentos. Dos ensaios e cálculos efectuados, também se constata que:

- a) A corrente necessária para a magnetização do circuito magnético é superior à corrente responsável pelas perdas magnéticas;
- b) A componente activa da impedância de magnetização (R_{02}) é significativamente maior que a componente reactiva da mesma (X_{m2});
- c) O facto de aparecer uma componente activa (R_{02}) no ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético, traduz o efeito de perdas no circuito magnético;
- d) Nestes transformadores, a relação entre as perdas no circuito magnético e as perdas totais são: 17% no transformador de ligação Dy, em estudo; 26%, no segundo transformador em estudo (transformador de ligação Yy);
- e) Comparação dos restantes parâmetros e grandezas:

Transformadores do estudo	U_{1_ens} (V)	R_{eq_2} (m Ω)	R_{12_Sup} (m Ω)	X_{eq_2} (m Ω)	Z_{eq_2} (m Ω)	Pcc (W)
Yy	16,1	71,08	52,27	86,14	150,45	323,9
Dy	18,7	170,46	7,74	84,1	197,05	432,7

Constata-se que o transformador de ligação Dy tem maior impedância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, referida ao secundário (Z_{eq_2}). As reactâncias combinadas de fuga dos enrolamentos, por fase, referidas ao secundário (X_{eq_2}), dos dois transformadores, apresentam valores semelhantes. Logo, a impedância combinada de fuga dos enrolamentos, por fase, do transformador de ligação Dy foi conseguida através de um incremento acentuado da resistência combinada dos enrolamentos por fase (R_{eq_2}). O referido incremento traduz-se

em aplicação de material condutor de menor secção nos enrolamentos. Esta prática acarreta maiores perdas de Joule nos enrolamentos, resultando maiores custos de energia numa instalação eléctrica. Contudo, este transformador (o transformador de ligação Dy, objecto do presente estudo) tem a vantagem de apresentar melhor comportamento aos esforços electrodinâmicos de curto circuito.

O quarto capítulo apresenta o estudo do comportamento de um transformador trifásico com a frequência da tensão de alimentação variável e a determinação dos parâmetros do circuito equivalente. Na caracterização do circuito magnético, para além da equivalência, abordou-se também o método e cálculo para a separação das perdas no ferro devidas aos efeitos de Histerese e por correntes de Foucault. Constatou-se que as perdas por efeitos de Histerese são superiores às perdas por efeito das correntes de Foucault, no circuito magnético. As referidas perdas variam proporcionalmente com a frequência do regime de funcionamento.

É de salientar que nestes regimes de funcionamento (com frequências variáveis e indução constante), a componente magnetizante da corrente no ensaio em vazio, I_{m2} , mantém-se constante o que leva a concluir que nos referidos regimes de funcionamento, o nível de magnetização da chapa do circuito magnético é constante.

A componente activa da corrente no ensaio em vazio tende a aumentar com o incremento da frequência.

Pelas experiências apresentadas, e demonstrado pelos valores obtidos (registados nas Tabelas 4.1 e 4.6), mantendo a indução constante e variando a frequência da alimentação, por acréscimo ou decréscimo, as perdas em vazio variam no mesmo sentido. A um aumento de frequência, corresponde a um aumento das perdas em vazio.

Com base nos resultados obtidos no referido capítulo, conclui-se que:

- Conforme se pode constatar nas figuras 4.2 e 4.6, a resistência do ramo eléctrico equivalente ao circuito magnético é sempre superior à reactância do referido ramo. Também, é de notar que estes dois parâmetros dependem da frequência de alimentação da máquina.

- Quanto às resistências suplementares, conforme se pode observar na comparação das figuras 4.3 e 4.7, estas dependem da frequência e o seu crescimento não é igual para todos os transformadores.
- A resistência combinada dos enrolamentos não depende da frequência de alimentação (trata-se de um parâmetro constante) e poderá ter valor maior ou menor que o da reactância combinada de fuga dos enrolamentos, dependendo das características dos transformadores em questão. A reactância combinada de fuga dos enrolamentos, por sua vez, é proporcional à frequência da alimentação da máquina. Os referidos factos poderão ser constatados através das comparações feitas nas figuras 4.4 e 4.8 .

No quinto capítulo foram estabelecidas leis matemáticas e regras práticas representativas dos parâmetros do circuito equivalente de um transformador, a frequência variável. Qualquer destes métodos requer ensaios prévios do transformador em estudo, embora o método prático exija apenas dois conjuntos de ensaios económicos a duas frequências distintas. O método denominado por determinação de leis matemáticas (determinação de polinómios aproximantes) requer conjuntos de ensaios económicos em todas as frequências dos regimes de funcionamento previstos. Este método é muito trabalhoso mas em contrapartida apresenta valores muito satisfatórios, com erros esperados inferiores quando comparado com o método prático.

No sexto capítulo, foram apresentadas comparações entre os valores medidos com o transformador em diversos regimes de funcionamento em carga e os valores numéricos obtidos através dos modelos nos referidos regimes de carga. Foram apresentados apenas algumas tabelas e gráficos referentes aos regimes de carga.

É de notar que os desvios cometidos, devido à utilização dos modelos de base experimental, de regras práticas e por leis matemáticas, apresentam valores insignificantes salientando-se que, quanto aos rendimentos, as curvas dadas pelos vários modelos são praticamente coincidentes.

No anexo B encontram-se as tabelas e comparações efectuadas, provenientes de um extenso estudo de validação dos modelos. No fim do referido anexo, encontra-se uma tabela resumo (a referida tabela encontra-se transcrita no presente capítulo, identificada como tabela B.68), confirmando que os desvios extremos provenientes dos modelos, em relação aos valores

registados ou provenientes dos ensaios são insignificantes, o que leva a concluir que os modelos estabelecidos com base nos valores de ensaios, são válidos. Contudo, é de notar que este tipo de modelo só poderá ser estabelecido a partir de resultados obtidos nos ensaios económicos ou seja, para estabelecer um modelo dever-se-à efectuar e registar valores de pelo menos um par de ensaios económicos. Os modelos estabelecidos por base experimental e os provenientes de leis matemáticas embora apresentem bons desvios em relação aos resultados dos ensaios, são muito trabalhosos. Na prática, o modelo estabelecido por regras práticas tem vantagens devido ao facto de ser mais simples e apresentar bons resultados.

Tabela B.68 : Tabela resumo de desvios gerais das características externas e rendimentos dos diversos modelos comparados com os resultados experimentais

Transformador	Tipo de carga	Modelo	f (Hz)	cos φ_2	Desvios (%)			
					U ₂ (medida na carga)		η	
					Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Yy	Indutiva	Base experimental	45	0,8	0,34	1,83	0,06	0,18
Yy	Indutiva	Regras práticas	45	0,8	0,34	1,84	0,06	0,18
Yy	Indutiva	Leis Matemáticas	45	0,8	0,34	1,83	0,05	0,15
Yy	Capacitiva	Base experimental	45	0,8	0,13	0,55	0,03	0,14
Yy	Capacitiva	Regras práticas	45	0,8	0,13	0,56	-0,08	0,14
Yy	Capacitiva	Leis Matemáticas	45	0,8	0,13	0,55	0,03	0,12
Yy	Capacitiva	Base experimental	45	0	-0,55	0,18	-0,15	0,63
Yy	Capacitiva	Regras práticas	45	0	-0,56	0,18	-0,15	0,63
Yy	Capacitiva	Leis Matemáticas	45	0	-0,55	0,18	-0,26	0,63
Yy	Indutiva	Base experimental	60	0,8	0,17	1,7	0,04	0,12
Yy	Indutiva	Regras práticas	60	0,8	0,17	1,72	0,03	0,11
Yy	Indutiva	Leis Matemáticas	60	0,8	0,17	1,69	0,01	0,11
Yy	Capacitiva	Base experimental	60	0,8	0,07	0,23	0,02	0,10
Yy	Capacitiva	Regras práticas	60	0,8	0,07	0,22	0,01	0,04
Yy	Capacitiva	Leis Matemáticas	60	0,8	0,07	0,25	0,00	0,03
Yy	Capacitiva	Base experimental	60	0	-0,93	0,11	-0,47	0,33
Yy	Capacitiva	Regras práticas	60	0	-0,96	0,11	-0,52	0,16
Yy	Capacitiva	Leis Matemáticas	60	0	-0,93	0,11	-0,97	0,00
Yy	Indutiva	Base experimental	65	0,8	0,36	1,2	0,05	0,14
Yy	Indutiva	Regras práticas	65	0,8	0,36	1,21	0,06	0,14
Yy	Indutiva	Leis Matemáticas	65	0,8	0,36	1,2	0,04	0,07
Dy	Indutiva	Base experimental	45	0,85	1,08	3,01	0,10	0,18
Dy	Indutiva	Regras práticas	45	0,85	1,09	3,04	-0,37	-0,21
Dy	Indutiva	Leis Matemáticas	45	0,85	1,08	3,01	0,09	0,18
Dy	Resistiva	Base experimental	45	1	0,86	1,72	0,07	0,11
Dy	Resistiva	Regras práticas	45	1	0,86	1,72	0,07	0,11
Dy	Resistiva	Leis Matemáticas	45	1	0,89	1,95	0,08	0,11
Dy	Indutiva	Base experimental	60	0,85	0,97	2,56	0,06	0,13
Dy	Indutiva	Regras práticas	60	0,85	0,97	2,59	0,06	0,10
Dy	Indutiva	Leis Matemáticas	60	0,85	0,97	2,57	0,04	0,06
Dy	Capacitiva	Base experimental	60	0,85	0,80	1,29	0,05	0,05
Dy	Capacitiva	Regras práticas	60	0,85	0,79	1,25	0,03	0,07
Dy	Capacitiva	Leis Matemáticas	60	0,85	0,79	1,24	0,01	0,05

O Sétimo capítulo trata do estudo sobre os efeitos dos harmónicos nos transformadores. Numa primeira parte do referido estudo, abordou-se a problemática das estipulações preconizadas pelas diversas normas dedicadas ao assunto. Conclui-se que em todas as normas está subjacente a ideia de haver uma necessidade de estimar perdas, desclassificações ou estipulação das

potências. Também foi constatado, no parágrafo 2 do referido capítulo, que os resultados provenientes da aplicação das diversas normas, são diferentes.

Foi também abordada a modelização de transformadores em relação aos harmónicos de ordem elevada. Ainda dentro desta temática, foram feitas algumas considerações sobre os possíveis efeitos catastróficos quando algumas frequências do espectro da corrente do regime de funcionamento, tiverem valores próximos ou iguais às de ressonância do transformador. Conclui-se este tema, remetendo para o anexo C, sensibilizando, para que a solução de reforço do isolamento entre camadas dos enrolamentos seja objecto de um estudo criterioso.

A Segunda parte deste estudo corresponde a realização de ensaios, registo e comparação de valores.

No presente capítulo, também ficou demonstrado teoricamente e experimentalmente que um transformador alimentado através de uma rede ou sistema com influências de harmónicos, apresenta perdas em vazio e em curto circuito superiores aos respectivos valores obtidos com alimentação sinusoidal.

Dos ensaios efectuados, conclui-se que, quer os harmónicos de tensão quer os de corrente são preponderantes no efeito de aquecimento da máquina. Para estes regimes de funcionamento, a frequência fundamental variável, registam-se aumentos das perdas em vazio e das perdas em curto-circuito. Os referidos aumentos de perdas traduzem-se em sobre-aquecimento da máquina. Este tópico não foi completamente explorado, remetendo-se para um futuro trabalho de comparação de efeitos dos harmónicos, entre os transformadores secos e os imersos em dieléctricos isolantes, de forma a quantificar os factores de desclassificação ou de estipulação de potência para as referidas máquinas.

A presente dissertação abre perspectivas para o desenvolvimento futuro de um equipamento de diagnóstico de avarias em determinados transformadores de uma instalação, baseando na variação da reactância combinada de fugas dos enrolamentos e na determinação de desequilíbrio de perdas medidas em curto circuito, nas fases. O referido diagnóstico poderá ser fundamentado por comparação entre valores medidos através de um analisador de potência e valores provenientes da modelização da máquina a frequência variável, registados numa base de dados.

REFERÊNCIAS

- [Seely, 58] Seely, Samuel;
“Introduction to Electromagnetic Fields” 1958
- [Küpfmüller, 59] Küpfmüller, K.; “Électricité Théorique et
appliquée”, 1959
- [Bejot, 92] Bejot, Jean Pierre; Comportement d'un
transformateur MT/BT en présence
d'harmoniques de courant; RGE n^a 7/92 – Julho
de 1992 - GEC Alsthom

BIBLIOGRAFIA

Artigo: “Non-Sinusoidal Load Currents”;
Amado, Paulo; 2002

ANSI/IEEE; Norma: “IEEE Recommended
Practice for Establishing Transformer Capability
When Supplying Nonsinusoidal Load
Currents”, C57.110-1986

Artigo: “Comportement d’un transformateur
MT/BT en presence d’harmoniques de courant”;
Bejot, Jean Pierre; RGE n° 7/92 – Julho de 1992
- GEC Alsthom

“Transformadores”; Carvalho, Carlos Castro;
1990

CDA Publication 145; Artigo: “Harmonics in
Practice”, September 2000

Artigo: “K Rating of Transformers Supplying
Harmonic Rich Loads”; Chapman, David

Artigo: “Guide technique”; Gec Alsthom

Artigo: “Energy Saving in Industrial Distribution Transformers”, Hulshorst, W.T.J.; Groeman, J.F.; KEMA, May 2002

“Transformadores”; Oliva, Enrique Ras; 1977

“Máquinas Eléctricas”; Kostenko, M. ; Piotrovski, L.; Tradução de Sá, Carlos Araújo, 1979

“Électricité Théorique et appliquée”; Küpfmüller, K.; 1959

Bulletin Scientifique de l'Association des Ingénieurs Electriciens Sortis de l'Institut Electrotechnique Montefiore - Liège. Artigo: “Étude de la repartition de la tension dans un enrolement de transformateur de tension bobiné en couches soumis aux ondes de choc et aux surtensions de manoeuvres”; Legros, Willy; Nov – Dec 1960

Artigo: “Harmonic Distortion and Countermeasures”; Lemerande, Cory J.; Electrical Construction & Maintenance, Mar1, 1998; Jul. 1, 1998

“Midcom’s Tips for Transformer Modeling”; LeVasseur, Dave; Midcom Technical Note #82; Jan. 29, 1998

“Calculo Industrial de Maquinas Electricas”
Martin, Juan Corrales; Tomo I – Fundamentos
del Calculo; Tomo II – Método de Calculo, 1976

Artigo: “Fundamentals of harmonics, Part 3”;
Michaels, Ken; Electrical Construction &
Maintenance, Aug1, 1999

“Técnicas de alta tensão”; Moura, Domingos;
1980

“Iron Losses and Properties of Soft Magnetic
Materials for Electrical Machines”; Rasmussen,
Claus B.; 1998

Artigo: “K – Rated Transformers”; Rusch,
Robert J.; Junho 1998

“Introduction to Electromagnetic Fields”; Seely,
Samuel; 1958

ANEXO A

APROXIMAÇÃO PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

O objectivo deste anexo é apresentar um método aplicável a uma tabela de valores discretos (neste caso, valores resultantes de ensaios), de forma a obter uma expressão matemática aproximada da função que descreve os pontos da referida tabela. O desenvolvimento deste método baseia-se na ideia da definição de um critério que permita afirmar qual a função que melhor se aproxima da tabela de valores.

A.1 – Estabelecimento dos critérios dos mínimos quadrados de Legendre

Este método é geralmente utilizado para tabelas com um número elevado de valores.

A função aproximante geralmente utilizada é um polinómio. Esta escolha é devida as duas principais características:

- A continuidade dos polinómios;
- A derivabilidade dos polinómios.

Designemos por $(x_i ; y_i)$ com $i=1,2,3,4,...,k$, os pares ordenados representativos dos pontos da tabela e por $y(x)$ a função aproximante. Consideremos que os valores de x são exactos e que os de y são aqueles que

contém erros de medida (são os valores dos resultados dos ensaios). O resíduo é definido como sendo a diferença entre o valor da tabela e o da função aproximante no ponto x_i . O referido resíduo será dado pela seguinte expressão:

$$R_{ES}(x_i) = y_i - \bar{y}(x_i) \quad (A.1)$$

O critério base do método dos mínimos quadrados estabelece que a função que melhor se aproxima à tabela de valores (neste caso são os valores resultantes dos ensaios), é aquela que minimiza a soma dos quadrados dos resíduos em todos os pontos x_i , ou seja, é a função que minimiza a seguinte expressão matemática:

$$\sum_{i=1}^k R_{ES}^2(x_i) = \sum_{i=1}^k \left[y_i - \bar{y}(x_i) \right]^2 \quad (A.2)$$

A minimização da expressão matemática anterior, permite calcular os coeficientes do polinómio aproximante.

A.2 – Regressão polinomial

O objectivo final será calcular um polinómio de grau n , que melhor se aproxima à tabela de valores (neste caso, valores obtidos através dos ensaios). O referido polinómio aproximante será do seguinte tipo:

$$\bar{y}(x) = \sum_{j=0}^n a_j x^j \quad (A.3)$$

Sendo:

n – O grau do polinómio aproximante

a_j – Os coeficientes do polinómio aproximante

Conforme preconizado no parágrafo A.1 deste (anexo A), será necessário minimizar a seguinte expressão matemática:

$$f(x) = \sum_{i=1}^k \left(y_i - \sum_{j=0}^n a_j x_i^j \right)^2 \quad (A.4)$$

Sendo:

k – O número de pontos da tabela de valores

O mínimo da função $f(x)$ é determinado nos pontos onde as derivadas parciais em ordem a a_j se anulam. Genericamente será:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial a_l} = -2 \cdot \sum_{i=1}^k (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - a_3 x_i^3 - \dots - a_n x_i^n) x_i^l = 0 \quad (A.5)$$

$$\text{Com } l = 1, 2, 3, 4, \dots, n \quad (A.6)$$

Fica, desta forma, determinado um sistema com $n+1$ equações normais, a $n+1$ incógnitas. Se os valores x_i não forem todos idênticos, o determinante do sistema é diferente de zero e este tem soluções possíveis e determináveis. As $n+1$ incógnitas do sistema correspondem aos coeficientes a_j do polinómio aproximante.

Desenvolvendo a expressão matemática A.5, considerando a condição A.6, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} k a_0 + \left(\sum_{i=1}^k x_i \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^k x_i^2 \right) a_2 + \dots + \left(\sum_{i=1}^k x_i^n \right) a_n &= \sum_{i=1}^k y_i \\ \left(\sum_{i=1}^k x_i \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^k x_i^2 \right) a_1 + \dots + \left(\sum_{i=1}^k x_i^{n+1} \right) a_n &= \sum_{i=1}^k x_i y_i \\ \left(\sum_{i=1}^k x_i^2 \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^k x_i^3 \right) a_1 + \dots + \left(\sum_{i=1}^k x_i^{n+2} \right) a_n &= \sum_{i=1}^k x_i^2 y_i \\ \vdots & \\ \left(\sum_{i=1}^k x_i^n \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^k x_i^{n+1} \right) a_1 + \dots + \left(\sum_{i=1}^k x_i^{2n} \right) a_n &= \sum_{i=1}^k x_i^n y_i \end{aligned}$$

Resolvendo o sistema de equações, obtém-se os coeficientes $a_0, a_1, \dots, a_n$.
A função aproximante será então o polinómio:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$$

Por exemplo, perante uma tabela de valores com 45 pontos e se for pretendido um polinómio aproximante de grau 4, o sistema de equações seria:

$$\begin{aligned} 45a_0 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^2\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^3\right)a_3 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^4\right)a_4 &= \sum_{i=1}^{45} y_i \\ \left(\sum_{i=1}^{45} x_i\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^2\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^3\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^4\right)a_3 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^5\right)a_4 &= \sum_{i=1}^{45} x_i y_i \\ \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^2\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^3\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^4\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^5\right)a_3 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^6\right)a_4 &= \sum_{i=1}^{45} x_i^2 y_i \\ \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^3\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^4\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^5\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^6\right)a_3 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^7\right)a_4 &= \sum_{i=1}^{45} x_i^3 y_i \\ \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^4\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^5\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^6\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^7\right)a_3 + \left(\sum_{i=1}^{45} x_i^8\right)a_4 &= \sum_{i=1}^{45} x_i^4 y_i \end{aligned}$$

Resolvendo o sistema de equações em ordem aos coeficientes a_0, a_1, a_2, a_3 e a_4 , o polinómio aproximante $y(x)$, seria:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$$

ANEXO B

TABELAS DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS ESTABELECIDOS PARA OS TRANSFORMADORES

Este estudo tem por objectivo a validação dos modelos estipulados, através de comparações das características externa $U_2(I_2)$ e rendimentos. É de notar que nos capítulos 4 e 5, foram determinados os modelos experimentais, os modelos provenientes de regras práticas e de leis matemáticas de variação de parâmetros.

Neste anexo, são apresentadas diversas tabelas com valores numéricos e desvios em relação aos valores registados ou provenientes dos ensaios. Os referidos valores numéricos foram obtidos utilizando as expressões matemáticas já indicadas nos capítulos da presente obra. A sequência a seguir para se efectuar os cálculos encontra-se abaixo indicada.

Sequência de cálculos :

Cálculo da característica externa

- 1) No capítulo 6, parágrafos 1.2.1.1, 1.2.1.2 e 1.2.1.3, deve-se seleccionar a expressão matemática da característica

externa do transformador, em função do tipo de carga utilizado.

- 2) Para determinar a resistência suplementar:
 - 2.1) Se tratar de cálculo através das regras práticas, recorre-se à expressão matemática do capítulo 5, parágrafo 2.2.3 ;
 - 2.2) Se tratar de cálculo através de leis matemáticas representativas do referido parâmetro, recorre-se ao capítulo 5:
 - 2.2.1) Para o transformador de ligação Yy recorre-se ao parágrafo 4.2 ;
 - 2.2.2) Para o transformador de ligação Dy recorre-se ao parágrafo 6.2 .
- 3) Para seleccionar a resistência combinada dos enrolamentos, recorre-se ao capítulo 4:
 - 3.1) Se tratar do transformador de ligação Yy, recorre-se à tabela 4.5 ;
 - 3.2) Se tratar do transformador de ligação Dy, recorre-se à tabela 4.10 .
- 4) Para determinar a reactância combinada de fuga dos enrolamentos:
 - 4.1) Se tratar de cálculo através das regras práticas, recorre-se à expressão matemática do capítulo 5, parágrafo 2.1.1 ;
 - 4.2) Se tratar de cálculo através de leis matemáticas representativas do referido parâmetro, recorre-se ao capítulo 5:
 - 4.2.1) Para o transformador de ligação Yy recorre-se ao parágrafo 4.2 ;
 - 4.2.2) Para o transformador de ligação Dy recorre-se ao parágrafo 6.2 .

Cálculo do rendimento

- 5) No capítulo 6, parágrafo 2 obtém-se a expressão matemática para determinação do rendimento.
- 6) A corrente nominal secundária é determinada através da tensão secundária indicada no capítulo 3, parágrafos:
 - 6.1) 3.1.1 para o transformador de ligação Yy;
 - 6.2) 3.2.1 para o transformador de ligação Dy.
- 7) O valor numérico de perdas em vazio é dado pela expressão matemática:

$$P_0 = \frac{U_{02}^2}{R_{02}} \quad [W]$$

- 7.1) A tensão em vazio é determinada segundo o indicado no ponto 6;
- 7.2) Determinação da componente resistiva do ramo do circuito eléctrico equivalente ao circuito magnético:
 - 7.2.1) Para cálculo através das regras práticas:
 - 7.2.1.1) Para o transformador de ligação Yy recorre-se ao capítulo 5, parágrafo 2.2.1;
 - 7.2.1.2) Para o transformador de ligação Dy recorre-se ao capítulo 5, parágrafo 2.2.1;
 - 7.2.2) Para cálculo através de leis matemáticas representativas do referido parâmetro:
 - 7.2.2.1) Para o transformador de ligação Yy recorre-se ao capítulo 5, parágrafo 4.1;
 - 7.2.2.2) Para o transformador de ligação Dy recorre-se ao capítulo 5, parágrafo 6.1.

B.1 – Comparações de características externas $U_2(I_2)$ e rendimentos entre os modelos experimentais, modelos provenientes das regras práticas e leis de variação de parâmetros do transformador Yy.

B.1.1 – Cargas indutivas em modelos a frequência de alimentação 45Hz, impondo factor de potência 0,8

Grandezas experimentais

Para a medida da tensão em carga, fizeram-se os ensaios à frequência variável, com variadas cargas. Neste caso, as situações de carga e alimentação da máquina são conforme abaixo indicadas na tabela B.1, à frequência de 45Hz. As cargas foram de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,8 , com diversas correntes de carga. As tensões medidas no secundário do transformador e os rendimentos calculados (tendo em conta os valores de perdas e correntes, indicados nas tabelas 4.2 e 4.5 do capítulo 4 e também a expressão matemática (6.17) do capítulo 6) encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.1).

Tabela B.1 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	η (%)
45	163,4	1,628	0,8	0,6	162,6	77,88
45	163,4	5,200	0,8	0,6	161,9	91,15
45	163,4	6,731	0,8	0,6	161,4	92,62
45	163,4	10,367	0,8	0,6	160,8	94,17
45	163,4	13,557	0,8	0,6	160,1	94,62
45	163,4	15,102	0,8	0,6	159,6	94,68
45	163,4	18,563	0,8	0,6	158,8	94,66
45	163,4	22,576	0,8	0,6	157,9	94,43
45	163,4	25,160	0,8	0,6	157,4	94,21
45	163,4	30,570	0,8	0,6	156,1	93,65

B.1.1.1 – Comparações com o modelo de base experimental

As tensões secundárias determinadas através do modelo experimental, bem como os desvios relativamente aos valores medidos já anteriormente indicados na tabela B.1, encontram-se na tabela seguinte, (tabela B.2):

Tabela B.2 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo de base experimental (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	163,4	1,628	0,8	0,6	163,16	0,34	78,02	0,18
45	163,4	5,200	0,8	0,6	162,65	0,46	91,23	0,09
45	163,4	6,731	0,8	0,6	162,42	0,63	92,69	0,08
45	163,4	10,367	0,8	0,6	161,90	0,68	94,23	0,06
45	163,4	13,557	0,8	0,6	161,43	0,82	94,68	0,06
45	163,4	15,102	0,8	0,6	161,21	1,00	94,76	0,08
45	163,4	18,563	0,8	0,6	160,71	1,19	94,74	0,08
45	163,4	22,576	0,8	0,6	160,12	1,39	94,52	0,10
45	163,4	25,160	0,8	0,6	159,75	1,47	94,31	0,11
45	163,4	30,570	0,8	0,6	158,96	1,80	93,78	0,14

Com as perdas em vazio e perdas de Joule determinadas numericamente e apresentadas na tabela B.3.

Tabela B.3 – Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	P_0 (W)	P_j (W)
45	163,4	1,628	102,71	0,98
45	163,4	5,200	102,71	9,96
45	163,4	6,731	102,71	16,69
45	163,4	10,367	102,71	39,58
45	163,4	13,557	102,71	67,69
45	163,4	15,102	102,71	84,00
45	163,4	18,563	102,71	126,91
45	163,4	22,576	102,71	187,72
45	163,4	25,160	102,71	233,15
45	163,4	30,570	102,71	344,19



B.1.1.2 – Comparações com o modelo estipulado por regras práticas

Na tabela abaixo indicada (tabela B.4), encontram-se os valores numéricos da característica externa e dos rendimentos referentes ao modelo indicado. Este estudo foi elaborado com a frequência de 45Hz, e cargas de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,8 , com diversas correntes de carga.

Tabela B.4 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	163,4	1,628	0,8	0,6	163,16	0,34	78,02	0,18
45	163,4	5,200	0,8	0,6	162,65	0,46	91,23	0,09
45	163,4	6,731	0,8	0,6	162,43	0,63	92,69	0,08
45	163,4	10,367	0,8	0,6	161,90	0,68	94,23	0,06
45	163,4	13,557	0,8	0,6	161,44	0,83	94,68	0,06
45	163,4	15,102	0,8	0,6	161,21	1,00	94,76	0,08
45	163,4	18,563	0,8	0,6	160,71	1,19	94,74	0,08
45	163,4	22,576	0,8	0,6	160,13	1,39	94,52	0,10
45	163,4	25,160	0,8	0,6	159,76	1,48	94,31	0,11
45	163,4	30,570	0,8	0,6	158,98	1,81	93,78	0,14

B.1.1.3 – Comparações com o modelo definido por leis matemáticas

Estudo com frequência de alimentação 45Hz, e cargas de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,8 , com diversas correntes de carga. Os valores da característica externa e rendimentos calculados, encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.5).

B.1.2 – Cargas capacitivas em modelos a frequência de alimentação 45Hz, impondo factor de potência 0,8

Grandezas experimentais

Neste caso, as cargas foram de natureza predominantemente capacitiva, impondo um factor de potência o mais próximo possível de 0,8 , com diversas correntes de carga, a frequência de 45Hz, conforme abaixo indicadas na tabela B.7. As tensões medidas no secundário do transformador e os rendimentos calculados (tendo em conta os valores de perdas e correntes, indicados nas tabelas 4.2 e 4.5 do capítulo 4, encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.7):

Tabela B.7 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas capacitivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	η (%)
45	163,4	1,49	0,8000	0,6000	163,1	76,40
45	163,4	5,37	0,8025	0,5967	162,8	91,43
45	163,4	6,18	0,8135	0,5815	162,6	92,35
45	163,4	9,66	0,8036	0,5951	162,4	94,07
45	163,4	13,15	0,7956	0,6058	162,3	94,62
45	163,4	14,98	0,7982	0,6023	162,1	94,75
45	163,4	18,12	0,8074	0,5900	161,8	94,81
45	163,4	21,92	0,8040	0,5946	161,5	94,61
45	163,4	25,15	0,8030	0,5959	161,2	94,36
45	163,4	28,44	0,8024	0,5967	161,1	94,06

B.1.2.1 – Comparações com o modelo de base experimental

Neste caso, as cargas utilizadas são capacitivas. Como já anteriormente referido, devido ao facto das cargas capacitivas terem variações por escalões, os factores de potência apresentados foram os mais próximos de 0,8, que se conseguiu obter. As tensões secundárias determinadas através do modelo experimental, bem como os desvios relativamente aos valores medidos (indicados na tabela B.7, encontram-se indicados na tabela seguinte, (tabela

B.8). As referidas tensões foram determinadas tendo em conta as grandezas e parâmetros indicados nas tabelas 4.2 , 4.5 do capítulo 4.

Tabela B.8 : Característica externa e rendimentos calculados com base no modelo experimental (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,8)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	Sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	163,4	1,49	0,8000	0,6000	163,32	0,13	76,51	0,14
45	163,4	5,37	0,8025	0,5967	163,12	0,20	91,48	0,05
45	163,4	6,18	0,8135	0,5815	163,06	0,28	92,40	0,05
45	163,4	9,66	0,8036	0,5951	162,90	0,31	94,11	0,04
45	163,4	13,15	0,7956	0,6058	162,74	0,27	94,66	0,04
45	163,4	14,98	0,7982	0,6023	162,64	0,33	94,78	0,03
45	163,4	18,12	0,8074	0,5900	162,44	0,39	94,85	0,04
45	163,4	21,92	0,8040	0,5946	162,26	0,47	94,66	0,05
45	163,4	25,15	0,8030	0,5959	162,09	0,55	94,41	0,05
45	163,4	28,44	0,8024	0,5967	161,93	0,51	94,11	0,05

As perdas em vazio e perdas de Joule foram determinadas numericamente e encontram-se indicadas na tabela B.9.

Tabela B.9 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	P ₀ (W)	P _j (W)
45	163,4	1,490	102,71	0,82
45	163,4	5,370	102,71	10,62
45	163,4	6,180	102,71	14,07
45	163,4	9,660	102,71	34,37
45	163,4	13,150	102,71	63,69
45	163,4	14,980	102,71	82,65
45	163,4	18,120	102,71	120,93
45	163,4	21,920	102,71	176,97
45	163,4	25,150	102,71	232,96
45	163,4	28,440	102,71	297,90

B.1.2.2 – Comparações com o modelo estipulado por regras práticas

Ainda com a frequência de 45Hz, e cargas de natureza predominantemente capacitiva, impondo um factor de potência 0,8 , com diversas correntes de carga.

Tabela B.10 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas capacitivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ_2	Sin φ_2	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	163,4	1,49	0,8000	0,6000	163,32	0,13	76,51	0,14
45	163,4	5,37	0,8025	0,5967	163,12	0,20	91,46	0,03
45	163,4	6,18	0,8135	0,5815	163,08	0,29	92,28	-0,08
45	163,4	9,66	0,8036	0,5951	162,90	0,31	94,09	0,02
45	163,4	13,15	0,7956	0,6058	162,72	0,26	94,69	0,07
45	163,4	14,98	0,7982	0,6023	162,63	0,33	94,79	0,04
45	163,4	18,12	0,8074	0,5900	162,46	0,41	94,80	-0,01
45	163,4	21,92	0,8040	0,5946	162,27	0,47	94,63	0,02
45	163,4	25,15	0,8030	0,5959	162,10	0,56	94,39	0,03
45	163,4	28,44	0,8024	0,5967	161,93	0,51	94,09	0,03

B.1.2.3 – Comparações com o modelo definido por leis matemáticas

Ainda com a frequência de 45Hz, e cargas de natureza predominantemente capacitiva, impondo um factor de potência 0,8 , com diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.11).

Tabela B.11 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,8)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	163,4	1,49	0,8000	0,6000	163,32	0,13	76,49	0,12
45	163,4	5,37	0,8025	0,5967	163,12	0,20	91,48	0,05
45	163,4	6,18	0,8135	0,5815	163,06	0,28	92,39	0,04
45	163,4	9,66	0,8036	0,5951	162,90	0,31	94,10	0,03
45	163,4	13,15	0,7956	0,6058	162,74	0,27	94,65	0,03
45	163,4	14,98	0,7982	0,6023	162,64	0,33	94,78	0,03
45	163,4	18,12	0,8074	0,5900	162,44	0,39	94,84	0,03
45	163,4	21,92	0,8040	0,5946	162,25	0,46	94,65	0,04
45	163,4	25,15	0,8030	0,5959	162,09	0,55	94,40	0,04
45	163,4	28,44	0,8024	0,5967	161,92	0,51	94,10	0,04

B.1.2.4 – Análise de desvios dos modelos com cargas capacitivas e frequência de alimentação 45Hz

Conforme indicado nas tabelas B.8, B.10 e B.11, os desvios da característica externa e rendimentos entre os resultados provenientes de ensaio e os diversos modelos teóricos, para este tipo de carga e frequência, são valores insignificantes. Os valores extremos dos referidos desvios encontram-se indicados na tabela B.12.

Tabela B.12 : Valores extremos dos desvios da característica externa e rendimentos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,8)

Extremos	Desvios	
	U ₂ (I ₂) (%)	η (%)
Máximo	0,56	0,14
Mínimo	0,13	-0,08

B.1.3 – Cargas capacitivas em modelos à frequência de alimentação 45Hz, impondo factor de potência 0

Grandezas experimentais

As cargas utilizadas foram de natureza predominantemente capacitiva, impondo um factor de potência o mais próximo possível de zero, com diversas correntes de carga, à frequência de 45Hz, conforme abaixo indicadas na tabela B.13. As tensões medidas no secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.13).

Tabela B.13 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	η (%)
45	163,4	1,18	0,0050	1	163,2	1,58
45	163,4	4,85	0,0016	1	163,9	1,93
45	163,4	6,03	0,0017	1	164,0	2,44
45	163,4	10,27	0,0050	1	164,5	9,33
45	163,4	13,33	0,0062	1	164,9	12,26
45	163,4	14,94	0,0070	1	165,2	13,88
45	163,4	18,35	0,0085	1	165,5	16,41
45	163,4	21,90	0,0107	1	166,0	19,37

B.1.3.1 – Comparações com o modelo de base experimental

A característica externa determinada através do modelo experimental, bem como os desvios relativamente aos valores medidos (indicados na tabela B.13, encontram-se indicados na tabela seguinte, (tabela B.14). As referidas tensões foram determinadas considerando as grandezas e parâmetros indicados nas tabelas 4.2 , 4.5 do capítulo 4.

Tabela B.14 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	163,4	1,18	0,0050	1	163,49	0,18	1,59	0,63
45	163,4	4,85	0,0016	1	163,78	-0,07	1,94	0,52
45	163,4	6,03	0,0017	1	163,87	-0,08	2,44	0,00
45	163,4	10,27	0,0050	1	164,20	-0,18	9,35	0,21
45	163,4	13,33	0,0062	1	164,43	-0,29	12,28	0,16
45	163,4	14,94	0,0070	1	164,56	-0,39	13,88	0,00
45	163,4	18,35	0,0085	1	164,82	-0,41	16,42	0,06
45	163,4	21,90	0.0107	1	165,08	-0,55	19,34	-0,15

Com as perdas em vazio e perdas de Joule determinadas numericamente e apresentadas na tabela B.15.

Tabela B.15 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	P ₀ (W)	P _J (W)
45	163,4	1,18	102.71	0.51
45	163,4	4,85	102.71	8.66
45	163,4	6,03	102.71	13.39
45	163,4	10,27	102.71	38.85
45	163,4	13,33	102.71	65.44
45	163,4	14,94	102.71	82.21
45	163,4	18,35	102.71	124.02
45	163,4	21,90	102.71	176.65

B.1.3.2 – Comparações com o modelo estipulado por regras práticas

O presente estudo foi efectuado com a frequência de alimentação 45Hz, e cargas de natureza predominantemente capacitiva. Foi imposto um factor de potência zero ou o mais próximo possível de zero, para diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.16).

Tabela B.16 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	163,4	1,18	0,0050	1	163,49	0,18	1,59	0,63
45	163,4	4,85	0,0016	1	163,78	-0,07	1,94	0,52
45	163,4	6,03	0,0017	1	163,87	-0,08	2,44	0,00
45	163,4	10,27	0,0050	1	164,19	-0,19	9,35	0,21
45	163,4	13,33	0,0062	1	164,42	-0,29	12,28	0,16
45	163,4	14,94	0,0070	1	164,55	-0,39	13,88	0,00
45	163,4	18,35	0,0085	1	164,80	-0,42	16,41	0,00
45	163,4	21,90	0,0107	1	165,07	-0,56	19,34	-0,15

B.1.3.3 – Comparações com o modelo definido por leis matemáticas

Também neste caso, o estudo foi efectuado com a frequência de 45Hz, e cargas de natureza predominantemente capacitiva, impondo um factor de potência o mais próximo possível de zero, para diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.17).

Tabela B.17 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido pelas leis matemáticas (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	163,4	1,18	0,0050	1	163,49	0,18	1,59	0,63
45	163,4	4,85	0,0016	1	163,78	-0,07	1,94	0,52
45	163,4	6,03	0,0017	1	163,87	-0,08	2,44	0,00
45	163,4	10,27	0,0050	1	164,20	-0,18	9,34	0,11
45	163,4	13,33	0,0062	1	164,44	-0,28	12,26	0,00
45	163,4	14,94	0,0070	1	164,56	-0,39	13,86	-0,14
45	163,4	18,35	0,0085	1	164,82	-0,41	16,39	-0,12
45	163,4	21,90	0,0107	1	165,09	-0,55	19,32	-0,26

B.1.3.4 – Análise de desvios dos modelos com cargas capacitivas à frequência de alimentação 45Hz, impondo factor de potência 0

Conforme indicado nas tabelas B.14, B.16 e B.17, os desvios da característica externa e rendimentos entre os resultados provenientes de ensaio e os diversos modelos teóricos, para este tipo de carga e frequência, são valores insignificantes. Os valores extremos dos referidos desvios encontram-se indicados na tabela B.18.

Tabela B.18 : Valores extremos dos desvios da característica externa e rendimentos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)

Extremos	Desvios	
	$U_2(I_2)$ (%)	η (%)
Máximo	0,18	0,63
Mínimo	-0,56	-0,26

B.1.4 – Cargas indutivas em modelos à frequência de alimentação 60Hz, impondo factor de potência 0,8

Grandezas experimentais

As cargas utilizadas foram de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,8 , com diversas correntes de carga, à frequência de 60Hz, conforme abaixo indicadas na tabela B.19. As tensões medidas no secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.19).

Tabela B.19 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	η (%)
60	217,7	1,48	0,8	0,6	217,1	75,30
60	217,7	5,51	0,8	0,6	216,2	91,34
60	217,7	6,15	0,8	0,6	216,0	92,04
60	217,7	10,19	0,8	0,6	214,9	94,29
60	217,7	13,06	0,8	0,6	214,2	94,90
60	217,7	15,77	0,8	0,6	213,3	95,15
60	217,7	19,02	0,8	0,6	212,6	95,25
60	217,7	22,86	0,8	0,6	211,6	95,18
60	217,7	26,11	0,8	0,6	210,7	95,04
60	217,7	31,80	0,8	0,6	209,0	94,65

B.1.4.1 – Comparações com o modelo de base experimental

As tensões secundárias determinadas através do modelo experimental, bem como os desvios relativamente aos valores medidos (indicados na tabela B.19, encontram-se indicados na tabela seguinte, (tabela B.20).

Tabela B.20 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	Sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	217,7	1,48	0,8	0,6	217,46	0,17	75,39	0,12
60	217,7	5,51	0,8	0,6	216,81	0,28	91,39	0,05
60	217,7	6,15	0,8	0,6	216,70	0,32	92,08	0,04
60	217,7	10,19	0,8	0,6	216,05	0,54	94,34	0,05
60	217,7	13,06	0,8	0,6	215,58	0,64	94,94	0,04
60	217,7	15,77	0,8	0,6	215,14	0,86	95,21	0,06
60	217,7	19,02	0,8	0,6	214,62	0,95	95,31	0,06
60	217,7	22,86	0,8	0,6	214,00	1,13	95,25	0,07
60	217,7	26,11	0,8	0,6	213,47	1,31	95,11	0,07
60	217,7	31,80	0,8	0,6	212,55	1,70	94,75	0,11

As perdas em vazio e perdas de Joule foram determinadas numericamente e encontram-se apresentadas na tabela B.21.

Tabela B.21 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	P ₀ (W)	P _j (W)
60	217,7	1,48	144,79	0,81
60	217,7	5,51	144,79	11,22
60	217,7	6,15	144,79	13,98
60	217,7	10,19	144,79	38,39
60	217,7	13,06	144,79	63,06
60	217,7	15,77	144,79	91,94
60	217,7	19,02	144,79	133,74
60	217,7	22,86	144,79	193,19
60	217,7	26,11	144,79	252,03
60	217,7	31,80	144,79	373,85

B.1.4.2 – Comparações com o modelo estipulado por regras práticas

Ainda com a frequência de 60Hz, e cargas de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,8 , com diversas correntes de carga. A característica externa e rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.22).

Tabela B.22 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado pelas regras práticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	217,7	1,48	0,8	0,6	217,46	0,17	75,34	0,05
60	217,7	5,51	0,8	0,6	216,81	0,28	91,37	0,03
60	217,7	6,15	0,8	0,6	216,71	0,33	92,07	0,03
60	217,7	10,19	0,8	0,6	216,06	0,54	94,33	0,04
60	217,7	13,06	0,8	0,6	215,60	0,65	94,93	0,03
60	217,7	15,77	0,8	0,6	215,17	0,88	95,20	0,05
60	217,7	19,02	0,8	0,6	214,64	0,96	95,30	0,05
60	217,7	22,86	0,8	0,6	214,03	1,15	95,25	0,07
60	217,7	26,11	0,8	0,6	213,51	1,33	95,11	0,07
60	217,7	31,80	0,8	0,6	212,59	1,72	94,75	0,11

B.1.4.3 – Comparações com o modelo definido por leis matemáticas

Com a frequência de 60Hz, e cargas de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,8 , com diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.23).

Tabela B.23 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	217,7	1,48	0,8	0,6	217,46	0,17	75,31	0,01
60	217,7	5,51	0,8	0,6	216,81	0,28	91,36	0,02
60	217,7	6,15	0,8	0,6	216,70	0,32	92,06	0,02
60	217,7	10,19	0,8	0,6	216,05	0,54	94,32	0,03
60	217,7	13,06	0,8	0,6	215,58	0,64	94,93	0,03
60	217,7	15,77	0,8	0,6	215,14	0,86	95,20	0,05
60	217,7	19,02	0,8	0,6	214,62	0,95	95,30	0,05
60	217,7	22,86	0,8	0,6	213,99	1,13	95,24	0,06
60	217,7	26,11	0,8	0,6	213,47	1,31	95,11	0,07
60	217,7	31,80	0,8	0,6	212,54	1,69	94,75	0,11

B.1.4.4 – Análise de desvios dos modelos com cargas indutivas à frequência de alimentação 60Hz, impondo factor de potência 0,8

Conforme indicado nas tabelas B.20, B.22 e B.23, os desvios da característica externa e rendimentos entre os resultados provenientes de ensaio e os diversos modelos teóricos, para este tipo de carga e frequência, são valores insignificantes. Os valores extremos dos referidos desvios encontram-se indicados na tabela B.24.

Tabela B.24 : Valores extremos dos desvios da característica externa e rendimentos (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

Extremos	Desvios	
	$U_2 (I_2)$ (%)	η (%)
Máximo	1,72	0,12
Mínimo	0,17	0,01

B.1.5 – Cargas capacitivas em modelos à frequência de alimentação 60Hz, impondo factor de potência 0,8 e 0,9
Grandezas experimentais

As cargas utilizadas foram de natureza predominantemente capacitiva, impondo factores de potência próximos de 0,8 e de 0,9 , com diversas correntes de carga, à frequência de 60Hz, conforme abaixo indicadas na tabela B.25. As tensões medidas no secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.25).

Tabela B.25 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas capacitivas; factores de potência próximos de 0,8 e 0,9)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	η (%)
60	217,7	1,184	0,8360	0,5487	217,5	71,90
60	217,7	4,810	0,8455	0,5340	217,1	90,86
60	217,7	6,118	0,9102	0,4142	216,9	92,93
60	217,7	10,737	0,8085	0,5885	216,8	94,55
60	217,7	13,792	0,8092	0,5875	216,7	95,10
60	217,7	15,320	0,7940	0,6079	216,7	95,16
60	217,7	18,830	0,8084	0,5886	216,5	95,38
60	217,7	23,870	0,8050	0,5933	216,5	95,28
60	217,7	25,780	0,8019	0,5975	216,3	95,18
60	217,7	31,990	0,8024	0,5968	216,1	94,82

B.1.5.1 – Comparações com o modelo de base experimental

As tensões secundárias determinadas através do modelo experimental, bem como os desvios relativamente aos valores medidos (indicados na tabela B.25, encontram-se indicados na tabela seguinte, (tabela B.26). As referidas tensões foram determinadas tendo em conta as grandezas e parâmetros indicados nas tabelas 4.2 , 4.5 do capítulo 4.

Tabela B.26 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas capacitivas; factores de potência próximos de 0,8 e 0,9)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	217,7	1,184	0,8360	0,5487	217,65	0,07	71,97	0,10
60	217,7	4,810	0,8455	0,5340	217,47	0,17	90,90	0,04
60	217,7	6,118	0,9102	0,4142	217,28	0,18	92,96	0,03
60	217,7	10,737	0,8085	0,5885	217,30	0,23	94,58	0,03
60	217,7	13,792	0,8092	0,5875	217,18	0,22	95,13	0,03
60	217,7	15,320	0,7940	0,6079	217,19	0,23	95,18	0,02
60	217,7	18,830	0,8084	0,5886	217,00	0,23	95,4	0,02
60	217,7	23,870	0,8050	0,5933	216,83	0,15	95,31	0,03
60	217,7	25,780	0,8019	0,5975	216,78	0,22	95,21	0,03
60	217,7	31,990	0,8024	0,5968	216,56	0,21	94,85	0,03

Com as perdas em vazio e perdas de Joule determinadas numericamente e apresentadas na tabela B.27.

Tabela B.27 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	P_0 (W)	P_j (W)
60	217,7	1,184	144,79	0,52
60	217,7	4,810	144,79	8,55
60	217,7	6,118	144,79	13,84
60	217,7	10,737	144,79	42,62
60	217,7	13,792	144,79	70,32
60	217,7	15,320	144,79	86,77
60	217,7	18,830	144,79	131,08
60	217,7	23,870	144,79	210,64
60	217,7	25,780	144,79	245,70
60	217,7	31,990	144,79	378,33

B.1.5.2 – Comparações com o modelo estipulado por regras práticas

Ainda com a frequência de 60Hz, e cargas de natureza predominantemente capacitiva, impondo factores de potência 0,8 e 0,9 , com diversas correntes de carga. A característica externa e rendimentos encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.28).

Tabela B.28 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas capacitivas; factores de potência próximos de 0,8 e 0,9)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	217,7	1,184	0,8360	0,5487	217,65	0,07	71,93	0,04
60	217,7	4,810	0,8455	0,5340	217,46	0,17	90,88	0,02
60	217,7	6,118	0,9102	0,4142	217,28	0,18	92,95	0,02
60	217,7	10,737	0,8085	0,5885	217,28	0,22	94,57	0,02
60	217,7	13,792	0,8092	0,5875	217,16	0,21	95,12	0,02
60	217,7	15,320	0,7940	0,6079	217,16	0,21	95,18	0,02
60	217,7	18,830	0,8084	0,5886	216,97	0,22	95,39	0,01
60	217,7	23,870	0,8050	0,5933	216,80	0,14	95,30	0,02
60	217,7	25,780	0,8019	0,5975	216,74	0,20	95,20	0,02
60	217,7	31,990	0,8024	0,5968	216,51	0,19	94,84	0,02

B.1.5.3 – Comparações com o modelo definido por leis matemáticas

Ainda com a frequência de 60Hz, e cargas de natureza predominantemente capacitiva, impondo factores de potência 0,8 e 0,9 , com diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.29).

Tabela B.29 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas capacitivas; factores de potência próximos de 0,8 e 0,9)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ_2	sin φ_2	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	217,7	1,184	0,8360	0,5487	217,66	0,07	71,00	0,00
60	217,7	4,810	0,8455	0,5340	217,53	0,20	90,40	0,01
60	217,7	6,118	0,9102	0,4142	217,49	0,27	92,05	0,01
60	217,7	10,737	0,8085	0,5885	217,32	0,24	94,51	0,02
60	217,7	13,792	0,8092	0,5875	217,22	0,24	95,06	0,01
60	217,7	15,320	0,7940	0,6079	217,16	0,21	95,21	0,02
60	217,7	18,830	0,8084	0,5886	217,04	0,25	95,35	0,02
60	217,7	23,870	0,8050	0,5933	216,86	0,17	95,27	0,01
60	217,7	25,780	0,8019	0,5975	216,80	0,23	95,19	0,02
60	217,7	31,990	0,8024	0,5968	216,58	0,22	94,83	0,03

B.1.5.4 – Análise de desvios dos modelos com cargas capacitivas à frequência de alimentação 60Hz, impondo factores de potência 0,8 e 0,9

Conforme indicado nas tabelas B.26, B.28 e B.29, os desvios da característica externa e rendimentos entre os resultados provenientes de ensaio e os diversos modelos teóricos, para este tipo de carga e frequência, são valores insignificantes. Os valores extremos dos referidos desvios encontram-se indicados nas tabelas B.30 e B.31.

Tabela B.30 : Valores extremos dos desvios da característica externa e rendimentos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,8)

Extremos	Desvios	
	$U_2 (I_2)$ (%)	η (%)
Máximo	0,25	0,10
Mínimo	0,07	0,00

Tabela B.31 : Valores extremos dos desvios da característica externa e rendimentos (carga capacitiva; factor de potência próximo de 0,9)

Extremos	Desvios	
	$U_2 (I_2)$ (%)	η (%)
Máximo	0,27	0,03
Mínimo	0,18	0,01

B.1.6 – Cargas capacitivas em modelos a frequência de alimentação 60Hz, impondo factor de potência 0

Grandezas experimentais

As cargas utilizadas foram de natureza predominantemente capacitiva, impondo factor de potência próximo de 0, com diversas correntes de carga, a frequência de 60Hz, conforme abaixo indicadas na tabela B.32. As tensões medidas no secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.32).

Tabela B.32 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	η (%)
60	217,7	1,32	0,0190	1	217,6	6,09
60	217,7	4,67	0,0009	1	218,2	1,03
60	217,7	6,43	0,0016	1	218,9	2,37
60	217,7	10,34	0,0040	1	219,4	7,84
60	217,7	13,49	0,0045	1	219,9	9,80
60	217,7	14,81	0,0052	1	220,1	11,47
60	217,7	18,10	0,0065	1	220,7	14,43
60	217,7	22,00	0,0078	1	221,4	16,84
60	217,7	25,29	0,0084	1	222,1	17,60
60	217,7	31,78	0,0100	1	223,1	19,10

B.1.6.1 – Comparações com o modelo de base experimental

As tensões secundárias determinadas através do modelo experimental, bem como os desvios relativamente aos valores medidos (indicados na tabela B.32, encontram-se indicados na tabela seguinte, (tabela B.33).

Tabela B.33 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	Cos φ ₂	sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	217,7	1,32	0,0190	1	217,84	0,11	6,11	0,33
60	217,7	4,67	0,0009	1	218,19	0,00	1,03	0,00
60	217,7	6,43	0,0016	1	218,38	-0,24	2,37	0,00
60	217,7	10,34	0,0040	1	218,79	-0,28	7,84	0,00
60	217,7	13,49	0,0045	1	219,12	-0,35	9,80	0,00
60	217,7	14,81	0,0052	1	219,26	-0,38	11,46	-0,09
60	217,7	18,10	0,0065	1	219,60	-0,50	14,41	-0,14
60	217,7	22,00	0,0078	1	220,01	-0,63	16,81	-0,18
60	217,7	25,29	0,0084	1	220,35	-0,79	17,54	-0,34
60	217,7	31,78	0,0100	1	221,02	-0,93	19,01	-0,47

Com as perdas em vazio e perdas de Joule determinadas numericamente e apresentadas na tabela B.34.

Tabela B.34 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	P ₀ (W)	P _j (W)
60	217,7	1,32	145,12	0,64
60	217,7	4,67	145,12	8,07
60	217,7	6,43	145,12	15,29
60	217,7	10,34	145,12	39,54
60	217,7	13,49	145,12	67,30
60	217,7	14,81	145,12	81,11
60	217,7	18,10	145,12	121,15
60	217,7	22,00	145,12	178,99
60	217,7	25,29	145,12	236,52
60	217,7	31,78	145,12	373,50

B.1.6.2 – Comparações com o modelo estipulado por regras práticas

Com a frequência de 60Hz, e cargas de natureza predominantemente capacitiva, impondo factor de potência 0, com diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.35).

Tabela B.35 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas capacitivas; factor de potência próximos de 0)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	Sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	217,7	1,32	0,0190	1	217,83	0,11	6,10	0,16
60	217,7	4,67	0,0009	1	218,18	-0,01	1,03	0,00
60	217,7	6,43	0,0016	1	218,36	-0,25	2,37	0,00
60	217,7	10,34	0,0040	1	218,76	-0,29	7,82	-0,26
60	217,7	13,49	0,0045	1	219,09	-0,37	9,78	-0,20
60	217,7	14,81	0,0052	1	219,22	-0,40	11,45	-0,17
60	217,7	18,10	0,0065	1	219,56	-0,52	14,39	-0,28
60	217,7	22,00	0,0078	1	219,95	-0,65	16,78	-0,36
60	217,7	25,29	0,0084	1	220,29	-0,81	17,52	-0,45
60	217,7	31,78	0,0100	1	220,95	-0,96	19,00	-0,52

B.1.6.3 – Comparações com o modelo definido por leis matemáticas

Ainda com a frequência de 60Hz, e cargas de natureza predominantemente capacitiva, impondo factor de potência 0, com diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.36).

Tabela B.36 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ_2	sin φ_2	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	217,7	1,32	0,0190	1	217,84	0,11	6,09	0,00
60	217,7	4,67	0,0009	1	218,19	0,00	1,02	-0,97
60	217,7	6,43	0,0016	1	218,38	-0,24	2,37	0,00
60	217,7	10,34	0,0040	1	218,79	-0,28	7,82	-0,26
60	217,7	13,49	0,0045	1	219,12	-0,35	9,78	-0,20
60	217,7	14,81	0,0052	1	219,26	-0,38	11,44	-0,26
60	217,7	18,10	0,0065	1	219,60	-0,50	14,38	-0,35
60	217,7	22,00	0,0078	1	220,01	-0,63	16,78	-0,36
60	217,7	25,29	0,0084	1	220,35	-0,79	17,52	-0,45
60	217,7	31,78	0,0100	1	221,03	-0,93	19,00	-0,52

B.1.6.4 – Análise de desvios dos modelos com cargas capacitivas à frequência de alimentação 60Hz, impondo factor de potência 0

Conforme indicado nas tabelas B.33, B.35 e B.36, os desvios da característica externa e rendimentos entre os resultados provenientes de ensaio e os diversos modelos teóricos, para este tipo de carga e frequência, são valores insignificantes. Os valores extremos dos referidos desvios encontram-se indicados nas tabelas B.37.

Tabela B.37 : Valores extremos dos desvios da característica externa e rendimentos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0)

Extremos	Desvios	
	$U_2 (I_2)$ (%)	η (%)
Máximo	0,11	0,33
Mínimo	-0,96	-0,97

B.1.7 – Cargas indutivas em modelos à frequência de alimentação 65Hz, impondo factor de potência 0,8

Grandezas experimentais

As cargas utilizadas foram de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,8 , com diversas correntes de carga, à frequência de 65Hz, conforme abaixo indicadas na tabela B.38. Também, na referida tabela encontram-se registadas as tensões medidas no secundário do transformador e os rendimentos calculados.

Tabela B.38 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 carga (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2 (I_2)$ (V)	η (%)
65	236,2	1,56	0,8	0,6	235,1	75,87
65	236,2	5,18	0,8	0,6	234,2	90,78
65	236,2	6,60	0,8	0,6	233,7	92,35
65	236,2	10,29	0,8	0,6	232,7	94,31
65	236,2	13,42	0,8	0,6	231,9	94,98
65	236,2	14,82	0,8	0,6	231,5	95,15
65	236,2	16,88	0,8	0,6	230,6	95,29

B.1.7.1 – Comparações com o modelo de base experimental

As tensões secundárias determinadas através do modelo experimental, bem como os desvios relativamente aos valores medidos (indicados na tabela B.38), encontram-se indicados na tabela seguinte, (tabela B.39).

Tabela B.39 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \phi_2$	$\sin \phi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
65	236,2	1,56	0,8	0,6	235,94	0,36	75,98	0,14
65	236,2	5,18	0,8	0,6	235,33	0,48	90,84	0,07
65	236,2	6,60	0,8	0,6	235,09	0,59	92,41	0,06
65	236,2	10,29	0,8	0,6	234,47	0,76	94,36	0,05
65	236,2	13,42	0,8	0,6	233,94	0,88	95,04	0,06
65	236,2	14,82	0,8	0,6	233,70	0,95	95,20	0,05
65	236,2	16,88	0,8	0,6	233,36	1,20	95,35	0,06

Com as perdas em vazio e perdas de Joule determinadas numericamente e apresentadas na tabela B.40.

Tabela B.40 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	P_0 (W)	P_j (W)
65	236,2	1,56	160,37	0,90
65	236,2	5,18	160,37	9,96
65	236,2	6,60	160,37	16,16
65	236,2	10,29	160,37	39,29
65	236,2	13,42	160,37	66,83
65	236,2	14,82	160,37	81,50
65	236,2	16,88	160,37	105,73

B.1.7.2 – Comparações com o modelo estipulado por regras práticas

Ainda com a frequência de 65Hz, e cargas de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,8 , com diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.41).

Tabela B.41 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
65	236,2	1,56	0,8	0,6	235,94	0,36	75,98	0,14
65	236,2	5,18	0,8	0,6	235,34	0,49	90,84	0,07
65	236,2	6,60	0,8	0,6	235,10	0,60	92,42	0,08
65	236,2	10,29	0,8	0,6	234,49	0,77	94,37	0,06
65	236,2	13,42	0,8	0,6	233,97	0,89	95,04	0,06
65	236,2	14,82	0,8	0,6	233,74	0,97	95,21	0,06
65	236,2	16,88	0,8	0,6	233,40	1,21	95,36	0,07

B.1.7.3 – Comparações com o modelo definido por leis matemáticas

Ainda com a frequência de 65Hz, e cargas de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,8 , com diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.42).

Tabela B.42 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
65	236,2	1,56	0,8	0,6	235,94	0,36	75,92	0,07
65	236,2	5,18	0,8	0,6	235,33	0,48	90,82	0,04
65	236,2	6,60	0,8	0,6	235,09	0,59	92,39	0,04
65	236,2	10,29	0,8	0,6	234,47	0,76	94,35	0,04
65	236,2	13,42	0,8	0,6	233,95	0,88	95,03	0,05
65	236,2	14,82	0,8	0,6	233,71	0,95	95,19	0,04
65	236,2	16,88	0,8	0,6	233,37	1,20	95,35	0,06

B.1.7.4 – Análise de desvios dos modelos com cargas indutivas à frequência de alimentação 65Hz, impondo factor de potência 0,8

Conforme indicado nas tabelas B.39, B.41 e B.42, os desvios da característica externa e rendimentos entre os resultados provenientes de ensaio e os diversos modelos teóricos, para este tipo de carga e frequência, são valores insignificantes. Os valores extremos dos referidos desvios encontram-se indicados na tabela B.43.

Tabela B.43 : Valores extremos dos desvios da
características externa e rendimentos
(cargas indutivas; factor de potência 0,8)

Extremos	Desvios	
	$U_2 (I_2)$ (%)	η (%)
Máximo	1,21	0,14
Mínimo	0,36	0,04

B.2 – Comparações de características externas $U_2(I_2)$ e rendimentos entre os modelos experimentais, modelos provenientes das regras práticas e leis de variação de parâmetros no transformador Dy.

B.2.1 – Cargas indutivas em modelos a frequência de alimentação 45Hz, impondo factor de potência 0,85

Grandezas experimentais

As cargas utilizadas foram de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,85 , com diversas correntes de carga, à frequência de 45Hz. As tensões medidas no secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.44).

Tabela B.44 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas indutivas; factor de potência 0,85)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	η (%)
45	180,2	4,14	0,851	0,525	177,50	92,67
45	180,2	18,99	0,851	0,525	172,87	94,79
45	180,2	21,40	0,851	0,525	172,15	94,49
45	180,2	28,22	0,851	0,525	169,79	93,46

B.2.1.1 – Comparações com o modelo de base experimental

As tensões secundárias determinadas através do modelo experimental, bem como os desvios relativamente aos valores medidos (indicados na tabela B.44), encontram-se indicados na tabela seguinte, (tabela B.45).

Tabela B.45 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas indutivas; factor de potência 0,85)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	Sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	180,2	4,14	0,851	0,525	179,42	1,07	92,76	0,10
45	180,2	18,99	0,851	0,525	176,63	2,13	94,90	0,12
45	180,2	21,40	0,851	0,525	176,18	2,29	94,60	0,12
45	180,2	28,22	0,851	0,525	174,90	2,92	93,63	0,18

As perdas em vazio e perdas de Joule foram determinadas numericamente e encontram-se apresentadas na tabela B.46.

Tabela B.46 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	P ₀ (W)	P _j (W)
45	180,2	4,14	76,47	9,01
45	180,2	18,99	76,47	189,48
45	180,2	21,40	76,47	240,62
45	180,2	28,22	76,47	418,43

B.2.1.2 – Comparações com o modelo estipulado por regras práticas

Ainda com a frequência de 45Hz, e cargas de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,85 , com diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.47).

Tabela B.47 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas indutivas; factor de potência 0,85)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ_2	Sin φ_2	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	180,2	4,14	0,851	0,525	179,43	1,08	92,33	-0,37
45	180,2	18,99	0,851	0,525	176,68	2,16	94,59	-0,21
45	180,2	21,40	0,851	0,525	176,23	2,32	94,28	-0,22
45	180,2	28,22	0,851	0,525	174,96	2,95	93,25	-0,23

B.2.1.3 – Comparações com o modelo definido por leis matemáticas

Ainda com a frequência de 45Hz, e cargas de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,85 , com diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.48).

Tabela B.48 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas indutivas; factor de potência 0,85)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ_2	sin φ_2	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	180,2	4,14	0,851	0,525	179,42	1,07	92,75	0,09
45	180,2	18,99	0,851	0,525	176,63	2,13	94,89	0,11
45	180,2	21,40	0,851	0,525	176,18	2,29	94,60	0,12
45	180,2	28,22	0,851	0,525	174,90	2,92	93,63	0,18

B.2.1.4 – Análise de desvios dos modelos com cargas indutivas à frequência de alimentação 45Hz, impondo factor de potência 0,85

Conforme indicado nas tabelas B.45, B.47 e B.48, os desvios da características externa e rendimentos entre os resultados provenientes de ensaio e os diversos modelos teóricos, para este tipo de carga e frequência, são valores insignificantes. Os valores extremos dos referidos desvios encontram-se indicados na tabela B.49.

Tabela B.49 : Valores extremos dos desvios da característica externa e rendimentos (cargas indutivas; factor de potência 0,85)

Extremos	Desvios	
	$U_2 (I_2)$ (%)	η (%)
Máximo	3,04	0,18
Mínimo	1,08	-0,37

B.2.2 – Cargas resistivas nos modelos à frequência de alimentação 45Hz
Grandezas experimentais

As cargas utilizadas foram de natureza resistiva, impondo diversas correntes de carga, à frequência de alimentação 45Hz, conforme abaixo indicado na tabela B.50. As tensões medidas no secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.50).

Tabela B.50 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas resistivas)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	η (%)
45	180,2	2,10	1	0	178,3	89,15
45	180,2	4,66	1	0	177,5	94,21
45	180,2	15,37	1	0	174,5	95,86

B.2.2.1 – Comparações com o modelo de base experimental

As tensões secundárias determinadas através do modelo experimental, bem como os desvios relativamente aos valores medidos (indicados na tabela B.50), encontram-se indicados na tabela seguinte, (tabela B.51).

Tabela B.51 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas resistivas)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \phi_2$	$\sin \phi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	180,2	2,10	1	0	179,83	0,86	89,25	0,11
45	180,2	4,66	1	0	179,38	1,06	94,28	0,07
45	180,2	15,37	1	0	177,51	1,72	95,93	0,07

Com as perdas em vazio e perdas de Joule determinadas numericamente e apresentadas na tabela B.52.

Tabela B.52 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	P_0 (W)	P_j (W)
45	180,2	2,10	76,47	2,32
45	180,2	4,66	76,47	11,41
45	180,2	15,37	76,47	124,12

B.2.2.2 – Comparações com o modelo estipulado por regras práticas

A comparação será efectuada com o seguinte regime de funcionamento: Frequência de alimentação 45Hz, cargas resistivas impondo diversas correntes de carga.

As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.53).

Tabela B.53 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas resistivas)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	Sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	180,2	2,10	1	0	179,83	0,86	89,25	0,11
45	180,2	4,66	1	0	179,38	1,06	94,28	0,07
45	180,2	15,37	1	0	177,51	1,72	95,93	0,07

B.2.2.3 – Comparações com o modelo definido por leis matemáticas

A comparação será efectuada com o seguinte regime de funcionamento: Frequência de alimentação 45Hz, cargas resistivas, impondo diversas correntes de carga.

As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.54).

Tabela B.54 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas resistivas)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
45	180,2	2,10	1	0	179,89	0,88	87,59	-1,78
45	180,2	4,66	1	0	179,51	1,12	93,34	-0,93
45	180,2	15,37	1	0	177,91	1,92	95,26	-0,63

B.2.2.4 – Análise de desvios dos modelos com cargas resistivas à frequência de alimentação 45Hz

Conforme indicado nas tabelas B.51, B.53 e B.54, os desvios da característica externa e rendimentos entre os resultados provenientes de ensaio e os diversos modelos teóricos, para este tipo de carga e frequência, são valores insignificantes. Os valores extremos dos referidos desvios encontram-se indicados na tabela B.55.

Tabela B.55 : Valores extremos dos desvios da característica externa e rendimentos (cargas resistivas)

Extremos	Desvios	
	$U_2 (I_2)$ (%)	η (%)
Máximo	1,95	0,11
Mínimo	0,86	0,07

B.2.3 – Cargas indutivas em modelos à frequência de alimentação 60Hz, impondo factor de potência 0,85

Grandezas experimentais

As cargas utilizadas foram de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência o mais próximo possível de 0,85 , com diversas correntes de carga, à frequência de 60Hz, conforme abaixo indicadas na tabela B.56. As tensões medidas no secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.56).

Tabela B.56 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas indutivas; factor de potência 0,85)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	η (%)
60	240,4	4,34	0,851	0,525	237,2	92,46
60	240,4	18,39	0,851	0,525	232,2	95,51
60	240,4	27,85	0,851	0,525	228,7	94,64

B.2.3.1 – Comparações com o modelo de base experimental

As tensões secundárias determinadas através do modelo experimental, bem como os desvios relativamente aos valores medidos (indicados na tabela B.56, encontram-se indicados na tabela seguinte, (tabela B.57).

Tabela B.57 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo de base experimental (cargas indutivas; factor de potência 0,85)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	240,4	4,34	0,851	0,525	239,49	0,97	92,52	0,06
60	240,4	18,39	0,851	0,525	236,54	1,87	95,58	0,07
60	240,4	27,85	0,851	0,525	234,56	2,56	94,76	0,13

Com as perdas em vazio e perdas de Joule determinadas numericamente e apresentadas na tabela B.58.

Tabela B.58 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	P_0 (W)	P_j (W)
60	240,4	4,34	113,67	10,18
60	240,4	18,39	113,67	182,75
60	240,4	27,85	113,67	419,12

B.2.3.2 – Comparações com o modelo estipulado por regras práticas

Ainda com a frequência de 60Hz, e cargas de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor o mais próximo possível de potência 0,85 , com diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.59).

Tabela B.59 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas indutivas; factor de potência 0,85)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	240,4	4,34	0,851	0,525	239,50	0,97	92,55	0,10
60	240,4	18,39	0,851	0,525	236,59	1,89	95,57	0,06
60	240,4	27,85	0,851	0,525	234,62	2,59	94,73	0,10

B.2.3.3 – Comparações com o modelo definido por leis matemáticas

Ainda com a frequência de 60Hz, e cargas de natureza predominantemente indutiva, impondo um factor de potência 0,85 , com diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.60).

Tabela B.60 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas indutivas; factor de potência 0,8)

f (Hz)	U_{02} (V)	I_2 (A)	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$U_2(I_2)$ (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	240,4	4,34	0,851	0,525	239,49	0,97	92,52	0,06
60	240,4	18,39	0,851	0,525	236,56	1,88	95,55	0,04
60	240,4	27,85	0,851	0,525	234,58	2,57	94,70	0,06

B.2.3.4 – Análise de desvios dos modelos com cargas indutivas a frequência de alimentação 60Hz, impondo factor de potência 0,85

Conforme indicado nas tabelas B.57, B.59 e B.60, os desvios da característica externa e rendimentos entre os resultados provenientes de ensaio e os diversos modelos teóricos, para este tipo de carga e frequência, são valores insignificantes. Os valores extremos dos referidos desvios encontram-se indicados na tabela B.61.

Tabela B.61 : Valores extremos dos desvios da característica externa e rendimentos (cargas indutivas; factor de potência 0,85)

Extremos	Desvios	
	$U_2(I_2)$ (%)	η (%)
Máximo	2,59	0,13
Mínimo	0,97	0,04

B.2.4 – Cargas capacitivas em modelos a frequência de alimentação 60Hz, impondo factor de potência 0,85

Grandezas experimentais

Neste caso, as cargas foram de natureza predominantemente capacitiva, impondo um factor de potência o mais próximo possível de 0.85, com diversas correntes de carga, à frequência de 60Hz, conforme abaixo indicadas na tabela B.62. As tensões medidas no secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.62).

Tabela B.62 : Característica externa proveniente de ensaios. Rendimentos calculados com base nos valores medidos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,85)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	η (%)
60	240,4	5,21	0,8496	0,5274	238,0	93,43
60	240,4	19,23	0,8527	0,5224	235,5	95,53

B.2.4.1 – Comparações com o modelo de base experimental

Neste caso, as cargas utilizadas são capacitivas. Devido ao facto das cargas capacitivas terem variações por escalões, os factores de potência apresentados foram os mais próximos de 0.85 . As tensões secundárias determinadas através do modelo experimental, bem como os desvios relativamente aos valores medidos (indicados na tabela B.62, encontram-se indicados na tabela seguinte, (tabela B.63).

Tabela B.63 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo experimental (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,85)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	240,4	5,21	0,8496	0,5274	239,90	0,80	93,48	0,05
60	240,4	19,23	0,8527	0,5224	238,53	1,29	95,58	0,05

As perdas em vazio e perdas de Joule foram determinadas numericamente e encontram-se indicadas na tabela B.64.

Tabela B.64 : Perdas em vazio e de Joule determinadas através dos parâmetros do modelo experimental

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	P ₀ (W)	P _J (W)
60	240,4	5,21	113,67	14,67
60	240,4	19,23	113,67	199,82

B.2.4.2 – Comparações com o modelo estipulado por regras práticas

As condições de funcionamento são: Frequência da alimentação 60Hz; Cargas de natureza predominantemente capacitiva, impondo um factor de potência 0.85, com diversas correntes de carga.

As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.65). Os valores de factor de potência são os mais próximos de 0.85 que se pôde obter.

Tabela B.65 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo estipulado por regras práticas (cargas capacitivas; factor de potência 0,85)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ ₂	sin φ ₂	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	240,4	5,21	0,8496	0,5274	239,87	0,79	93,50	0,07
60	240,4	19,23	0,8527	0,5224	238,44	1,25	95,56	0,03

B.2.4.3 – Comparações com o modelo definido por leis matemáticas

Ainda com a frequência de 60Hz, e cargas de natureza predominantemente capacitiva, impondo um factor de potência o mais próximo possível de 0.85, com diversas correntes de carga. As tensões determinadas para o secundário do transformador e os rendimentos calculados encontram-se na tabela abaixo indicada (tabela B.66).

Tabela B.66 : Característica externa e Rendimentos determinados através do modelo definido por leis matemáticas (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,85)

f (Hz)	U ₀₂ (V)	I ₂ (A)	cos φ_2	sin φ_2	U ₂ (I ₂) (V)	Desvio (%)	η (%)	Desvio (%)
60	240,4	5,21	0,8496	0,5274	239,87	0,79	93,48	0,05
60	240,4	19,23	0,8527	0,5224	238,43	1,24	95,54	0,01

B.2.4.4 – Análise de desvios dos modelos com cargas capacitivas e frequência de alimentação 60Hz

Conforme indicado nas tabelas B.63, B.65 e B.66, os desvios da característica externa e rendimentos entre os resultados provenientes de ensaio e os diversos modelos teóricos, para este tipo de carga e frequência, são valores insignificantes. Os valores extremos dos referidos desvios encontram-se indicados na tabela B.67.

Tabela B.67 : Valores extremos dos desvios da característica externa e rendimentos (cargas capacitivas; factor de potência próximo de 0,85)

Extremos	Desvios	
	U ₂ (I ₂) (%)	η (%)
Máximo	1,29	0,07
Mínimo	0,79	0,01

B.3 – Síntese

Na tabela seguinte (tabela B.68), apresenta-se o resumo, indicando os desvios gerais da característica externa e rendimentos dos diversos modelos, comparados com os resultados experimentais.

Tabela B.68 : Tabela resumo de desvios gerais da característica externa e rendimentos dos diversos modelos comparados com os resultados experimentais

Transformador	Tipo de carga	Modelo	f (Hz)	cos φ_2	Desvios (%)			
					U ₂ (I ₂)		η	
					Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Yy	Indutiva	Base experimental	45	0,8	0,34	1,83	0,06	0,18
Yy	Indutiva	Regras práticas	45	0,8	0,34	1,84	0,06	0,18
Yy	Indutiva	Leis Matemáticas	45	0,8	0,34	1,83	0,05	0,15
Yy	Capacitiva	Base experimental	45	0,8	0,13	0,55	0,03	0,14
Yy	Capacitiva	Regras práticas	45	0,8	0,13	0,56	-0,08	0,14
Yy	Capacitiva	Leis Matemáticas	45	0,8	0,13	0,55	0,03	0,12
Yy	Capacitiva	Base experimental	45	0	-0,55	0,18	-0,15	0,63
Yy	Capacitiva	Regras práticas	45	0	-0,56	0,18	-0,15	0,63
Yy	Capacitiva	Leis Matemáticas	45	0	-0,55	0,18	-0,26	0,63
Yy	Indutiva	Base experimental	60	0,8	0,17	1,7	0,04	0,12
Yy	Indutiva	Regras práticas	60	0,8	0,17	1,72	0,03	0,11
Yy	Indutiva	Leis Matemáticas	60	0,8	0,17	1,69	0,01	0,11
Yy	Capacitiva	Base experimental	60	0,8	0,07	0,23	0,02	0,10
Yy	Capacitiva	Regras práticas	60	0,8	0,07	0,22	0,01	0,04
Yy	Capacitiva	Leis Matemáticas	60	0,8	0,07	0,25	0,00	0,03
Yy	Capacitiva	Base experimental	60	0	-0,93	0,11	-0,47	0,33
Yy	Capacitiva	Regras práticas	60	0	-0,96	0,11	-0,52	0,16
Yy	Capacitiva	Leis Matemáticas	60	0	-0,93	0,11	-0,97	0,00
Yy	Indutiva	Base experimental	65	0,8	0,36	1,2	0,05	0,14
Yy	Indutiva	Regras práticas	65	0,8	0,36	1,21	0,06	0,14
Yy	Indutiva	Leis Matemáticas	65	0,8	0,36	1,2	0,04	0,07
Dy	Indutiva	Base experimental	45	0,85	1,08	3,01	0,10	0,18
Dy	Indutiva	Regras práticas	45	0,85	1,09	3,04	-0,37	-0,21
Dy	Indutiva	Leis Matemáticas	45	0,85	1,08	3,01	0,09	0,18
Dy	Resistiva	Base experimental	45	1	0,86	1,72	0,07	0,11
Dy	Resistiva	Regras práticas	45	1	0,86	1,72	0,07	0,11
Dy	Resistiva	Leis Matemáticas	45	1	0,89	1,95	0,08	0,11
Dy	Indutiva	Base experimental	60	0,85	0,97	2,56	0,06	0,13
Dy	Indutiva	Regras práticas	60	0,85	0,97	2,59	0,06	0,10
Dy	Indutiva	Leis Matemáticas	60	0,85	0,97	2,57	0,04	0,06
Dy	Capacitiva	Base experimental	60	0,85	0,80	1,29	0,05	0,05
Dy	Capacitiva	Regras práticas	60	0,85	0,79	1,25	0,03	0,07
Dy	Capacitiva	Leis Matemáticas	60	0,85	0,79	1,24	0,01	0,05

ANEXO C

BREVES CONCEITOS ACERCA DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES AO LONGO DE UM ENROLAMENTO DE UM TRANSFORMADOR, SUJEITO A UMA SOBRETENSÃO DE ELEVADA FREQUÊNCIA

O objectivo deste anexo é fazer uma breve abordagem acerca da distribuição da tensão ao longo dos enrolamentos de um transformador sujeito a sobretensões de elevada frequência, relacionando a referida repartição com os valores das capacidades inerentes aos enrolamentos (capacidades series e capacidades à terra).

C.1 – Modelização do enrolamento

Este estudo será baseado num modelo matemático, segundo os seguintes critérios:

- a) Considerar que a indutância mútua entre espiras é desprezável;
- b) Considerar que o enrolamento é uniforme;
- c) Considerar que a forma de onda aplicada aos terminais do transformador é de frente rectangular.

C.1.1 – Representação gráfica do modelo

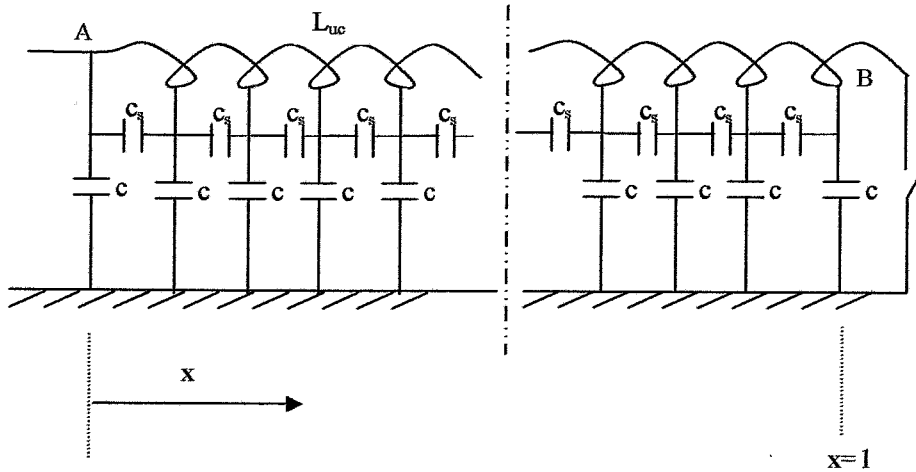


Figura C.1 : Modelização de um enrolamento
Legros, 60, p. 27

- c_s --- Capacidade série entre os pontos A e B, por unidade de comprimento [F/m];
- c --- Capacidade à terra, por unidade de comprimento [F/m];
- C_s --- Capacidade total série entre os pontos A e B [F];
- C --- Capacidade total à terra [F];
- L_{uc} --- Indutância, por unidade de comprimento [H/m]
- l_e --- Comprimento do enrolamento [m]
- x --- Comprimento medido a partir da entrada do enrolamento [m]

C.2 – Desenvolvimento matemático

A distribuição da tensão num enrolamento, para qualquer forma de onda, será conforme a seguinte expressão matemática:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - L_{uc} C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + L_{uc} C_s \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad (C.1)$$

Onde $u(x;t)$ corresponde à tensão de qualquer ponto do enrolamento, em relação à terra.

Para o desenvolvimento do modelo, considera-se que o enrolamento está sujeito a uma onda de frente rectangular e que a distribuição apresenta três etapas distintas:

1ª Etapa

A repartição inicial obtida durante o tempo de impacto da frente de onda: Nesta etapa, o enrolamento comporta-se como um sistema capacitivo, face à alta frequência em que se desenvolve o fenómeno;

2ª Etapa

Repartição intermédia: Esta etapa corresponde a uma situação transitória entre as etapas 1 e 3. Neste período, a tensão ao longo do enrolamento passa da repartição inicial (etapa 1), à repartição final (etapa 3) através de uma série de oscilações complexas, de amplitudes muito superiores às amplitudes na etapa 1, mas diferentes da repartição final;

3ª Etapa

Trata-se de uma repartição final após o amortecimento de todos os fenómenos transitórios.

C.2.1 – Resolução do modelo matemático no instante inicial (etapa 1)

Para a resolução da equação diferencial (C.1) no instante inicial, consideram-se as hipóteses de neutro ligado à terra e de neutro isolado, conforme os seguintes parágrafos.

C.2.1.1 – Transformador com neutro ligado à terra

Considerando o neutro do transformador ligado à terra (Ponto B ligado à terra), as condições fronteiras serão:

$$\text{para } x = 0; u(0,0) = U_A;$$

$$\text{para } x = l_e; u(l_e,0) = 0;$$

Sendo U_A a amplitude da onda de entrada [kV]

A solução da expressão matemática (C.1), será:

$$u(x,t) = U_A \times \frac{\operatorname{sh}\left(\alpha \cdot \left(\frac{l_e - x}{l_e}\right)\right)}{\operatorname{sh}(\alpha)} \quad (C.2)$$

$$\text{sendo } \alpha = \sqrt{\frac{C}{C_s}} \quad (C.3)$$

A respectiva representação gráfica encontra-se na seguinte figura:

Distribuição inicial de tensão (Neutro à terra)

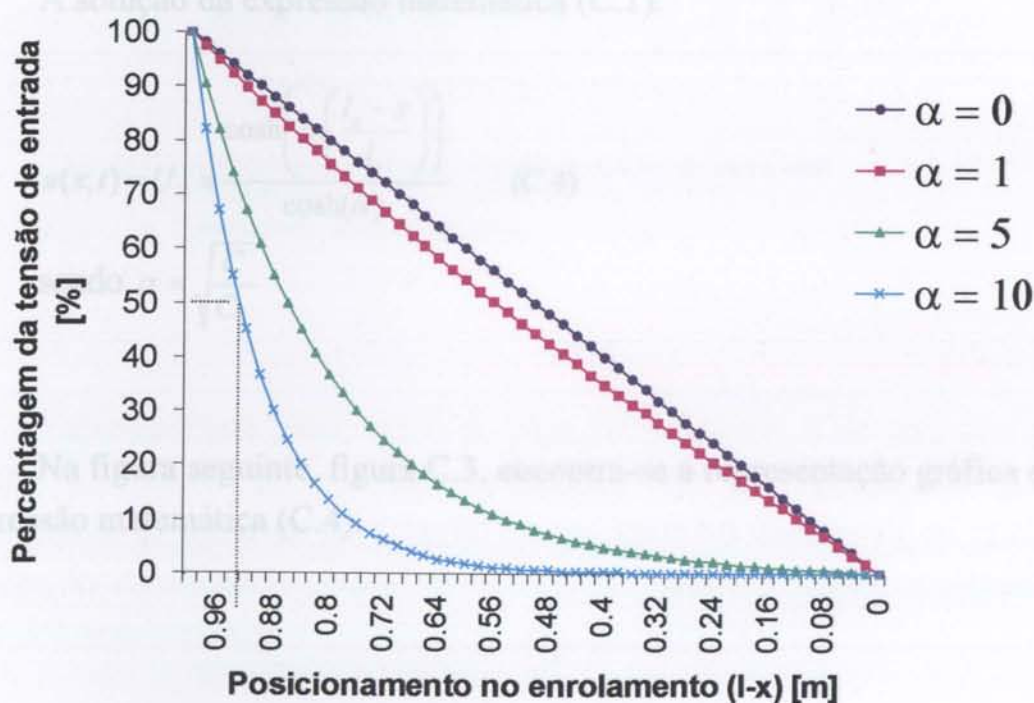


Figura C.2 : Representação gráfica da distribuição inicial de tensão num enrolamento com neutro ligado à terra, sujeito a uma sobretensão de alta frequência.

Constata-se que, a tensão decresce bruscamente no início do enrolamento. Conclui-se, que as primeiras espiras do enrolamento ficam sujeitos a grandes fadigas dieléctricas o que explica a sistemática ocorrência de avarias na entrada dos enrolamentos quando os transformadores são sujeitos a ondas de sobretensão de elevada frequência.

C.2.1.2 – Transformador com neutro isolado em relação à terra

Para o caso do neutro do transformador isolado em relação à terra (Ponto B isolado em relação à terra), as condições fronteiras serão:

$$\text{para } x = l_e; \frac{\partial u}{\partial x} = 0;$$

$$\text{para } x = 0; u(0,0) = U_A;$$

A solução da expressão matemática (C.1):

$$u(x,t) = U_A \times \frac{\cosh\left(\alpha \left(\frac{l_e - x}{l_e}\right)\right)}{\cosh(\alpha)} \quad (C.4)$$

$$\text{sendo } \alpha = \sqrt{\frac{C}{C_s}}$$

Na figura seguinte, figura C.3, encontra-se a representação gráfica da expressão matemática (C.4).

Distribuição inicial de tensão (Neutro isolado)

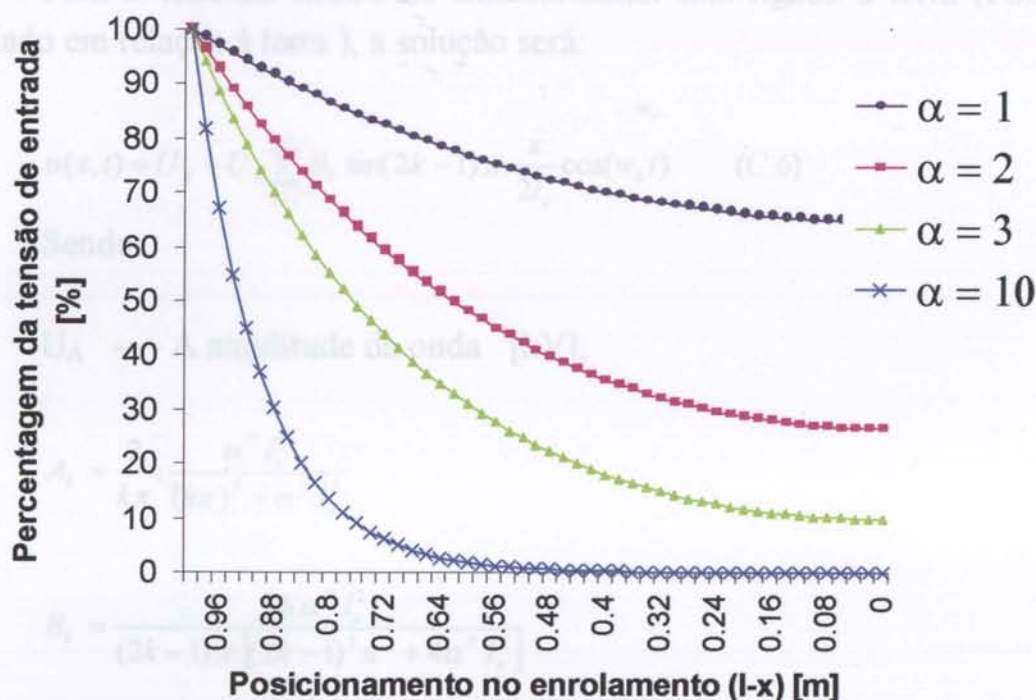


Figura C.3 : Representação gráfica da distribuição inicial de tensão num enrolamento com neutro isolado em relação à terra, sujeito a uma sobretensão de alta frequência.

C.3 - Análise de resultados

Também neste caso, como no parágrafo anterior, é de salientar que a tensão no início do enrolamento poderá ter um decréscimo brusco, dependendo do valor de α . Conclui-se que, também neste caso, as primeiras espiras do enrolamento podem ficar sujeitas a grandes fadigas dieléctricas e seus potenciais efeitos.

C.2.1.2 – Solução da equação (C.1) para instantes posteriores indicados como sendo etapas 2 e 3.

Para o caso do neutro do transformador ligado à terra (Ponto B ligado à terra), a solução será:

$$u(x,t) = U_A \left(1 - \frac{x}{l_e}\right) + U_A \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin\left(\frac{k\pi x}{l_e}\right) \cos(\omega_k t) \quad (C.5)$$

Para o caso do neutro do transformador não ligado à terra (Ponto B isolado em relação à terra), a solução será:

$$u(x,t) = U_A + U_A \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin(2k-1)\pi \cdot \frac{x}{2l_e} \cos(\omega_k t) \quad (C.6)$$

Sendo:

U_A ---- A amplitude da onda [kV];

$$A_k = \frac{2}{k\pi} \cdot \frac{\alpha^2 I_e^2}{(k\pi)^2 + \alpha^2 I_e^2}$$

$$B_k = \frac{16\alpha^2 I_e^2}{(2k-1)\pi \left[(2k-1)^2 \pi^2 + 4\alpha^2 I_e^2 \right]}$$

ω_k ---- pulsação própria, de ordem k.

C.3 - Análise de resultados

Em conformidade com a expressão matemática (C.2), a repartição do potencial ao longo da bobina no instante inicial é representada pela curva (a) da figura C.4.

A repartição final será aquela obtida em regime estacionário, ou seja à frequência nominal. Esta repartição de $u(x;t)$, devida à indutância do enrolamento, será linear – ver Figura C.4, curva (b).

A passagem do estado inicial ao final, em cada ponto é feita por uma série de oscilações cuja amplitude está compreendida entre as curvas (a) e (c) da figura C.4, que são de “certo modo” simétricas em relação à curva (b). As referidas oscilações são designadas por **ressonâncias**.

O gradiente de potencial à entrada do enrolamento durante o estado inicial, por exemplo no caso de neutro ligado à terra, será:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{ch\alpha}{sh\alpha} \times \frac{\alpha}{l_e^2}$$

Constata-se que este valor é proporcional com α .

Durante as oscilações, o referido gradiente de potencial é calculado de acordo com a seguinte expressão matemática:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{U_A}{l_e} + 2.U_A \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k.\pi}{l_e} \times \frac{\alpha^2 I_e^2}{k.\pi(k^2.\pi^2 + \alpha^2 I_e^2)} \cos(\omega_k t)$$

É de notar que o gradiente de potencial nesta etapa, oscila em torno do valor: $-\frac{U_A}{l_e}$

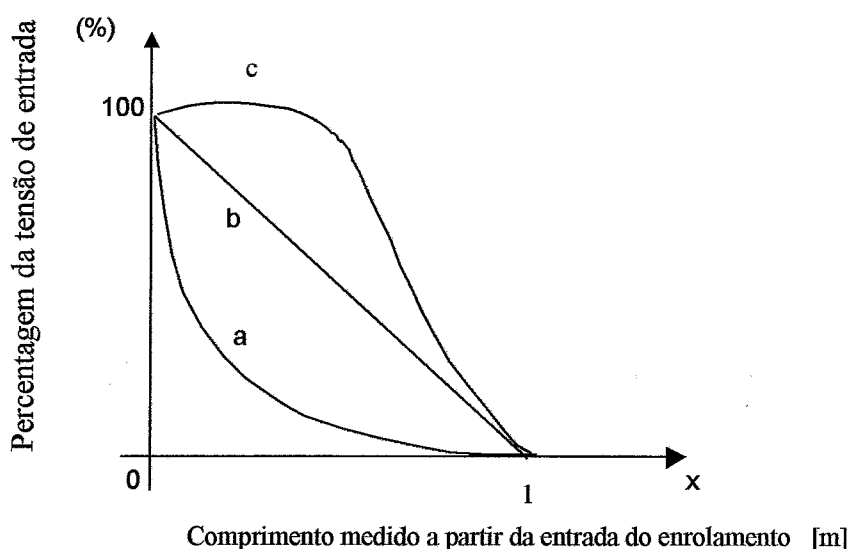


Figura C.4 : Representação gráfica das repartições durante as etapas: inicial, intermédia e final.

Willy Legros; Artigo: “Étude de la repartition de la tension dans un enrolement de transformateur de tension bobiné en couches soumis aux ondes de choc et aux surtensions de manoeuvres”

C.4 – Síntese e Conclusões:

Neste anexo, verificou-se que o gradiente do potencial à entrada do enrolamento (zona de maior solicitação dieléctrica), é proporcional com o parâmetro α .

Quando a repartição inicial da onda de sobretensão de alta frequência coincide com a repartição final, estamos perante um enrolamento anti-ressonante. Esta condição é realizada se o parâmetro $\alpha = \sqrt{\frac{C}{C_s}}$ tiver um valor

bastante reduzido. Teoricamente, se a capacidade total à massa (C) for nula ou com um valor desprezável, o parâmetro α será também de valor desprezável e a distribuição de tensão torna-se aproximadamente uniforme. Contudo, na prática é impossível eliminar as capacidades relativamente à terra, mas podem compensar-se as correntes necessárias para carregar essas capacidades, através de correntes vindas da linha, por um sistema de capacidades ligadas ao enrolamento, formando um **écran capacitivo**.

Regista-se a ideia de que o comportamento dos enrolamentos de um transformador (enrolamentos à entrada da onda) sujeitos a sobretensões de elevada frequência depende das capacidades serie e capacidades à massa. Portanto, o reforço do isolamento à entrada dos enrolamentos, deverá ser objecto de um estudo criterioso, porque ao melhorar o comportamento às sobretensões entre camadas, poder-se-à agavar a distribuição de tensões ao longo dos enrolamentos.

ANEXO D

PROCEDIMENTOS RECOMENDADOS PARA ESTIMAÇÃO DE PERDAS E DE POTÊNCIA DE TRANSFORMADORES COM CARGAS NÃO LINEARES

Serve o presente anexo para estabelecer procedimentos de estimação de perdas num transformador, em funcionamento numa rede com harmónicos.

Tendo a referida estimativa, poder-se-à optar por um transformador capaz de alimentar cargas, não lineares, com correntes não sinusoidais, sem perda da vida normal esperada, através do conceito de desclassificação ou de estipulação de uma potência adequada ao regime de funcionamento.

D.1 – Método de estimação das perdas suplementares em função do espectro de frequências

Neste estudo, o objectivo é efectuar uma comparação de perdas. Neste caso, desenvolver-se-à uma expressão matemática para comparar as perdas suplementares em regime sinusoidal com as perdas suplementares em regimes não sinusoidais.

As perdas de Joule e as suplementares, por fase, num transformador alimentando uma carga a corrente nominal (corrente sinusoidal) será:

Perdas de Joule:

$$P_J = R_{eq_2} I_n^2 \quad [W] \quad (D.1)$$

Onde:

I_n – é a corrente nominal (corrente sinusoidal), na fase [A];

Perdas suplementares:

$$P_{sup} \quad [W] \quad (D.2)$$

As perdas totais serão dadas por:

$$P_{Ln} = P_J + P_{sup} = R_{eq_2} I_n^2 + P_{sup} \quad [W] \quad (D.3)$$

Com:

P_{Ln} – as perdas totais em regime nominal (correntes sinusoidais) [W].

Se o referido transformador estiver em funcionamento, alimentando uma carga não linear (com correntes não sinusoidais), o valor eficaz do quadrado da corrente será:

$$I^2 = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \quad [A^2] \quad (D.4)$$

Onde:

h – representa a ordem dos harmónicos;

I_h – é o harmónico da corrente de ordem h , na fase [A].

Para este caso, as perdas totais, por fase, serão dadas pela seguinte expressão matemática:

$$P_{Lh} = R_{eq_2} I^2 + P_{sup_h} \quad [W] \quad (D.5)$$

Com:

P_{Lh} – perdas totais no regime não sinusoidal [W];

P_{sup_h} – perdas suplementares no regime não sinusoidal [W].

Segundo o preconizado nas normas ANSI, consideram-se as referidas perdas suplementares, proporcionais aos quadrados da frequência e valor eficaz da corrente. Assim sendo:

$$P_{Sup_h} = P_{Sup} \times \frac{f_h^2 I_h^2}{f_n^2 I_n^2} \quad [W] \quad (D.6)$$

Onde:

f_h – é a frequência do harmónico de corrente (de ordem h) [Hz];

Desenvolvendo a expressão matemática (D.6) obtém-se:

$$P_{Sup_h} = P_{Sup} \times (h^2) \times \frac{I_h^2}{I_n^2} \quad [W] \quad (D.7)$$

Generalizando para todos os harmónicos de corrente, obtém-se a seguinte expressão matemática:

$$P_{Sup_h} = P_{Sup} \times \sum_{h=1}^{\infty} (h^2) \times \frac{I_h^2}{I_n^2} \quad [W] \quad (D.8)$$

Para as perdas totais, obtém a seguintes expressão matemática:

$$P_{Lh} = R_{eq_2} I^2 + P_{Sup} \times \sum_{h=1}^{\infty} (h^2) \times \frac{I_h^2}{I_n^2} \quad [W] \quad (D.9)$$

D.2 – Estimação das perdas por efeito de Joule em função do espectro de frequências

O presente estudo, também, consiste em comparar as perdas por efeito de Joule devidas aos harmónicos de corrente, com as perdas por efeito de joule no caso de uma alimentação sinusoidal.

Apresenta-se neste parágrafo, uma breve demonstração teórica, com o intuito de estabelecer a expressão matemática que possibilita efectuar a referida comparação.

Através da decomposição em série de Fourier, uma corrente de carga não sinusoidal poderá ser representada pela seguinte expressão matemática:

$$i(t) = I_{ct} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos(n\omega t) \quad [A]$$

Por exemplo, as cargas não lineares responsáveis pelos maiores harmónicos introduzidos nas redes eléctricas são os rectificadores com tecnologia a díodos ou tirístores e os conversores de frequência.

Para estes casos, o termo I_{ct} , corresponde à componente contínua da corrente de carga, em cada fase. Normalmente,

$$I_{ct} \leq \frac{2}{100} \times I_{rms} \quad [A] \quad (D.10)$$

Sendo:

- I_{ct} a componente contínua da corrente de carga (A)
- I_{rms} o valor eficaz da corrente (A)

O valor eficaz da corrente, por definição, será:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^T i(t)^2 dt} \quad [A] \quad (D.11)$$

Para um espectro com n harmónicos vem:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{ct}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{n_rms}^2} \quad [A] \quad (D.12)$$

$$I_{rms}^2 = I_{ct}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{n_rms}^2 \quad [A^2]$$

$$\frac{I_{rms}^2}{I_{1_rms}^2} = \frac{I_{ct}^2}{I_{1_rms}^2} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_{n_rms}^2}{I_{1_rms}^2} \quad (D.13)$$

Considerando a aproximação :

$$\frac{I_{ct}^2}{I_{1_rms}^2} = 0.02^2 \cong 0 \quad (D.14)$$

a expressão matemática (D.13) terá a seguinte forma:

$$I_{rms}^2 = I_{1_rms}^2 \times \left[1 + \left(\frac{I_{2_rms}}{I_{1_rms}} \right)^2 + \left(\frac{I_{3_rms}}{I_{1_rms}} \right)^2 + \left(\frac{I_{4_rms}}{I_{1_rms}} \right)^2 + \dots \right] \quad [A^2] \quad (D.15)$$

Assim sendo, para as perdas por efeito de Joule tem-se:

$$R_{eq_2} I_{rms}^2 = R_{eq_2} I_{1_rms}^2 \times \left[1 + \left(\frac{I_{2_rms}}{I_{1_rms}} \right)^2 + \left(\frac{I_{3_rms}}{I_{1_rms}} \right)^2 + \left(\frac{I_{4_rms}}{I_{1_rms}} \right)^2 + \dots \right] \quad [W] \quad (D.16)$$

A expressão matemática (D.16) indica-nos que num transformador sujeito a uma alimentação com harmónicos, as perdas por efeitos de Joule aumentam segundo a proporção indicada.

D.3 – Desclassificação de transformadores e estipulação de potências para funcionamento em regimes de cargas não lineares

Para a desclassificação de transformadores e estipulação de potência admissível para transformadores acoplados a cargas não lineares, sem perda da vida normal esperada, recorre-se ao cálculo de um factor K ou do factor de desclassificação F_d .

D.3.1 – Desclassificação de transformadores

Para casos em que exista um transformador e haja necessidade de o colocar em funcionamento numa rede com cargas não lineares, deve-se efectuar a desclassificação de potência através do factor F_d , como abaixo indicado:

$$S_k = S_s \times F_d \quad [kVA] \quad (D.17)$$

Onde:

S_K - é a potência estipulada, após a desclassificação (kVA);

S_s - é a potência estipulada para o transformador com correntes e tensões nominais, sinusoidais (kVA);

F_d - é o factor de desclassificação de um transformador sob influência de harmónicos.

De seguida serão abordados os princípios adoptados, por algumas normas internacionais, para estabelecer a desclassificação de transformadores:

D.3.1.1 – Princípios adoptados pela ANSI (American National Standards Institute)

Para regimes de funcionamento com cargas não lineares, ficou estabelecido, através da expressão matemática (D.7), que:

$$P_{Sup_h} = P_{Sup} \times (h^2) \times \frac{I_h^2}{I_n^2} \quad [W]$$

A norma ANSI C57.110, preconiza que o factor K será dado pela seguinte expressão matemática:

$$K = (h^2) \times \frac{I_h^2}{I_n^2} \quad (D.18)$$

É de salientar que o K corresponde ao factor indicado no segundo membro da expressão matemática (D.7).

O factor de desclassificação, por sua vez, seria:

$$F_d = \frac{1}{K} = \frac{1}{(h^2) \times \frac{I_h^2}{I_n^2}} \quad (D.19)$$

D.3.1.2 – Princípios adoptados pela CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrique)

Supor o transformador a fornecer uma corrente sinusoidal (I_n) a uma carga linear, apresentando as seguintes perdas:

$$P_{Ln} = R_{eq_2} I_n^2 + P_{Sup} \quad [W] \quad (D.20)$$

Quando o mesmo transformador estiver acoplado a uma carga não linear, a fornecer uma corrente não sinusoidal de valor eficaz I_{ns} , as perdas serão dadas pela seguinte expressão matemática:

$$P_{Lh} = R_{eq_2} I_{ns}^2 + P_s \times \sum_{h=1}^{\infty} (h^2) \times \frac{I_h^2}{I_{ns}^2} \quad [W] \quad (D.21)$$

Onde:

I_{ns} – é o valor eficaz da corrente não sinusoidal, por fase, pedida pela carga [A];

Considerar P_s como sendo as perdas suplementares por fase, devidas a uma corrente sinusoidal com valor eficaz igual a I_{ns} .

Assim sendo,

$$P_s = P_{Sup} \frac{I_{ns}^2}{I_n^2} \quad [W] \quad (D.22)$$

Substituindo este resultado na expressão (D.21), obtém-se:

$$P_{Lh} = R_{eq_2} I_{ns}^2 + P_{Sup} \times \frac{I_{ns}^2}{I_n^2} \times \sum_{h=1}^{\infty} (h^2) \times \frac{I_h^2}{I_{ns}^2} \quad [W] \quad (D.23)$$

Supondo as perdas devidas ao funcionamento com correntes sinusoidais iguais às perdas devidas ao funcionamento com correntes não sinusoidais, neste caso efectuando a igualdade entre as expressões matemáticas (D.20) e (D.23), vem:

$$R_{eq_2} I_n^2 + P_{Sup} = R_{eq_2} I_{ns}^2 + P_{Sup} \times \frac{I_{ns}^2}{I_n^2} \times \sum_{h=1}^{\infty} (h^2) \times \frac{I_h^2}{I_{ns}^2} \quad [W] \quad (D.24)$$

Considerando que,

$$e_p = \frac{P_{Sup}}{R I_n^2} \quad (D.25)$$

a expressão matemática (D.24) poderá ser escrita da seguinte forma:

$$1 + e_p = \left(\frac{I_{ns}^2}{I_n^2} \right) \times \left[1 + e_p \times \left(\frac{1}{I_{ns}^2} \right) \times \sum_{h=1}^{\infty} h^2 \times I_h^2 \right] \quad (D.26)$$

Se considerar o valor eficaz da fundamental dos harmónicos da corrente, I_1 , na expressão (D.26), vem:

$$1 + e_p = \left(\frac{I_{ns}^2}{I_n^2} \right) \times \left[1 + e_p \times \left(\frac{I_1^2}{I_{ns}^2} \right) \times \sum_{h=1}^{\infty} h^2 \times \left(\frac{I_h^2}{I_1^2} \right) \right] \quad (D.27)$$

Da resolução da equação (D.27) vem que:

$$I_{ns}^2 = \frac{I_n^2}{\left[\frac{1}{1 + e_p} + \frac{e_p}{1 + e_p} \times \left(\frac{I_1^2}{I_{ns}^2} \right) \times \sum_{h=1}^{\infty} h^2 \times \left(\frac{I_h^2}{I_1^2} \right) \right]} \quad (D.28)$$

Da expressão matemática (D.28), conclui-se que, um transformador a alimentar uma carga não linear (o transformador fornece correntes não sinusoidais), deverá ser desclassificado de um factor F_d , como abaixo indicado, na expressão matemática (D.29):

$$F_d = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{1}{1 + e_p} + \frac{e_p}{1 + e_p} \times \left(\frac{I_1^2}{I_{ns}^2} \right) \times \sum_{h=1}^{\infty} h^2 \times \left(\frac{I_h^2}{I_1^2} \right) \right]}} \quad (D.29)$$

A norma CENELEC apresenta o factor K com algumas diferenças, como poderá ser constatado na expressão matemática abaixo indicada (D.30):

$$K = \sqrt{\left[1 + \frac{e_p}{1 + e_p} \times \left(\frac{I_1^2}{I_{ns}^2} \right) \times \sum_{h=1}^{\infty} h^q \times \left(\frac{I_h^2}{I_1^2} \right) \right]} \quad (D.30)$$

Neste caso, o factor de desclassificação seria:

$$F_d = \frac{1}{K} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \frac{e_p}{1 + e_p} \times \left(\frac{I_1^2}{I_{ns}^2} \right) \times \sum_{h=1}^{\infty} h^q \times \left(\frac{I_h^2}{I_1^2} \right) \right]}} \quad (D.31)$$

Para as expressões matemáticas (D.30) e (D.31), a variável q depende do tipo de enrolamento secundário do transformador em estudo.

- Para enrolamentos secundários efectuados com condutor em forma de folha: $q = 1.5$;
- Para enrolamentos secundários efectuados com outros tipos de condutores: $q = 1.7$.





FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000078214