**JOSÉ CARLOS MENDES** 

# REDUÇÃO DE FALHAS EM GRANDES TRANSFORMADORES DE ALTA TENSÃO

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

São Paulo 1995

# **JOSÉ CARLOS MENDES**

Eng. Eletricista, Escola de Engenharia Mauá, 1980 Mestre em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da USP, 1989

# REDUÇÃO DE FALHAS EM GRANDES TRANSFORMADORES DE ALTA TENSÃO

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Dimetri Ivanoff

São Paulo 1995

Mendes, José Carlos Redução de falhas em grandes transformadodores de alta tensão. São Paulo, 1995. 166p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Transformadores de potência - Transitórios, Falhas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Elétrica II.t

Aos meus pais e aos meus irmãos.

# AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Dimetri Ivanoff pela colaboração importante e persistente nestes anos de Pós-Graduação.

Ao Eng. Tobias Hurter da ABB Asea Brown Boveri (antes BBC Brown Boveri) pelo incentivo e motivação ao estudo.

A Siemens SA (TUSA Transformadores União Ltda) pelo incentivo e colaboração nos anos iniciais desta Pós-Graduação.

A ABB Asea Brown Boveri.

Aos meus colegas de trabalho (ABB, BBC, TUSA-Siemens) pelas discussões oportunas.

Aos meus professores.

### RESUMO

A quantidade de falhas recentes em transformadores e suas consequências são alarmantes. As perdas econômicas, os riscos e a falta de confiabilidade decorrentes são inaceitáveis. Face à gravidade da recomendações situação um conjunto de de implementação imediata é estabelecido. O objetivo é assegurar a continuidade da operação confiável dos transformadores em serviço e garantir a especificação segura de transformadores novos.

As recomendações envolvem o dimensionamento de enrolamentos levando em conta transitórios rápidos e ressonâncias internas; auditoria e controle de projetos; formas de ondas de ensaio mais representativas de fenômenos transitórios não convencionais; ações associadas à condições de operação; monitoração contínua e aplicação de filtros para a proteção frente a transitórios rápidos.

Estas recomendações apoiam-se em análises cuidadosas das condições de projeto, fabricação e ensaios de transformadores complementadas pela análise teórica e de campo de falhas recentes em grandes transformadores de alta tensão.

Vários modos de falhas dielétricas de transformadores estão associados a transitórios eletromagnéticos não convencionais. É analisada a modelagem de enrolamentos para transitórios de alta frequência. Os resultados de simulações aplicadas a alguns transformadores de alta tensão são apresentados.

A aplicação das recomendações apresentadas deverá resultar na redução de falhas em grandes transformadores de alta tensão.

### ABSTRACT

The number of transformer failures and its consequences are of very high concern. The associated economic losses, risks to life and environment and reduced reliability level are not acceptable any more. From this situation, a set of recommendation with possible immediately implementation is established. The objective is to give a reliable continuous operation condition to the remaining transformers in service and guarantee a safe specification for new transformers.

The recommendations are including the dimensioning of transformer windings related to very fast transients and internal resonance; design review; dielectric test waves more representatives of non conventional transients phenomena; operation conditions; continuous monitoring and application of filter as protection device against very fast transients.

These recommendations are supported by deep analysis of design conditions, manufacturing and test of power transformers complemented with theoretic and on site analysis of recent failures of high voltage large power transformers.

Several dielectric failures modes of transformers are associated with non conventional electromagnetic transients. From this, it is included a modeling of transformer windings for high frequency transients. The results of simulations applied to high voltage transformers are presented.

The application of the presented recommendations shall give as result a reduction in number of failures of large power transformers.

# SUMÁRIO

### RESUMO Abstract

1	INTRODUÇÃO	1
2	FALHAS EM GRANDES TRANSFORMADORES DE ALTA TENSÃO	4
2.1	Introdução	4
2.2	Taxa de falhas de transformadores	4
2.3	l axa de falhas em ensaios de transformadores	1
2.4 2.5	Connabilidade de um transformador	<i>1</i> 0
2.0	Falbas dialátricas	0 10
2.0	Ressonância elétrica	10
2.7	Tensões transitórias ránidas	12
2.0	Fontes	13
2.8.2	Características	
2.8.3	Espectro de frequência	
2.8.4	Consequências	
2.8.5	Influência de buchas	17
3	MODELAGEM DE ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADOR	ES19
3.1	Introdução	20
3.2	Modelo teórico de linha de transmissão longa	20
3.2.1	Modelo de parâmetros distribuidos	20
3.2.2	Modelo quadripolo $\pi$ equivalente	23
3.2.3	Associação série de quadripolos $\pi$	25
3.2.4	Modelo de linha de transmissão longa	
	com condutores múltiplos	26
3.2.4	.1 Solução geral	30
3.2.4	.2 Auto-valores	30
3.2.4	.3 Auto-vetores	
3.2.4	.4 Diagonalização da matriz [P]	
3.2.4	.5 Matriz parcial [A]	
3.2.4	.6 Matriz parcial [B]	
3.3	Soluçao geral - resumo	35
4	PARÂMETROS ELÉTRICOS DE ENROLAMENTOS	36
4.1	Introdução	36
4.2	Matriz de capacitâncias	36
4.2.1	Permissividade dielétrica	37
4.2.2	Capacitâncias paralelas	40
4.2.2	2.1 Entre enrolamentos	40

4.2.2	2.2 Enrolamento-tanque	42
4.2.2	2.3 Adicionais	43
4.2.3	3 Capacitância série	44
4.2.3	B.1 Enrolamento disco contínuo	44
4.2.3	3.2 Enrolamento disco entrelaçado	48
4.2.3	3.3 Enrolamento camadas entrelaçadas	50
4.3	Matriz de indutâncias	51
4.3.1	Matriz de relutâncias	52
4.3.2	2 Relutâncias parciais (com perdas)	52
4.3.3	3 Relutâncias parciais entre espiras	53
4.3.4	Relutâncias parciais entre bobinas	54
4.3.5	5 Relutâncias parciais entre enrolamentos	56
4.3.6	6 Relutâncias parciais entre bobina e tanque	58
4.4	Matrizes de rede	60
	~	
5	RESPOSTA DE ENROLAMENTO NO DOMINIO DA	
	FREQUENCIA E DO TEMPO	61
5.1	Introdução	61
5.2	Admitância terminal equivalente	62
5.3	Resposta transitória de enrolamento	63
5.4	Tensão de entrada	65
5.4.1	Amostragem da tensão de entrada	66
5.4.2	2 Transformada rápida de Fourier	68
5.4.3	B Falseamento	70
5.5	Tensões e correntes internas	71
5.5.1	Convolução no domínio da frequência	71
5.5.2	2 Deconvolução no domínio da frequência	72
5.5.3	3 Funções de transferências	72
5.5.4	Divisão de zero por zero	73
5.6	Tensões de saída	74
5.6.1	Transformada inversa de Fourier	74
5.6.2	2 Filtros ou janelamento de saída	75
5.6.2	2.1 Filtro ou janelamento retangular	76
5.6.2	2.2 Filtro ou janelamento exponencial	78
5.6.2	2.3 Filtro ou janelamento Hanning	80
6	ΑΡΙ ΙζΑζÃΟ Ε RESULTADOS	<b>Q1</b>
61	Introdução 81	
6.2	Tipos de enrolamentos de alta tensão	81
6.2.1	Enrolamento disco contínuo	
622	P Enrolamento disco contrilacado	
63	Desempenho transitório de enrolamento disco	
6.0	Roteiro nara cálculo da resposta transitória	03 72
65	Análise de casos	۲۵ وو
6.6	Caso 1 - Enrolamento disco contínuo	۵۵ ۵۵
661	Características elétricas	۵۵ ۵۵
662	<ul> <li>Características geométricas</li> </ul>	
0.0.2		

Esquema de ligação de bobina dupla	92
Solicitações, suportabilidades e seguranças internas	92
o 2 - Enrolamento disco entrelaçado	94
Características elétricas	94
Características geométricas	94
Esquema de ligação de bobina dupla	95
Solicitações, suportabilidades e seguranças internas	95
o 3 - Transformador regulador	97
Características elétricas	97
Características geométricas	98
Esquema de ligação de bobina dupla	99
Solicitações, suportabilidades e seguranças internas	99
o 4 - Transformador elevador	101
Características elétricas	101
Características geométricas	101
Esquema de ligação de bobina dupla	102
Solicitações, suportabilidades e seguranças internas	102
alise de resultados	104
Margens de segurança	104
Distribuições capacitivas e fatores $\alpha$	107
Resposta em frequência	108
Admitância de entrada	109
Tensão parcial entre bobinas duplas	110
	Esquema de ligação de bobina dupla Solicitações, suportabilidades e seguranças internas $2 - Enrolamento disco entrelaçadoCaracterísticas elétricasEsquema de ligação de bobina duplaSolicitações, suportabilidades e seguranças internas3 - Transformador reguladorCaracterísticas elétricasCaracterísticas geométricasEsquema de ligação de bobina duplaSolicitações, suportabilidades e seguranças internas2 - 3 - Transformador reguladorCaracterísticas geométricasEsquema de ligação de bobina duplaSolicitações, suportabilidades e seguranças internas2 - 4 - Transformador elevadorCaracterísticas geométricasEsquema de ligação de bobina duplaSolicitações, suportabilidades e seguranças internasDistribuições, suportabilidades e seguranças internasBaquema de ligação de bobina duplaSolicitações, suportabilidades e seguranças internasDistribuições capacitivas e fatores \alphaResposta em frequênciaAdmitância de entradaTensão parcial entre bobinas duplas$

# 7 RECOMENDAÇÕES PARA A ESPECIFICAÇÃO, O PROJETO, E A OPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES

7.1	Introdução	112
7.2	Especificações convencionais	113
7.2.1	Níveis de isolamento	113
7.2.2	Coordenação de isolamento com pára-raios	115
7.3	Recomendações para especificações novas	116
7.3.1	Características elétricas e níveis de isolamento	116
7.3.2	Modelamento e análise de respostas transitórias	119
7.3.3	Revisão e controle de projetos	120
7.3.4	Modernização de ensaios elétricos	125
7.4	Recomendações para projeto	128
7.4.1	Projeto de circuito magnético	129
7.4.2	Projeto de enrolamentos	130
7.4.3	Projeto de isolação principal	132
7.4.4	Outros componentes	134
7.4.5	Tanque	137
7.5	Recomendações para transformadores em operação	138
7.5.1	Monitoração de operação	139
7.5.2	Adequação de Proteção	140
7.5.2.	1 Proteção por capacitor	141
7.5.2.2	2 Proteção por cabos	143

7.5.	2.3	Proteção por indutor	143
8	СО	NCLUSÕES	146
	AN	EXOS	
	А	Demonstração da Expressão (3.57)	150
	В	Demonstração da Expressão (3.64)	154
	С	Cálculo de Capacitâncias Parciais- Expansão das Equações	158
	RE	FERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164

## 1 - INTRODUÇÃO

O Transformador foi inventado no final do século XIX. Desenvolvimentos significativos na aplicação de materiais, métodos de cálculo e ensaios tem sido constantes ao longo dos anos. No entanto, a taxa de falhas em serviço de transformadores de extra e ultra alta tensão permanece elevada. A redução de falhas de grandes transformadores de alta tensão é fundamental para o aumento da confiabilidade operativa dos sistemas elétricos, minimizando riscos e perdas econômicas.

A quantidade de falhas de transformadores e suas consequências são alarmantes. O valor elevado da taxa de falhas, as perdas econômicas, os riscos e a falta de confiabilidade decorrentes são inaceitáveis. Frente a gravidade da situação, ações urgentes são necessárias para:

- primeiro, assegurar a continuidade da operação confiável dos transformadores em serviço; e
- © segundo, garantir a especificação segura de transformadores novos.

Esta tese propõe um conjunto de ações orientados a estes dois objetivos. Estas recomendações apoiam-se em análise cuidadosa das condições de projeto, fabricação e ensaios de transformadores complementadas pela análise teórica e de campo de falhas recentes em grandes transformadores de alta tensão.

Em particular, a resposta de enrolamentos de transformadores a fenômenos transitórios é assunto de vários trabalhos científicos desde o

início deste século. Todavia, a resposta destes enrolamentos a tensões transitórias rápidas é de interesse recente associada ao reconhecimento da natureza e características destes transitórios nos sistemas elétricos. Um número restrito de trabalhos científicos foram publicados até agora, abordando de maneira limitada o assunto.

Portanto, é justificável o esforço para o entendimento dos meios e mecanismos de falhas de transformadores associadas a tensões transitórias, incluindo aquelas de rápida frente de onda, e a implementação de procedimentos de especificação, projeto, ensaios e proteção mais adequados que os atuais.

Inicialmente são indicados aspectos relevantes associados a falhas de transformadores. São discutidas as falhas de natureza dielétrica e incluidos aspectos associados a ressonância elétrica interna. Informações gerais associados a tensões transitórias, em particular aquelas de natureza rápida, são apresentadas. São consideradas as condições e os fenômenos principais para o estabelecimento destas tensões transitórias, suas características descritivas (tempo de frente, amplitude e frequência de ocorrência), o espectro de frequência de algumas tensões transitórias típicas e a influência de buchas condensivas (SF<sub>6</sub>-óleo ou ar-óleo) na propagação de tensão de frente de onda muito rápida.

A modelagem de enrolamento de transformador orientado para a análise de fenômenos transitórios e, em particular, para os transitórios rápidos e em alta frequência é desenvolvida. As restrições dos modelos existentes e utilizados na indústria são abordadas. A modelagem é fundamentada no modelo elétrico de parâmetros distribuidos de linha de transmissão longa, sendo o enrolamento representado espira por espira com a inclusão adequada dos acoplamentos eletromagéticos correspondentes. Os parâmetros correspondentes são modelados em função da frequência e representados por números complexos. A solução modal das equações matriciais associadas ao modelo do enrolamento é determinada.

A determinação da resposta transitória de enrolamento no domínio da frequência e no domínio do tempo é também indicada. A admitância terminal equivalente e as principais funções de transferência são abordadas. Aspectos gerais associados a convolução e deconvolução numérica e da aplicação da técnica de transformada rápida de Fourier são apresentados. O esquema geral para o cálculo da resposta transitória de enrolamentos é apresentado sob a forma de diagrama de blocos.

O método é aplicado no cálculo da resposta transitória de enrolamentos típicos de transformadores de alta tensão. São incluidos: um enrolamento tipo disco contínuo e enrolamentos entrelaçados típicos de transformadores de 138kV e 550kV. As análises e verificações pertinentes dos resultados são realizadas.

Neste contexto, são então propostas recomendações efetivas para a redução de falhas e aplicáveis imediatamente na operação de transformadores em serviço, na especificação de compra mais adequada de novos transformadores, no projeto eletromecânico e na operação e proteção de transformadores de alta tensão.

# 2 - FALHAS EM GRANDES TRANFORMADORES DE ALTA TENSÃO

#### 2.1. Introdução

A taxa de falhas em serviço de grandes transformadores de extra e ultra alta tensão permanece elevada conforme o resultado de pesquisas internacionais. A destruição ou a indisponibilidade do transformador, associada ao tempo elevado de reparo, comprometem a confiabilidade dos sistemas elétricos e estabelecem custos adicionais e perdas econômicas.

#### 2.2. Taxa de Falhas de Transformadores

O valor mundial da taxa anual média de falhas de transformadores de até 500kV é de aproximadamente 2.5%, enquanto que para tensões superiores a 500kV aproxima-se de 7% [1,5].

No Brasil, a taxa anual média de falhas é da ordem de 3.5% para transformadores de até 500kV [2].

Todavia, em subestações de 500kV isoladas a SF<sub>6</sub>, ocorreram nos últimos 15 anos mais de uma dezena de falhas dielétricas dentro de uma população observada de 78 transformadores de diferentes fabricantes e tecnologias. Algumas destas falhas envolveram a destruição total do transformador [3]. A figura 2.1 mostra a evolução da taxa de falhas observadas em transformadores instalados em 3 subestações de 500kV isoladas com SF<sub>6</sub> no Brasil. Destaca-se a concentração de falhas nos primeiros anos de operação.



Figura 2.1 - Taxa Acumulada de Falhas em Subestações de 500kV em  $SF_6$ 

Para o caso particular da SE Grajaú - RJ observa-se um número elevado de falhas nos primeiros anos de operação dos transformadores. Anterior às primeiras ocorrências com os transformadores, algumas falhas foram verificadas em buchas Ar-SF<sub>6</sub>. Considerando a experiência e o conhecimento relacionados à época (início da década de 1980), explicações definitivas não puderam ser estabelecidas. Algumas análises sugeriram o relacionamento das falhas dielétricas a solicitações por tensões transitórias rápidas. Desta forma, restrições operacionais foram estabelecidas de maneira a evitar manobras das seccionadoras isoladas a SF<sub>6</sub>. Esta ação pode ter contribuido para a redução da taxa de falhas naquela subestação. Além disto, nesta subestação o transformador é ligado aos barramentos isolados a SF<sub>6</sub> através de uma linha de transmissão aérea curta.

Na UHE de Tucuruí - PA várias falhas foram registradas a partir do terceiro ano de operação da subestação. A taxa de falhas dos transformadores elevadores permanece elevada ao redor de 7.5%. As buchas de alta tensão dos transformadores são ligadas diretamente à subestação intermediária isolada em SF<sub>6</sub>. Adicionalmente também tem sido observado uma elevação gradual da concentração de gases dissolvidos no óleo das buchas SF<sub>6</sub>-Óleo.

A figura 2.2 mostra que cada grupo de dois geradores (350MVA/unidade) podem ser interligados. Uma linha de transmissão aérea curta interliga a subestação elevadora em SF<sub>6</sub> à subestação principal de 500kV. Nesta instalação a adoção de medidas restritivas na operação de seccionadoras impõe perdas significativas de flexibilidade operacional.



Figura 2.2 - Ligação de Transformadores

Na UHE de Itaipú - PR algumas falhas foram registradas em buchas SF<sub>6</sub>-Óleo e em transformadores elevadores. Várias análises tem sido realizadas associadas a esta instalação, incluindo investigação com tensões transitórias rápidas. Em particular, correlações de tensões rápidas e concentração de gases dissolvidos no óleo de buchas tem sido analisadas.

Em subestações de 500kV, isoladas a ar, ocorreram falhas dielétricas sucessivas de grandes transformadores de interligação de redes, também de diferentes fabricantes e com menos de 3 anos em operação. Estas falhas ocorreram associadas a sobretensões internas, e na ausência de qualquer ocorrência externa detectada pelo sistema de proteção convencional correspondente.

Em sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica a taxa anual média de falhas de transformadores é considerada elevada e varia entre 1.6% e 8.5%, considerando 10 importantes concessionárias. Entre as causas das falhas, descargas atmosféricas contribuem para 48% delas [4].

#### 2.3. Taxa de Falhas em Ensaios de Transformadores

Considerando os dados publicados de falhas em ensaios de um fabricante de transformadores, o valor mundial da taxa anual média de falhas ocorridas durante ensaios de transformadores na fábrica, incluidos todos os níveis de isolamento, é de aproximadamente 2.1%.

No entanto, a dispersão desta taxa de falhas é razoavelmente grande. São encontradas fábricas com taxa anual média de falhas da ordem de 0.8% e outras com até 7.2% [35].

#### 2.4. Confiabilidade de um Transformador

Confiabilidade de um transformador é definida como a probabilidade de operação com sucesso por um determinado período de tempo. A confiabilidade pode ser calculada a partir da taxa anual média de falhas. Basicamente:

$$R = 1 - P_f = e^{-\frac{t}{m}} = e^{-t \cdot l}$$
(2.1)

onde:

t [h] é um período especificado de operação **sem falhas**;

μ [h] é o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF);

 $\lambda$ Erro! Indicador não definido. [h<sup>-1</sup>] taxa anual média de falhas ( $I = \frac{1}{m}$ );

Pf [pu] probabilidade de falha no período (t) especificado de operação

R [pu] confiabilidade de operação em um período de tempo  $\geq$  t.

A tabela 2.1 mostra, como exemplo, valores de probabilidade de falha (Pf) para períodos de operação de 10 e 20 anos. A taxa anual média de falhas é admitida constante durante o período de tempo especificado.

Pf	[%]	2.5	3.5	4	7.5	15
t	[h]	8760	8760	8760	8760	8760
R	[pu]	0.975	0.965	0.96	0.925	0.85
1	[1/h]	2.89E-06	4.07E-06	4.66E-06	8.90E-06	1.86E-05
m	[h]	3.46E05	2.45E05	2.14E05	1.12E05	0.54E05
	[anos]	39.5	28.1	24.5	12.8	6.2
Pf,10anos	[%]	22.4	29.9	33.5	54.1	80.3
Pf,20anos	[%]	39.7	50.9	55.8	78.9	96.1

Tabela 2.1 - Probabilidade de Falhas em 10 e 20 anos

Para uma taxa anual média de falha de transformadores superior à 2.5% os resultados, indicados na tabela anterior, revelam probabilidades elevadas de falhas dentro de período de tempo inferior à vida útil estimada de operação fundamentada no envelhecimento normal da isolação.

#### 2.5. Riscos e Perdas Econômicas

Enquanto que o preço médio de um novo transformador de alta tensão é de 10USD/kVA (sem comutador sob carga: ≈7-9USD/kVA e com comutador sob carga: ≈12-15USD/kVA) o preço de reparo de um transformador, cuja isolação principal e enrolamentos tenham sido envolvidos, pode ser estimado entre 60% a 70% do valor inicial correspondente.

O tempo de indisponibilidade (análise da falha, concorrência, reparo e recomissionamento) do transformador pode atingir até um ano.

Em particular, no caso de transformadores elevadores próximos a grandes alternadores, a operação de substituição de um transformador avariado pela unidade de reserva correspondente pode demandar até alguns dias. Nestes casos, o custo da perda de faturamento por venda de energia pode atingir mais de meio milhão de dólares. Em grandes indústrias siderúrgicas as perdas econômicas diárias, por redução de produção associada a indisponibilidade de um transformador regulador de 100MVA, pode atingir até 2 milhões de dólares.

Adicionalmente, a ocorrência de falhas com consequências catastróficas, coloca em risco a vida humana de operadores e provoca a contaminação do meio ambiente por vazamento de óleo isolante. Em alguns casos de centrais de geração, a subestação com os transformadores elevadores está localizada dentro da barragem e, em geral, os transformadores estão ligados diretamente aos geradores sem disjuntor de separação.

No Brasil, o custo médio estimado de uma falha (reparo e substituição) de um transformador de distribuição é da ordem de 600USD. Consequentemente, o custo médio anual total de falhas em transformadores de distribuição pode atingir 40 milhões de dólares, dos quais as descargas atmosféricas contribuem em causa com aproximadamente 20 milhões de dólares. No caso particular de subestações isoladas a  $SF_6$ , restrições operacionais tem sido impostas a manobra de chaves seccionadoras, de maneira a minimizar o estabelecimento e propagação de tensões transitórias rápidas e consequentes solicitações nos transformadores correspondentes. Esta prática é uma medida pragmática e resulta em perda de flexibilidade, custos de imobilização de ativos e custos operacionais.

#### 2.6. Falhas Dielétricas

Entre as falhas, várias são aquelas de natureza dielétrica envolvendo enrolamentos, a isolação principal, comutadores de tensão e buchas. Há, entretanto, muitas falhas que permanecem sem explicações adequadas. Estas últimas podem caracterizar um conhecimento insuficiente do comportamento de transformadores submetidos a fenômenos transitórios não convencionais. Por exemplo, pesquisas recentes demonstram que a suportabilidade da isolação de papel, entre duas espiras, é reduzida para tensão transitória com frente de onda muito rápida [14,15].

Entre as causas prováveis de falhas há uma forte contribuição do projeto (elétrico, mecânico e térmico) do transformador [1]. As condições de competição de mercado levaram a redução das margens de lucro dos fabricantes com impacto e re-estruturações nas suas áreas de engenharia, com tendência de redução de margens de segurança [29].

Adicionalmente, o monitoramento contínuo com registro de tensões transitórias em subestações revelam a ocorrência de surtos de tensão com várias formas de onda e amplitudes [6]. Assim, de um lado, as formas de ondas de ensaios dielétricos normalizados podem não refletir as solicitações reais impostas a um transformador em operação. Por outro lado, as solicitações dielétricas impostas por estes ensaios podem eventualmente comprometer a suportabilidade da isolação correspondente.

A ocorrência de um número elevado de falhas de transformadores em sistemas de extra e ultra alta tensão coincide com a redução das margens entre a tensão máxima de operação e as tensões de ensaios correspondentes ao seu nível de isolamento . Enquanto que em um sistema de 145kV o valor de crista da tensão de ensaio de impulso atmosférico é 4.5 vêzes maior (650kV), o valor correspondente em um sistema de 550kV pode ser de apenas 2.6 vêzes maior (1425kV). Todavia uma elevação de 40% no nível de impulso de um transformador de 550kV, isto é, um elevação para 1950kV, refletiria em uma elevação do preço de apenas aproximadamente 10%.

Desta maneira, são colocados naturalmente em dúvida:

- a adequação das especificações técnicas convencionais;
- os métodos convencionais de coordenação de isolamento e proteção de transformadores;
- as técnicas convencionais de dimensionamento de enrolamentos e isolação principal de transformadores submetidos a tensões transitórias;
- as características de suportabilidade de sistemas de isolação utilizados em transformadores e aplicáveis para solicitações dielétricas associadas a tensões transitórias rápidas;
- In os níveis normalizados de tensões de ensaios; e
- os procedimentos de ensaios dielétricos normalizados para transformadores que se destinam a estes sistemas. Atenção deve

ser dedicada à verificação de eventual degradação sofrida pelo transformador nos ensaios.

#### 2.7. Ressonância Elétrica

O transformador deve suportar, além da tensão de operação em regime permanente, tensões transitórias de várias formas de onda e amplitudes envolvendo frequências na faixa de Hertz até Megahertz [7]. A natureza eletromagnética do arranjo de enrolamentos forma uma estrutura ressonante, com várias frequências naturais que podem ser excitadas por tensões transitórias estabelecidas no sistema, com consequências perigosas para o transformador devido a amplificações internas localizadas de tensão.

Projetar um transformador não-ressonante é inviável. Porém a combinação de esforços entre especificação-projeto (cliente-fabricante) pode contribuir para a proteção adequada do transformador em uma certa faixa de frequências, minimizando riscos de amplificações internas de tensões e solicitações dielétricas excessivas.

#### 2.8. Tensões Transitórias Rápidas

Algumas operações de manobra e algumas condições de falta em um Sistema Elétrico são reconhecidas como causa de tensões transitórias rápidas que solicitam os equipamentos a ele conectados.

A resposta de enrolamentos de transformadores a fenômenos transitórios é assunto de vários trabalhos científicos desde o início deste século. Porém, a resposta destes enrolamentos a tensões transitórias rápidas é de interesse recente associada ao reconhecimento da natureza e características destes transitórios nos sistemas elétricos. Um número restrito de trabalhos científicos foram publicados até agora, abordando de maneira limitada o assunto [13,18].

A indústria de transformadores utiliza, para a análise da resposta transitória e projeto da isolação de enrolamentos, técnicas avançadas de modelamento matemático e de resolução através de métodos adequados em computador. Todavia a validade dos modelos convencionais está limitada a frequências de até algumas centenas de kHz [27].

Em consequência, o desempenho do equipamento correspondente pode ser comprometido quando submetido a tensões transitórias rápidas em operação.

#### 2.8.1. Fontes de Tensões Transitórias Rápidas

As fontes e as características das tensões transitórias rápidas são bem conhecidas e documentadas [8-12].

Tensões transitórias rápidas internas a sistemas elétricos de potência são razoavelmente comuns associados a operações de manobra de equipamentos. Nomeadamente:

- manobra de seccionadoras, disjuntores e falhas internas em subestações blindadas e isoladas com gás SF<sub>6</sub>. Neste tipo de subestações, a geometria (na forma de estrutura metálica coaxial blindada) e o dielétrico SF<sub>6</sub> (distâncias elétricas curtas), suportam a geração e propagação de transitórios eletromagnéticos rápidos;
- manobra envolvendo a operação de grandes motores em circuitos com cabos de baixas perdas entre disjuntor e motor;
- b manobra de transformadores ligados a fornos a arco;
- b manobra de transformadores ligados a sistemas retificadores;

- manobra de equipamentos através de disjuntores a vácuo e reignições de arco correspondentes; e
- manobra de seccionadoras isoladas a ar e próximas a transformadores de proteção ou medição.

Adicionalmente, tensões transitórias rápidas podem também ser estabelecidas associadas a alguns fenômenos particulares externos a um sistema elétrico de potência, por exemplo:

- descarga atmosférica com variação rápida de corrente de descarga. Por exemplo, tem sido registrados correntes com taxa de crescimento muito superiores ao valor de 0.6kA/µs normalmente utilizadas na especificação de transformadores de distribuição;
- Arco secundário entre cabo pára-raios ou torre e condutor de fase após a descarga atmosférica direta em linha de transmissão; e
- surto de corrente induzida em um sistema elétrico associado a pulso eletromagnético nuclear em geral externo a atmosfera;
- surto de corrente induzida em um sistema elétrico associado a tempestades geomagnéticas.

#### 2.8.2. Características de Tensões Transitórias Rápidas

Estudos	destes	transitórios	de	tensão	indicam,	tipicamente,	as
características	ä	apresentadas		na	ta	bela	2.2.

Parte	Característica	Tempo de	Amplitude	Ocorrência
da Onda		Frente [ns]	[pu]	
frente	surto	20	1.5	comum
		10	2.5	rara
cauda	oscilatória	-	-	-
	(1 à 10 MHz)			

Tabela 2.2 - Tensões Transitórias Rápidas

A frequência da componente oscilatória das ondas de tensões transitórias rápidas depende das características de propagação de ondas, das descontinuidades e do arranjo físico de ligação de equipamentos e barramentos da subestação considerada.

Os surtos de tensões transitórias rápidas podem ser representados por formas de ondas triangulares equivalentes. Os tempos de frente e de meio valor correspondentes a alguns casos típicos são indicados na tabela 2.3.

Fenômeno	Tempo de	Tempo de	
	Frente [ns]	Meio Valor [ns]	
Pulso Nuclear	≤ 10	10 200	
Manobra	≤ <b>2</b> 0	1000 5000	
Desc. Atmosférica	20 500	5000 20000	

Tabela 2.3 - Formas de Onda Triangular de Tensões Transitórias Rápidas

### 2.8.3. Espectro de Frequência de Tensões Transitórias

Formas típicas de ondas de tensões transitórias e os correspondentes espectros de frequência são indicados na tabela 2.4.



Tabela 2.4 - Espectro de Frequência

### 2.8.4. Consequências de Tensões Transitórias Rápidas

A prevenção de tensões transitórias rápidas em sistemas elétricos não é economicamente viável. Portanto suas consequências devem ser verificadas de maneira a garantir operação com elevado nível de confiabilidade. Em particular:

- comportamento da isolação de equipamentos elétricos sob condições de tensões transitórias rápidas;
- compatibilidade eletromagnética de equipamentos e circuitos elétricos secundários; e
- 🏷 segurança de pessoal.

#### 2.8.5. Influência de Buchas em Tensões Transitórias Rápidas

A ligação entre o transformador e o sistema elétrico é feita através de buchas adequadas de separação. Em alta tensão, buchas com isolação composta papel-óleo são utilizadas.

A figura 2.3 mostra, comparativamente, a influência de uma bucha de ligação entre um transformador e a subestação em SF<sub>6</sub> correspondente, na propagação de um surto rápido de tensão através dela [13].



Figura 2.3 - Bucha e Tensão Transitória Rápida

Eletricamente, uma bucha incluindo o cabo interno de ligação, forma uma estrutura RLC. Esta estrutura, ao introduzir uma descontinuidade

através de uma impedância de onda de valor diferente daquela do sistema, influencia a propagação da tensão transitória entre o sistema e o enrolamento correspondente do transformador.

A taxa de crescimento da tensão é alterada significativamente pela bucha embora o valor de crista não tenha sido modificado. O atraso entre valores de cristas é de aproximadamente 60ns. Todavia, para transitótios rápidos no sistema com tempo de frente da ordem de 10...20ns, o tempo de frente da onda correspondente que ultrapassa a bucha e atinge o enrolamento é da ordem de 80ns. Tempos de frente desta magnitude são ainda muito inferiores comparados àqueles transitórios associados a fenômenos atmosféricos com tempos de frente da ordem alguns µs.

# 3 - MODELAGEM DE ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

#### 3.1.Introdução

A representação de enrolamentos de transformadores por parâmetros elétricos, concentrados ou distribuidos, é conhecida na literatura [7].

Motivada por requisitos técnicos e de otimização econômica de sistemas elétricos, a tecnologia de dimensionamento de transformadores tem respondido através do estabelecimento de modelos avançados de enrolamentos.

Todavia, os modelos atuais não refletem com boa precisão o comportamento do enrolamento para sinais de excitação que contenham frequências elevadas em seu espectro.

A validade dos modelos existentes não ultrapassa a frequência de 200kHz [27]. Ela está associada à precisão dos parâmetros elétricos correspondentes: resistências, condutâncias, indutâncias e capacitâncias.

Estes parâmetros dependem, fundamentalmente, da geometria e da localização relativa dos enrolamentos e de seus condutores, das características de seus materiais e da variação destas características com a frequência. Tolerâncias de fabricação e montagem também são causas de imprecisão.

Adicionalmente, para valores elevados de frequência, também é importante o comprimento físico e parâmetros elétricos representativos dos

cabos de ligação entre os terminais externos (buchas) do transformador e o terminal ou tap de ligação no enrolamento. Da mesma forma, são importantes também os parâmetros elétricos de buchas de passagem [13].

### 3.2. Modelo Teórico de Linha de Transmissão Longa

### 3.2.1. Modelo de Parâmetros Distribuidos

Uma linha de transmissão monofásica longa, de condutor singelo e com comprimento  $\mathbf{I}$ , pode ser representada por uma associação adequada de parâmetros elétricos distribuidos em sucessivos comprimentos diferenciais dx. A figura 3.1 mostra esta representação.



Figura 3.1 - Linha de Transmissão Longa

A queda de tensão  $d\dot{V}$  e a corrente transversal  $d\dot{I}$  são dadas por:  $d\dot{V} = -\dot{z} \cdot \dot{I} \cdot dx$  (3.1)  $d\dot{I} = -\dot{y} \cdot \dot{V} \cdot dx$  (3.2) As equações diferenciais correspondentes são escritas por:

$$\frac{d^2 \dot{V}}{dx^2} = -\dot{z} \cdot \frac{dI}{dx} = \dot{z} \cdot \dot{y} \cdot \dot{V}$$
(3.3)

$$\frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} = -\dot{y} \cdot \frac{d\dot{V}}{dx} = \dot{z} \cdot \dot{y} \cdot \dot{I}$$
(3.4)

As formas gerais das soluções de (3.3) e (3.4) são dadas por:

$$\dot{V} = A_1 \cdot e^{-\sqrt{z} \cdot y \cdot x} + A_2 \cdot e^{+\sqrt{z} \cdot y \cdot x}$$
(3.5)

$$\dot{\mathbf{I}} = \frac{\mathbf{A}_{1}}{\sqrt{\frac{z}{y}}} \cdot \mathbf{e}^{-\sqrt{z} \cdot y \cdot x} - \frac{\mathbf{A}_{2}}{\sqrt{\frac{z}{y}}} \cdot \mathbf{e}^{+\sqrt{z} \cdot y \cdot x}$$
(3.6)

O primeiro termo das expressões (3.5) e (3.6) representa uma onda incidente (valor decrescente no sentido crescente S-R de x, isto é, x>0). O segundo termo representa uma onda refletida (valor decrescente no sentido decrescente R-S de x, isto é x<0).

Definindo:  

$$\dot{\boldsymbol{g}} = \sqrt{\dot{z} \cdot \dot{y}} = \boldsymbol{a} + j\boldsymbol{b}$$
 [km<sup>-1</sup>] (3.7)

podemos representar:

$$e^{\boldsymbol{g}\cdot\boldsymbol{x}} = e^{(\boldsymbol{a}+j\boldsymbol{b})\cdot\boldsymbol{x}} = e^{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{x}} \cdot e^{j\boldsymbol{b}\cdot\boldsymbol{x}} = e^{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{x}} \cdot (\cos \boldsymbol{b}\cdot\boldsymbol{x} + j \operatorname{sen} \boldsymbol{b}\cdot\boldsymbol{x})$$
(3.8)

onde

 $e^{ax}$  é a constante de atenuação [Nepers], e

 $e^{jbx}$  é a constante de rotação de fase [radianos].

A impedância característica da linha de transmissão é dada por:

$$\dot{Z}_{c} = \sqrt{\frac{\dot{z}}{\dot{y}}} = \sqrt{\frac{r + j\mathbf{w}L}{g + j\mathbf{w}C}} \quad [\Omega]$$
(3.9)

As constantes de integração A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub> são determinadas a partir das condições de contorno:

$$x = 0 \implies \dot{V} = \dot{V}_s \quad e \quad \dot{I} = \dot{I}_s$$
 (3.10)

resultando:

$$\dot{A}_{1} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \dot{V}_{s} + \dot{Z}_{c} \cdot \dot{I}_{s} \right]$$
(3.11)

$$\dot{A}_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \dot{V}_s - \dot{Z}_c \cdot \dot{I}_s \right]$$
(3.12)

As expressões (3.5) e (3.6) são então escritas por:  $(\vec{v} + \vec{z} + \vec{i}) = (\vec{v} - \vec{z} + \vec{i})$ 

$$\dot{V} = \left(\frac{\dot{V}_s + \dot{Z}_c \cdot \dot{I}_s}{2}\right) \cdot e^{-\sqrt{g} \cdot x} + \left(\frac{\dot{V}_s - \dot{Z}_c \cdot \dot{I}_s}{2}\right) \cdot e^{+\sqrt{g} \cdot x}$$
(3.13)

$$\dot{I} = \left(\frac{\dot{V}_s + \dot{Z}_c \cdot \dot{I}_s}{2 \cdot \dot{Z}_c}\right) \cdot e^{-\sqrt{g} \cdot x} - \left(\frac{\dot{V}_s - \dot{Z}_c \cdot \dot{I}_s}{2 \cdot \dot{Z}_c}\right) \cdot e^{+\sqrt{g} \cdot x}$$
(3.14)

A corrente e a tensão no terminal remoto, R, são dadas por:

$$\dot{V}_{r} = \left(\frac{\dot{V}_{s} + \dot{Z}_{c} \cdot \dot{I}_{s}}{2}\right) \cdot e^{-\sqrt{g} \cdot \ell} + \left(\frac{\dot{V}_{s} - \dot{Z}_{c} \cdot \dot{I}_{s}}{2}\right) \cdot e^{+\sqrt{g} \cdot \ell}$$
(3.15)

$$-\dot{I}_{r} = \left(\frac{\dot{V}_{s} + \dot{Z}_{c} \cdot \dot{I}_{s}}{2 \cdot \dot{Z}_{c}}\right) \cdot e^{-\sqrt{g} \cdot \ell} - \left(\frac{\dot{V}_{s} - \dot{Z}_{c} \cdot \dot{I}_{s}}{2 \cdot \dot{Z}_{c}}\right) \cdot e^{+\sqrt{g} \cdot \ell}$$
(3.16)

ou seja,

$$\dot{V}_{r} = \dot{V}_{s} \cdot \left(\frac{e^{\dot{g} \cdot \ell} + e^{-\dot{g} \cdot \ell}}{2}\right) - \dot{Z}_{c} \cdot \dot{I}_{s} \cdot \left(\frac{e^{\dot{g} \cdot \ell} - e^{-\dot{g} \cdot \ell}}{2}\right)$$
(3.17)

$$\dot{I}_{r} = \frac{\dot{V}_{s}}{\dot{Z}_{c}} \cdot \left(\frac{e^{\dot{g}\cdot\ell} - e^{-\dot{g}\cdot\ell}}{2}\right) - \dot{I}_{s} \cdot \left(\frac{e^{\dot{g}\cdot\ell} - e^{-\dot{g}\cdot\ell}}{2}\right)$$
(3.18)

que resultam:

$$\dot{V}_{r} = \cosh\left(\dot{g} \cdot \ell\right) \cdot \dot{V}_{s} - \dot{Z}_{c} \cdot \operatorname{senh}\left(\dot{g} \cdot \ell\right) \cdot \dot{I}_{s}$$
(3.19)

$$\dot{I}_{r} = \frac{1}{\dot{Z}_{c}} \operatorname{senh}(\dot{g} \cdot \ell) \cdot \dot{V}_{s} - \cosh(\dot{g} \cdot \ell) \cdot \dot{I}_{s}$$
(3.20)

ou, inversamente:

$$\dot{V}_{s} = \cosh\left(\dot{g}\cdot\ell\right)\cdot\dot{V}_{r} - \dot{Z}_{c}\cdot\operatorname{senh}\left(\dot{g}\cdot\ell\right)\cdot\dot{I}_{r}$$

$$\dot{I}_{s} = \frac{1}{\dot{Z}_{c}}\operatorname{senh}\left(\dot{g}\cdot\ell\right)\cdot\dot{V}_{r} - \cosh\left(\dot{g}\cdot\ell\right)\cdot\dot{I}_{r}$$
(3.21)
(3.22)

Usando a notação matricial,

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{s} \\ \dot{I}_{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cosh(\dot{\boldsymbol{g}} \cdot \ell)}{\dot{Z}_{c} \cdot \operatorname{senh}(\dot{\boldsymbol{g}} \cdot \ell)} & -\frac{1}{\dot{Z}_{c} \cdot \operatorname{senh}(\dot{\boldsymbol{g}} \cdot \ell)} \\ -\frac{1}{\dot{Z}_{c} \cdot \operatorname{senh}(\dot{\boldsymbol{g}} \cdot \ell)} & \frac{\cosh(\dot{\boldsymbol{g}} \cdot \ell)}{\dot{Z}_{c} \cdot \operatorname{senh}(\dot{\boldsymbol{g}} \cdot \ell)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{s} \\ \dot{V}_{r} \end{bmatrix}$$
(3.23)

## 3.2.2. Modelo Quadripolo p Equivalente

A linha de transmissão indicada na figura 3.1 é equivalente ao quadripolo **p** da figura 3.2.



Figura 3.2 - Linha de Transmissão Quadripolo p

As expressões que descrevem o quadripolo  $\pi$  da figura 3.2, na sua forma matricial, são dadas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{s} \\ \dot{I}_{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\dot{Z}_{eq}} + \dot{Y}_{eq} & -\frac{1}{\dot{Z}_{eq}} \\ -\frac{1}{\dot{Z}_{eq}} & \frac{1}{\dot{Z}_{eq}} + \dot{Y}_{eq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{s} \\ \dot{V}_{r} \end{bmatrix}$$
(3.24)

A identificação dos termos correspondentes das relações matriciais (3.23) e (3.24) estabelecem os valores da impedância longitudinal e admitância transversal equivalentes. Nomeadamente:

$$\dot{Z}_{eq} = \dot{Z}_{c} \cdot \operatorname{senh}\left(\dot{\boldsymbol{g}} \cdot \boldsymbol{\ell}\right) \tag{3.25}$$

$$\frac{Y_{eq}}{2} = \frac{1}{\dot{Z}_c \cdot \operatorname{senh}\left(\dot{\boldsymbol{g}} \cdot \boldsymbol{\ell}\right)} \cdot \left(\cosh\left(\dot{\boldsymbol{g}} \cdot \boldsymbol{\ell}\right) - 1\right)$$
(3.26)

### 3.2.3. Associação Série de Quadripolos p

A superposição, ou associação série, de quadripolos  $\pi$  sucessivos, permite estabelecer as condições de continuidade na interface entre quadripolos (**nó**). Considerando a figura 3.3, temos:



Figura 3.3 - Associação Série de Quadripolos

A impedância adjacente à esquerda e à direita do nó "k" indicam que não há reflexão de ondas de tensão e corrente no nó. Os coeficientes de reflexão e transmissão de ondas no nó genérico "k" da linha de transmissão são dados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Coeficientes de Reflexão e Transmissão de Ondas

$\boldsymbol{a}_{r} = \frac{Z_{B} - Z_{A}}{Z_{B} + Z_{A}} = 0$	Coeficientes		
	reflexão	transmissão	
Tensão	$\boldsymbol{a}_{ru} = \boldsymbol{a}_{r} = 0$	${\bm b}_{_{tu}} = 1 + {\bm a}_{_{r}} = 1$	
Corrente	$\boldsymbol{a}_{ri} = -\boldsymbol{a}_{r} = 0$	$\boldsymbol{b}_{i} = 1 - \boldsymbol{a}_{r} = 1$	

Então, as relações de continuidade no nó "k" de interligação entre os quadripolos **A e B** são dadas por:
$$\dot{V}_{s}^{k+1} = \dot{V}_{r}^{k}$$
 (3.27)

$$\dot{I}_{s}^{k+1} = -\dot{I}_{r}^{k}$$
 (3.28)

#### 3.2.4. Modelo de Linha de Transmissão Longa com Condutores Múltiplos

A teoria básica de linha de transmissão com múltiplos condutores aplicase a uma rede de **n** condutores acoplados mutuamente. A rede caracteriza-se por:

$$\begin{bmatrix} \dot{Z} \end{bmatrix}$$
, matriz de impedância (n x n)  
 $\begin{bmatrix} \dot{Y} \end{bmatrix}$ , matriz de admitância (n x n)

As matrizes  $\begin{bmatrix} \dot{Z} \end{bmatrix} e \begin{bmatrix} \dot{Y} \end{bmatrix}$  são formadas a partir dos parâmetros distribuidos e associados a cada um dos condutores.



Seja a rede de condutores indicada na figura 3.4.

Figura 3.4 - Linha de Transmissão

As expressões básicas das relações entre tensão e corrente, associadas aos condutores acoplados da rede, podem ser escritas na seguinte forma matricial.

$$\frac{d[\dot{V}]}{dx} = -[\dot{Z}]*[\dot{I}]$$
(3.29)

$$\frac{\mathrm{d}[\mathrm{I}]}{\mathrm{d}x} = -[\dot{\mathrm{Y}}] * [\dot{\mathrm{V}}]$$
(3.30)

Os vetores  $\begin{bmatrix} \dot{v} \end{bmatrix}$   $\mbox{ e } \begin{bmatrix} \dot{i} \end{bmatrix}$  podem ser decompostos nos respectivos vetores

no início e no fim de cada um dos condutores. Isto é:

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_s \\ \begin{bmatrix} \dot{V}_r \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$
(3.31)  
$$\begin{bmatrix} \dot{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_s \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s \\ [I_r] \end{bmatrix}$$
(3.32)

Analogamente a linha de transmissão com condutor singelo, agora as relações entre corrente e tensão são descritas por:

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{s} \end{bmatrix}_{n \times 1} \\ \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{r} \end{bmatrix}_{n \times 1} \end{bmatrix}_{2n \times 1} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \end{bmatrix}_{n \times n} & -\begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix}_{n \times n} \\ -\begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix}_{n \times n} & \begin{bmatrix} \mathbf{A} \end{bmatrix}_{n \times n} \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \cdot \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_{s} \end{bmatrix}_{n \times 1} \\ \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_{r} \end{bmatrix}_{n \times 1} \end{bmatrix}_{2n \times 1}$$
(3.33)

As matrizes parciais [A] e [B] incluem os parâmetros elétricos que descrevem a rede de múltiplos condutores e os correspondentes acoplamentos mútuos.

A solução da expressão matricial (3.33), considerando as relações de continuidade dos acoplamentos dadas por (3.27) e (3.28), resulta os vetores  $[\dot{V}_s], [\dot{V}_r], [\dot{I}_s] e \ [\dot{I}_r] \ .$ 

A figura 3.5 ilustra o exposto para um caso simples de 3 (n=3) condutores interligados.



Figura 3.5 - Linha de Transmissão com 3 Condutores Interligados

Sendo dados:

$$\begin{cases} \dot{V}_{s1} \\ \dot{V}_{r3} \end{cases}$$
(3.34)

As relações de continuidade (3.27) e (3.28) resultam:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{r1} \\ \dot{V}_{r2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{s2} \\ \dot{V}_{s3} \end{bmatrix}$$

(3.35)

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{r1} \\ \dot{I}_{r2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{I}_{s2} \\ -\dot{I}_{s3} \end{bmatrix}$$
(3.36)

As relações que descrevem os quadripolos são escritas, a partir de (3.33),

por:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{s1} \\ \dot{I}_{s2} \\ \dot{I}_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{s1} \\ \dot{V}_{s2} \\ \dot{V}_{s3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{r1} = \dot{V}_{s2} \\ \dot{V}_{r2} = \dot{V}_{s3} \\ \dot{V}_{r3} \end{bmatrix}$$
(3.37)

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{r1} = -\dot{I}_{s2} \\ \dot{I}_{r2} = -\dot{I}_{s3} \\ \dot{I}_{r3} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} B \\ \vdots \\ \dot{V}_{s1} \\ \dot{V}_{s2} \\ \dot{V}_{s3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{V}_{r2} = \dot{V}_{s3} \\ \dot{V}_{r3} \end{bmatrix} (3.38)$$

Das relações (3.37) e (3.38) resultam:

$$\begin{cases} \dot{I}_{s1} \\ \dot{I}_{s2} \\ \dot{I}_{s3} \end{cases} \begin{cases} \dot{V}_{s1} \\ \dot{V}_{s2} \\ \dot{V}_{s3} \end{cases} \begin{cases} \dot{V}_{s1} \\ \dot{V}_{s2} \\ \dot{V}_{s3} \end{cases}$$

e das relações (3.35) e (3.36) resultam:

$\int \dot{I}_{r1}$	$\int \dot{V}_{r1}$
$\left\{\dot{I}_{r^2}\right\}$	$\left\{\dot{V}_{r2}\right\}$
	$\dot{V}_{r3}$

A tabela 3.2 indica as relações de expressões, número de equações e número de incógnitas utilizadas.

Equações	Número de	
	expressões	incógnitas
(3.37) e (3.38)	2*n	2*n
(3.35) e (3.36)	2*n - 2	2*n - 2
condições de contorno dadas	2	2
total	4*n	4*n

Tabela 3.2 - Eo	quações e N	lúmero de Ex	pressões e	Incógnitas
-----------------	-------------	--------------	------------	------------

Todos os parâmetros característicos de circuito (valores de tensão e corrente) impostos pelos contornos, bem como os valores de tensão e corrente calculados são representados por números complexos.

#### 3.2.4.1. Solução Geral

A solução geral da expressão matricial (3.33) utiliza o cálculo dos autovalores e auto-vetores que caracterizam o circuito elétrico equivalente e descrito pelas matrizes de impedâncias e admitâncias  $\begin{bmatrix} \dot{Z} \end{bmatrix} e \begin{bmatrix} \dot{Y} \end{bmatrix}$  respectivamente.

Fazendo:

$$\left[P\right]_{n\times n}^{2} = \left[\dot{Z}\right] \cdot \left[\dot{Y}\right]$$
(3.39)

#### 3.2.4.2. Auto-Valores

Os auto-valores da matriz [P] são determinados a partir da solução do polinômio característico de grau **n** :

$$\det\left[\boldsymbol{I}\cdot\left[\boldsymbol{I}_{d}\right]-\left[\boldsymbol{P}\right]\right]=0\tag{3.40}$$

A solução resulta o seguinte conjunto de autovalores:

$$\{I_1; I_2; I_3; ...; I_n\}$$
 (3.41)

ou

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{2} & \dots & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{I}_{n} \end{bmatrix}$$
(3.42)

#### 3.2.4.3. Auto-Vetores

A cada auto-valor, do conjunto de auto-valores (3.41), é possível relacionar um auto-vetor correspondente, tal que:

$$\left[P\right]_{nxn} \cdot \left[q_i\right]_{nx1} = \boldsymbol{I}_i \cdot \left[q_i\right]_{nx1}$$
(3.43)

onde

$$\left[ q_i 
ight]_{n ext{x1}}$$
 é um auto-vetor coluna "i", da matriz  $\left[ Q 
ight]$ , associado à matriz  $\left[ m{I} 
ight]_{n ext{xn}}$  dada em (3.42).

lsto é:

$$\begin{bmatrix} P \end{bmatrix}_{nxn} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \end{bmatrix}_{nx1} = \mathbf{I}_1 \cdot \begin{bmatrix} q_1 \end{bmatrix}_{nx1}$$
$$\begin{bmatrix} P \end{bmatrix}_{nxn} \cdot \begin{bmatrix} q_2 \end{bmatrix}_{nx1} = \mathbf{I}_2 \cdot \begin{bmatrix} q_2 \end{bmatrix}_{nx1}$$
(3.44)  
....
$$\begin{bmatrix} P \end{bmatrix}_{nxn} \cdot \begin{bmatrix} q_n \end{bmatrix}_{nx1} = \mathbf{I}_n \cdot \begin{bmatrix} q_n \end{bmatrix}_{nx1}$$

Da solução do sistema de equações descrito por (3.44) resultam os autovetores colunas:

$$[q_{1}], [q_{2}], ... [q_{n}]$$
da matriz  $[Q]$  . Isto é:  

$$[Q]_{nxn} = [[q_{1}]_{nx1} | [q_{2}]_{nx1} | ... | [q_{n}]_{nx1}]_{nxn}$$
(3.45)

e consequentemente obtem-se a matriz inversa  $[Q]^{-1}$ .

## 3.2.4.4. Diagonalização da Matriz [P]

A matriz diagonal [p] associada a matriz característica [P] é obtida facilmente por:

$$[p] = [Q]^{-1} * [P] * [Q]$$
(3.46)

ou de maneira equivalente,

$$[P] = [Q] \cdot [p] \cdot [Q]^{-1}$$
(3.47)

A matriz [A] relaciona a corrente e a tensão nos terminais de entrada da associação de quadripolos indicada na figura 3.4. Isto é, a matriz [A] corresponde a matriz de admitância própria de entrada em curto-circuito de cada quadripolo. De (3.33) resulta,

$$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix}^{-1} \Big|_{[V_r]=0}$$

$$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_r \end{bmatrix}^{-1} \Big|_{[V_s]=0}$$
(3.48)

Estendendo a expressão (3.23) para uma relação matricial e identificando com a correspondente expressão (3.33), resulta:

$$[A] = [Z_c]^{-1} * \operatorname{cot} \operatorname{gh}([P] * \ell)$$
(3.49)

onde

ou

$$\left[Z_{c}\right]^{2} = \left[\dot{Z}\right] \cdot \left[\dot{Y}\right]^{-1}$$
(3.50)

A matriz de impedâncias característica pode ser escrita considerando a matriz de propagação [P] dada por (3.39). Isto é:

$$\begin{bmatrix} Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \cdot \begin{bmatrix} Y \end{bmatrix}^{-\frac{1}{2}} = \begin{bmatrix} Z \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \cdot \begin{bmatrix} Y \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \cdot \begin{bmatrix} Y \end{bmatrix}^{-\frac{1}{2}} \cdot \begin{bmatrix} Y \end{bmatrix}^{-\frac{1}{2}}$$
  
=  $\begin{bmatrix} P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y \end{bmatrix}^{-1}$  (3.51)

Desta forma, a inversa da matriz  $[Z_c]$  pode ser escrita por:

$$[Y_c] = [Z_c]^{-1} = [Y] \cdot [P]^{-1}$$
(3.52)

substituindo (3.52) em (3.49),

$$[A] = [Y] \cdot [P]^{-1} \cdot \cot gh([P] \cdot \ell)$$
(3.53)

considerando, de (3.47), que:

$$[P]^{-1} = [Q] \cdot [p]^{-1} \cdot [Q]^{-1}$$
(3.54)

resulta,

$$[A] = [Y] \cdot [Q] \cdot [p]^{-1} \cdot [Q]^{-1} \cdot \operatorname{cot} gh([P] \cdot \ell)$$
(3.55)

Finalmente, conforme demontrado no **Apêndice A**, é possível escrever:  $[A] = [Y] \cdot [Q] \cdot [p]^{-1} \cdot [Q]^{-1} \cdot \cot gh([P] \cdot \ell) \cdot [Q] \cdot [Q]^{-1} \quad (3.56)$ 

sendo que

$$\cot gh([p] \cdot \ell) = [Q]^{-1} \cdot \cot gh([P] \cdot \ell) \cdot [Q]$$
(3.57)

resulta:

$$[A] = [Y] \cdot [Q] \cdot [p]^{-1} \cdot \cot gh([p] \cdot \ell) \cdot [Q]^{-1}$$
(3.58)

### **3.2.4.6.** Matriz Parcial $\begin{bmatrix} B \end{bmatrix}$

A matriz  $\begin{bmatrix} B \end{bmatrix}$  relaciona a corrente e a tensão nos terminais de entrada e saida da associação de quadripolos indicadas na figura 3.4. Ou seja, a matriz  $\begin{bmatrix} B \end{bmatrix}$  corresponde a matriz de admitância de transferência em curto-circuito de cada quadripolo. De (3.33) resulta,

(3.59)

$$-[B] = [I_s] \cdot [V_r]^{-1} \Big|_{[V_s]=0}$$

 $-[B] = [I_r] \cdot [V_s]^{-1}|_{[V_r]=0}$ 

ou

Estendendo a expressão (3.23) para uma relação matricial e identificando com a correspondente expressão (3.33), resulta:

$$-[B] = -\frac{[Z_c]^{-1}}{\left\{\operatorname{senh}([P] \cdot \ell)\right\}}$$
(3.60)

ou

$$[B] = [Z_c]^{-1} \cdot \operatorname{cos} \operatorname{sec} h([P] \cdot \ell)$$
(3.61)

Lembrando (3.52),  

$$[B] = [Y] \cdot [P]^{-1} \cdot \cos \sec h([P] \cdot \ell)$$

$$[B] = [Y] \cdot [Q] \cdot [P]^{-1} \cdot [Q]^{-1} \cdot \cos \sec h([P] \cdot \ell)$$
(3.62)

Finalmente, conforme demonstrado no Apêndice B, é possível escrever:  $\begin{bmatrix} B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix}^{-1} \cdot \cos \sec h(\begin{bmatrix} P \end{bmatrix} \cdot \ell) \cdot \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix}^{-1}$ (3.63)

sendo que

$$\cos \sec h \left( \left[ p \right] \cdot \ell \right) = \left[ Q \right]^{-1} \cdot \cos \sec h \left( \left[ P \right] \cdot \ell \right) \cdot \left[ Q \right]$$
(3.64)

resulta:

$$[B] = [Y] \cdot [Q] \cdot [p]^{-1} \cdot \operatorname{cos\,sec} h([p] \cdot \ell) \cdot [Q]^{-1}$$
(3.65)

As correntes e tensões são dadas pela expressão (3.33). Isto é:

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{s} \end{bmatrix}_{n \times 1} \\ \begin{bmatrix} \dot{I}_{r} \end{bmatrix}_{n \times 1} \end{bmatrix}_{2n \times 1} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}_{n \times n} & -\begin{bmatrix} B \end{bmatrix}_{n \times n} \\ -\begin{bmatrix} B \end{bmatrix}_{n \times n} & \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}_{n \times n} \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \cdot \begin{bmatrix} \begin{vmatrix} \dot{V}_{s} \end{bmatrix}_{n \times 1} \\ \begin{bmatrix} \dot{V}_{r} \end{bmatrix}_{n \times 1} \end{bmatrix}_{2n \times 1}$$

Cuja solução geral, representada pelos vetores  $\left[\dot{V}_{_{s}}\right]\!,\!\left[\dot{V}_{_{r}}\right]\!,\!\left[\dot{I}_{_{s}}\right]\!e\,\left[\dot{I}_{_{r}}\right]$ ,

considerando as relações de continuidade dos acoplamentos e condições de contorno específicas dadas, é descrita nas etapas indicadas na tabela 3.3.

Parâmetro		Expressão	
matriz $[P]$	(3.39)	$\left[\mathbf{P}\right]_{n \times n}^{2} = \left[\dot{\mathbf{Z}}\right]_{n \times n} \cdot \left[\dot{\mathbf{Y}}\right]_{n \times n}$	
auto-valores [λ]	(3.40)	$\det \begin{bmatrix} \lambda \cdot [\mathbf{I}_{d}] - [\mathbf{P}] \end{bmatrix} = 0 \implies$ $\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{2} & \dots & 0 \\ & & \dots & \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{I}_{n} \end{bmatrix}$	
auto-vetores [q]	(3.43)	$\begin{bmatrix} P \end{bmatrix}_{n \times n} \cdot \begin{bmatrix} q_i \end{bmatrix}_{n \times l} = \lambda_i \cdot \begin{bmatrix} q_i \end{bmatrix}_{n \times l} \implies$ $\begin{bmatrix} q_i \end{bmatrix}_{n \times l}  \text{para}  i = 1, 2, \dots, n$	
matrizes $[Q] e [Q]^{-1}$	(3.45)	$\begin{bmatrix} Q \end{bmatrix}_{n \times n} = \begin{bmatrix} [q_1]_{n \times 1} & [q_2]_{n \times 1} & \dots & [q_n]_{n \times 1} \end{bmatrix}_{n \times n}$ $\Rightarrow \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix}_{n \times n}^{-1}$	
matriz diagonal [p]	(3.46)	$[p] = [Q]^{-1} \cdot [P] \cdot [Q]$	
matriz [A]	(3.58)	$[A] = [Y] \cdot [Q] \cdot [p]^{-1} \cdot \cot gh([p] \cdot \ell) \cdot [Q]^{-1}$	
matriz [B]	(3.65)	$[B] = [Y] \cdot [Q] \cdot [p]^{-1} \cdot \operatorname{cos} \operatorname{sec} h([p] \cdot \ell) \cdot [Q]^{-1}$	

Tabela 3.3 - Etapas para a Solução Geral

## 4 - PARÂMETROS ELÉTRICOS DE ENROLAMENTOS

#### 4.1. Introdução

A resposta transitória de enrolamentos de transformadores é estabelecida pelos acoplamentos eletromagnéticos entre as bobinas е espiras correspondentes e com enrolamentos e estruturas adjacentes. Estes acoplamentos são determinados pelas matrizes de admitâncias  $|\dot{Y}|$ e de impedâncias  $[\dot{Z}]$ , conforme descrito no capítulo anterior. Por sua vêz, estas matrizes são obtidas através da consideração adequada das matrizes de capacitâncias e de indutâncias.

As matrizes de capacitâncias  $\begin{bmatrix} \dot{C} \end{bmatrix}$  e de indutâncias  $\begin{bmatrix} \dot{L} \end{bmatrix}$  são formadas por parâmetros elétricos distribuidos, correspondentes ao acoplamento eletromagnético entre condutores dos enrolamentos, e calculados a partir de dimensões geométricas do transformador [16-18].

## 4.2. Matriz de Capacitâncias $\begin{bmatrix} \dot{C} \end{bmatrix}$

Todos os elementos da matriz  $\begin{bmatrix} \dot{C} \end{bmatrix}$  são calculados através de fórmulas analíticas clássicas, assumindo modelos de capacitores planos ou cilíndricos. Os elementos da matriz  $\begin{bmatrix} \dot{C} \end{bmatrix}$  representam capacitâncias parciais entre

dois condutores adjacentes ou capacitâncias parciais entre um condutor e a terra. A figura 4.1 mostra uma rede de capacitâncias.



Figura 4.1 - Rede de Capacitâncias

A matriz  $\begin{bmatrix} \dot{C} \end{bmatrix}$  é formada considerando o método seguinte:  $\begin{cases}
C_{ii} = \begin{array}{c} Capacitância Parcial \\
do Condutor "i" para a Terra \\
C_{ij} = - \begin{array}{c} Capacitância Parcial \\
C_{ij} = - \begin{array}{c} Capacitância Parcial \\
entre condutores "i" e "j" (i \neq j) \end{array}$ (4.1)

#### 4.2.1. Permissividade Dielétrica

O cálculo de capacitâncias requer o conhecimento da permissividade dielétrica dos materiais isolantes do enrolamento do transformador.

A permissividade dielétrica é dependente da frequência e ela é determinada para cada material.

As perdas dielétricas, e a correspondente dependência da frequência, são consideradas através da tangente do ângulo de perdas (tan  $\delta$ ).

A permissividade dielétrica, em sua forma complexa, é descrita por [18]:  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_r \cdot \mathbf{x}_0 \cdot (1 - j \tan d) \qquad \begin{bmatrix} F / \\ m \end{bmatrix}$ (4.2)

O valor da permissividade dielétrica do papel isolante, presspan e óleo, tradicionalmemte utilizados na construção de transformadores, são dados por:

• papel
  $\dot{\mathbf{x}}_{pa} = \mathbf{x}_{rpa} \cdot \mathbf{x}_0 \cdot (1 - j \tan \mathbf{d}_{pa}) = a_1 + ja_2$  • presspan
  $\dot{\mathbf{x}}_{pb} = \mathbf{x}_{rpb} \cdot \mathbf{x}_0 \cdot (1 - j \tan \mathbf{d}_{pb}) = b_1 + jb_2$  (4.3)
 • óleo
  $\dot{\mathbf{x}}_{ol} = \mathbf{x}_{rol} \cdot \mathbf{x}_0 \cdot (1 - j \tan \mathbf{d}_{ol}) = c_1 + jc_2$ 

com os coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$ , e  $c_i$ , indicados na tabela 4.1

material	permissividade	tan δ (20°C)		
	dielétrica	60Hz	1 MHz	100MHz
vácuo	$\xi_0 = 8.85434 \times 10^{-12}$ [F/m]	-	-	-
papel	$\begin{split} \xi_{rpa} &= 3.4 \\ a_{1} &= \xi_{rpa} \cdot \xi_{0} = 30.1048 \times 10^{-12} \\ a_{2} &= -\xi_{rpa} \cdot \xi_{0} \cdot \tan \delta_{pa} = -30.1048 \times 10^{-12} \cdot \tan \delta_{pa} \end{split}$	1x10 <sup>-2</sup>	4x10 <sup>-2</sup>	7x10 <sup>-2</sup>
	$\xi_{\rm rpb} = 4.4$ b = $\xi_{\rm rpb} = -38.9591 \times 10^{-12}$			
presspan	$b_1 = \zeta_{rpb} \cdot \zeta_0 \cdot \tan \delta_{pb} = -38.9591 \times 10^{-12} \cdot \tan \delta_{pb}$ $b_2 = -\zeta_{rpb} \cdot \zeta_0 \cdot \tan \delta_{pb} = -38.9591 \times 10^{-12} \cdot \tan \delta_{pb}$	0.035x10 <sup>-2</sup>	0.025x10 <sup>-2</sup>	0.025x10 <sup>-2</sup>
óleo	$\begin{split} \xi_{\rm rol} &= 2.2 \\ c_1 &= \xi_{\rm rol} \cdot \xi_0 = 19.4795 \times 10^{-12} \\ c_2 &= -\xi_{\rm rol} \cdot \xi_0 \cdot \tan \delta_{\rm ol} = -19.4795 \times 10^{-12} \cdot \tan \delta_{\rm ol} \end{split}$	0.01x10 <sup>-2</sup>	0.01x10 <sup>-2</sup>	0.04x10 <sup>-2</sup>

Tabela 4.1 - Coeficientes da Permissividade Dielétrica

A variação das perdas dielétricas com a frequência, considerando os valores indicados na tabela 4.1, podem ser representadas através das funções logaritmicas indicadas na tabela 4.2.

Frequ.[rd/s]	$2\pi \cdot 60 \leq \omega \leq 2\pi \cdot 10^6$	$2\pi \cdot 10^6 < \omega \le 2\pi \cdot 100 \times 10^6$
papel	$\tan \delta_{pa} = 0.007106 \cdot \log \omega - 0.008307$	$\tan \delta_{pa} = 0.015 \cdot \log \omega - 0.061973$
presspan	$\tan \delta_{\rm pb} = -0.002369 \times 10^{-2} \cdot \log \omega + 0.00041$	$0.025 \cdot 10^{-2}$
óleo	$0.010 \cdot 10^{-2}$	$\tan \delta_{\rm ol} = 15 \times 10^{-3} \cdot \log \omega - 92 \times 10^{-3}$

Tabela 4.2 - Perdas Dielétricas e Frequência

#### 4.2.2. Capacitâncias Paralelas

As capacitâncias paralelas representam, principalmente, o acoplamento capacitivo entre enrolamentos e enrolamento-terra adjacentes.

As capacitâncias paralelas são assumidas como distribuidas uniformemente ao longo dos enrolamentos de interesse.

#### 4.2.2.1. Entre Enrolamentos

A capacitância entre dois enrolamentos cilíndricos concêntricos é representada na figura 4.2.



Figura 4.2 - Enrolamentos Cilíndricos Concêntricos

A capacitância entre dois enrolamentos é calculada a partir do modelo de capacitores de placas cilíndricas. A isolação composta (presspan+óleo) entre enrolamentos é considerada através da representação da figura 4.3.



Figura 4.3 - Isolação Composta entre Enrolamentos

Considerando:

$$D_{m} = \frac{D_{e} + D_{i}}{2}$$

$$(4.4)$$

$$\beta = \frac{\sum A_c}{B_{ee}}$$
(4.5)

$$\alpha = \frac{\mathbf{N}_{v} \cdot \mathbf{B}_{v}}{\pi \cdot \mathbf{D}_{m}}$$
(4.6)

a capacitância entre enrolamentos é dada por:

$$C_{ee} = \xi_0 \frac{(1-\alpha) \cdot \pi \cdot D_m \cdot H_{eq}}{(1-\beta) \cdot B_{ee}} + \frac{\beta \cdot B_{ee}}{\xi_{pb}} + \xi_0 \cdot \xi_{pb} \cdot \frac{\alpha \cdot \pi \cdot D_m \cdot H_{eq}}{B_{ee}} \qquad [F] \qquad (4.7)$$

onde

$$H_{eq} = H_e + B_{ee} \qquad [m]$$

representa, de maneira aproximada, a compensação geométrica associada à não homogeneidade do campo elétrico nas extremidades dos enrolamentos.

#### 4.2.2.2. Enrolamento-Tanque

A capacitância entre o enrolamento e o tanque pode ser calculada através da expressão (4.7) considerando adequadamente as geometrias do contorno do tanque.

A influência do tanque é considerada através da discretização do contorno em setores geométricos equivalentes, definindo um ângulo sólido do setor e largura do setor (distância entre enrolamento e o tanque). A figura 4.4 mostra um exemplo.



Figura 4.4 - Setores Enrolamento-Tanque

Sejam:

e com:

$$C_{et1} = \xi_0 \cdot \frac{(1-\alpha) \cdot k_1 \cdot \pi \cdot D_{m1} \cdot H_e}{\frac{(1-\beta) \cdot B_{ee1}}{\xi_{ol}} + \frac{\beta \cdot B_{ee1}}{\xi_{pb}}} + \xi_0 \cdot \xi_{pr} \cdot \frac{\alpha \cdot k_1 \cdot \pi \cdot D_{m1} \cdot H_e}{B_{eel}} \quad [F]$$
(4.9)

e  

$$C_{et2} = \xi_0 \cdot \frac{(1-\alpha) \cdot k_2 \cdot \pi \cdot D_{m2} \cdot H_e}{\frac{(1-\beta) \cdot B_{ee2}}{\xi_{ol}} + \frac{\beta \cdot B_{ee2}}{\xi_{pb}}} + \xi_0 \cdot \xi_{pr} \cdot \frac{\alpha \cdot k_2 \cdot \pi \cdot D_{m2} \cdot H_e}{B_{ee2}} \quad [F]$$
(4.10)

resulta:

$$C_{et} = 2 \cdot (C_{et1} + C_{et2}) \qquad [F/m] \qquad (4.11)$$

### 4.2.2.3. Adicionais

Capacitâncias adicionais são consideradas apenas com base estimativa e que fornecem resultados satisfatórios. Elas são estabelecidas por:

- ⇒ ligações isoladas entre terminais de enrolamentos;
- ⇒ anéis estáticos de extremidades de enrolamentos;
- $\Rightarrow$  comutadores e buchas

Estas capacitâncias são representadas no modelo conforme sua localização no transformador (neutro-terra, enrolamento-terra, etc.).

#### 4.2.3. Capacitância Série

As capacitâncias série representam, principalmente, o acoplamento capacitivo entre espiras e bobinas adjacentes de um enrolamento e elas resultam, para cada tipo de enrolamento, do cálculo da energia eletrostática armazenada entre espiras e bobinas.

Neste trabalho são consideradas de interesse a determinação da capacitância série em enrolamentos tipo disco contínuo, disco entrelaçado e camada entrelaçada.

#### 4.2.3.1. Enrolamento Disco Contínuo

A figura 4.5 mostra a ligação entre discos sucessivos em um enrolamento tipo disco contínuo.



Figura 4.5 - Capacitância Série - Enrolamento Disco Contínuo

Cada grupo de dois discos adjacentes (uma bobina dupla) é representado por uma capacitância série equivalente. A capacitância série do enrolamento completo resulta da associação série das capacitâncias destes grupos, resultando:

$$C_{s} = \frac{C_{si}}{n_{bd}}$$
 [F] (4.12)

onde:

C<sub>Si</sub> [F] representa a capacitância série total por bobina dupla; e
 n<sub>bd</sub> representa o número total de bobinas duplas no enrolamento.

A capacitância série total, por bobina dupla, é dada por:

$$C_{si} = k_a \cdot C_a + k_d \cdot C_d + k_w \cdot C_w + k_r \cdot C_r$$
 [F] 4.13)

onde  $k_a$ ,  $k_d$ ,  $k_w$ , e,  $k_r$ , são dados na tabela 4.3.

número de condutores	coeficientes de c	apacitância série	
em paralelo (elétricos)	k <sub>a</sub> , k <sub>d</sub> , k	$\mathbf{k}_{\mathrm{a}}$ , $\mathbf{k}_{\mathrm{d}}$ , $\mathbf{k}_{\mathrm{w}}$ e $\mathbf{k}_{\mathrm{r}}$	
	k <sub>a</sub>	$\frac{n^2-1}{3\cdot n^2}$	
N <sub>p</sub> =1	k <sub>d</sub>	$\frac{n^2-1}{6\cdot n^2}$	
	k "	$\frac{n-2-2\cdot y}{n^2}$	
	k <sub>r</sub>	$\frac{\mathbf{n}^2 + 3 \cdot \mathbf{n} + 2}{12 \cdot \mathbf{n}^2}$	

Tabela 4.3 - Coeficientes de Capacitância Série

onde:

- Np número de condutores em paralelo
- m número de condutores por bobina (disco) do enrolamento
- n número de espiras em uma bobina dupla
- y número de canais axiais internos ao enrolamento

A capacitância parcial  $C_a$  é dada por:

$$C_{a} = \pi \cdot \xi_{0} \cdot d_{m} \cdot \frac{a}{t} \cdot \left[ \frac{\sigma}{\frac{1}{\xi_{pb}} + \frac{S_{pl}}{t \cdot \xi_{pa}}} + \frac{1 - \sigma}{\frac{1}{\xi_{pb}} + \frac{S_{pl}}{t \cdot \xi_{pa}}} \right]$$
[F] (4.14)

com

$$\sigma = \frac{\sum b_c}{\pi \cdot d_m}$$
 [pu]

onde

$\sum b_c$	[m]	soma das larguras de calços por bobina;
d <sub>m</sub>	[m]	diâmetro médio do enrolamento;
а	[m]	dimensão radial do enrolamento;
S <sub>pl</sub>	[m]	espessura total da isolação em um condutor
		do enrolamento; e
t	[m]	espessura do canal radial entre bobinas.

A capacitância parcial  $C_d$  é dada por:

$$C_{d} = C_{a}$$
 [F] (4.15)

A capacitância parcial  $\,C_W\,$  é dada por:

$$C_{w} = \xi_{pa} \cdot \xi_{0} \cdot \pi \cdot d_{m} \cdot \frac{(H_{c} + \frac{2}{3} \cdot S_{pl})}{S_{pl}}$$
 [F] (4.16)

onde

 $H_C$  [m] representa a dimensão axial do condutor isolado

A capacitância parcial  $C_r$  é considerada apenas para a bobina (disco) adjacente ao anel estático. Ela é dada por:

$$C_r = \frac{t}{t_r} * C_a \qquad [F] \qquad (4.17)$$

#### 4.2.3.2. Enrolamento Disco Entrelaçado

A figura 4.6 mostra a ligação entre discos sucessivos em um enrolamento tipo disco entrelaçado.



Figura 4.6 - Capacitância Série Enrolamento Disco Entrelaçado

Cada grupo de dois discos adjacentes (uma bobina dupla) é representado por uma capacitância série equivalente. A capacitância série do enrolamento completo resulta da associação série das capacitâncias destes grupos, resultando:

$$C_{s} = \frac{C_{si}}{n_{bd}}$$
 [F] (4.18)

onde,

A capacitância série total, por bobina, é dada por:

$$C_{si} = k_a \cdot C_a + k_d \cdot C_d + k_w \cdot C_w + k_r \cdot C_r \qquad [F]$$
(4.19)

onde  $k_{a}^{}$ ,  $k_{d}^{}$ ,  $k_{w}^{}$  e  $k_{r}^{}$  são dados na tabela 4.4.

condutores	coeficientes de capacitância série		
paralelos	$k_a$ , $k_d$ , $k_w$ e $k_r$		
	-	m (par)	m (impar)
	k <sub>a</sub>	$\frac{n^2-1}{3\cdot n^2}$	$\frac{n^2-1}{3\cdot n^2}$
N <sub>p</sub> =1	k <sub>d</sub>	$\frac{5 \cdot n^2 - 2}{12 \cdot n^2}$	$\frac{5 \cdot n^2 - 12 \cdot n + 10}{12 \cdot n^2}$
	k <sub>w</sub>	$\frac{1}{4 \cdot n^2} \cdot \left[ n^3 - (4 + 2 \cdot y) \cdot n^2 + 10 \cdot n - 8 \right]$	$\frac{1}{4 \cdot n^2} \cdot \left[ n^3 - (4 + 2 \cdot y) \cdot n^2 + 6 \cdot n - 4 \right]$
	k <sub>r</sub>	$\frac{1}{24 \cdot n^2} \cdot \left[ 5 \cdot n^2 + 9 \cdot n + 4 \right]$	$\frac{1}{24 \cdot n^3} \cdot \left[ 5 \cdot n^3 - 3 \cdot n^2 + 4 \cdot n + 12 \right]$

Tabela 4.4 - Coeficientes de C	apacitância Série
--------------------------------	-------------------

onde:

- Np número de condutores em paralelo (elétricos)
- m número de condutores por bobina (disco) do enrolamento
- n número de espiras em uma bobina dupla
- y número de canais axiais internos ao enrolamento

As capacitâncias parciais são dadas por expressões anteriores, conforme indicado na tabela 4.5.

Capacitância Parcial	Expressão
Ca	(4.14)
Cd	(4.15)
Cw	(4.16)
Cr	(4.17)

Tabela 4.5 - Expressões e Capacitâncias

### 4.2.3.3. Enrolamento Camadas Entrelaçadas

A figura 4.7 mostra a ligação e o entrelaçamento de espiras em um enrolamento tipo camadas. Ele é aplicado, em geral, em enrolamentos para regulação de tensão.



Figura 4.7 - Enrolamento Camada Entrelaçada

Cada condutor  $N_C$  fisicamente em paralelo, é enrolado com n espiras no enrolamento completo.

O número total de espiras no enrolamento completo é dado por:

$$N = N_c \cdot n \tag{4.20}$$

A capacitância série total do enrolamento resulta então:

$$C_{s} = \frac{(4 \cdot N_{c} - 7) \cdot n^{3} + (n - 1)^{3}}{N^{2}} \cdot C_{w}$$
 [F] (4.21)

onde C<sub>W</sub> representa a capacitância parcial entre espiras calculada através da expressão (4.16).

## 4.3. Matriz de Indutâncias $\begin{bmatrix} \dot{L} \end{bmatrix}$

Os elementos da matriz de indutâncias  $[\dot{L}]$  não podem ser calculados através de fórmulas analíticas clássicas. Fórmulas analíticas existem para enrolamentos no ar. Todavia fórmulas gerais não são encontradas quando a estrutura contém um núcleo ferro-magnético.

Os elementos da matriz  $\begin{bmatrix} \dot{L} \end{bmatrix}$  representam indutâncias parciais, próprias e mútuas, de condutores do enrolamento e os acoplamentos magnéticos entre condutores adjacentes e não adjacentes.

Sendo o enrolamento representado e descrito espira por espira, na análise em alta frequência, é possível construir a rede de relutâncias associada ao caminho magnético ao redor dos condutores [18]. A matriz  $\begin{bmatrix} B \\ B \end{bmatrix}$  é obtida por inversão direta da matriz de relutâncias  $[\Re]$ . Isto é:

$$[\Re] \cdot [\Phi] = [I] \tag{4.22}$$

com,

$$[L] \cdot [I] = [\Phi] \tag{4.23}$$

resulta:

$$\begin{bmatrix} \Re \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Phi \end{bmatrix}$$
  
 
$$\therefore \qquad \begin{bmatrix} L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Re \end{bmatrix}^{-1}$$
 (4.24)

### 4.3.1. Matriz de Relutâncias $[\Re]$

A figura 4.8 representa a rede de relutâncias associada aos condutores de duas bobinas de um enrolamento.



Figura 4.8 - Rede de Relutâncias

A matriz de relutâncias é formada, a partir das relutâncias parciais, por meio do seguinte algorítimo:

 $\begin{cases} \Re_{ii} = \sum \text{das relutâncias parciais ao redor do condutor"i"} \\ \Re_{ij} = - [\text{relutância parcial entre condutores "i" e "j"}]_{i \neq j} \end{cases}$ (4.25)

#### 4.3.2. Relutâncias Parciais (com perdas)

O fluxo magnético penetra condutores e meios magnéticos adjacentes em uma profundidade pelicular não desprezível. A esta profundidade pelicular no condutor ou meio associam-se perdas adicionais. As perdas associadas a profundidade de penetração do campo magnético nos condutores são importantes no início do espectro de frequência (até poucos MHz). Sua influência é então decrescente com o inverso da raiz quadrada da frequência angular, **W** . Estas perdas aumentam proporcionalmente com o número de espiras em um mesmo disco.

As seguintes relutâncias parciais são consideradas de interesse:

- ⇒ relutância entre condutores (por exemplo, espiras);
- ⇒ relutância entre bobinas;
- ⇒ relutância entre enrolamentos; e
- $\Rightarrow$  relutância entre bobina e tanque.

#### 4.3.3. Relutâncias Parciais entre Espiras

A figura 4.9 mostra a disposição relativa de dois condutores adjacentes, os parâmetros principais envolvidos na determinação das relutâncias parciais entre eles e a profundidade de penetração correspondente.



Figura 4.9 - Relutâncias Parciais entre Espiras

A relutância associada ao espaço ocupado pela isolação entre os dois condutores é dada por:

$$\frac{1}{\Re_{i}} = \mu_{0} \cdot \frac{d}{b} \qquad [H/m] \qquad (4.26)$$

A relutância associada à profundidade de penetração do campo magnético nos condutores é dada por:

$$\frac{1}{\hat{\mathfrak{R}}_c} = \boldsymbol{m}_0 \cdot \frac{\dot{\boldsymbol{d}}}{b} \qquad [H/m] \qquad (4.27)$$

onde a profundidade de penetração

$$\dot{\boldsymbol{d}} = \frac{1-j}{\sqrt{2 \cdot \boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{s} \cdot \boldsymbol{w}}} \qquad [m] \qquad (4.28)$$

é uma distância com valor complexo.

A relutância equivalente á dada pela associação paralela adequada das relutâncias  $\dot{\Re}_i e \dot{\Re}_c$ . Isto é:

$$\frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{cc}} = \frac{1}{\mathfrak{R}_{i}} + \frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{c}} + \frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{c}}$$

$$\frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{cc}} = \boldsymbol{m}_{0} \cdot \frac{d}{b} + 2 \cdot \boldsymbol{m} \cdot \frac{\dot{\boldsymbol{d}}}{b}$$
(4.29)

A relutância equivalente,  $\dot{\mathfrak{R}}_{cc}$ , é incluida na matriz  $[\dot{\mathfrak{R}}(w)]$ .

#### 4.3.4. Relutâncias Parciais entre Bobinas

A figura 4.10 mostra a disposição relativa de duas bobinas adjacentes, os parâmetros principais envolvidos na determinação das relutâncias parciais entre eles e a profundidade de penetração correspondente.



Figura 4.10 - Relutâncias Parciais entre Bobinas

A relutância associada a isolação e ao canal radial de óleo entre as bobinas adjacentes é dada por:

$$\frac{1}{\Re_{ca}} = \mu_0 \cdot \frac{d}{a} \qquad [H/m] \qquad (4.30)$$

A relutância associada à profundidade de penetração do campo magnético nos condutores é dada por:

$$\frac{1}{\hat{\mathfrak{R}}_c} = \boldsymbol{m}_0 \cdot \frac{\boldsymbol{d}}{a} \qquad [H/m] \qquad (4.31)$$

$$\dot{\boldsymbol{d}} = \frac{1-j}{\sqrt{2 \cdot \boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{s} \cdot \boldsymbol{w}}} \qquad [m] \qquad (4.32)$$

A relutância equivalente á dada pela associação paralela adequada das relutâncias  $\dot{\Re}_{ca} e \ \dot{\Re}_{c}$ . Isto é:

$$\frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{bb}} = \frac{1}{\mathfrak{R}_{ca}} + \frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{c}} + \frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{c}}$$

$$\frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{bb}} = \mathbf{m}_{0} \cdot \frac{d}{a} + 2 \cdot \mathbf{m} \cdot \frac{\dot{\mathbf{d}}}{a}$$
(4.33)

A relutância equivalente,  $\dot{\mathfrak{R}}_{_{bb}}$ , é incluida na matriz  $\left[\dot{\mathfrak{R}}(w)\right]$ .

#### 4.3.5. Relutâncias Parciais entre Enrolamentos

A figura 4.11 mostra a disposição relativa entre uma bobina do enrolamento considerado e o enrolamento adjacentede, os parâmetros principais envolvidos na determinação das relutâncias parciais entre eles e a profundidade de penetração correspondente.



Figura 4.11 - Relutâncias Parciais entre Enrolamentos

A relutância associada a isolação do canal principal entre os enrolamentos é dada por:

$$\frac{1}{\Re_{ce}} = \mu_0 \cdot \frac{d}{b} \qquad [H/m] \qquad (4.34)$$

A relutância associada à profundidade de penetração do campo magnético nos condutores das bobinas adjacentes dos enrolamentos é dada por:

$$\frac{1}{\mathfrak{R}_c} = \mathbf{m}_0 \cdot \frac{\mathbf{d}}{b} \qquad [H/m] \qquad (4.35)$$

$$\dot{\boldsymbol{d}} = \frac{1-j}{\sqrt{2 \cdot \boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{s} \cdot \boldsymbol{w}}} \qquad [m] \qquad (4.36)$$

A relutância equivalente á dada pela associação paralela adequada das relutâncias  $\dot{\Re}_{ce} e \ \dot{\Re}_{c}$ . Isto é:

$$\frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{ee}} = \frac{1}{\mathfrak{R}_{i}} + \frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{ce}} + \frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{c}}$$

$$\frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{ee}} = \mathbf{m}_{0} \cdot \frac{d}{b} + 2 \cdot \mathbf{m} \cdot \frac{\dot{\mathbf{d}}}{b}$$
(4.37)

A relutância equivalente,  $\dot{\mathfrak{R}}_{ee}$ , é incluida na matriz  $[\dot{\mathfrak{R}}(w)]$ .

#### 4.3.6. Relutâncias Parciais entre Bobina e Tanque

A figura 4.12 mostra a disposição relativa entre uma bobina do enrolamento considerado e a lateral (adjacente à ela) do tanque do transformador, os parâmetros principais envolvidos na determinação das relutâncias parciais entre eles e a profundidade de penetração correspondente.

A relutância associada a isolação do canal entre o enrolamentos e a lateral do tanque é dada por:

$$\frac{1}{\Re_{ct}} = \mu_0 \cdot \frac{d}{b} \qquad [H/m] \qquad (4.38)$$

A relutância associada à profundidade de penetração do campo magnético no condutor da bobina adjacente dos enrolamento considerado é dada por:

$$\frac{1}{\hat{\mathfrak{R}}_c} = \boldsymbol{m}_0 \cdot \frac{\dot{\boldsymbol{d}}}{b} \qquad [H/m] \qquad (4.39)$$

$$\dot{\boldsymbol{d}} = \frac{1-j}{\sqrt{2 \cdot \boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{s} \cdot \boldsymbol{w}}} \qquad [m] \qquad (4.40)$$



Figura 4.12 - Relutâncias Parciais entre Bobina e Tanque

A relutância associada à profundidade de penetração do campo magnético na lateral do tanque é dada por:

$$\frac{1}{\mathfrak{R}_{t}} = \mathbf{m}_{t} \cdot \frac{\mathbf{d}_{t}}{b} \qquad [H/m] \qquad (4.41)$$

$$\dot{\boldsymbol{d}}_{t} = \frac{1-j}{\sqrt{2 \cdot \boldsymbol{m}_{t} \cdot \boldsymbol{s}_{t} \cdot \boldsymbol{w}}} \qquad [m] \qquad (4.42)$$

A relutância equivalente á dada pela associação paralela adequada das relutâncias  $\dot{\Re}_{ct}$ ,  $\dot{\Re}_{c} e \dot{\Re}_{t}$ . Isto é:

$$\frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{et}} = \frac{1}{\mathfrak{R}_{ct}} + \frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{c}} + \frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{t}}$$
$$\frac{1}{\dot{\mathfrak{R}}_{et}} = \boldsymbol{m}_{0} \cdot \frac{d}{b} + \boldsymbol{m} \cdot \frac{\dot{\boldsymbol{d}}}{b} + \boldsymbol{m} \cdot \frac{\dot{\boldsymbol{d}}}{b}$$

(4.43) A relutância equivalente,  $\dot{\Re}_{et}$ , é incluida na matriz  $[\dot{\Re}(w)]$ .

# 4.4. Matrizes de Rede $\begin{bmatrix} \dot{Z} \end{bmatrix} e \begin{bmatrix} \dot{Y} \end{bmatrix}$

As matrizes representativas dos parâmetros da rede de condutores, que modelam as bobinas e acoplamentos eletromagnéticos correspondentes, são obtidas a partir das matrizes de capacitâncias e indutâncias. Isto é:

$$\begin{bmatrix} \dot{Z} \end{bmatrix}_{n \times n} = [R] + j \boldsymbol{w} \cdot [L] \cong j \boldsymbol{w} \cdot [L]_{n \times n}$$
$$\begin{bmatrix} \dot{Y} \end{bmatrix}_{n \times n} = [G] + j \boldsymbol{w} \cdot [C] \cong j \boldsymbol{w} \cdot [C]_{n \times n}$$
(4.44)

## 5 - RESPOSTA DE ENROLAMENTO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E DO TEMPO

#### 5.1. Introdução

Para cada intervalo de frequência de interesse, a resposta do enrolamento a tensões transitórias rápidas pode ser determinada no domínio da frequência e transformada, posteriormente, no domínio do tempo [17,18,23].

O modelo do enrolamento é estabelecido pela associação de quadripolos  $\pi$  adequados, conforme descrito nos capítulos anteriores. Cada quadripolo representa uma espira do enrolamento.

A representação do enrolamento, espira por espira, permite avaliar com boa precisão o desempenho do enrolamento à sobretensões de alta frequência. Adicionalmente, a avaliação ressonante do enrolamento completo (ou parcial, das partes de interesse) pode ser estabelecida.

Todavia, a representação do enrolamento espira por espira requer um grande número de quadripolos. Isto eleva o tempo de computação e requisitos de memória de computador necessários para a solução completa do sistema.

Desta forma, o enrolamento é representado por poucas espiras do segmento de interesse. Algumas poucas bobinas são representadas. As
outras espiras são representadas por uma admitância terminal equivalente ou por uma superfície equipotencial equivalente e de valor conhecido.

#### 5.2. Admitância Terminal Equivalente

A representação parcial do enrolamento requer o seu truncamento a uma certa distância do terminal de entrada. O acoplamento de outras bobinas e espiras é considerado através de uma admitância terminal equivalente ou por uma superfície equipotencial equivalente e de valor conhecido.

A admitância equivalente pode ser determinada, no domínio da frequência, através de computação recursiva. Isto é, o número de quadripolos modelados é extendido além do segmento de interesse do enrolamento. A admitância de entrada do quadripolo representativo da espira de interesse é calculada para condições de circuito aberto e curto-circuito. Se os valores destas duas admitâncias resultam diferentes além de um diferencial aceitável, o número de quadripolos é elevado. O teste é repetido sucessivamente até que a condição de teste seja satisfeita. A admitância terminal equivalente é identificada então com o último valor da admitância de entrada calculada (circuito-aberto ou curto circuito) [18].

Desta forma, através da ligação da espira final **n** e da admitância terminal equivalente ( $\dot{Y}_r$ ), a uma equipotencial teórica (nó **n**) é possível manter o valor da tensão associada a distribuição capacitiva inicial a um nível adequado, sem perturbar o modo de propagação série através das espiras do enrolamento.

A figura 5.1 mostra a representação do enrolamento, truncado após **n** espiras.



Figura 5.1 - Representação do Enrolamento

No nó **n** resulta a seguinte equação:

$$\dot{I}_r^n = -\dot{Y}_r \cdot \dot{V}_r^n \tag{5.1}$$

## 5.3. Resposta Transitória de Enrolamento

A figura 5.2 mostra o terminal genérico de entrada "**A**" do enrolamento e o terminal genérico de interesse "**B**".



Figura 5.2 - Entrada e Saída

O objetivo é determinar a resposta transitória do enrolamento no **terminal B** a uma excitação de entrada com a uma forma de onda qualquer aplicada no **terminal A** A figura 5.3 mostra o fluxograma geral associado ao cálculo da resposta do enrolamento.



Figura 5.3 - Fluxograma Geral de Cálculo

A resposta R(w) é determinada, passo a passo, para cada intervalo de frequência de interesse.

No domínio da frequência, o comportamento ressonante do enrolamento no **terminal B**, pode ser analisado através da função de transferência H(w) associada a resposta R1(w) e correspondente a uma onda de entrada tipo impulso aplicada ao **terminal A**.

No domínio do tempo, a resposta r(t) mostra como a onda de entrada e(t) é transferida para a saída. A resposta r(t) é o resultado a ser utilizado para a análise de solicitações elétricas internas ao enrolamento do transformador. Portanto, a resposta transitória de enrolamentos é calculada pela aplicação de métodos adequados que envolvem, fundamentalmente, as etapas principais indicadas na figura 5.4.



Figura 5.4 - Etapas Principais de Cálculo

Assim, são abordados nas seções seguintes os métodos de transformações das ondas de tensão de interesse entre os domínios do **tempo** ⇒ **frequência** e **frequência** ⇒ **tempo**.

#### 5.4. Tensão de Entrada

De maneira geral, a forma de onda da tensão de entrada pode ser qualquer. Todavia, na análise da resposta de enrolamentos de transformadores, interesse particular é associado aquelas formas de onda tipo impulso triangular, representativos de fenômenos transitórios tipos surtos de manobra e atmosféricos.

A figura 5.5 representa um impulso triangular com indicação das características principais correspondentes.



Figura 5.5 - Impulso Triangular

A onda da tensão de entrada é transformada do domínio do tempo para o domínio da frequência pela aplicação do método numérico da Transformada Rápida de Fourier.

## 5.4.1. Amostragem da Tensão de Entrada

A tensão de entrada u(t) é amostrada ou discretizada por uma sucessão de pulsos de largura  $\Delta t_i$ , igualmente espaçados, e altura igual ao valor da função u(t) no centro do intervalo  $\Delta t_i$ . Isto é representado na figura 5.6.



Figura 5.6 - Tensão de Entrada e Aproximação por Pulsos

Para um intervalo de tempo  $\Delta t_i \rightarrow 0$ , os pulsos são representáveis pelas funções impulso (de Dirac) correspondentes. Isto é:

$$\Delta t_{i} \to 0 \Rightarrow u(t) = u(t_{i}) \cdot \delta(t - t_{i})$$
(5.2)

Cada uma destas funções impulso representam uma função de transferência de um sistema linear. Isto é:

$$h(t - t_i) = \delta(t - t_i)$$
(5.3)

Aplicando cada um dos pulsos de largura  $\Delta t_i$  a um sistema de resposta impulsiva h(t), a resposta correspondente resulta:

$$\mathbf{r}(\mathbf{t}) = \Delta \mathbf{t}_{i} \cdot \mathbf{u}(\mathbf{t}_{i}) \cdot \mathbf{h}(\mathbf{t} - \mathbf{t}_{i})$$
(5.4)

A resposta ao sinal de entrada u(t) é a soma das respostas aos impulsos sucessivos em que o sinal foi decomposto. A resposta no instante "**t**" é a soma das respostas impulsivas  $[\Delta t_i \cdot u(t_i) \cdot h(t-t_i)]$  dos impulsos que ocorreram no tempo passado anterior à "**t**" e é dada por:

$$\mathbf{r}(\mathbf{t}) = \sum_{-\infty}^{n} \Delta \mathbf{t}_{i} \cdot \mathbf{u}(\mathbf{t}_{i}) \cdot \mathbf{h}(\mathbf{t} - \mathbf{t}_{i})$$
(5.5)

A frequência de amostragem da tensão de entrada é dada por:

$$f_{s} = \frac{1}{\Delta t}$$
(5.6)

Esta representação permite o cálculo do espectro para um valor máximo de frequência, denominada de frequência de corte de Nyquist, dada por:

$$f_{\max} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} = \frac{f_s}{2}$$
(5.7)

Adicionalmente o intervalo correspondente de frequência amostrada é dado por:

$$\Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta t} = \frac{f_s}{N}$$
(5.8)

A expressão (5.7) mostra que a frequência de amostragem deve ser o dobro da máxima frequência de interesse de cálculo.

Por outro lado, a fidelidade da representação da função contínua original pode ser extendida para altas frequências através da redução do intervalo  $\Delta t$ .

#### 5.4.2. Transformada Rápida de Fourier

A Transformada Rápida de Fourier é um método particular de cálculo de alto desempenho da Transformada Discreta de Fourier. Como tal, ela é em princípio aplicável a formas de ondas periódicas. A transformação de onda aperiódica, como por exemplo o impulso triangular, pode ser realizada aproximadamente. Correções ou artíficios de equivalência são utilizados.

A Transformada Discreta de Fourier (TDF) é uma relação exata entre uma sequência original amostrada e uma sequência imagem resultante. A TDF de uma função periódica x(t) qualquer para o domínio da frequência, é dada por:

$$X(\omega) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(t) \cdot e^{-j\omega \cdot \frac{t}{N}}$$
(5.9)

onde n = 0, 1, 2, 3, ..., (N-1) é correspondente aos intervalos iguais de amostragem  $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, ..., (N-1)\Delta t$  segundo os quais o domínio (ou período) é subdividido.

A transformação de uma forma de onda aperiódica, tipo impulso triangular, é realizada utilizando-se a técnica artificial de **Enchimento com Zeros**. Segundo esta técnica, o período de amostragem é estendido para o dobro do valor do período da onda original para os quais o valor da função é nulo. Esta operação de Enchimento com Zeros evita sobreposição de espectros e eleva a resolução no domínio da frequência. A figura 5.7 mostra o impulso triangular equivalente.



Figura 5.7 - Impulso Triangular e Enchimento com Zeros

O procedimento usual de determinação do número de intervalos de amostragem, segundo o qual o período (incluindo o enchimento com zeros) é subdividido, envolve o cálculo recursivo. A partir de um intervalo de tempo  $\Delta t$  adotado inicialmente calcula-se a Transformada correspondente. Reduzindo-se o intervalo de tempo recalcula-se a Transformada até que a diferença entre espectros sucessivos seja no máximo igual a um certo valor admissível.

O número N de intervalos de amostragem é normalmente uma potência de base 2 ( $N=2^{m}$ , onde m é um número inteiro). Esta escolha, reflete em uma elevada eficiência computacional. Adicionalmente, para um total de N amostras no domínio do tempo resultam N amostras complexas no domínio da frequência.

A TDF resulta, no domínio da frequência, uma função periódica, cujo período é  $2\pi/\Delta t \text{ [rad/s]}$ . Devido a esta periodicidade é possível calcular corretamente a transformada da onda estendida (incluindo o enchimento com zeros), usando os pontos sequencialmente a partir de t = 0.

#### 5.4.3. Falseamento

Falseamento é o fenômeno segundo o qual, para uma mesma frequência de amostragem, o sinal contínuo no tempo de interesse pode ser confundido por outros sinais de diferentes frequências na medida em que o sinal original é representado por um conjunto de amostras.

A figura 5.8 mostra o fenômeno de Falseamento associado a um sinal senoidal, segundo o qual ondas de diferentes frequências podem apresentar a mesma taxa de amostragem.



Figura 5.8 - Falseamento em Sinal Senoidal

A forma convencional usada para relacionar um unico sinal a um conjunto de amostras é filtrar o sinal através de uma filtro passa-baixas. A escolha do filtro passa-baixa fundamenta-se no critério segundo o qual para uma frequência de amostragem  $f_s$  maior que duas vêzes a frequência máxima  $f_{max}$  presente no sinal há um unico sinal contínuo no domínio do tempo associado a um sinal amostrado por intervalos discretos.

## 5.5. Tensões e Correntes Internas

A tensão de entrada, transformada para o domínio da frequência, resulta em um espectro de tensões individuais sob a forma de um número complexo.

As tensões e correntes internas, em cada uma das espiras (nós) do circuito equivalente do enrolamento, são calculadas no domínio da frequência e para cada intervalo de frequência de interesse, como respostas a cada uma das componentes individuais do espectro da tensão de entrada.

Desta forma, as tensões e correntes internas resultam de uma combinação linear dos parâmetros do enrolamento e da tensão de entrada. Em um ponto qualquer do enrolamento, a resposta correspondente é estabelecida com um atraso no tempo. Este atraso reflete o tempo de propagação da tensão a partir do terminal de entrada.

### 5.5.1. Convolução no Domínio da Frequência

A convolução representa o fato que a excitação de entrada é transferida, para uma dada saída de um sistema físico qualquer, após um certo intervalo de tempo.

No domínio da frequência, a convolução pode ser representada por:

$$R(\omega) = H(\omega) \cdot U(\omega)$$
(5.10)

ou seja, a resposta do enrolamento pode ser obtida por operações simples de multiplicar espectros de frequência.

No domínio do tempo, a resposta de interesse resulta da transformada inversa de  $R(\omega)$ .

#### 5.5.2. Deconvolução no Domínio da Frequência

A deconvolução, no domínio da frequência, representa a operação de determinação de uma função de transferência qualquer  $H(\omega)$  a partir da divisão de dois espectros de um sinal. Isto é, um sinal qualquer de resposta  $R(\omega)$  pelo sinal de entrada  $U(\omega)$ .

#### 5.5.3. Funções de Transferências

De maneira geral, a função de transferência é utilizada na análise de comportamento ressonante de um enrolamento [24,25,26].

As funções de transferência entre qualquer espira representada do enrolamento e a espira de entrada, para cada intervalo de frequência, podem ser calculadas a partir das componentes espectrais da tensão de entrada e das tensões e correntes internas.

Considerando uma resposta  $R(\omega)$  qualquer a uma dada excitação  $U(\omega)$ , a função de transferência resulta da deconvolução dos dois espectros:

$$H(\omega) = \frac{R(\omega)}{U(\omega)}$$
(5.11)

A divisão dos dois espectros é uma operação delicada. Por exemplo, valores excessivamente reduzidos no denominador  $U(\omega)$  resultam valores elevados do quociente  $H(\omega)$ , inutilizando a função de transferência.

Considerando o circuito equivalente do enrolamento representado pela figura 5.1, as funções de transferências são dadas por:

$$\begin{cases} I_s^1(\boldsymbol{w}) = Y_{eq}(\boldsymbol{w}) \cdot V_s^1(\boldsymbol{w}) \\ \dot{I}_s^2(\boldsymbol{w}) = \dot{H}_f^2(\boldsymbol{w}) \cdot \dot{V}_s^2(\boldsymbol{w}) \\ \vdots \\ \dot{I}_s^n(\boldsymbol{w}) = \dot{H}_f^n(\boldsymbol{w}) \cdot \dot{V}_s^n(\boldsymbol{w}) \end{cases}$$
(5.12)

onde:

 $\dot{Y}_{_{eq}}(w)$ , representa a admitância equivalente do enrolamento para frequências altas;

 $\dot{H}_{f}^{i}(w)$ , representa a função de transferência, definida para cada intervalo de frequência de interesse, entre a espira "i" e a espira de entrada "1".

Ambas grandezas,  $\dot{Y}_{eq}(w)$  e  $\dot{H}_{f}^{i}(w)$ , são uma representação dos acoplamentos eletromagnéticos próprios e mútuos entre as indutâncias e capacitâncias parciais representativas dos enrolamentos.

#### 5.5.4. Divisão de Zero por Zero

No processo de deconvolução, em particular na faixa de altas frequências, ocorre a divisão de valores numéricos excessivamente baixos. Esta divisão produz resultados instáveis que corrompem a Função de Transferência.

A utilização de formatação numérica tipo precisão dupla com ponto flutuante não elimina completamente o fenômeno.

Este efeito pode ser minimizado pela introdução de um fator de alisamento no denominador da divisão complexa, estabelecendo um valor mínimo a cada valor correspondente do denominador. Todavia, o fator de alisamento deve ser avaliado cuidadosamente de maneira a evitar a atenuação nos pólos de alta frequência.

#### 5.6. Tensões de Saída

As tensões de saida, naqueles terminais de interesse do enrolamento são determinadas no domínio da frequência. Fundamentalmente, as tensões de saida em um enrolamento requererem a convolução de uma resposta a impulso (função de transferência) com um sinal de entrada não repetitivo, resultando em um sinal de saída não repetitivo, ou linear [24].

Depois, pela aplicação da Transformada Inversa de Fourier, a tensão correspondente no domínio do tempo é determinada. Isto é:

$$r(t) = F^{-1} \{ [R(\omega)] \}$$
 (5.13)

Desta forma são determinadas todas as tensões nodais para a terra e as tensões entre partes do enrolamento.

## 5.6.1. Transformada Inversa de Fourier

A Transformada Discreta Inversa Fourier (TDIF) de uma função  $X(\omega)$ 

qualquer, do domínio da frequência para o domínio do tempo, é dada por:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{X}(\omega) \cdot e^{+j\omega \cdot \frac{t}{N}}$$
(5.14)

onde n = 0, 1, 2, 3, ..., (N-1) é correspondente aos intervalos iguais de amostragem  $f = 0, \Delta f, 2\Delta f, 3\Delta f, ..., (N-1)\Delta f$  segundo os quais o domínio da frequência considerado é subdividido.

Para o cálculo da TDIF é utilizado o método numérico da Transformada Rápida Inversa de Fourier.

#### 5.6.2. Filtros ou Janelamento de Saída

O truncamento de funções contínuas apresenta o aspecto indesejável de oscilações na resposta de interesse. Adicionalmente, independente de aspectos teóricos, erros são introduzidos pela aplicação de métodos numéricos de cálculos.

Como exemplo, a Transformada Rápida de Fourier (TRF) é um algorítimo que corresponde a aplicação da série de Fourier a um sinal repetitivo e contínuo no tempo. A aplicação direta da TRF a um sinal truncado em um intervalo de tempo de interesse resulta em erros.

O erro em análise resulta da aproximação de convolução linear por circular. Quando os sinais de entrada e saída são infinitamente longos  $(T \rightarrow \infty)$  o erro introduzido é desprezível. Todavia para duração finita do sinal, o erro introduzido é significativo e afeta o resultado final.

Considerando o aspecto numérico finito associado a uma resposta teórica de duração infinita, a utilização de filtros adequados é recomendável. Este procedimento reduz o efeito de oscilações indesejáveis na forma de onda da resposta transitória de interesse. Um filtro de saida é equivalente a uma função de transferência atuante entre a resposta interna e a resposta terminal do sistema. No domínio da frequência, a resposta filtrada resulta da multiplicação do espectro da tensão de saída pelo espectro da função de transferência correspondente ao filtro. A figura 5.9 mostra o fluxo de cálculo.



Figura 5.9 - Aplicação de Filtros de Saida

A reconstituição de uma tensão qualquer, a partir do espectro associado a uma transformação de Fourier correspondente, pode incluir a aplicação de funções delimitadoras, ou filtros, de sinal que minimizam estas oscilações. A resposta filtrada resulta da seguinte expressão de convolução:

$$RF(\omega) = R(\omega) \cdot F_{s}(\omega)$$
(5.15)

#### 5.6.2.1. Filtro ou Janelamento Retangular

A figura 5.10 mostra o procedimento de análise de uma função contínua do tempo considerando o intervalo de tempo [-T/2; +T/2]. As funções do tempo e a correspondente Transformada de Fourier são mostradas lado a lado.



Figura 5.10 - Janelamento Retangular e Truncamento de Função Contínua

A aplicação do janelamento retangular  $F_R(t)$  finito de R(t) resulta, após convolução no domínio da frequência, em dois pulsos oscilantes e não em dois impulsos, como é o resultado da transformada de Fourier na função contínua R(t).

A Transformada de Fourier do janelamento  $F_{\!_R}(t)$  é dada por:

$$F_{R}(f) = T \cdot \frac{\operatorname{sen}(\pi \cdot f \cdot T)}{\pi \cdot f \cdot T} = T \cdot \operatorname{sinc}(f \cdot T)$$
(5.16)

cujo módulo é representado na figura 5.11.



Figura 5.11 - Módulo do Filtro Retangular

As oscilações associadas ao truncamento correspondem a dispersão de energia. Portanto, a função contínua deve então ser filtrada por meio de uma outra função não retangular. O filtro adequado deve ter a característica de aproximar a função finita observada (medida ou calculada) a função contínua infinita teórica correspondente.

#### 5.6.2.2. Filtro ou Janelamento Exponencial

O filtro ou janelamento Exponencial decrescente apresenta esta característica. Após um intervalo de tempo T o sinal é reduzido exponencialmente a zero.

O filltro ou janelamento Exponencial resulta em uma consideração adequada para a análise do período inicial comparada ao período final da resposta transitória no domínio da frequência.

No domínio da frequência o filtro Exponencial é dado por:

$$F_{E}(f) = \frac{1}{\alpha + j 2\pi f} = \frac{\alpha}{\alpha^{2} + (2\pi f)^{2}} - j \frac{2\pi f}{\alpha^{2} + (2\pi f)^{2}}$$
(5.17)

cujo módulo é representado na figura 5.12.



Figura 5.12 - Módulo do Filtro Exponencial

O janelamento exponencial é escolhido de maneira a reduzir o valor do sinal filtrado a aproximadamente **1%** no final do janelamento. O valor da constante  $\alpha$  pode ser determinado a partir desta condição de contorno. No domínio do tempo, o filtro exponencial resulta:

$$F_{E}(t) = \Im^{-1} \{ F_{E}(f) \} = e^{-\alpha \cdot t}$$
(5.18)

que pode ser discretizado em:

$$F_{E}(i \cdot \Delta t) = e^{-a \cdot i \cdot \Delta t}$$
,  $i = 1, 2, ..., n$  (5.19)

Então, considerando a condição de contorno dada, no final do janelamento considerado, isto é:

$$\Gamma = \mathbf{n} \cdot \Delta t \tag{5.20}$$

tem-se

$$F_{E}(n \cdot \Delta t) = F_{E}(T) = e^{-\alpha \cdot T} = 0.01$$
 (5.21)

resultando:

$$\alpha = -\frac{\ln(0.01)}{T}$$

(5.22)

## 5.6.2.3. Filtro ou Janelamento Hanning

O filtro ou janelamento Hanning não apresenta a desvantagem do filtro Exponencial ao estabelecer o amortecimento das oscilações para altas e baixas frequências do espectro considerado. A parte final da resposta original é forçada a zero por este filtro. No domínio da frequência o filtro de Hanning, é dado por:

$$F_{\rm H}(f) = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot f}{W}\right) & \text{para:} & |f| < W \\ 0 & \text{para:} & \text{demais} \end{cases}$$
(5.23)

onde W [1/s] representa o janelamento da frequência amostrada. O módulo da função  $F_{H}(f)$  é representado na figura 5.13.



Figura 5.13 - Módulo do Filtro Hanning

# 6 - APLICAÇÃO E RESULTADOS

#### 6.1. Introdução

Neste capítulo, o modelo estabelecido e descrito nos capítulos anteriores é aplicado para a análise de enrolamentos de transformadores submetidos a tensões transitórias convencionais e não convencionais. Enrolamentos representativos daqueles tradicionalmente utilizados na indústria para níveis de isolamento de 72.5, 145 e 550kV são simulados.

Inicialmente, os principais tipos de enrolamentos utilizados em alta tensão são apresentados.

#### 6.2. Tipos de Enrolamentos de Alta Tensão

Tradicionalmente, para o projeto e a fabricação de enrolamentos de alta tensão de transformadores são aplicados enrolamentos tipo disco contínuo ou tipo disco entrelaçados. Em alguns casos, associado ao nível de isolamento de seus terminais, enrolamentos tipo disco contínuo com blindagens interna e enrolamentos tipo disco parcialmente entrelaçado são também aplicados.

#### 6.2.1. Enrolamento Disco Contínuo

Enrolamento tipo disco contínuo é formado por um conjunto de bobinas planas, com espiras radialmente justapostas, enroladas continuamente e separadas axialmente por espaçadores que formam, por sua vêz, canais de óleo entre bobinas adjacentes.

Em cada uma das bobinas, as espiras correspondentes são enroladas como uma espiral plana. As bobinas adjacentes são ligadas em série de

maneira contínua. O número de condutores em paralelos é dependente da corrente a conduzir, das perdas máximas e das solicitações mecânicas associadas a curto-circuitos. Quando dois ou mais condutores paralelos são empregados, transposições dos condutores são necessárias.

A figura 6.1 mostra o arranjo de uma bobina dupla tipo disco contínuo e o esquema elétrico de interligação correspondente.



diferença de potencial entre espiras

Figura 6.1 - Bobina Dupla em Enr. Disco Contínuo

Enrolamento tipo disco contínuo é aplicado, em geral, para transformadores com nível de isolamento correspondente a tensão de impulso atmosférico de até 350kV. A baixa capacitância série destes enrolamentos não permite a aplicação para tensões mais elevadas.

#### 6.2.2. Enrolamento Tipo Disco Entrelaçado

O entrelaçamento de espiras eleva a capacitância série total do enrolamento, melhorando sua resposta à tensão transitória. A distribuição de tensão ao longo do enrolamento é aproximadamente linear.

Nestes enrolamentos as bobinas são enroladas com um número par (dois ou mais) de condutores e interligadas de maneira que os condutores estão galvanicamente em série. Dentro de uma bobina dupla, o entrelaçamento é obtido pelo retorno do condutor à bobina anterior. Nestes enrolamentos, os condutores adjacentes pertencem a espiras eletricamente afastadas o que estabelece, comparativamente, maiores diferenças de potencial entre eles.

A figura 6.2 mostra o arranjo geral de uma bobina dupla tipo disco entrelaçado e o esquema elétrico de interligação correspondente.



diferença de potencial entre espiras

Figura 6.2 - Bobina Dupla em Enr. Disco Entrelaçado

Enrolamento tipo disco entrelaçado é aplicado, em geral, para transformadores com nível de isolamento correspondente à tensão de impulso atmosférico superior a 350kV.

Existem algumas formas construtivas diferentes de entrelaçamento de espiras para enrolamentos, com influência no desempenho correspondente. Os tipos mais usuais, aplicados na indústria de transformadores, são apresentados na tabela 6.1 [36]. Os arranjos são apresentados com um número par de espiras em cada disco de uma bobina dupla, embora um número impar de espiras seja também utilizado.



Tabela 6.1 - Enrolamentos Entrelaçados

O esquema proposto pela English Electric é frequentemente utilizado na indústria devido a facilidade de fabricação comparado aos esquemas propostos por Kratochwil e Van Nuys. O esquema proposto por Kratochwil apresenta, por bobina dupla equivalente, uma maior capacitância série que o English Electric.

A figura 6.3 mostra o esquema elétrico de uma bobina dupla do enrolamento entrelaçado tipo English Electric com seis espiras por disco de uma bobina dupla.



Figura 6.3 - Bobina Dupla: Enrolamento Entrelaçado English Electric

## 6.3. Desempenho Transitório de Enrolamento Disco

O desempenho transitório de um enrolamento tipo disco está associado a relação das capacitâncias série e paralela correspondentes. A relação entre estas capacitâncias estabelece o fator de distribuição de tensão transitória em um enrolamento. Nomeadamente:

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$$
(6.1)

Enrolamentos de alta tensão são, em geral, projetados com valores típicos de fator de distribuição de tensão conforme indicado na tabela 6.2.

Tipo Enrolamento	$C_{g}[pF]$	C <sub>s</sub> [pF]	α [pu]
Disco Contínuo	1200	6	14
Disco Entrelaçado	1300	150	3

Tabela 6.2 - Valores Típicos de  $C_{_g},\,C_{_s}\,\,e\,\,\alpha$ 

A figura 6.4 mostra distribuições típicas de tensão transitória ao longo de enrolamentos tipo disco para alguns valores de capacitância série.



Figura 6.4 - Entrelaçamento e Resposta Transitória ( $\alpha 1 < \alpha 2 < \alpha 3$ )

A distribuição inicial  $(t \rightarrow 0)$  de tensão transitória ao longo do enrolamento aproxima-se de uma distribuição final linear  $(t \rightarrow \infty)$  para valores de  $\alpha \rightarrow 0$  que correspondem a elevadas capacitâncias séries. Assim as solicitações de tensão nas espiras correspondentes podem ser controladas aos níveis da suportabilidade da isolação correspondente.

Portanto, para o controle adequado da distribuição da tensão transitória ao longo do enrolamento é fundamental calcular com boa precisão os valores das solicitações de tensão para diferentes condições transitórias especificadas para o enrolamento.

# 6.4. Roteiro para o Cálculo da Resposta Transitória

O roteiro de aplicação do modelamento e cálculo da resposta transitória associada a um enrolamento, fundamenta-se no esquema geral representado no Capítulo 5. A tabela 6.3 mostra o roteiro.

Tabela 6.	3 - Roteiro de Aplicação do Méto	odo
_	_	

Etapa	Descrição				
0	identificação e caracterização do enrolamento de interesse				
0	identificação do terminal de entrada do enrolamento				
	- terminal A				
€	identificação dos locais ou segmentos de interesse do				
	enrolamento - <b>terminal B</b>				
4	modelamento do enrolamento, incluindo funções de				
	frequência: matrizes $[\dot{L}(f)]$ e $[\dot{C}(f)]$				
6	🛎 transformações (janelamento, transformada de Fourier				
	e enchimento com zeros) à tensão ${ m U}({ m f})$ de entrada				
6	🖵 cálculo, para cada intervalo de frequência, das tensões				
	e correntes nodais internas ao enrolamento				
0	$\blacksquare$ cálculo da resposta ${ m R}({ m f})$ de interesse (tensão para terra				
	ou tensão parcial entre espiras ou segmentos dos				
	enrolamentos)				
	🗖 cálculo da função de transferência entre a saida				
	de interesse e o terminal de entrada do enrolamento				
	C(f) = R(f)				
	$G(1) = \frac{1}{E(f)}$				
	determinação das frequencias naturais, identificados				
	como os pólos da função de transferência ${ m G}({ m f})$				
8	🔊 transformações inversas (janelamento, transformada de				
	Fourier) e determinação da resposta de interesse $ r \left( t  ight) .$				

#### 6.5. Análise de Casos

Nas seções seguintes são analisados segmentos de interesse próximos ao terminal de entrada de alguns enrolamentos submetidos a tensões transitórias. Nomeadamente:

- ⇒ enrolamento contínuo típico de um transformador com nível de isolamento correspondente a tensão máxima operativa de 72.5kV;
- ⇒ enrolamento entrelaçado típico de um transformador com nível de isolamento correspondente a tensão máxima operativa de 145kV;
- ⇒ enrolamento entrelaçado típico de um transformador regulador com nível de isolamento correspondente a tensão máxima operativa de 550kV; e
- ⇒ enrolamento entrelaçado típico de um transformador elevador com nível de isolamento correspondente a tensão máxima operativa de 550kV.

Os parâmetros elétricos considerados incluem relações características que ajustam o valor correspondente à variações do valor de frequência. A partir dos parâmetros são obtidas as matrizes de capacitâncias e indutâncias.

As formas de onda das tensões transitórias, aplicadas no terminal de interesse do enrolamento considerado, são as seguintes:

- ⇒ forma de onda triangular tipo impulso atmosférico 1.2/50µs; e
- ⇒ forma de onda triangular tipo impulso rápido 10/2500ns.

As características geométricas de interesse são indicadas na figura 6.5.



Figura 6.5 - Dimensões Principais de Enrolamentos

As principais solicitações são calculadas nos seguintes locais de interesse indicados na figura 6.6:

- ⇒ tensão parcial na isolação de papel entre espiras;
- ⇒ tensão parcial no canal de óleo axial externo entre bobinas adjacentes em uma bobina dupla;
- tensão parcial no canal de óleo entre bobinas adjacentes em uma bobina dupla; e
- ⇒ tensão parcial no canal de óleo entre bobinas duplas adjacentes.



Figura 6.6 - Bobina Dupla e Solicitações de Interesse

Para cada caso em análise, inicialmente são apresentadas as características elétricas, a geometria e os parâmetros elétricos relativos ao modelamento da rede correspondente. Depois são apresentadas as tensões internas resultantes dos cálculos realizados, as tensões suportáveis e os coeficientes de segurança correspondentes.

#### 6.6. Caso 1 - Enrolamento Disco Contínuo

## 6.6.1. Características Elétricas

As características elétricas principais do enrolamento em análise são apresentadas na tabela 6.5.

Característica	Unidade	Valor
nível de isolamento	kV	72.5
tensão induzida 60Hz	kVeficaz	140
impulso atmosférico 1.2/50µs		350
impulso rápido 10/2500ns, crista 1.5	kVcrista	90
impulso rápido 10/2500ns, crista 2.5		150

Tabela 6.5 - Características Elétricas do Enrolamento

# 6.6.2. Características Geométricas

As dimensões principais do enrolamento, definidas na figura 6.5, são indicadas na tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Características Geométricas do Enrolamento

Símbolo	Unidade	Descrição	Valor
Ac	mm	espessura do condutor isolado	4.5
Ace	mm	soma espessura isolação canal externo	3
Aci	mm	soma espessura isolação canal interno	6
Bc	mm	largura do calço do enrolamento	38
Bee	mm	medida radial canal entre enrolamentos	38
Bet	mm	medida radial canal enrolamtanque	90
Bre	mm	medida radial enrolamento	40
Bve	mm	largura da vareta no canal externo	20
Bvi	mm	largura da vareta no canal interno	20
De	mm	diâmetro externo enrolamento interno	600
Di	mm	diâmetro interno enrolamento	680
Dt	mm	diâmetro interno tanque	940
Hc	mm	largura do condutor isolado	12
He	mm	altura enrolamento	1276
Nbob	-	número de bobinas (discos) no enrolamento	80
Nc	-	número de calços no enrolamento	16
Nesp	-	número de espiras em uma bobina dupla	18
Nve	-	número de varetas no canal externo	16
Nvi	-	número de varetas no canal interno	16
Spl	mm	espessura total isolação do condutor	1.5
t	mm	canal entre bobinas	4
tr	mm	canal enrolamento - anel estático	4



# 6.6.3. Esquema de Ligação de Bobina Dupla

O esquema de ligação de uma bobina dupla é indicado na figura 6.7.

Figura 6.7 - Esquema de Ligação de Bobina Dupla

# 6.6.4. Solicitações, Suportabilidades e Seguranças Internas

Na tabela 6.7 são apresentadas as tensões internas resultantes e as margens de segurança correspondentes.

Local		Tensões Internas [kV]		
discos	local	Usolicitação [kV]	Usuportável [kV]	segurança [pu]
	B1	39	95	2.4
Uatm	B2	134	205	1.5
350kV	B3	116	197	1.7
	B4	26	183	7.0
	B1	19	74	3.9
Uráp1.5	B2	54	234	4.3
90kV	B3	21	236	11.2
	B4	61	229	3.8
	B1	31	74	2.4
Uráp2.5	B2	90	231	2.6
150kV	B3	35	266	7.6
	B4	103	221	2.2

Tabela 6.7 - Solicitações, Suportabilidade e Segurança

A figura 6.8 mostra a evolução no tempo das tensões parciais B1 a B4 para a tensão de entrada tipo impulso atmosférico.



Figura 6.8 - Resposta para Impulso Atmosférico 1.2/50µs

Analogamente, a figura 6.9 mostra a resposta correspondente ao impulso rápido.



Figura 6.9 - Resposta ao Impulso Rápido 1.5pu - 10/2500ns

# 6.7. Caso 2 - Enrolamento Tipo Disco Entrelaçado

## 6.7.1. Características Elétricas

As características elétricas principais do enrolamento em análise são apresentadas na tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Características Elétricas do Enrolamento

Característica	Unidade	Valor
nível de isolamento	kV	145
tensão induzida 60Hz	kVeficaz	275
impulso atmosférico 1.2/50µs	kVcrista	650
impulso rápido 10/2500ns, crista 1.5	kVcrista	180
impulso rápido 10/2500ns, crista 2.5	kVcrista	300

## 6.7.2. Características Geométricas

As dimensões principais do enrolamento, definidas na figura 6.5, são indicadas na tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Características Geométricas do Enrolamento

Símbolo	Unidade	Descrição	Valor
Ac	mm	espessura do condutor isolado	4.8
Ace	mm	soma espessura isolação canal externo	4
Aci	mm	soma espessura isolação canal interno	8
Вс	mm	largura do calço do enrolamento	38
Bee	mm	medida radial canal entre enrolamentos	45
Bet	mm	medida radial canal enrolamtanque	170
Bre	mm	medida radial enrolamento	48
Bve	mm	largura da vareta no canal externo	20
Bvi	mm	largura da vareta no canal interno	20
De	mm	diâmetro externo enrolamento interno	700
Di	mm	diâmetro interno enrolamento	790
Dt	mm	diâmetro interno tanque	1226
Hc	mm	largura do condutor isolado	15
He	mm	altura enrolamento	1516
Nbob	-	número de bobinas (discos) no enrolamento	80
Nc	-	número de calços no enrolamento	20

Nesp	-	número de espiras em uma bobina dupla	20
Nve	-	número de varetas no canal externo	20
Nvi	-	número de varetas no canal interno	20
Spl	mm	espessura total isolação do condutor	2.0
t	mm	canal entre bobinas	3
tr	mm	canal enrolamento - anel estático	4

# 6.7.3. Esquema de Ligação de Bobina Dupla

O esquema de ligação de uma bobina dupla é indicado na figura 6.10.



Figura 6.10 - Esquema de Ligação de Bobina Dupla

# 6.7.4. Solicitações, Suportabilidades e Seguranças Internas

Na tabela 6.10 são apresentadas as tensões internas resultantes e as margens de segurança correspondentes.

Lo	cal	Tensões Internas [kV]		
discos	local	Usolicitação [kV]	Usuportável [kV]	segurança [pu]
	B1	55	126	2.3
Uatm	B2	152	177	1.2
650kV	B3	63	181	2.9
	B4	28	137	4.9
	B1	29	98	3.4
Uráp1.5	B2	59	202	3.4
180kV	B3	8	203	25.4
	B4	7	191	27.3
	B1	48	98	2.0
Uráp2.5	B2	99	199	2.0
300kV	B3	13	203	15.6
	B4	11	180	16.4

Tabela 6.10 - Solicitações, Suportabilidade e Segurança

A figura 6.11 mostra a evolução no tempo das tensões parciais B1 a B4 para a tensão de entrada tipo impulso atmosférico.



Figura 6.11 - Resposta para Impulso Atmosférico 1.2/50µs

Analogamente, a figura 6.12 mostra a resposta correspondente ao impulso rápido.



Figura 6.12 - Resposta ao Impulso Rápido 1.5pu - 10/2500ns

# 6.8. Caso 3 - Transformador Regulador Enrolamento Disco Entrelaçado

## 6.8.1. Características Elétricas

As características elétricas principais do enrolamento em análise são apresentadas na tabela 6.11.

Característica	Unidade	Valor
nível de isolamento	kV	550
tensão induzida 60Hz	kVeficaz	1250
impulso atmosférico 1.2/50µs	kVcrista	1550
impulso rápido 10/2500ns, crista 1.5	kVcrista	670
impulso rápido 10/2500ns, crista 2.5	kVcrista	1125
# 6.8.2. Características Geométricas

As dimensões principais do enrolamento, definidas na figura 6.5, são indicadas na tabela 6.12.

Tabela 6.12 - Características Geométricas do Enrolamento

Símbolo	Unidade	Descrição	Valor
Ac	mm	espessura do condutor isolado	7.6
Ace	mm	soma espessura isolação canal externo	10
Aci	mm	soma espessura isolação canal interno	14
Вс	mm	largura do calço do enrolamento	60
Bee	mm	medida radial canal entre enrolamentos	110
Bet	mm	medida radial canal enrolamtanque	350
Bre	mm	medida radial enrolamento	99
Bve	mm	largura da vareta no canal externo	30
Bvi	mm	largura da vareta no canal interno	30
De	mm	diâmetro externo enrolamento interno	1563
Di	mm	diâmetro interno enrolamento	1783
Dt	mm	diâmetro interno tanque	2681
Hc	mm	largura do condutor isolado	14.8
He	mm	altura enrolamento	2362
Nbob	-	número de bobinas (discos) no enrolamento	132
Nc	-	número de calços no enrolamento	30
Nesp	-	número de espiras em uma bobina dupla	26
Nve	-	número de varetas no canal externo	30
Nvi	-	número de varetas no canal interno	30
Spl	mm	espessura total isolação do condutor	2.3
t	mm	canal entre bobinas	3
tr	mm	canal enrolamento - anel estático	4

# 6.8.3. Esquema de Ligação de Bobina Dupla



O esquema de ligação de uma bobina dupla é indicado na figura 6.13.

Figura 6.13 - Esquema de Ligação de Bobina Dupla

# 6.8.4. Solicitações, Suportabilidades e Seguranças Internas

Na tabela 6.13 são apresentadas as tensões internas resultantes e as margens de segurança correspondentes.

Lo	cal			
discos	local	Usolicitação [kV]	Usuportável [kV]	segurança [pu]
	B1	78	145	1.9
Uatm	B2	170	182	1.1
1550kV	B3	107	192	1.8
	B4	178	212	1.2
	B1	47	113	2.4
Uráp1.5	B2	150	207	1.4
670kV	B3	22	212	9.6
	B4	60	190	3.2
	B1	78	113	1.4
Uráp2.5	B2	249	201	0.8
1125kV	B3	37	212	5.7
	B4	99	173	1.7

Tabela 6.13 - Solicitações, Suportabilidade e Segurança





Figura 6.14 - Resposta para Impulso Atmosférico 1.2/50µs

Analogamente, a figura 6.15 mostra a resposta correspondente ao impulso rápido.



Figura 6.15 - Resposta ao Impulso Rápido 1.5pu - 10/2500ns

## 6.9. Caso 4 - Transformador Elevador Enrolamento Disco Entrelaçado

## 6.9.1. Características Elétricas

As características elétricas principais do enrolamento em análise são apresentadas na tabela 6.14.

Tabela 6.14 - Características Elétricas do Enrolamento

Característica	Unidade	Valor
nível de isolamento	kV	550
tensão induzida 60Hz	kVeficaz	675
impulso atmosférico 1.2/50µs	kVcrista	1550
impulso rápido 10/2500ns, crista 1.5	kVcrista	670
impulso rápido 10/2500ns, crista 2.5	kVcrista	1125

## 6.9.2. Características Geométricas

As dimensões principais do enrolamento, definidas na figura 6.5, são indicadas na tabela 6.15.

Símbolo Descrição Valor Unidade 7 Ac mm espessura do condutor isolado 6 Ace mm soma espessura isolação canal externo Aci 10 mm soma espessura isolação canal interno Bc mm largura do calço do enrolamento 60 122 Bee mm medida radial canal entre enrolamentos medida radial canal enrolam.-tanque Bet mm 300 Bre medida radial enrolamento 80 mm Bve mm largura da vareta no canal externo 30 largura da vareta no canal interno Bvi mm 30 diâmetro externo enrolamento interno 1437 De mm Di mm diâmetro interno enrolamento 1681 Dt mm diâmetro interno tanque 2441 Hc 11 mm largura do condutor isolado He 2491 mm altura enrolamento Nbob \_ número de bobinas (discos) no enrolamento 2 x 78 Nc 30 número de calços no enrolamento

Tabela 6.15 - Características Geométricas do Enrolamento

Nesp	-	número de espiras em uma bobina dupla	22
Nve	-	número de varetas no canal externo	30
Nvi	-	número de varetas no canal interno	30
Spl	mm	espessura total isolação do condutor	1,8
t	mm	canal entre bobinas	5
tr	mm	canal enrolamento - anel estático	5

# 6.9.3. Esquema de Ligação de Bobina Dupla

O esquema de ligação de uma bobina dupla é indicado na figura 6.16.



Figura 6.16 - Esquema de Ligação de Bobina Dupla

# 6.9.4. Solicitações, Suportabilidades e Seguranças Internas

Na tabela 6.16 são apresentadas as tensões internas resultantes e as margens de segurança correspondentes.

Lo	cal	Tensões Internas [kV]				
discos	local	Usolicitação [kV]	segurança [pu]			
	B1	111	113	1.0		
Uatm	B2	139	220	1.6		
1550kV	B3	121	208	1.7		
	B4	18	177	9.8		
	B1	168	88	0.5 !!		
Uráp	B2	87	246	2.8		
670kV	B3	187	245	1.3		
	B4	71	228	3.2		
	B1	280	88	0.3 !!		
Uráp	B2	145	237	1.6		
1125kV	B3	311	245	0.8 !!		
	B4	177	206	1.2		

Tabela 6.16 - Solicitações, Suportabilidade e Segurança

A figura 6.17 mostra a evolução no tempo das tensões parciais B1 a B4 para a tensão de entrada tipo impulso atmosférico.



tempo [µs]

Figura 6.17 - Resposta para Impulso Atmosférico 1.2/50µs



Analogamente, a figura 6.18 mostra a resposta correspondente ao impulso

Figura 6.18 - Resposta ao Impulso Rápido 1.5pu - 10/2500ns

## 6.10. Análise de Resultados

#### 6.10.1. Margens de Segurança

Considerando:

- ⇒ as caracterísiticas elétricas e geométricas dos enrolamentos;
- ⇒ o valor de crista e a forma de onda das tensões transitórias aplicadas aos terminais dos enrolamentos;
- ⇒ as caracterísiticas de suportabilidade da isolação papel+óleo da isolação interna dos enrolamentos disponíveis na literatura e em particular nas referências [14,15];

as análises quantitativas das simulações realizadas revelam:

 Para transitórios convencionais, que podem ser representados por ondas tipo impulso atmosférico 1.2/50µs, os enrolamentos avaliados nos Casos
 1 até 4 apresentam dimensionamento interno com margens adequadas de segurança com valores superiores a 1.0pu. A figura 6.19 mostra os resultados comparativos.



Figura 6.19 - Margens de Segurança ao Impulso Atmosférico 1.2/50µs

In para transitórios não convencionais, que podem ser representados por ondas tipo impulso triangular e com frente de onda muito rápida 10/2500ns, verifica-se que os enrolamentos para níveis de isolamento de até 145kV, avaliados nos Casos 1 e 2, apresentam dimensionamento interno com margens adequadas de segurança com valores superiores a 2.0pu para tensões transitórias de até 2.5 vêzes a tensão máxima operativa correspondente. Entretanto, verifica-se que os enrolamentos para níveis de isolamento da ordem de 550kV, avaliados nos Casos 3 e 4, apresentam dimensionamento interno com margens inadequadas de segurança com valores superiores a 1.0pu. Em particular são críticas as solicitações entre espiras e entre bobinas de uma bobina dupla. A figura 6.20 mostra os resultados comparativos para tensões transitórias de 1.5 vêzes a tensão máxima operativa correspondente.



Figura 6.20 - Margens de Segurança ao Impulso Rápido 10/2500ns 1.5 pu

Adicionalmente, a figura 6.21 mostra os resultados comparativos para tensões transitórias de 2.5 vêzes a tensão máxima operativa correspondente.



Figura 6.21 - Margens de Segurança ao Impulso Rápido 10/2500ns 2.5 pu

É importante observar que a suportabilidade da isolação papel+óleo de transformadores para impulsos convencionais é bem conhecida e

aplicada adequadamente dentro das diferentes tecnologias. Por outro lado, a suportabilidade correspondente para impulsos não convencionais com frentes de ondas muito rápidas é de interesse recente e pouco conhecida. Sendo assim, a aplicação tecnológica deste conhecimento é limitada. Desta forma os resultados das simulações realizadas devem ser cuidadosamente avaliados dentro do contexto do estado da arte do conhecimento.

As simulações realizadas revelam boa precisão quanto a localização física das regiões do enrolamento com margens inadequadas de segurança. A desmontagem, a inspeção e análise de falhas ocorridas em passado recente, envolvendo transformadores semelhantes, revelaram falhas de isolação entre espiras e entre bobinas de uma mesma bobina dupla.

#### 6.10.2 Distribuições Capacitivas e Fatores a

Os enrolamentos analisados nas seções anteriores apresentam os valores de capacitâncias paralelas, série e fator  $\alpha$  indicados na tabela 6.17.

Caso	Enrolamento	$C_{g} [pF]$	$C_{s}[pF]$	$\alpha = \sqrt{C_{g}/C_{s}}$
1	contínuo	2504	5.95	20.514
2	entrelaçado	2631	77.50	5.827
3	entrelaçado	1755	276	2.522
4	entrelaçado	3733	342	3.304

Tabela 6.17 - Capacitâncias e Fator  $\alpha$ 

As distribuições iniciais capacitivas e finais indutivas ao longo do enrolamento com terminal final aterrado é mostrada na figura 6.22.



Figura 6.22 - Distribuições de Tensões Iniciais e Fatores  $\alpha$ 

É importante observar que, comparando os Casos 3 e 4 representativos de enrolamentos com nível de isolamento de 550kV, verifica-se que o enrolamento do Caso 3 apresenta fator  $\alpha$ =2.522 enquanto que o enrolamento do Caso 4 apresenta fator  $\alpha$ =3.304. As simulações revelaram que o desempenho comparado do enrolamento do Caso 4 é inferior aquele do enrolamento do Caso 3. Este resultado reforça o requisito de que as margens internas de segurança de enrolamentos sujeitos a transitórios rápidos pode ser melhorada com a elevação da capacitância série dos enrolamentos de interesse.

#### 6.10.3. Resposta em Frequência

A aplicação da modelagem desenvolvida permite análises intermediárias no domínio da frequência. Frequências de ressonâncias e amplificações locais ou parciais de tensões internas ao enrolamento associadas a ressonâncias podem ser observadas.

Os resultados destas simulações apresentam ressonâncias internas com frequências na faixa de MHz, mostrando a eficiência da modelagem

efetuada e recomendada. Estes resultados não poderiam ser obtidos pela aplicação de modelos convencionais de enrolamentos utilizados atualmente na indústria de transformadores.

Como exemplo, utilizando os resultados obtidos para o Caso 3 (transf. regulador 550kV), são mostrados os gráficos no domínio da frequência correspondentes à admitância de entrada e às solicitações no canal interno entre a primeira e segunda bobinas duplas (local B4) para impulso atmosférico 1,2/50µs e impulso rápido 10/2500ns.

#### 6.10.3.1. Admitância de Entrada

A figura 6.23 mostra a admitância de entrada em função da frequência para tensão de entrada tipo impulso atmosférico.



Figura 6.23 - Admitância de Entrada Impulso Atmosférico 1.2/50µs

Observam-se ressonância terminal (corrente terminal máxima) nas frequências de 90, 180 e 220kHz e anti-ressonância terminal (corrente terminal mínima) nas frequências de 70, 150 e 190kHz.

Analogamente, a figura 6.24 mostra a impedância de entrada em função da frequência para tensão de entrada tipo impulso rápido.



Figura 6.24 - Admitância de Entrada Impulso Rápido 1.5pu - 10/2500ns

## 6.10.3.2. Tensão Parcial Entre Bobinas Duplas

A figura 6.25 mostra a tensão parcial entre bobinas duplas (local B4), em função da frequência, para tensão de entrada tipo impulso atmosférico.



Figura 6.25 - Tensão Parcial B4 para Impulso Atmosférico 1.2/50µs

Observam-se ressonância parcial interna (tensão interna máxima) nas frequências de 70, 110 e 220kHz e anti-ressonância interna (tensão interna mínima) nas frequências de 50, 90 e 180kHz.

Analogamente, a figura 6.26 mostra a tensão parcial entre bobinas duplas (local B4) em função da frequência para tensão de entrada tipo impulso rápido.



Figura 6.26 - Tensão Parcial B4 para Impulso Rápido 1.5pu - 10/2500ns

Observam-se ressonância parcial interna (tensão interna máxima) nas frequências de 1.5, 1.9 e 2.5MHz e anti-ressonância interna (tensão interna mínima) nas frequências de 1.1, 1.8, 2.3 e 2.7MHz.

# 7 - RECOMENDAÇÕES PARA A ESPECIFICAÇÃO, O PROJETO E A OPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES

## 7.1. Introdução

Este Capítulo, fundamentado nas análises realizadas nos capítulos precedentes, estabelece recomendações para a especificação técnica incluindo níveis de isolamento, modelamento e análise de respostas transitórias, revisão e controle de projetos e modernização de ensaios elétricos.

Depois, considerando que no projeto de transformadores é encontrada a origem de grande quantidade de falhas [1], são estabelecidas recomendações técnicas para o projeto de transformadores inclusive aqueles submetidos a tensões transitórias rápidas.

A consideração adequada destas recomendações contribuirá para a redução dos altos valores das taxas de falhas de transformadores verificadas nos últimos anos. Em adição, a cooperação e combinação de esforços entre fabricantes e usuários é importante para a elevação do conhecimento relacionado a aplicação, especificação, projeto, ensaios e monitoração da operação de transformadores.

As especificações atuais fazem referência a diferentes Normas locais e Internacionais. A revisão das especificações implicam em recomendações para adequação de algumas destas Normas.

#### 7.2. Especificações Convencionais

De maneira geral as especificações técnicas e de ensaios de transformadores desenvolvidas por diferentes usuários são similares. Em geral elas são extensas e detalhadas. Em muitos casos, há um desequilíbrio entre os elevados requisitos estabelecidos para as partes externas (tanque, acessórios, sistemas de comando controle e proteção, etc) e aqueles associados às partes internas (núcleo, enrolamentos, etc).

Alguns usuários estabelecem diversos ensaios de materiais, ensaios de acessórios incluindo exigências de certificados e inspeções de etapas intermediárias da fabricação. Com o crescente processo internacional de Certificação e Garantia de Qualidade, outros clientes minimizaram muitos dos requisitos associados aos processos de produção.

Todavia, a alta taxa de falhas de transformadores verificadas em operação no campo e após a aprovação nos ensaios em fábrica revelam que o conteúdo de muitas especificações técnicas não contribuem com eficiência para a redução da taxa de falhas. Certificados de Qualidade, embora importantes, podem não garantir isoladamente o bom desempenho operacional a longo prazo.

#### 7.2.1. Níveis de Isolamento

O nível de isolamento de um equipamento é o conjunto de tensões suportáveis nominais, aplicadas ao equipamento durante os ensaios e definidas em uma norma específica.

Para um transformador, de acordo com o valor da tensão máxima de operação, as tensões definidas em normas para comprovar o seu nível de isolamento são:

➡ tensão suportável nominal (valor eficaz) a frequência industrial de curta duração em geral não superior a 1 mínuto;

⇒ tensão suportável nominal (valor de crista) de impulso de manobra;e

⇒ tensão suportável nominal (valor de crista) de impulso de manobra;e

A tabela 7.1 mostra valores de tensões normalizadas de ensaio de transformadores conforme Norma ABNT NBR-5356/1993 [30]:

Tabela 7.1 - Tensões Normalizadas de Ensaios de Transformadores

Um	Um,ft	Uind	Uind,lo	d [kV,ef]	Uman	Uatm	Uatm,ct
[kV,ef]	[kVcrista]	[kV,ef]	U1 - 5s	U2 - 1h	[kVcrista]	[kVcrista]	[kVcrista]
145	118	230	-	-	-	550	605
		275	-	-	-	650	715
242	200	395	-	-	750	950	1045
		460	-	-	950	1050	1155
362	296	-	362	314	850	1050	1155
		-	-	-	950	1175	1292
460	376	-	460	398	1050	1300	1430
		-	-	-	1050	1425	1567
550	449	-	550	476	1050	1425	1567
		-	-	-	1300	1550	1705
800	653	-	800	693	1425	1800	1980
		-	-	-	1550	1950	2145

onde:

- ⇒ Um tensão máxima operativa;
- ⇒ Um,ft tensão máxima operativa fase-terra;
- ⇒ Uind tensão induzida de curta duração 7200ciclos

e frequência entre 120Hz e 480Hz;

 ⇒ Uind,ld - tensão induzida de longa duração com medição de descargas parciais:

$$U1 = \sqrt{3} \cdot \frac{Um}{\sqrt{3}} \qquad e \qquad U2 = 1.5 \cdot \frac{Um}{\sqrt{3}}$$

- $\Rightarrow$  Uman tensão de impulso de manobra 100x1000µs;
- ⇒ Uatm tensão de impulso atmosférico pleno 1,2x50µs;

- ⇒ Uatm,ct tensão de impulso atmosférico cortado
   1,2x50μs, tempo de corte entre 2 e 6μs após
  - o zero virtual.

A prática tradicional de alguns usuários é especificar a tensão mínima de impulso atmosférico referente a um determinado nível de isolamento, orientada por redução do valor de compra de transformadores combinado com a coordenação de isolamento por aplicação de pára-raios. As tolerâncias nos tempos característicos das formas de onda de impulsos são amplas (conforme ABNT NBR-5380: ±30% para o tempo de frente e ±20% para o tempo até meio valor), consolidando dispersões elevadas a partir de diferentes fabricantes. Esta prática não motiva a evolução e aumento da precisão dos sistemas de ensaios de impulso.

As especificações de condições de potencialização dos outros terminais do transformador, em relação ao terminal em teste, não admitem tensão transferida para aqueles terminais superior a 75% da sua tensão de ensaio de impulso. A prática é o aterramento direto ou através de resistência de valor elevado.

#### 7.2.2. Coordenação de Isolamento com Pára-Raios

As especificações convencionais estabelecem níveis de isolamento de equipamentos em um sistema elétrico, considerando:

- máximas sobretensões esperadas para o equipamento;
- coordenação entre pára-raios e equipamento;
- margem de segurança adicionada ao nível do pára-raios; e
- valores de tensões normalizadas de ensaios pertinentes.

As margens convencionais mínimas de segurança, designada como Margem de Proteção, entre o nível de proteção de pára-raios e o nível de isolamento correspondente do equipamento são indicadas na tabela 7.2.

Um [kV,ef]	Margem de Proteção [%]	Margem para
Equipamento	Pára-Raios - Equipamento	
1 ≤ Um ≤ 52	20 a 40	imp. atmosférico
52 < Um ≤ 300	20	imp. atmosférico
Um > 300	15	imp. manobra
	25	imp. atmosférico

Tabela 7.2 - Ma	argem de F	Proteção e	entre Pára-	-Raios - E	quipame	nto
		•				

#### 7.3. Recomendações para Especificações Novas

Melhorias são necessárias nas seguintes áreas de abrangência de especificações técnicas de transformadores:

- elevação de níveis de isolamento;
- e modelamento e análise de respostas transitórias;
- revisão e controle de projetos; e
- modernização de ensaios elétricos.

#### 7.3.1. Características Elétricas e Níveis de Isolamento

Uma das formas de elevar as margens de segurança de projetos de ennrolamentos e sistemas de isolação de transformadores é a atualização para valores adequados dos níveis de isolamento. Recomenda-se:

- aumentar o nível da tensão de impulso; e
- aumentar o nível de tensão induzida a frequência industrial de curta duração.

O simples aumento do nível de impulso não é suficiente. A isolação entre espiras e bobinas pode não ser adequadamente verificada através de impulso. Isto é melhor endereçado pelo aumento do valor da tensão induzida do ensaio de curta duração. A duração do ensaio pode ser reduzida a um intervalo de tempo de aplicação de tensão suficiente para verificar o estado da isolação quanto a inicialização de descargas parciais.

O aumento do nível de impulso para um transformador influi diretamente em partes específicas do sistema de isolação. Os resultados estimados são as seguintes melhorias:

- aumento da isolação entre enrolamentos;
- aumento da isolação entre enrolamentos e jugos do núcleo;
- aumento da isolação entre cabos isolados de ligação;
- aumento da isolação entre saidas de enrolamentos e eletrodos adjacentes, por exemplo, componentes aterrados;
- aumento da isolação entre espiras e bobinas para aquelas bobinas de um enrolamento próximas aos terminais para os quais são especificadas ondas de impulso cortado; e
- aumento do nível de impulso de comutadores (sem e sob carga) correspondentes.

Naturalmente, muito dos aumentos de isolação descritos resultarão em aumento de afastamentos físicos e eventual aumento de quantidade de materiais. Portanto, podem haver implicações para o preço inicial. Todavia, a relação custo/benefício global pode ser compensada pela redução da taxa de falhas e elevação da disponibilidade e da vida útil do transformador. O aumento do nível de impulso resulta em buchas maiores e de custo mais elevado. Isto pode ser evitado através de procedimentos que garantam a verificação conjunta usuário+fabricante de projetos orientados e estabelecidos por tensões de impulso maiores, porém ensaiados com níveis de impulso reduzidos.

Por exemplo, para um transformador elevador trifásico de 300MVA e 550kV, estima-se que as buchas de AT e nível de impulso de 1550kV contribuem em aproximadamente 5% do preço do transformador. A elevação do nível de impulso de 1550kV para 1800kV refletem um aumento no preço do transformador aproximadamente em:

- @ 22% com buchas de 1800kV de impulso; e
- 7% mantidas buchas de 1550kV de impulso.

A tabela 7.3 mostra valores de tensões normalizadas de ensaio de transformadores atualmente adotada pela Norma ANSI/IEEE C57.12.90, que devem ser adotadas como uma recomendação inicial para a atualização dos valores estabelecidos na Norma ABNT NBR-5356.

Um	Um,ft	Uind	Uind,Id	[kV,ef]	Uman	Uatm	Uatm,ct
[kV,ef]	[kVcrista]	[kV,ef]	U1 - 5s	U2 - 1h	[kVcrista]	[kVcrista]	[kVcrista]
145	118	-	160	145	540	650	750
242	200	-	270	242	950	1050	1155
362	296	-	400	362	1050	1175	1210
460	376	-	510	460	1300	1425	1700
550	449	-	610	550	1425	1550	1780
800	653	-	890	800	1700	2050	2360

Tabela 7.3 - Tensões Normalizadas Recomendadas de Ensaios de Transf.

onde:

- ⇒ Um tensão máxima operativa;
- ⇒ Um,ft tensão máxima operativa fase-terra;
- ⇒ Uind tensão induzida de curta duração 7200 ciclos

e frequência entre 120Hz e 480Hz;

 Uind,Id - tensão induzida de longa duração com medição de descargas parciais:

 $U1 = 1.10 \cdot Um \qquad e \qquad U2 = Um$ 

- $\Rightarrow$  Uman tensão de impulso de manobra 100x1000µs;
- $\Rightarrow$  Uatm tensão de impulso atmosférico pleno 1,2x50µs;
- ⇒ Uatm,ct tensão de impulso atmosférico cortado 1,2x50μs,
   tempo de corte entre 2 e 6μs após o zero virtual.

#### 7.3.2. Modelamento e Análise de Respostas Transitórias

Na operação de um sistema elétrico de potência são registradas ocorrências de fenômenos transitórios não previstos e com formas de onda típicas que podem não ser representadas pelas formas de ondas normalizadas de ensaios. Em consequência, outros valores de solicitações dielétricas são impostas à isolação interna de transformadores do sistema.

A simulação em laboratório de todos estes transitórios, durante ensaios finais de aprovação na fábrica, não é viável. Todavia, uma adequação das características elétricas e dos níveis de isolamento correspondentes especificados para um transformador é possível e economicamente viável. Como resultado, as margens de projeto podem ser melhoradas.

Desta forma, é importante o estabelecimento de modelos de enrolamentos incluindo todos os terminais de interesse de um transformador no contexto do sistema elétrico. Em conjunto com o modelo, métodos rápidos de solução de redes no domínio da frequência e do tempo, permitem analisar o comportamento do transformador para diferentes formas de ondas aplicadas aos terminais e para diferentes condições de potencialização dos terminais remanescentes. É possível analisar o comportamento ressonante e a resposta de enrolamentos para tensões transitórias rápidas.

O modelamento do transformador é complexo. Requer a contribuição e o conhecimento especializado do projeto a partir do fabricante. Um esforço de verificação do desempenho do modelo é necessário através da comparação com valores medidos em ensaios. Medições de resposta em frequência e/ou no domínio do tempo devem ser conduzidas em terminais acessíveis do transformador (terminais para buchas, taps, etc...) para diferentes formas de ondas aplicadas.

Por outro lado, a resposta da interação transformador-sistema elétrico, para várias condições transitórias de interesse, requer o conhecimento especializado do sistema a partir do usuário.

Portanto, o modelamento adequado e completo de um transformador dentro de um sistema elétrico só pode ser obtido pela colaboração entre fabricante e usuário.

#### 7.3.3. Revisão e Controle de Projetos

A revisão e controle criterioso de projeto de transformador com participação ativa do usuário é um intrumento eficaz e recomendado como mecanismo que contribui para a redução de falhas.

Como tal, uma especificação técnica, ao estabelecer a participação efetiva do usuário em etapas do processo de projeto elétrico, térmico e mecânico de um transformador, cria as seguintes oportunidades:

garantir que o projeto atende as características especificadas;

- 8 garantir ao usuário entendimento dos processos de projeto e fabricação;
- garantir ao usuário melhor conhecimento para a instalação, operação e manutenção adequada;
- garantir ao fabricante um entendimento assistido da especificação e dos requisitos de aplicação do transformador;
- interação fabricante+usuário como meio eficaz de demonstração relativa a requisitos reais que resultem em melhores projetos;
- o acesso pelo usuário a resultados numéricos, permitindo avaliação sistemática da efetividade de testes especiais especificados;
- identificar, comparativamente, entre diferentes tecnologias as práticas comuns e aquelas que caracterizam individualmente os diversos fabricantes; e
- 8 melhoria contínua das especificações técnicas.

Naturalmente estabelecer sistemas efetivos de revisão e controle de projetos coordenados com fabricantes é uma tarefa complexa. Em muitos casos, fundamentado na prática anterior associada ao direito de propriedade, o fabricante pode oferecer resistência a apresentação ao usuário de dados internos de projeto.

As seguintes áreas de projeto e fabricação devem ser cuidadosamente analisadas em processos de revisão e controle de projetos:

#### A Núcleo

análise da localização e distribuição de condutores de alta corrente nas proximidades do núcleo, de maneira a minimizar correntes induzidas no núcleo ou estrutura metálica correspondente; e análise criteriosa dos processos de corte de chapa e empilhamento do núcleo de maneira a minimizar danos as chapas e riscos de estabelecimento de correntes circulantes entre chapas por redução da isolação entre elas. As rebarbas ao longo das linhas de corte devem ser cuidadosamente observadas.

#### **Enrolamentos**

- ⇒ isolação entre espiras e bobinas, incluindo solicitações elétricas e verificação de margens de segurança;
- ⇒ isolação entre enrolamentos, incluindo solicitações elétricas e verificação de margens de segurança;
- isolação de terminais de enrolamentos, incluindo solicitações elétricas e verificação de margens de segurança;
- isolação e dimensionamento térmico de cabos de ligação entre enrolamentos e terminais, incluindo solicitações e margens de segurança;
- dimensionamento de interfaces presspan-óleo quanto a tensões elétricas de escoamento superficial, incluindo solicitações e margens de segurança;
- dimensionamento para condições de curto-circuitos, incluindo a análise de assimetrias entre enrolamentos e diferentes condições de ligação de espiras em enrolamentos com taps para regulação;
- dimensionamento de enrolamentos terciários para solicitações máximas de curto-circuitos, incluindo a análise da suportabilidade mecânica dos suportes das extremidades;
- verificação dos processos de fabricação de maneira que os requisitos de curto-circuito sejam atendidos. Incluindo:

- distribuição de ligações e transposições em enrolamentos sem risco de cruzamentos entre condutores e risco de corte de isolação por cisalhamento mecânico;
  - alinhamento e distribuição de calços nos enrolamentos;
  - evitar folgas mecânicas em enrolamentos;
  - controle de forças de prensagem compatíveis com as forças associadas a curto-circuitos; e
  - análise dos dispositivos internos de prensagem de enrolamentos, identificando os mecanismos de compensação correspondente, de maneira a garantir o bom desempenho ao longo do tempo, inclusive após encolhimento associada a impregnação definitiva com óleo.
- ⇒ análise e mecanismos de controle que garantam a localização e fixação correta de blindagens elétricas (terminais de enrolamentos, extremidades internas de buchas, terminais de religações, etc...); e
- ⇒ análise de processos de fabricação associados a isolação de e emendas soldadas de condutores.

#### **A Isolação Interna de Cabos Múltiplos**

- cálculo de tensões máximas entre condutores paralelos dentro de um cabo múltiplo associadas a variações de orrente e para diferentes valores de di/dt característicos a várias condições transitórias incluindo condições rápidas;
- ⇒ aplicar preferencialmente isolação de papel, em vêz de isolação tipo verniz, para cada condutor individual;
- ⇒ análise criteriosa do processo de fabricação; e

 ⇒ incluir testes específicos que garantam a identificação da integridade da isolação entre condutores individuais.

#### **△** Sistema de Resfriamento

⇒ cálculo de fluxo de óleo, em diversas partes do sistema de resfriamento, de maneira a estimar a geração de cargas estáticas e o processo de relaxação e analisar a importância de eletrificação estática.

#### **Blindagens Estáticas**

- verificação das correntes induzidas por fluxo de dispersão em blindagens estáticas de enrolamentos, calculando amplitudes máximas e aquecimento correspondente da blindagem;
- ⇒ estabilidade mecânica da blindagem; e
- ⇒ robustez dos cabos e contatos de potencialização.

## **Correntes Induzidas em Partes Metálicas**

 estimar a corrente induzida em partes metálicas por fluxo de dispersão associado aos enrolamentos ou barramentos de ligações internas, controlando aquecimento correspondente aos níveis admissíveis.

#### Comutadores Sob Carga

⇒ revisão do projeto mecânico, incluindo: engrenagens de contatos,
 vazamentos, contatores, relés, travamentos, etc.

#### **Comutadores Sem Carga**

- ⇒ revisão do projeto mecânico, incluindo: engrenagens, mecanismos de acionamento, estrutura de fixação, etc.
- ⇒ análise da localização de blindagens de contatos; e
- ⇒ análise de cabos de potencialização de componentes aterrados.

#### 7.3.4. Modernização de Ensaios Elétricos

Mais de 30% de todas as falhas internas em transformadores tem origem dielétrica conforme dados obtidos em estatísticas distintas conduzidas pelo CIGRÉ, pela AEP (American Electric Power Service Corporation, Ohio, USA) e pelo GCOI (Grupo Coordenador para Operação Interligada, Eletrobrás, Brasil) [1,2,5].

Neste contexto, os segmentos de enrolamentos e interligações internas envolvidas com Comutadores de Tensão apresentam uma grande contribuição para o número total de falhas. Os enrolamentos com taps introduzem descontinuidades elétricas no sistema de enrolamentos com consequências nas solicitações dielétricas, mecânicas e térmicas (associadas a perdas por dispersão).

A monitoração contínua de transformadores em um sistema elétrico revelam a existência de múltiplas ocorrências transitórias de tensões com várias forma de onda e amplitudes.

Adicionalmente, esforços devem ser dedicados a fenômenos de eletrificação estática associada a sistemas de resfriamento que incluam bombas em seu circuito.

Portanto a modernização dos ensaios elétricos devem incluir recomendações nas áreas de interesse indicadas acima. As principais são:

## **Ensaios Dielétricos - Formas de Onda**

- $\Rightarrow$  ensaio de manobra com frente de onda rápida:
  - \$ tempo de frente: 1.2 $\mu$ s
  - 🏷 tempo até o primeiro zero: 4200μs
  - ♣ amplitude: 2xUtap (Tensão

Nominal do Tap)

🏷 terminais não testados: abertos (com registro da tensão).

#### Ensaios Dielétricos - Condições Terminais

- ⇒ ensaio de impulso atmosférico com simulação de condições de potencialização de terminais não testados:
  - tempo de frente: 1.2μs
  - 🤄 tempo de meio valor: 50μs
  - ✤ amplitude: Uatm
  - tondições terminais em Transf. Elevador:
    - → terminais AT sob ensaio; e
    - terminais BT abertos ou aterrados através de capacitâncias representativas dos barramentos isolados correspondentes;
  - ♦ condições terminais em Autotransformadores:
    - »> pára-raios com Margem de Proteção de 15% são ligados aos terminais não testados. O ensaio é realizado para todos os terminais com exceção do terminal de neutro.

### **Ensaios Dielétricos - Tolerâncias na Forma de Onda**

⇒ tolerâncias para onda de impulso atmosférico:

♦ tempo de frente:	$\leq 2\mu s$
🏷 tempo de meio valor:	≥ 40µs
M	Llater

🏷 amplitude: Uatm

♦ correção para tempo de frente >2µs:

🗞 correção para tempo de meio valor <40μs:

 $\implies U_{atm}^{corr} = K_{cauda} \cdot U_{atm}$ 

onde:  $K_{cauda}$  é definido a partir da energia da onda. Isto é, a área  $[kV \cdot \mu s]$  acima do valor  $[80\% \text{ de } U_{atm}^{onda \text{ com tempo meio valor} < 40\mu s}]$  é igual a área

da onda normal tipo exponencial dupla 2x40µs.

Scorreção para tempo de frente >2μs e tempo de meio valor <40μs:</p>

$$\implies U_{\text{atm}}^{\text{corr}} = \left[1 + (K_{\text{frente}} - 1) + (K_{\text{cauda}} - 1)\right] \cdot U_{\text{atm}}$$

⇒ tolerâncias para tempo de corte:

✤ intervalo de tempo entre o tempo de corte e o primeiro zero

	de tensão:	≤ 1μ <b>s</b>
勢	tempo de meio valor:	≥ 40µs

#### **A Ensaios Dielétricos - Descargas Parciais e Rádio Interferência RIV**

⇒ medir Descargas Parciais [pC] e tensão de RIV [µV] em todos os terminais durante o ensaio de tensão induzida de longa duração (5s/1hora), observando os seguintes limites:

ensaio de 1hora:  $\leq$  500pC e acréscimo máximo 100pC;

ensaio de 1hora:  $\leq 100 \mu V$  e acréscimo máximo  $30 \mu V$ ;

## 🛆 Ligação de Bombas e Eletrificação Estática

⇒ transformador protótipo desenergizado;

- medir indiretamente o período de tempo entre a ligação da bomba do sistema de resfriamento e a estabilização da corrente de eletrificação estática;
- ⇒ para cada enrolamento um terminal é aterrado via eletrômetros enquando Descarga parcial é medido no outro terminal; e
- ⇒ bombas permanecem ligadas durante os ensaios de tensão induzida de longa duração (5s/1hora).

### 7.4. Recomendações para Projeto

Segundo dados estatísticos obtidos pelo CIGRÉ [1], mais de 12% das falhas internas a transformadores tem como causa mais provável o projeto. Porém, mais de 32% relacionam-se a causas assumidas como desconhecidas [1]. Todavia, dentro destas uma grande maioria pode estar associada a projetos inadequados.

Desta forma algumas recomendações podem ser estabelecidas para o projeto de transformadores relacionados àquelas áreas de projeto elétrico, mecânico e térmico de maior incidência de falhas. Nomeadamente:

- circuito magnético;
- enrolamentos;
- isolação principal e de saída de enrolamentos; e
- utros componentes.

A adoção e controle sistemático destas recomendações, através do fabricante e do usuário, contribuirá para a redução da taxa de falhas e para o bom desempenho operacional a longo prazo do transformador.

#### 7.4.1. Projeto de Circuito Magnético

As falhas relacionadas ao núcleo ferro-magnético de transformadores estão associadas a correntes induzidas por fluxos magnéticos de dispersão, potencialização inadequada e falhas em componentes mecânicos. Assim, as seguintes recomendações são aplicáveis:

#### **△** Divisão de Pacotes Externos dos Jugos

⇒ reduzir as correntes induzidas por fluxos de dispersão;

#### **A Isolação Interna a Colunas**

- ⇒ aplicável a grandes núcleos, onde as chapas das colunas são divididas devido a limitação de largura de chapas. Ela inclui uma barreira isolante entre secções adjacentes reduzindo riscos de descargas eletrostáticas entre pacotes;
- canais de resfriamento internos, em grandes núcleos, devem ser isolados através de uma barreira isolante. Esta barreira reduz riscos de descargas eletrostáticas através do canal entre pacotes adjacentes. As diversas secções do núcleo, separadas por canais internos, devem ser potencializadas mutuamente através de ligação metálica em um único ponto;

#### Controle de Correntes de Circulação

- ⇒ evitar espira fechada através da estrutura metálica do núcleo; e
- ⇒ o núcleo e sua estrutura devem ser potencializados individualmente e então, na parte externa do tanque, ao terra comum.

#### **△** Controle de Perdas Adicionais

- tirantes ou bandagens metálicas que atravessem a janela do núcleo devem ser de aço não magnético;
- em grandes núcleos com mais de 100MVA por coluna, as barras de suspensão adjacentes às colunas do núcleo e que interligam as vigas de prensagem dos jugos, devem ser de aço não magnético;
- ⇒ controle do afastamento axial entre viga de prensagem dos jugos e enrolamentos.

#### **A Controle de Prensagem e Magneto-Estricção**

controle das forças de prensagem dos jugos, evitando áreas de concentração de forças. A pressão deve ser compatível ao valor que não ocasiona degradação das propriedades de magneto-estricção da qualidade da chapa de FeSi utilizada. Isto contribui para o controle do nível de ruido do núcleo.

#### 7.4.2. Projeto de Enrolamentos

Entre os principais componentes de um transformador, os enrolamentos apresentam a maior incidência de falhas. As causas são de natureza dielétrica, térmica e mecânica. As principais recomendações para o projeto de enrolamentos de alta tensão são:

#### **A** Tipos de Enrolamentos

- $\Rightarrow$  disco contínuo para Uatm  $\leq$  350kVcrista;
- ⇒ disco contínuo com blindagem interna para Uatm ≤950kVcrista;
- ⇒ disco parcialmente entrelaçado para Uatm ≤ 650kVcrista;

- disco parcialmente entrelaçado não é recomendável para Uatm> 650kVcrista devido a amplitude da tensão de onda estacionária formada na descontinuidade disco contínuo-entrelaçado;
- húmero mínimo de 20% de bobinas duplas entrelaçadas contadas a partir do terminal de AT do enrolamento;
- ⇒ disco entrelaçado para Uatm > 950kVcrista, com fator de distribuição de tensão com valor máximo  $\alpha = \sqrt{C_g/C_s} \le 2$ ;

#### A Tipo de Condutor

- ⇒ condutor retangular, simples ou múltiplo, cabo transposto;e
- ⇒ cabo múltiplo com condutores individuais isolados com papel.

#### A Isolação entre Espiras e Bobinas

- dimensionada para a máxima solicitação entre aquelas correspondentes às tensões transitórias especificadas e esperadas, incluindo tensões transitórias rápidas;
- ⇒ controlar solicitações elétricas:
  - ♦ entre espiras;
  - 🗞 cantos de condutores, em uma bobina dupla; e
  - ✤ cantos de condutores, entre bobinas duplas;
  - canto de condutores adjacentes a canal de resfriamento interno a uma bobina;
- ⇒ incluir isolação adicional de canto, em no mínimo 20% das bobinas de um enrolamento contadas a partir do terminal de AT em enrolamentos com Uatm ≥ 1550kV e independente do valor da solicitação elétrica estimada; e
- ⇒ localização cuidadosa de anéis desviadores de fluxo de óleo, com controle da tensão de escoamento na interface presspan-óleo dos

anéis. Estes anéis não devem ser localizados próximos a terminais e AT inclusive no canal de óleo do lado oposto a este terminal.

#### **A Distribuição de Espiras**

 enrolamentos tipo disco devem incluir perda de espiras em cada uma de suas bobinas, evitando penetração de transposições e passagens entre bobinas adjacentes em canais de óleo adjacentes. Isto provoca modificação do campo elétrico, podendo provocar elevação de solicitações localizadas.

#### 7.4.3. Projeto de Isolação Principal

A isolação principal inclui a distribuição adequada de componentes isolantes (cilíndros, capas de jugo, canais de óleo, etc...) entre enrolamentos, entre enrolamentos e núcleo e entre enrolamentos externos e o tanque.

A saída de um enrolamento de alta tensão, ao introduzir modificações na distribuição de potencial elétrico correspondentes, contribui para a concentração de campos elétricos facilitando a evolução de condições de descargas elétricas. Sob este aspecto, as saídas de enrolamentos constituem, em geral, pontos fracos e de grande incidência de falhas em sistemas de isolação. Elas devem ser cuidadosamente analisadas, projetadas e montadas.

## 

 cálculo das distribuições de potenciais por métodos numéricos e para as diferentes condições de ensaios e operacionais de ligações dos enrolamentos especificadas ou esperadas;

- cálculo das solicitações elétricas (valores de campos elétricos médios, máximos e em superfícies de materiais isolantes sólidos) correspondentes às distribuições de potenciais; e
- identificação de áreas de interesse onde são encontradas concentrações de solicitações elétricas, controlando-as a níveis admissíveis e não superiores aqueles de inicialização de descargas parciais no óleo isolante ou na isolação sólida.

#### Suportabilidade Elétrica

- conhecimento comprovado, experimental ou por aplicação a longo prazo com bom desempenho, da suportabilidade elétrica do arranjo de isolação principal selecionado e com mínima probabilidade de descarga; e
- validação de suportabilidade elétrica admissível da isolação para canais de óleo, tangenciais às superfícies de isolantes sólidos, nas superfícies de eletrodos isolados e não isolados e entre eletrodos envolvendo grandes columes de óleo.

#### **⊖** Saídas de Enrolamentos

- ⇒ cálculo das solicitações elétricas localizadas de tensões e comparações associadas a suportabilidade correspondente;
- ⇒ projeto de blindagens elétricas adequadas incluindo meio seguro de potencialização;
- ⇒ isolação e distribuição adequada de barreiras isolantes na região da saída, controlando solicitações em volumes grandes de óleo; e
- ⇒ controle dimensional rigoroso, considerando ocorrências de deslocamentos e afastamentos dimensionais associados a
encolhimento de materiais associados a processos de prensagem e impregnação com óleo.

#### 7.4.4. Outros Componentes

Em um transformador, outros componentes contribuem para a taxa total de falhas. Por exemplo: bucha condensiva e comutador de tensão. Consequentemente, a redução de taxa de falhas requer a seleção, qualificação e aplicação criteriosa destes componentes.

Por outro lado, o sistema de resfriamento e o sistema de preservação de óleo são importantes para o controle das características isolantes do óleo, contribuindo para a manutenção adequada dos níveis de suportabilidade elétrica.

### 🔒 Bucha Condensiva

- ⇒ as recomendações de projeto de buchas devem abranger as áreas de interesse associadas às seguintes falhas típicas:
  - descargas parciais internas associadas à processos de secagem e impregnação inadequados;
  - descargas internas associadas a localização incorreta ou potencialização indevida de fitas semicondutivas com consequente modificação de solicitações elétricas, geração de gases e evolução para falha completa. Isto é particularmente importante para buchas sujeitas a tensões transitórias com frentes de onda muito rápidas;
  - resfriamento inadequado de buchas de alta corrente;
  - vazamento por envelhecimento precoce de gaxetas de borracha causadas por temperatura excessiva em flanges metálicas associadas a perdas suplementares de campos magnéticos;

- montagem de bucha com eixo na horizontal podem estabelecer áreas de concentrações de esforços mecânicos com consequente fadiga e falha mecânica;
- eletro-erosão associada a aplicação indevida de materiais em contato;
- falhas em colagem de emendas de isoladores;
- desvios e excentricidades na montagem de isoladores;
- ruptura mecânica de flanges.

## **△** Comutador de Tensão

- ⇒ comutadores de tensão contribuem para até 40% das falhas em transformadores [1];
- ⇒ as recomendações de projeto devem abranger as áreas de interesse associadas as seguintes falhas típicas:
  - arcos elétricos no seletor;
  - problemas mecânicos no seletor e acoplamento de eixos;
  - perda de elasticidade de molas em contatos; e
  - vazamento, com contaminação do óleo do transf. pelo óleo do comutador.

### 

- ⇒ o sistema de resfriamento tem a função de manter as temperaturas do óleo e dos enrolamentos abaixo dos limites seguros e de envelhecimento normal da isolação do transformador;
- o controle da temperatura da isolação é importante para manter as propriedades dielétricas correspondentes e garantir a suportabilidade elétrica do transformador;

- sistemas de resfriamento com bombas de óleo apresentam riscos de eletrificação estática em interfaces óleo-isolação sólida óleo, com aumento de cargas elétricas livres no óleo e redução da suportabilidade elétrica correspondente. O controle da velocidade do fluxo de óleo dentro dos canais internos ao sistema de isolação dos enrolamentos deve ser verificado na etapa de projeto; e
- sistemas de resfriamento com trocadores de calor tipo óleo- água apresentam o risco adicional de vazamento (ou infiltração) de água no óleo. Controles rigorosos de pressão nos sistemas de água devem ser observados. Instalação de caixas d'água na entrada do trocador minimizam elevações transitórias de pressão (golpes de ariete). A especificação de trocador de calor com tubo duplo oferecem segurança adicional mas, em geral, de alto custo.

### A Sistema de Preservação de Óleo

- o sistema de preservação de óleo deve ser fechado com membrana de borracha, sem contato direto do óleo com o ar externo ou com óleo de comuatador sob carga;
- sistemas selados com colchão de gás inerte (Nitrogênio) não são recomendados para transformadores de altas tensões sujeitos a variações rápidas de carga. Redução rápida de temperatura estabelece variação rápida no colchão de gás facilitando a geração de bolhas com consequente redução de suportabilidade elétrica; e
- sistemas selados por membrana de borracha permitem uma melhor análise cromatográfica de gases dissolvidos no óleo ao permanecerem livres da influência do gás do sistema de

preservação. A aplicação de membrana, combinada com a desgaseificação periódica do óleo (em geral, período superior à 10 anos), é procedimento seguro, simples e confiável.

### 7.4.5. Tanque

O projeto do tanque é fundamental para a segurança do pessoal e da instalação quando da ocorrência de falha interna e eventual explosão seguida de incêndio de um transformador.

A ocorrência de uma falta interna estabelece condições de elevação rápida da pressão interna ao tanque de um transformador. Em consequência, ondas de pressão propagam-se através do óleo e forças mecânicas de natureza dinâmica solicitam a estrutura principal do tanque e os elementos de fixações correspondentes. As avarias comuns em tanques associadas a falhas de transformadores são:

- b deformações mecânicas da estrutura metálica;
- ruptura de filetes de solda nos reforços;
- 🤄 ruptura de elementos de fixação de canecos de buchas; e
- ✤ ruptura de parafusos de fixação tampa-tanque.

### **Elevação de Pressão no Tanque Devido a Falha** Interna

- estimar a elevação de pressão interna em função da tensão de arco,
   da corrente de arco, do tempo de duração da falta e do coeficiente de
   expansão associada a elasticidade do tanque;
- ⇒ a figura 7.1 mostra resultados de simulações realizadas para um tanque de transformador de 300MVA submetido a falha elétrica seguida de ruptura mecânica do tanque. Como exemplo, valores de elevações de pressão superiores à 4kgf/cm2 são esperados

para condições de corrente de arco da ordem de 30kA e tempo de duração da falta da ordem de 125ms.





 ⇒ portanto, elevações rápidas de pressão são esperadas com valores muito superiores àqueles valores estáticos tradicionalmente especificados e utilizados em projetos de transformadores (aproximadamente 1 kgf/cm2).

### 7.5. Recomendações para Transformadores em Operação

Na operação de sistemas elétricos com transformadores sujeitos a falhas são cabíveis ações dirigidas para a continuidade operativa confiável destes equipamentos. Estas ações envolvem, principalmente, as seguintes áreas de interesse:

- monitoração de operação; e
- adequação da proteção.

### 7.5.1. Monitoração de Operação

A aplicação de ações convencionais não são, em geral, adequadas devido ao custo elevado. Porém em condições de risco de falhas reconhecidamente elevado elas podem contribuir para minimizar perdas econômicas severas. Destacam-se:

### **A Flexibilização da Operação**

- ⇒ previsão de transformador reserva;
- ⇒ redução de número de manobras reconhecidas ou suspeitas de serem fontes de tensões transitórias perigosas aos transformadores; e
- ⇒ desligamento de cargas de distribuição de enrolamentos terciários de autotransformadores.

## **⊖** Monitoração da Operação

- ⇒ avaliar o estabelecimento de condições econômicas de monitoramento contínuo, ou a intervalo de tempo reduzido, em transformadores de maneira a detectar eventual falha incipiente. Os seguintes parâmetros podem ser observados:
  - processamento contínuo do óleo do transf. com remoção de oxigênio livre, impurezas e partículas;
  - + análise contínua de alguns gases combustíveis (H2 e CO);
  - eventual registro em tempo real de tensões transitórias na entrada do transformador com processamento virtual de sinal (faixa ≈1MHz);
    - е
  - detector de descargas parciais (carga aparente).

### 🛆 Monitoração do Sistema

- proceder a medições de resposta transitória associadas a operações de manobras no sistema elétrico;
- proceder a medição da impedância de entrada em função da frequência, e na faixa de até alguns MHz, em transformadores selecionados importantes; e
- ⇒ exame de condições transitórias do sistema elétrico incluindo os transformadores de interesse modelados adequadamente para uma ampla faixa de frequências.

### 7.5.2. Adequação de Proteção

O desempenho dos sistemas de proteção de transformadores em operação deve ser avaliado também para fenômenos não convencionais.

Por exemplo, a distância de separação entre o transformador e os páraraios precisa ser controlada de maneira que a taxa de crescimento e a amplitude da onda de tensão estacionária nos terminais do transformador não ultrapasse o limite de suportabilidade correspondente.

Para transformadores sujeitos a fenômenos tansitórios com frente de onda muito rápidas, a proteção fase-terra por pára-raios tipo ZnO não é adequada, devido a elevação da tensão no pára-raios associada ao tempo curto da frente de onda correspondente. Nestes casos são recomendados os seguintes esquemas alternativos:

- ⇒ uma combinação paralela de capacitor e pára-raios;
- ⇒ cabo em série; ou
- ⇒ indutor em série.

### 7.5.2.1 Proteção por Capacitor

A tensão em um capacitor não é estabelecida instantaneamente. A efetividade de um capacitor em manter baixo o valor da tensão depende da energia do surto e da capacitância do capacitor. Surtos rápidos desenvolvem energia reduzida e, portanto, requerem capacitância de baixo valor. Surtos de energia elevada requerem grandes capacitores, em geral de custo elevado.

Em esquemas de proteção, o capacitor apresenta as seguintes características:

- ⇒ absorção de surtos rápidos; e
- ⇒ modificação da forma de onda.

A combinação capacitor - pára-raios oferece proteção contra tensões rápidas. Enquanto o capacitor reduz a inclinação da frente da onda, o pára-raios limita a amplitude da tensão. É claro que estes capacitores devem ser construidos de forma a resultar uma baixa indutância e resistência parasitas.

Como exemplo, a proteção por capacitor do transformador elevador de alta tensão sujeito a um surto com frente de onda muito rápida da ordem de 10ns é determinada. As condições de contorno são:

- ⇒ tensão máxima transitória superior à 670kV (1.5pu fase-terra)
- $\Rightarrow$  tempo de atraso da onda para corte do pára-raios de 1µs;
- ⇒ energia do surto inferior à 30kJ; e
- $\Rightarrow$  impedância característica do barramento de 100 $\Omega$  (SF<sub>6</sub>).

A figura 7.2 mostra o esquema elétrico da proteção do transformador por capacitor.



Figura 7.2 - Proteção por Capacitor

O dimensionamento é simplificado. A esistência do cabo e os outros acoplamentos capacitivos parciais não são incluidos. O capacitor necessário apresenta as características indicadas na tabela 7.4.

Característica	Un	Valor
capacitância total do capacitor	μF	0.0493
capacitância de um módulo	μF	1.1037
número de módulos (Ufase=1.05*550/ $\sqrt{3}$ kV)	-	22
tensão nominal do módulo	kV	14.9
potência nominal do módulo	kVAr	92.4
corrente de fuga com freq. industrial 60Hz	Aef	2.82

Tabela 7.4 - Características do Capacitor

A combinação capacitor-pára-raios é econômica apenas para equipamentos de baixa e média tensão (por exemplo, grandes motores de média tensão). Para equipamentos de alta tensão, este esquema de proteção requer a a associação série de vários capacitores individuais de grande capacitância inviabilizando economicamente e dimensionalmente a aplicação.

Portanto, em transformadores de alta tensão a alternativa é transferir a combinação capacitor-pára-raios para dentro do tanque. Isto é, aumentando adequadamente a capacitância série do enrolamento a ser protegido e colocando pára-raios interno ligados em paralelo com partes do enrolamento sujeitos a valores elevados de oscilações transitórias de tensões.

### 7.5.2.2 Proteção por Cabos

A aplicação de uma cabo de interligação entre o transformador e o sistema elétrico pode contribuir para a proteção do mesmo frente a tensões transitórias. A escolha de um cabo com valor de capacitância adequado influencia o valor dos coeficientes de refração e reflexão de ondas nos terminais do transformador. Consequentemente, a taxa de crescimento da tensão estacionária estabelecida nestes terminais pode ser controlada. Porém, de maneira equivalente a uma bucha ou a um capacitor isolado, o cabo não influencia o valor máximo da tensão estacionária no terminais do transformador.

#### 7.5.2.3 Proteção por Indutor

O indutor é ligado em série com o transformador. Quando um surto atinge um indutor ele é inicialmente absorvido no campo magnético da corrente correspondente. O indutor apresenta uma alta impedância para uma variação rápida da taxa de crescimento da corrente e, em consequência, uma queda de tensão é estabelecida no indutor, protegendo o transformador ao reduzir o valor da tensão que atinge seus terminais. A atuação do indutor, nestes casos, é equivalente àquela de um filtro passa-alta. Estes filtros apresentam um ganho elevado para frequências maiores que a frequência de corte correspondente. O valor da indutância pode ser estimado a partir da frequência de corte associada a amostragem do transitório rápido de interesse.

A figura 7.3 mostra o esquema elétrico da proteção do transformador por um indutor e a resposta em frequência do circuito.



Figura 7.2 - Proteção por Indutor

Como exemplo, a proteção por indutor de transformador de alta tensão sujeito a um surto com frente de onda muito rápida da ordem de 10ns é determinada. As condições de contorno são:

⇒ suportar tensão de até 1125kV (2.5pu fase-terra) durante 2µs;

⇒ indução máxima com núcleo de ar de 0,25T; e

 $\Rightarrow$  freq. de corte (  $f_{_{\rm c}}=\omega_{_{\rm c}}/2\pi$  -Nyquist) superior a 1600kHz.

O dimensionamento é simplificado. A resistência do cabo e os acoplamentos capacitivos entre espiras do indutor não são incluidos. A impedância de entrada do transformador,  $\dot{Z}$ , é obtida dos cálculos anteriores (**Caso 4 - Capítulo 6**).

O indutor com núcleo de ar necessário apresenta as características indicadas na tabela 7.5.

Característica	Un	Valor
número de espiras do indutor	-	103
raio do indutor	mm	220
comprimento do indutor	mm	3100
diâmetro máximo do condutor do indutor	mm	30
indutância do indutor	mH	0.655
indução máxima	mT	144
queda de tensão com frequ. industrial 60Hz	Vef	122

Tabela 7.5 - Características do Indutor

## 8 - CONCLUSÕES

A alta taxa de falhas apresentada por grandes transformadores de alta tensão em anos recentes pode ser reduzida pela aplicação sistemática e criteriosa de uma conjunto de recomendações de implementação imediata. Em consequência, é assegurada a continuidade da operação confiável dos transformadores em serviço e, adicionalmente, garantida a especificação segura de transformadores novos.

As recomendações envolvem o dimensionamento de enrolamentos associados a transitórios rápidos, ressonâncias internas, auditoria e controle de projetos, formas de ondas de ensaio mais representativas de fenômenos transitórios não convencionais, ações associadas à condições de operação, monitoração contínua e aplicação de filtros para a proteção face a transitórios de altas frequências. Nomeadamente:

#### Caso de Transformadores em Operação:

- prever transformador reserva;
- verificar a viabilidade de se adotarem medidas operativas possíveis que incluam a redução do número de manobras das seccionadoras no barramento de ligação de transformadores dentro de uma subestação isolada em SF6;
- e desligamento de cargas de distribuição de enrolamentos terciários de autotransformadores;
- monitorar continuamente a operação com alerta e interrupção de operação antes de uma falha iminente;

- - processamento contínuo do óleo do transformador com remoção de oxigênio livre, impurezas e partículas;
  - análise contínua de alguns gases combustíveis (H2 e CO) dissolvidos no óleo;
  - eventual registro em tempo real de tensões transitórias na entrada do transformador com processamento virtual de sinal (faixa ≈1MHz); e
  - detector de descargas parciais utilizando o método acústico ou o método da carga aparente.
- medir a resposta transitória do transformador associada a manobras, em
   particular daquele instalado em subestação isolada em SF6;
- medir a impedância de entrada do transformador, em função da frequência, e na faixa de até alguns MHz;
- realizar estudo transitório de sistemas elétricos incluindo o transformador modelado adequadamente para uma ampla faixa de frequências; e
- © considerando que a proteção fase-terra por pára-raios constituido por elementos não lineares,no lado do transformador, não é adequada para transitórios rápidos devido ao tempo curto da frente de onda correspondente, proceder ao exame da aplicação de filtros adequados.

### Caso de Especificação de Transformadores Novos:

 o cálculo de distribuição de tensões transitórias em enrolamentos incluindo transitórios rápidos em alta frequência;

- o dimensionamento e o projeto de enrolamentos de transformadores levando em conta ressonâncias;
- a auditoria e revisões de projetos importantes incluindo análise de critérios de cálculo de solicitações e suportabilidades;
- a melhoria da especificação de compra de transformadores, tais como:
  - elevação de níveis de isolamento (tensões de impulso e tensão induzida a frequência industrial de curta duração);
  - sistemas de preservação de óleo isolante do tipo fechado, operando a pressão atmosférica, e que contribuam para manter as características de suportabilidade da isolação interna em valores adequados; e
- a adequação de especificação de ensaios dielétricos, incluindo formas de ondas de ensaio mais representativas de fenômenos transitórios não convencionais.

Considerando o estado da arte de projeto, fabricação, ensaios e operação de transformadores estas propostas são concretas. Elas traduzem a experiência do autor, suportada por vários anos de atuação na fábrica e no campo, nesta área de conhecimento. Adicionalmente, elas resultam da análise cuidadosa das condições de projeto, fabricação e ensaios de transformadores complementadas pela análise teórica e de campo de falhas recentes em grandes transformadores de alta tensão. O desempenho de algumas destas recomendações será verificado ao longo da aplicação, o que, todavia, não inviabiliza a aplicação imediata do conjunto delas.

É evidente que a aplicação destas recomendações deve ser realizada de acordo com as circunstâncias envolvidas e requerem a análise caso a caso. São distintos os casos de um transformador em operação ou de encomenda de um transformador novo.

O autor está convencido que a aplicação destas recomendações deve solucionar o problema da alta taxa de falhas em grandes transformadores de alta tensão.

Merece ser destacado, neste contexto, a importância da simulação. No desenvolvimento deste trabalho foi analisada a modelagem de enrolamentos para transitórios com frente de onda muito rápida. Os resultados de simulações, aplicadas a transformadores de alta tensão, foram analisados e comparados com valores disponíveis de suportabilidade [7,8], revelando em alguns casos inadequação da isolação correspondente.

Em adição, este trabalho contém informações básicas para futuros trabalhos, relacionados à:

- ➡ melhorias da modelagem e do cálculo da resposta transitória de enrolamentos para tensões transitórias com consideração de métodos de cálculos de alto desempenho e análise modernas de funções (por exemplo: **onduletas**) de transformações tempo→frequência→tempo;
- ⇒ investigação de alternativas de projeto de enrolamentos com capacitância série elevada e sem elevação do tempo de fabricação;
- elevação do conhecimento da suportabilidade de estruturas isolantes utilizadas em transformadores associadas a tensões transitórias com frentes de onda muito rápidas incluindo experiências em laboratório;
- ⇒ interpretação de resultados de ensaios dielétricos modernos em alta tensão através da resposta em frequência; e
- ⇒ aplicação de redes neurais no estabelecimento de sistemas epecialistas de monitoração e diagnóstico, em tempo contínuo, de transformadores.

# Anexo A Demonstração da Expressão (3.57)

## A.1. Objetivo

Dado que:

$$[A] = [Y] * [Q] * [P]^{-1} * [Q]^{-1} * \cot gh([P] * \ell) * [Q] * [Q]^{-1}$$
(A.1)

demonstrar que:

$$\cot gh([p]*\ell) = [Q]^{-1} * \cot gh([P]*\ell)*[Q]$$
(A.2)

### A.2. Fundamentos

Lembrando que:

$$\cot gh(x) = \frac{1 + e^{-2x}}{1 - e^{-2x}}$$
(A.3)

escrevemos,

$$\cot gh([P] * \ell) = \{ [I_d] + e^{-2*[P] * \ell} \} * \{ [I_d] - e^{-2*[P] * \ell} \}^{-1}$$
(A.4)

## A.3. Demonstração

Seja:

$$[S] = [Q]^{-1} * \cot gh([P] * \ell) * [Q]$$
(A.5)

considerando (A.4),

$$[S] = [Q]^{-1} * \{ [I_d] + e^{-2*[P]*\ell} \} * \{ [I_d] - e^{-2*[P]*\ell} \} * \{ [I_d] - e^{-2*[P]*\ell} \}^{-1} * \{ [I_d] - e^{-2*[P]*\ell} \}^{-1} * [Q]$$
(A.6)

ou

$$S = [Q]^{-1} * \{ [I_d] + e^{-2*[P]*\ell} \} * \{ [I_d] - e^{-2*[P]*\ell} \} * \{ [I_d] - e^{-2*[P]*\ell} \}^{-1} * [Q]$$

$$(A.6)$$

$$[S] = [Q]^{-1} * \{S_1\} * \{S_2\} * [Q] * [Q]^{-1} * \{S_3\} * \{S_3\} * [Q]$$
(A.7)  
$$[S] = \{S_4\} * \{S_5\}$$
(A.8)

$$[S_{1}] = \left\{ [I_{d}] + e^{-2*[P]*\ell} \right\}$$

$$[S_{2}] = \left\{ [I_{d}] - e^{-2*[P]*\ell} \right\}$$

$$[S_{3}] = \left\{ [I_{d}] - e^{-2*[P]*\ell} \right\}^{-1}$$

$$[S_{4}] = [Q]^{-1}* \left\{ S_{1} \right\} * \left\{ S_{2} \right\} * [Q]$$

$$[S_{5}] = [Q]^{-1}* \left\{ S_{3} \right\} * \left\{ S_{3} \right\} * [Q] *$$
(A.10)

a) Cálculo de 
$$[S_4]$$
  
 $[S_4] = [Q]^{-1} * \left\{ [I_d] - \left( \begin{bmatrix} I_d \end{bmatrix} - 4 * [P] * \ell + \frac{1}{2!} * (4 * [P] * \ell)^2 - \\ \frac{1}{3!} * (4 * [P] * \ell)^3 + \cdots \right) \right\} * [Q]$ (A.11)

que re-arraniando.

$$[S_4] = \left\{ [I_d] - \left( [I_d] - 4*[Q]^{-1}*[P]*[Q]*\ell + \frac{1}{2!}*\left(4*[Q]^{-1}*[P]*[Q]*\ell \right)^2 - \cdots \right) \right\} (A.12)$$

Lembrando que

$$[p] = [Q]^{-1} * [P] * [Q]$$
(A.13)

resulta:

$$[S_{4}] = \left\{ [I_{d}] - \left\{ \begin{bmatrix} I_{d} \end{bmatrix} - 4 * [p] * \ell + \frac{1}{2!} * (4 * [p] * \ell)^{2} - \\ \frac{1}{3!} * (4 * [p] * \ell)^{3} + \cdots \right\} \right\}$$
(A.14)

ou, finalmente:

$$[S_{4}] = \left\{ [I_{d}] + e^{-4*[p]*\ell} \right\}$$
  
=  $\left\{ [I_{d}] + e^{-2*[p]*\ell} \right\} * \left\{ [I_{d}] - e^{-2*[p]*\ell} \right\}$  (A.15)

b) Cálculo de 
$$[S_5]$$
  
 $[S_5] = [Q]^{-1} * \{ [I_d] - e^{-2*[P]*\ell} \}^{-1} * \{ [I_d] - e^{-2*[P]*\ell} \}^{-1} * [Q]$  (A.16)

Lembrando que:

$$(1-x)^{-1} = 1 + x + x^{2} + \dots - 1 \langle x \langle 1$$
 (A.17)

escrevemos,

$$[S_{5}] = [Q]^{-1} * \{ [I_{d}] + e^{-2*[P]*\ell} + e^{-4*[P]*\ell} + \cdots \} *$$

$$\{ [I_{d}] + e^{-2*[P]*\ell} + e^{-4*[P]*\ell} + \cdots \} * [Q]$$
(A.18)

ou

$$[S_{5}] = [Q]^{-1} * \{ [I_{d}] + e^{-2*[P]*\ell} + e^{-4*[P]*\ell} + \cdots + e^{-2*[P]*\ell} + e^{-4*[P]*\ell} + e^{-6*[P]*\ell} \cdots + e^{-4*[P]*\ell} + e^{-6*[P]*\ell} + e^{-8*[P]*\ell} + \cdots \} * [Q]$$
(A.19)

que somando adequadamente resulta,

$$[S_5] = [Q]^{-1} * \{ [I_d] + 2 * e^{-2*[P] * \ell} + 3 * e^{-4*[P] * \ell} + 4 * e^{-6*[P] * \ell} + \dots \} * [Q]$$
(A.20)

Agora, expandindo as matrizes exponenciais, escrevemos:

$$[S_{5}] = [Q]^{-1} * \left\{ [I_{d}] - 2 * ([I_{d}] - 2 * [P] * \ell + \frac{1}{2!} * (2 * [P] * \ell)^{2} - \cdots ) + 3 * ([I_{d}] - 4 * [P] * \ell + \frac{1}{2!} * (4 * [P] * \ell)^{2} - \cdots ) + \cdots \right\} * [Q]$$
(A.21)

resultando,

$$[S_5] = [Q]^{-1} * \{ [I_d] + 2 * e^{-2 * [P] * \ell} + 3 * e^{-4 * [P] * \ell} + \cdots \} * [Q]$$
(A.22)

ou, finalmente:

$$[S_{5}] = \left\{ [I_{d}] - e^{-2*[p]*\ell} \right\}^{-2}$$

$$= \left\{ [I_{d}] - e^{-2*[p]*\ell} \right\}^{-1} * \left\{ [I_{d}] - e^{-2*[p]*\ell} \right\}^{-1}$$
(A.23)

c) Cálculo de [S]

Lembrando (A.8),  $[S] = \{S_4\} * \{S_5\}$ 

e considerando (A.15) e (A.23),  

$$\begin{bmatrix}S \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix}I_d \end{bmatrix} + e^{-2*[p]*\ell} \right\} * \left\{ \begin{bmatrix}I_d \end{bmatrix} - e^{-2*[p]*\ell} \right\} * \left\{ \begin{bmatrix}I_d \end{bmatrix} - e^{-2*[p]*\ell} \right\}^{-1} * \left\{ \begin{bmatrix}I_d \end{bmatrix} - e^{-2*[p]*\ell} \right\}^{-1}$$
(A.24)

ou

$$[S] = \{ [I_d] + e^{-2*[p]*\ell} \} * \{ [I_d] - e^{-2*[p]*\ell} \}^{-1}$$
(A.25)

e finalmente,

$$[S] = \cot gh([p]*\ell) \qquad (A.26)$$

# Anexo B Demonstração da Expressão (3.64)

## B.1. Objetivo

Dado que:

$$[B] = [Y] * [Q] * [p]^{-1} * [Q]^{-1} * \cos \sec h([P] * \ell) * [Q] * [Q]^{-1}$$
(B.1)

demonstrar que:

$$\operatorname{cossec} h([p] * \ell) = [Q]^{-1} * \operatorname{cossec} h([P] * \ell) * [Q]$$
(B.2)

### B.2. Fundamentos

Lembrando que:

cossec 
$$h(x) = \frac{1}{\operatorname{senh}(x)} = \frac{2}{e^x - e^{-x}} = \frac{2 \cdot e^{-x}}{1 - e^{-2 \cdot x}}$$
 (B.3)

escrevemos,

cossec 
$$h([P]*\ell) = 2*\{e^{-[P]*\ell}\}*\{[I_d]-e^{-2*[P]*\ell}\}^{-1}$$
 (B.4)

## B.3. Demonstração

Seja:

$$[T] = [Q]^{-1} * \operatorname{cossec} h([P] * \ell) * [Q]$$
(B.5)

considerando (B.4),

Lembrando que

que re-arranjando,  

$$\begin{bmatrix} T_4 \end{bmatrix} = \left\{ \left( \begin{bmatrix} I_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} P \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix} * \ell + \frac{1}{2!} * \left( \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} P \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix} * \ell \right)^2 - \dots \right) - \left( \begin{bmatrix} I_d \end{bmatrix} - 3 * \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} P \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix} * \ell + \frac{1}{2!} * \left( 3 * \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} P \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix} * \ell \right)^2 - \dots \right) \right\}$$
(B.12)

Cálculo de 
$$[T_4]$$
  

$$[T_4] = [Q]^{-1} * \begin{cases} \left( [I_d] - [P] * \ell + \frac{1}{2!} * ([P] * \ell)^2 - ... \right) - \\ \left( [I_d] - 3 * [P] * \ell + \frac{1}{2!} * (3 * [P] * \ell)^2 - ... \right) \end{cases} * [Q] \quad (B.11)$$

$$\begin{bmatrix} T_{1} \end{bmatrix} = \left\{ e^{-[P] * \ell} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} T_{2} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} I_{d} \end{bmatrix} - e^{-2 * [P] * \ell} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} T_{3} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} I_{d} \end{bmatrix} - e^{-2 * [P] * \ell} \right\}^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} T_{4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix}^{-1} * \left\{ T_{1} \right\} * \left\{ T_{2} \right\} * \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} T_{5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix}^{-1} * \left\{ T_{3} \right\} * \left\{ T_{3} \right\} * \begin{bmatrix} Q \end{bmatrix} *$$
(B.10)

onde:

a)

ou

$$[T] = 2*[Q]^{-1}*{T_1}*{T_2}*[Q]*[Q]^{-1}*{T_3}*{T_3}*[Q]$$
(B.7)  
$$[T] = 2*{T_4}*{T_5}$$
(B.8)

$$[T] = 2*[Q]^{-1}*\{e^{-[P]*\ell}\}*\{[I_d] - e^{-2*[P]*\ell}\}* \{[I_d] - e^{-2*[P]*\ell}\}^{-1}*\{[I_d] - e^{-2*[P]*\ell}\}^{-1}*[Q]$$
(B.6)

(B.7)

$$[p] = [Q]^{-1} * [P] * [Q]$$
(B.13)

resulta:

$$\begin{bmatrix} T_4 \end{bmatrix} = \left\{ \left( \begin{bmatrix} I_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p \end{bmatrix} * \ell + \frac{1}{2!} * \left( \begin{bmatrix} p \end{bmatrix} * \ell \right)^2 - \dots \right) - \\ \left( \begin{bmatrix} I_d \end{bmatrix} - 3 * \begin{bmatrix} p \end{bmatrix} * \ell + \frac{1}{2!} * \left( 3 * \begin{bmatrix} p \end{bmatrix} * \ell \right)^2 - \dots \right) \right\}$$
(B.14)

ou, finalmente:

escrevemos,

ou

$$[T_4] = \left\{ e^{-[p]*\ell} \right\} * \left\{ [I_d] - e^{-2*[p]*\ell} \right\}$$
(B.15)

b) Cálculo de 
$$[T_5]$$
  
 $[T_5] = [Q]^{-1} * \{ [I_d] - e^{-2*[P]*\ell} \}^{-1} * \{ [I_d] - e^{-2*[P]*\ell} \}^{-1} * [Q]$ (B.16)

 $[T_5] = [Q]^{-1} * \left\{ [I_d] + e^{-2*[P]*\ell} + e^{-4*[P]*\ell} + \cdots \right\} * \left\{ [I_d] + e^{-2*[P]*\ell} + e^{-4*[P]*\ell} + \cdots \right\} * [Q]$ (B.18)

 $+e^{-2*[P]*\ell}+e^{-4*[P]*\ell}+e^{-6*[P]*\ell}\cdots$ 

$$(1-x)^{-1} = 1 + x + x^2 + \dots - 1 \langle x \langle 1$$
 (B.17)

 $+ e^{-4*[P]*\ell} + e^{-6*[P]*\ell} + e^{-8*[P]*\ell} + \cdots \}*[Q]$ 

$$(1-x)^{-1} = 1 + x + x^2 + \dots - 1 \langle x \langle 1$$
 (B.17)

$$(1-x)^{-1} = 1 + x + x^2 + \dots - 1 \langle x \langle 1$$
 (B.17)

$$(1-x)^{-1} = 1 + x + x^2 + \dots - 1 \langle x \langle 1$$
 (B.17)

 $[T_5] = [Q]^{-1} * \{ [I_d] + e^{-2*[P]*\ell} + e^{-4*[P]*\ell} + \cdots$ 

 $[T_5] = [Q]^{-1} * \{ [I_d] + 2 * e^{-2 * [P] * \ell} + 3 * e^{-4 * [P] * \ell} + 4 * e^{-6 * [P] * \ell} + \cdots \} * [Q]$ 

que somando adequadamente resulta,

(B.19)

(B.20)

Agora, expandindo as matrizes exponenciais, escrevemos:

$$[T_{5}] = [Q]^{-1} * \left\{ [I_{d}] - 2 * ([I_{d}] - 2 * [P] * \ell + \frac{1}{2!} * (2 * [P] * \ell)^{2} - \cdots ) + 3 * ([I_{d}] - 4 * [P] * \ell + \frac{1}{2!} * (4 * [P] * \ell)^{2} - \cdots ) + \cdots \right\} * [Q]$$
(B.21)

resultando,

$$[T_5] = [Q]^{-1} * \{ [I_d] + 2 * e^{-2 * [P] * \ell} + 3 * e^{-4 * [P] * \ell} + \cdots \} * [Q]$$
(B.22)

ou, finalmente:

$$[T_5] = \left\{ [I_d] - e^{-2*[p]*\ell} \right\}^{-2}$$
  
=  $\left\{ [I_d] - e^{-2*[p]*\ell} \right\}^{-1} * \left\{ [I_d] - e^{-2*[p]*\ell} \right\}^{-1}$  (B.23)

# c) Cálculo de [T]

Lembrando (B.8),  $[T] = 2* \{T_4\} * \{T_5\}$ 

e considerando (B.15) e (B.23),  

$$[T] = 2* \left\{ e^{-2*[p]*\ell} \right\} * \left\{ [I_d] - e^{-2*[p]*\ell} \right\} * \left\{ [I_d] - e^{-2*[p]*\ell} \right\}^{-1} * \left\{ [I_d] - e^{-2*[p]*\ell} \right\}^{-1}$$
(B.24)

ou

$$[T] = 2*\left\{e^{-2*[p]*\ell}\right\}*\left\{[I_d] - e^{-2*[p]*\ell}\right\}^{-1}$$
(B.25)

e finalmente,

$$[T] = \operatorname{cossec} h([p] * \ell) \qquad (B.26)$$

## Anexo C

## Cálculo de Capacitâncias Parciais- Expansão das Equações

### C.1. Geral

As capacitâncias parciais de interesse incluem relações características que ajustam o valor correspondente à variações do valor de frequência. As expressões principais para o cálculo das capacitâncias parciais são apresentadas no Capítulo 4.

## C.2. Capacitância Parcial Paralela Entre Enrolamentos

Sendo conhecidos os seguintes dados geométricos do enrolamento em análise:

$$\mathbf{D}_{i}, \mathbf{D}_{e}, \mathbf{H}_{e}, \mathbf{B}_{ee}, \mathbf{N}_{v} \in \mathbf{B}_{v}$$
(C.1)

são então calculados:

$$D_{m} = 0.5 \cdot (D_{i} + D_{e})$$

$$\beta = \frac{\sum A_{c}}{B_{ee}}$$

$$\alpha = \frac{N_{v} \cdot B_{v}}{\pi \cdot D_{m}}$$

$$H_{eq} = H_{e} + B_{ee}$$
(C.2)

A capacitância entre enrolamentos é dada por:

$$C_{ee} = \xi_0 \cdot \frac{(1-\alpha) \cdot \pi \cdot D_m \cdot H_{eq}}{(1-\beta) \cdot B_{ee}} + \frac{\beta \cdot B_{ee}}{\xi_{pb}} + \xi_0 \cdot \xi_{pb} \cdot \frac{\alpha \cdot \pi \cdot D_m \cdot H_{eq}}{B_{ee}} \quad [F]$$
(C.3)

equivalente à:

$$C_{ee} = \frac{(1-\alpha) \cdot \pi \cdot D_{m} \cdot H_{eq}}{\frac{(1-\beta) \cdot B_{ee}}{\xi_{0} \cdot \xi_{ol}} + \frac{\beta \cdot B_{ee}}{\xi_{0} \cdot \xi_{pb}}} + \xi_{0} \cdot \xi_{pb} \cdot \frac{\alpha \cdot \pi \cdot D_{m} \cdot H_{eq}}{B_{ee}} \quad [F]$$
(C.4)

Sendo a permissividade dielétrica uma função complexa da frequência, podemos escrever:

$$\dot{C}_{ee} = \frac{k_x}{(1-b)} + \frac{b}{\dot{x}_{pb}} + k_y \cdot \dot{x}_{pb} \qquad [F]$$
(C.5)

onde,

$$k_{x} = (1 - \alpha) \cdot \pi \cdot D_{m} \cdot \frac{H_{eq}}{B_{ee}}$$
$$k_{y} = \alpha \cdot \pi \cdot D_{m} \cdot \frac{H_{eq}}{B_{ee}}$$

Escrevendo:  

$$\dot{\xi}_{pb} = \xi_{rpb} \cdot \xi_0 \cdot (1 - j \tan \delta_{pb}) = b_1 + j b_2$$

$$\dot{\xi}_{ol} = \xi_{rol} \cdot \xi_0 \cdot (1 - j \tan \delta_{ol}) = c_1 + j c_2$$
(C.6)  

$$x_1 = (b_1 \cdot c_1 - b_2 \cdot c_2) \cdot [(1 - \beta) \cdot b_1 + \beta \cdot c_1] + (b_1 \cdot c_2 + b_2 \cdot c_1) \cdot [(1 - \beta) \cdot b_2 + \beta \cdot c_2]$$

$$x_2 = (b_1 \cdot c_2 + b_2 \cdot c_1) \cdot [(1 - \beta) \cdot b_1 + \beta \cdot c_1] - (b_1 \cdot c_1 - b_2 \cdot c_2) \cdot [(1 - \beta) \cdot b_2 + \beta \cdot c_2]$$

$$x_3 = [(1 - \beta) \cdot b_1 + \beta \cdot c_1]^2 + [(1 - \beta) \cdot b_2 + \beta \cdot c_2]^2$$

resulta:

$$\dot{C}_{ee} = k_x \cdot \frac{x_1}{x_3} + k_y \cdot b_1 + j \left[ k_x \cdot \frac{x_2}{x_3} + k_y \cdot b_2 \right]$$
 [F] (C.7)

## C.3. Capacitância Parcial Paralela Entre Enrolamento e Tanque

Sendo conhecidos os seguintes dados geométricos do enrolamento e tanque em análise:

$$D_e, B_1, B_2, \gamma_1, \gamma_2, H_e, \sum A_c, N_v \in B_v$$
 (C.8)

são calculados:

$$\begin{split} B_{ee1} &= B_{1} - 0.5 \cdot D_{e} \\ B_{ee2} &= B_{2} - 0.5 \cdot D_{e} \\ D_{m1} &= 0.5 \cdot (D_{e} + 2 \cdot B_{1}) \\ D_{m2} &= 0.5 \cdot (D_{e} + 2 \cdot B_{2}) \end{split}$$

$$\begin{aligned} k_{1} &= \frac{\gamma_{1}}{360} \qquad \beta_{1} = \frac{\sum A_{c}}{B_{ee1}} \qquad \alpha_{1} = \frac{N_{v} \cdot B_{v}}{\pi \cdot D_{m1}} \\ k_{2} &= \frac{\gamma_{2}}{360} \qquad \beta_{2} = \frac{\sum A_{c}}{B_{ee2}} \qquad \alpha_{2} = \frac{N_{v} \cdot B_{v}}{\pi \cdot D_{m2}} \end{split}$$

A capacitância parcial entre enrolamento e o tanque pode ser calculada através da expressão:

$$\dot{C}_{et1} = \frac{k_{x1}}{\frac{(1-\beta)}{\dot{\xi}_{ol}} + \frac{\beta}{\dot{\xi}_{pb}}} + k_{y1} \cdot \dot{\xi}_{pb} \qquad [F]$$
(C.10)

onde,

$$\mathbf{k}_{x1} = (1 - \alpha_1) \cdot \mathbf{k}_1 \cdot \pi \cdot \mathbf{D}_{m1} \cdot \frac{\mathbf{H}_e}{\mathbf{B}_{ee1}} \qquad [m]$$
(C.11)

$$k_{y1} = \alpha_1 \cdot k_1 \cdot \pi \cdot D_{m1} \cdot \frac{H_e}{B_{ee1}} \qquad [m] \qquad (C.12)$$

e considerando  $x_1, x_2, x_3$  definidos pelas expressões (6.5), resulta:

$$\dot{C}_{et1} = k_{x1} \cdot \frac{x_1}{x_3} + k_{y1} \cdot b_1 + j \left[ k_{x1} \cdot \frac{x_2}{x_3} + k_{y1} \cdot b_2 \right]$$
 [F] (C.13)

...

Agora, considerando:

$$k_{x2} = (1 - \alpha_2) \cdot k_2 \cdot \pi \cdot D_{m2} \cdot \frac{H_e}{B_{ee2}} \qquad [m] \qquad (C.14)$$

$$k_{y2} = \alpha_2 \cdot k_2 \cdot \pi \cdot D_{m2} \cdot \frac{H_e}{B_{ee2}} \qquad [m] \qquad (C.15)$$

e  $x_1, x_2, x_3$  definidos pelas expressões (C.6), resulta analogamente:

$$\dot{C}_{et2} = k_{x2} \cdot \frac{x_1}{x_3} + k_{y2} \cdot b_1 + j \left[ k_{x2} \cdot \frac{x_2}{x_3} + k_{y2} \cdot b_2 \right] \qquad [F] \text{ (C.16)}$$

Finalmente:

$$\dot{C}_{et} = 2 \cdot (C_{et1} + C_{et2}) = 2 \cdot \begin{cases} (k_{x2} + k_{x1}) \cdot \frac{x_1}{x_3} + (k_{y1} + k_{y2}) \cdot b_1 + \\ j[(k_{x2} + k_{x1})] \cdot \frac{x_2}{x_3} + (k_{y1} + k_{y2}) \cdot b_2 \end{cases}$$
(C.17)

## C.4. Capacitância Série Parcial entre Bobinas

Sejam conhecidos os seguintes dados do enrolamento:

$$d_{m}, b_{c}, a, H_{c}, t_{r} e S_{pl}$$
 (C.18)

calcula-se:

$$\sigma = \frac{\sum b_c}{\pi \cdot d_m}$$
(C.19)

A capacitância parcial série entre bobinas é dada por:

$$C_{a} = \pi \cdot \xi_{0} \cdot d_{m} \cdot \frac{a}{t} \cdot \left[ \frac{\sigma}{\frac{1}{\xi_{0} \cdot \xi_{pb}} + \frac{S_{pl}}{t \cdot \xi_{0} \cdot \xi_{pa}}} + \frac{1 - \sigma}{\frac{1}{\xi_{0} \cdot \xi_{pb}} + \frac{S_{pl}}{t \cdot \xi_{0} \cdot \xi_{pa}}} \right]$$
(C.20)

fazendo,

$$\mathbf{K}_{\mathbf{a}} = \boldsymbol{\pi} \cdot \mathbf{d}_{\mathbf{m}} \cdot \mathbf{a} \tag{C.21}$$

e escrevendo:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{pa} &= \xi_{rpa} \cdot \xi_{0} \cdot \left(1 - j \tan \delta_{pa}\right) = a_{1} + j a_{2} \\ \dot{\xi}_{pb} &= \xi_{rpb} \cdot \xi_{0} \cdot \left(1 - j \tan \delta_{pb}\right) = b_{1} + j b_{2} \\ \dot{\xi}_{ol} &= \xi_{rol} \cdot \xi_{0} \cdot \left(1 - j \tan \delta_{ol}\right) = c_{1} + j c_{2} \\ x_{4} &= \left(a_{1} \cdot b_{1} - a_{2} \cdot b_{2}\right) \cdot \left(t \cdot a_{1} + S_{pl} \cdot b_{1}\right) + \left(a_{1} \cdot b_{2} + a_{2} \cdot b_{1}\right) \cdot \left(t \cdot a_{2} + S_{pl} \cdot b_{2}\right) \\ x_{5} &= \left(a_{1} \cdot b_{2} + a_{2} \cdot b_{1}\right) \cdot \left(t \cdot a_{1} + S_{pl} \cdot b_{1}\right) - \left(a_{1} \cdot b_{1} - a_{2} \cdot b_{2}\right) \cdot \left(t \cdot a_{2} + S_{pl} \cdot b_{2}\right) \\ x_{6} &= \left(t \cdot a_{1} + S_{pl} \cdot b_{1}\right)^{2} + \left(t \cdot a_{2} + S_{pl} \cdot b_{2}\right)^{2} \end{aligned}$$
(C.22)

$$\begin{aligned} y_{4} &= \left(a_{1} \cdot c_{1} - a_{2} \cdot c_{2}\right) \cdot \left(t \cdot a_{1} + S_{pl} \cdot c_{1}\right) + \left(a_{1} \cdot c_{2} + a_{2} \cdot c_{1}\right) \cdot \left(t \cdot a_{2} + S_{pl} \cdot c_{2}\right) \\ y_{5} &= \left(a_{1} \cdot c_{2} + a_{2} \cdot c_{1}\right) \cdot \left(t \cdot a_{1} + S_{pl} \cdot c_{1}\right) - \left(a_{1} \cdot c_{1} - a_{2} \cdot c_{2}\right) \cdot \left(t \cdot a_{2} + S_{pl} \cdot c_{2}\right) \\ y_{6} &= \left(t \cdot a_{1} + S_{pl} \cdot c_{1}\right)^{2} + \left(t \cdot a_{2} + S_{pl} \cdot c_{2}\right)^{2} \end{aligned}$$

resultando:

$$\dot{C}_a = k_a \cdot \left[ \sigma \cdot \frac{x_4}{x_6} + (1 - \sigma) \cdot \frac{y_4}{y_6} \right] + j \left[ k_a \cdot \sigma \cdot \frac{x_5}{x_6} + k_a \cdot (1 - \sigma) \cdot \frac{y_5}{y_6} \right] \quad [F]$$
(C.23)

É dada por:

$$\dot{C}_d = \dot{C}_a$$
 [F] (C.24)

## C.6. Capacitância Série Parcial entre Espiras

É calculada por:

$$C_{w} = \xi_{pa} \cdot \xi_{0} \cdot \pi \cdot d_{m} \cdot \frac{\left(H_{c} + \frac{2}{3} \cdot S_{pl}\right)}{S_{pl}} \quad [F]$$
(C.25)

e escrevendo:

$$\dot{\xi}_{pa} = \xi_{rpa} \cdot \xi_0 \cdot \left(1 - j \tan \delta_{pa}\right) = a_1 + j a_2$$
(C.26)

resulta:

$$\dot{C}_{w} = \frac{\pi \cdot d_{m}}{S_{pl}} \cdot (H_{c} + \frac{2}{3} \cdot S_{pl}) \cdot [a_{1} + ja_{2}] \qquad [F] \qquad (C.27)$$

## C.7. Capacitância Série Parcial entre Bobina e Anel Estático

É calculada por:

$$\dot{C}_r = \frac{t}{t_r} \cdot \dot{C}_a \qquad [F] \tag{C.28}$$

## Referências Bibliográficas

- 1. CIGRÉ WG 12-05. An international survey on failures in large power transformers in service. **Electra**. Paris, n. 88, p.23-48, May 1983.
- 2. ELETROBRÁS GCOI. Análise e indíce de falhas de transformadores entre 1989 e 1993. Brasília, 1985. (Relatório Interno GCOI/GTMS).
- 3. CIGRÉ WG 12-11. Statistics of transformers with respect to very fast transients in service. Paris, 1995.
- 4. COUTO, E.C. et al. Análise da taxa de falha de transformadores aéreos de distribuição. **Eletricidade Moderna**. São Paulo, abr. 1995.
- 5. KOGAN, V.I. et al. Failure analysis of EHV transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**. New York, v. 3, n. 2, p.672-83, Apr. 1988.
- SCHNEIDER, J.M. et al. The Rockport transient voltage monitoring system: analysis and simulation of recorded waveforms. IEEE Transactions on Power Delivery. New York, v. 4, p.1794-805, July, 1989.
- MENDES, J.C. Sobretensões ressonantes: fundamentos, falhas e monitoramento contínuo de transformadores de alta tensão. Dissertação de Mestrado. São Paulo, 1989. 514p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- BOGGS, S.A. et al. Disconnect Switch Induced Transients and Trapped Charge in Gas-Insulated Substations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. New Yorkv. v. PAS-101, n. 10., p.3593-602, Oct. 1982.
- 9. ESMERALDO, P.C.V., CARVALHO, F.M.S. Surge propagation analysis: an application to the Grajaú 500kV SF6 gas-insulated substation. Paris, Cigré, 33-01, 6p., 1988.
- 10. CIGRÉ WG 33-13. Very fast transient phenomena associated with gasinsulated substations. Paris, 33-13, 20p., 1988.
- 11. MEPPELINK, J. Dr. Very fast transients in high voltage GIS substations. **ABB.** Zurich, n. 5, p.31-8, 1989.
- 12. GRANDL, J. et al. Studies of very fast transient (VFT) in a 765kV substation. Paris, Cigré, 33-12, 6p., 1988.

- MÜLLER, W., STEIN, W. Behaviour of high-voltage transformer windings on steep-fronted input waves of nanoseconds duration. Siemens Power Engineering. Nuremberg, v. V, n. 5, p.259-62, 1983.
- BREITFELDER, D. et al. Dielectric strength of transformer oil under impulse and high frequency voltage stress. In: International Symposium on High Voltage Engineering, 5th ISH. Braunschweig, 22.12, p.1-4, Aug 1987.
- VANDERMAAR, A.J. et al. The electrical breakdown characteristics of oilpaper insulation under steep front impulse voltages. IEEE Transactions on Power Delivery. New York, v. 9, p.1926-35, Oct 1994.
- AVILA-ROSALES, J., ALVARADO, F.L. Non linear frequency dependent transformer model for eletromagnetic transient studies in power systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. New York, v. PAS-101, n. 11. p.4281-88, Nov. 1982.
- GUARDADO, J.L., CORNICK, K.J.. A computer model for calculating steepfronted surge distribution in machine windings. IEEE Transactions on Energy Conversion. New York, v. 4, n. 1, p.95-101, Mar. 1989
- 18. CORNICK, K. et al. Distribution of very fast transient overvoltages in transformer windings. Paris, Cigré, 12-204, 6p., 1992.
- WRIGHT, M.T. et al. General theory of fast-fronted interturn voltage distribution in electrical machine windings. IEE Proceedings Part B. New York, v. 130, n. 4. p.245-50, July 1983.
- McLAREN, P.G. et al. Multiconductor transmission line model for the line-end coil of large AC machines. IEE Proceedings Part B. New York, v. 132, n. 3, p.149-56, May 1985.
- RECKLEFF, J.G. et al. Characterization of fast rise-time transients when energizing large 13.2kV motors. IEEE Transactions on Power Delivery. New York, v. 3, n. 2. ,p.627-36, Apr. 1988.
- Mc LAREN, P.G. et al. Modeling of large AC motor coils for steep-fronted surge studies. IEEE Transactions on Industry Applications. New York, v. 24, n. 3., p.422-26, May/June 1988.
- RHUDY, R.G., OWEN, E.L., SHARMA, D.K. Voltage distribution among the coils and turns of a form wound AC rotating machine exposed to impulse voltage. IEEE Transactions on Energy Conversion. New York, v. EC-1, n. 2, p.50-60, June 1989,

- CHARRAT, O., DEMOMENT, G., SEGALEN, A. High voltage impulse restoration with a fast deconvolution technique. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York, v. PAS-103, n. 4, p.841-48, Apr. 1984.
- VAESSEN, P.T.M., HANIQUE, E. A new frequency response analysis method for power transformers. IEEE Transactions on Power Delivery. New York, v.7, n.1, p.384-91, Jan. 1992.
- 26. HANIQUE, E. A transfer function is a reliable tool for comparison of full and chopped lightning impulse tests. **IEEE Transactions on Power Delivery.** New York, v.9, n. 3. p.1261-66, July 1994.
- MALEWSKI, R. et al. Experimental validation of a computer model simulating an impulse voltage distribution in HV transformer windings. IEEE Transactions on Power Delivery. New York, v. 9, p.1789-98, Oct, 1994.
- CIGRÉ JTF 12-14. In-service performance of HVDC converter transformers and oil-cooled smoothing reactors. Electra. Paris, n. 155, p.7-29, Aug 1994.
- 29. WAGENAAR, L.B. et al. EHV transformer dielectric specification improvements. **IEEE Transactions on Power Delivery**. New York, v. 9, n. 1, p.265-84, Jan. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. Transformadores de Potência: especificação - NBR5356. Rio de Janeiro, 1993.
- 31. ANSI/IEEE. Standard test code for liquid immersed distribution, power and regulating transformers C57.12.90. New York,1993.
- 32. IEC Power Transformers Part II 76-2. Geneva, 1978.
- 33. KARSAI, K., KERÉNYI, D., KISS, L. Large power transformers. New York, Elsevier, 1987. 615p.
- 34. CARNAHAN, B., LUTHER, H.A., WILKES, J. O. Applied numerical methods. New York, John Wiley, 1969. 604p.
- 35. HARRY, M.J. **The vision of six sigma**: a road map for breakthrough. Phoenix, Sigma Publishing, 1994.
- NUYS, R. van. Interleaved high-voltage transformer windings. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. New York, v. PAS-97, n.5, p.1946-54, Sep/Oct, 1978.