

**DEGRADAÇÃO DOS CAPACITORES  
DE POTÊNCIA SOB INFLUÊNCIA  
DOS COMPONENTES HARMÔNICOS**

Luiz Henrique Silva Duarte

Dissertação de Mestrado PPGEE-021/2000

Orientador: Prof. Dr. Mário Fabiano Alves

Setembro / 2000

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais Luiz e Dalcy. O primeiro, verdadeiro e notório mestre, com capacidade holística e singular, ética e profissionalismo ímpares. Minha mãe, exemplo perfeito de fé e perseverança desde sempre. Aposta absoluta na educação. Aos meus irmãos.

A minha família, que tanto tem compartilhado os meus desafios, com apoio e compreensão irrestritos. À Silvana, Matheus e Anna Luiza, todo o meu amor e carinho.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores, funcionários e colegas do mestrado, especialmente à Isabel.

Ao coordenador do PPGEE, Prof. Dr. Luiz Danilo Barbosa Terra, líder, mestre, motivador e empreendedor nesta atividade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mário Fabiano Alves, pela oportunidade de trabalharmos juntos, pelo eficiente papel desempenhado, pelo apoio e compreensão.

À CEMIG, por esta oportunidade e por tantas outras que possibilitam o crescimento de pessoas, de profissionais e da própria empresa. Especialmente, aos colegas e gerentes: Augusto Campos e Resende, Eduardo Nunes e Carvalho, Ivan Rejane de Castro e Pinto, José Rita Leão, Leopoldo Crisostomo, Márcio Maia Ribeiro, Marco Antônio Ferreira, Monica Neves Cordeiro, Rodrigo Assunção Fonseca, Walter de Aguiar Campos, Wellington Zakhia Soares.

Aos vários amigos e colegas presentes neste e em tantos outros processos de aprendizado. Em particular, àqueles que contribuíram diretamente para este trabalho: Adriana de Castro Passos, Kleber Lopes Borges, Marta Luciene Rosa, e colegas da LAELC Indústria e Comércio Ltda.

À Deus, em síntese, pela fé...

"Dias inteiros de calma, noites de ardência, dedos no leme e olhos no horizonte; descobri a alegria de transformar distâncias em tempo.

Um tempo em que aprendi a entender as coisas do mar, a conversar com as grandes ondas e não discutir com o mau tempo. A transformar o medo em respeito, o respeito em confiança.

Descobri como é bom chegar quando se tem paciência. E, para se chegar, onde quer que seja, aprendi que não é preciso dominar a força, mas a razão.

É preciso, antes de mais nada, querer".

Amir Klink

## SUMÁRIO

SIGLAS E ACRÔNIMOS .....	6
LISTA DE FIGURAS .....	7
LISTA DE GRÁFICOS .....	8
LISTA DE TABELAS .....	10
RESUMO.....	11
ABSTRACT .....	12
APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS .....	13
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	15
1.1 Objetivos .....	17
1.2 Relevância.....	18
1.3 Escopo .....	19
1.4 Metodologia.....	19
1.5 Contribuição .....	20
CAPÍTULO 2 – CAPACITORES DE POTÊNCIA DE ALTA TENSÃO .....	22
2.1 Capacitores de potência – conceito e breve histórico.....	22
2.2 Projetos modernos de capacitores de potência .....	24
2.3 Dielétricos.....	32
2.3.1 Líquidos impregnantes.....	32
2.3.2 Filmes dielétricos .....	36
2.3.3 Interação entre impregnante e filme .....	41
2.4 Comentários finais ao capítulo .....	44
CAPÍTULO 3 – DEGRADAÇÃO DOS CAPACITORES DE POTÊNCIA .....	47
Introdução.....	47
3.1 Descargas parciais em capacitores de potência.....	48
3.1.1 Efeito das bordas dos eletrodos .....	48
3.1.2 Influência da temperatura ambiente .....	53
3.2 Degradação dielétrica dos capacitores de potência .....	54
3.2.1 Degradação do sistema dielétrico .....	54
3.2.2 O fenômeno da degradação do PP em capacitores de potência .....	57
3.2.3 Degradação acelerada do polipropileno.....	61
3.2.4 Avaliação da durabilidade de filmes poliméricos sob DP .....	63
3.3 Síntese teórica .....	63
3.4 Investigações experimentais .....	64

3.4.1	Descargas parciais em modelos de capacitores só-filme com impregnantes de naturezas diferentes [33] .....	65
3.4.2	Efeitos das descargas parciais em filmes de polipropileno impregnados [34] .....	69
3.4.3	Degradação de filmes de polipropileno impregnados em corrente alternada [32].....	74
3.4.4	Síntese das observações experimentais.....	81
3.5	Medição de DP para diagnóstico em capacitores de potência.....	82
3.6	Comentários sobre a degradação dos capacitores de potência .....	85
CAPÍTULO 4 - CAPACITORES DE POTÊNCIA SOB COMPONENTES HARMÔNICOS ....		87
4.1	Reações eletroquímicas e as descargas parciais.....	87
4.2	Reações orgânicas e as descargas parciais.....	91
4.3	Síntese - Degradação dos capacitores .....	93
4.4	Solicitações adicionais impostas pelos componentes harmônicos .....	94
4.5	Análise comparativa entre as solicitações dielétricas impostas ao capacitor sob componentes harmônicas e os limites admissíveis por norma .....	99
4.6	Análise qualitativa e quantitativa - casos práticos.....	113
4.7	Comentários finais ao capítulo .....	131
CAPÍTULO 5 – ANÁLISE CRÍTICA DAS CLÁUSULAS NORMATIVAS PERTINENTES....		134
5.1	Sobretensões permissíveis de longa duração .....	134
5.2	Critérios para a escolha da tensão nominal .....	141
5.3	Aplicações sob componentes harmônicos.....	143
5.4	Tópicos complementares.....	151
5.5	Aspectos evolutivos .....	154
5.6	Visão crítica e análise comparativa .....	156
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES .....		161
6.1	Contribuição para os critérios de especificação.....	163
6.2	Proposições para outros trabalhos.....	164
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		166
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....		170

## SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	–	American National Standards Institute
ASTM	–	American Society for Testing and Materials
CIGRE	–	Conference Internationale des Gands Réseaux Electriques à Haute Tension
DP	–	Descargas Parciais
DTHT	–	Distorção de Tensão Harmônica Total
GCOI	–	Comitê de Gestão da Operação Interligada da Eletrobrás
GTA	–	Gradiente de Tensão Aplicado
$\Delta$ GTA	–	Gradiente de Tensão Aplicado Adicional
IEC	–	International Electrotechnical Commission
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronics Engineers
JIS	–	Japanese Industrial Standards
M/DBT	–	Mono-DiBenzilTolueno
NEMA	–	National Electrical Manufactures Association
ONS	–	Operador Nacional do Sistema
PAC	–	Ponto de Acoplamento Comum
PCB	–	Polychlorinated Biphenyls (Askarels)
PP	–	Polipropileno
TEDP	–	Tensão de Extinção de Descargas Parciais
TIDP	–	Tensão de Incepção de Descargas Parciais
TIDPb	–	Tensão de Incepção de Descargas Parciais em baixos níveis
TVP	–	Tempo médio de Vida Previsto do capacitor de potência em projeto
TVR	–	Tempo médio de Vida Real do capacitor de potência

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	– Vida do sistema dielétrico do capacitor x estresse dielétrico .....	16
Figura 2.1	– Capacitor de potência e elemento capacitivo .....	27
Figura 2.2	– Esquema exemplo para capacitores com fusíveis internos .....	29
Figura 2.3	– Esquema exemplo para capacitores com fusíveis externos .....	30
Figura 2.4	– Esquema exemplo para capacitores sem fusíveis .....	31
Figura 2.5	– Estrutura química do M/DBT .....	33
Figura 3.1	– Mapeamento do campo elétrico num sistema dielétrico típico de capacitores de potência.....	49
Figura 3.2	– Mapeamento do campo elétrico num sistema dielétrico de capacitores de potência com a espessura do dielétrico menor do que na figura 3.1.....	50
Figura 3.3	– Variação da tensão de longa duração ( $E_{\infty}$ ) e da tensão de inceptção de descargas parciais (TIDP) com a espessura do dielétrico .....	51
Figura 3.4	– Determinação da TIDP e TEDP através de diferentes métodos de ensaio.....	53
Figura 3.5	– Mecanismo de DP para uma sobretensão temporária imposta ao sistema dielétrico do capacitor.....	56
Figura 3.6	– Reação Química. Primeiro estágio do processo de degradação do PP....	57
Figura 3.7	– Exemplos de reações químicas de degradação do PP na presença de oxigênio.....	59
Figura 3.8	– Exemplos de reações químicas de degradação do PP com traços de oxigênio.....	60
Figura 3.9	– Reação química de eliminação – Fissão $\beta$ – sem a presença de oxigênio.....	60
Figura 3.10	– Circuito de ensaio .....	66
Figura 3.11	– Representação tridimensional da diferença entre a absorção para um filme de PP, espessura igual a $65\mu\text{m}$ , impregnado com (a) M/DBT e (b) M/DBT aditivado em epóxi .....	72
Figura 3.12	– (a) Distribuição da absorção a $1710\text{ cm}^{-1}$ na degradação do PP. O círculo pontilhado circunscreve a borda da área sob campo elétrico; e (b) Respectiva representação tridimensional. Os valores dos eixos X e Y estão indicados em mm.....	80
Figura 4.1	– Diagrama unifilar da indústria do caso prático 1 .....	114
Figura 4.2	– Diagrama Unifilar da indústria do caso prático 2 .....	121

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1	– Distribuição de descargas positivas e negativas em função das janelas de fase; (a) número relativo de descargas; (b) intensidade média relativa das descargas. Eixos (sem escala definida) vertical e horizontal, número de descargas em p.u. e janelas de fase no ciclo, respectivamente .....	67
Gráfico 3.2	– Variação do fator de perdas ( $\text{tg } \delta$ ) em função da frequência para um filme de PP de espessura igual a 13,6 $\mu\text{m}$ após envelhecimento (curva 1); e novo (curva 2) .....	75
Gráfico 4.1	– Formas de onda de tensões fundamental e harmônica .....	98
Gráfico 4.2	– Situação 1a - Tensão aplicada eficaz de 1,0 p.u. à frequência fundamental.....	101
Gráfico 4.3	– Situação 1b - Tensão aplicada eficaz de 1,00 p.u., com 5% de distorção harmônica de ordem 3 .....	102
Gráfico 4.4	– Tensão distorcida ( $h = 1$ e $h = 3$ ) x Tensão fundamental ( $h = 1$ ).....	103
Gráfico 4.5	– Situação 2a - Tensão aplicada eficaz de 1,10 p.u. à frequência fundamental.....	105
Gráfico 4.6	– Situação 2b - Tensão aplicada eficaz de 1,10 p.u., incluindo 46% de distorção harmônica de ordem 3 .....	105
Gráfico 4.7	– Curva experimental: Tempo de Vida médio do Capacitor x Gradiente de Tensão aplicado .....	107
Gráfico 4.8	– Curva Tempo de Vida Real (TVR) x Gradiente de Tensão Aplicado Adicional ( $\Delta\text{GTA}$ ).....	109
Gráfico 4.9	– Tensão não-senoidal – Caso teórico.....	112
Gráfico 4.10	– Tensão resultante na Barra 4 – Antes da mitigação .....	115
Gráfico 4.11	– Tensão aplicada na Barra 6 – Antes da mitigação.....	116
Gráfico 4.12	– Tensão resultante na barra 4 – Após mitigação.....	118
Gráfico 4.13	– Tensão resultante no banco de capacitores da barra 4 – Após mitigação .....	119
Gráfico 4.14	– Tensão resultante na barra 6 – Após mitigação.....	120
Gráfico 4.15	– Tensão resultante na Barra Forno 2 – Antes da mitigação .....	122
Gráfico 4.16	– Tensão resultante na Barra Forno 3 – Antes da mitigação.....	123
Gráfico 4.17	– Tensão resultante na Barra Forno 2 – Após a mitigação .....	125

Gráfico 4.18 – Tensão resultante no banco de capacitores da barra Forno 2 – Após mitigação .....	126
Gráfico 4.19 – Tensão resultante na Barra 4 com 5% de sobretensão – Antes da mitigação .....	128
Gráfico 4.20 – Tensão resultante na Barra 4 com 5% de sobretensão – Após a mitigação .....	129
Gráfico 4.21 – Tensão resultante na Barra Forno 3 com 5% de sobretensão – Antes da mitigação .....	130

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades físicas do M/DBT.....	34
Tabela 2.2 – Propriedades elétricas do M/DBT .....	34
Tabela 2.3 – Características do PP aferidas em ensaios normalizados .....	38
Tabela 2.4 – Propriedades elétricas do PP.....	39
Tabela 3.1 – Resumo dos principais resultados obtidos para cada impregnante.....	68
Tabela 3.2 – TIDP x Espessura do Dielétrico .....	69
Tabela 3.3 – Avaliação do envelhecimento de filmes de PP para o impregnante M/DBT com e sem aditivos a base de epóxi .....	71
Tabela 3.4 – Valores médios da tensão de disrupção dos filmes de PP impregnados ..	77
Tabela 3.5 – Tensões de disrupção de filmes de PP para diferentes estresses elétricos.....	78
Tabela 3.6 – Tempo de vida e tensão de disrupção de filme de PP impregnado após o envelhecimento com uma pressão hidrostática de 4 MPa.....	79
Tabela 4.1 – Limites de distorção de tensão conforme IEEE-519.....	98
Tabela 4.2 – Limites globais de distorção de tensão, expressos em % da tensão fundamental, conforme ONS.....	99
Tabela 5.1 – Tensões de Longa Duração – IEC 60871-1 – Projeto 33/260/FDIS .....	135
Tabela 5.2 – Tensões de Longa Duração – IEEE Std 18-1992 .....	137
Tabela 5.3 – Tensões de longa duração – Norma ABNT – NBR 5282.....	138
Tabela 5.4 – Índices para cálculo da Tensão harmônica resultante para cada faixa ...	149

## RESUMO

A presença de componentes harmônicos pode implicar um desempenho inferior dos capacitores de potência. Para uma avaliação adequada dessa possibilidade devem ser levados em conta os mecanismos de degradação de longa duração dos capacitores e as eventuais solicitações adicionais impostas pelos harmônicos.

Este trabalho discute os mecanismos de degradação de longa duração para os capacitores de potência de tecnologia só-filme, com ênfase para as atividades de descargas parciais.

Uma metodologia específica foi desenvolvida para avaliar a influência dos harmônicos na degradação dos capacitores de potência só-filme. Esta metodologia é baseada no nível de atividades de descargas parciais, utilizando-se a tensão aplicada e respectiva forma de onda. Casos reais exemplos são apresentados e discutidos.

As principais cláusulas normativas da IEC, IEEE/ANSI e ABNT pertinentes à degradação de longa duração e, principalmente, à aplicação de capacitores sob harmônicos são analisadas e comparadas criticamente.

Por fim, conclui-se que houve uma significativa elucidação do mecanismo de degradação dos capacitores de potência sob influência dos componentes harmônicos.

## **ABSTRACT**

The presence of harmonic components may result in a lower performance of power capacitors. Long-term degradation mechanisms of power capacitors and actual additional stresses from harmonics should be taken into account to perform an adequate assessment of this subject.

The long-term degradation mechanisms for all-film power capacitors, emphasizing the role of partial discharge activities, is discussed.

A specific methodology has been developed to evaluate the harmonics influence on capacitor degradation. This methodology is based on the level of partial discharge activities. Voltage magnitude as well as its respective waveform are used to assess it. Real cases, used as example, are presented and discussed.

The main normative clauses from IEC, ANSI/IEEE and ABNT (Technical Standards Brazilian Association) relevant to long-term degradation and mainly to application of power capacitors under harmonics are critically assessed. A comparison between these clauses is also made.

Finally, it is concluded that a significant elucidation of the degradation mechanism of power capacitor subject to harmonic components has been achieved.

## **APRESENTAÇÃO DOS CAPÍTULOS**

### **Capítulo 1 – Introdução**

Introduz o tema central do trabalho, inserindo-o no contexto da área afim. Esta introdução apresenta a revisão bibliográfica correspondente ao desenvolvimento do trabalho, bem como descreve os seus objetivos, relevância, contribuição e metodologia.

### **Capítulo 2 – Capacitores de potência de alta tensão**

Mostra o capacitor no que se refere aos aspectos conceituais, históricos, de projeto e matérias-primas. Os projetos atualmente praticados e as funções dos dielétricos são priorizados a fim de subsidiar o entendimento dos fenômenos a serem estudados.

### **Capítulo 3 – Degradação dos capacitores de potência**

O foco deste capítulo é a apresentação de uma teoria de degradação dos capacitores de potência. A abordagem dos mecanismos de degradação perpassa, principalmente, pelas atividades de descargas parciais e reações químicas específicas. Para elucidar e validar a teoria são apresentadas investigações experimentais e respectivos resultados.

### **Capítulo 4 – Capacitores de potência sob componentes harmônicos**

Este capítulo aborda diretamente o tema central do trabalho, usando as análises efetuadas nos capítulos precedentes e os efeitos dos componentes harmônicos nas tensões aplicadas aos capacitores. Uma formulação analítica para a avaliação da degradação do capacitor é apresentada e validada através de casos práticos.

## Capítulo 5 – Análise crítica das cláusulas normativas pertinentes

As cláusulas normativas pertinentes mais utilizadas mundialmente e no Brasil, bem como, alguns projetos de norma, são analisados e correlacionados com o conteúdo apresentado nos capítulos 3 e 4, permitindo-se também a comparação entre diferentes critérios. Esta análise é complementada por informações sobre a evolução das cláusulas normativas e pela aplicação dos critérios estabelecidos em casos práticos.

## Capítulo 6 – Conclusões

As conclusões analisam o cumprimento dos objetivos estabelecidos para o trabalho, enfatizando as investigações necessárias para se obter a requerida elucidação dos fatores influenciados no desempenho dos capacitores de potência sob componentes harmônicos. Adicionalmente discute-se a contribuição deste para as atividades de especificação de capacitores e são propostos conteúdos para trabalhos complementares ou relacionados com a área estudada.

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Capacitores de potência comumente têm o seu desempenho projetado comprometido por componentes harmônicos presentes nos sistemas elétricos, os quais podem ser intensificados pela instalação de capacitores de potência, ou, os capacitores de potência quando instalados em sistemas elétricos podem intensificar componentes harmônicos, os quais comumente comprometem o desempenho dos capacitores de potência [1-7].

A questão capacitores de potência versus componentes harmônicos realmente comporta uma interpretação bifurcada, e se caracteriza por uma interação particular nos sistemas elétricos de potência.

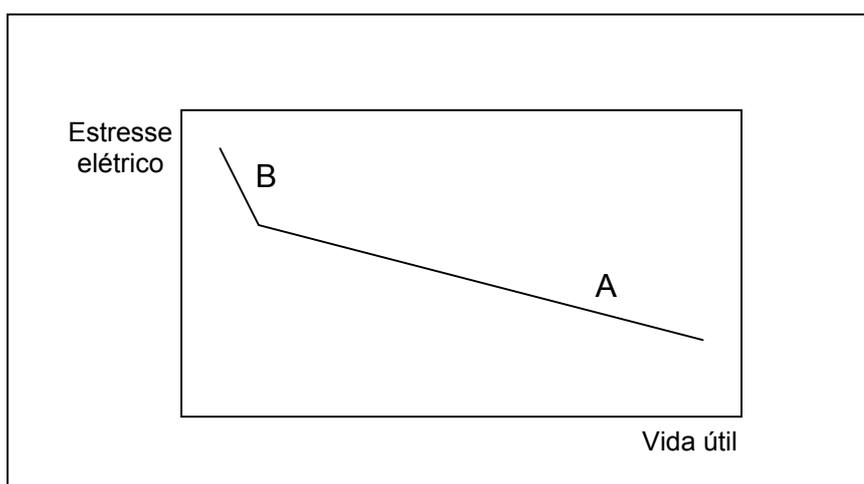
Esta interação é motivo de investigação desde as décadas de 60/70, refletindo em cláusulas normativas específicas [8,9], e no estabelecimento de critérios, também específicos, para a aplicação de capacitores de potência em sistemas cujas grandezas elétricas apresentam distorções harmônicas [1,3,4,6,7].

Genericamente, os componentes harmônicos representam eventuais solicitações adicionais térmicas, dielétricas e possivelmente outras, impostas aos capacitores de potência. Desta forma, as normas pertinentes chamam a atenção para que tais solicitações adicionais não ultrapassem os limites estabelecidos para tensão, corrente, potência e temperatura de operação [8,10-20].

A origem dessas solicitações adicionais impostas pelos harmônicos não é verificada de uma forma direta, detalhada ou abrangente na literatura disponível na área de capacitores de potência. Mesmo as cláusulas normativas não indicam uma interpretação única, devido aos diferentes critérios adotados por grupos normalizadores diferentes para estabelecer os limites operativos dos capacitores de potência de alta tensão [9].

Possivelmente, esta ausência de uma abordagem específica está relacionada com a dificuldade em estabelecer parâmetros para o estudo da degradação dos capacitores de potência a longo prazo [21-26].

Enquanto a degradação de curta duração foi sempre atribuída aos fenômenos de descargas elétricas internas, a degradação de longa duração foi inicial e exclusivamente atribuída a fatores térmicos (até a década de 70), posteriormente, também a reações químicas (década de 80) [22,23] e, atualmente, principalmente, a fatores dielétricos. A figura 1.1 ilustra os conceitos predominantes até o final da década de 80.



**Figura 1.1 – Vida do sistema dielétrico do capacitor x estresse dielétrico**

A = Envelhecimento devido a fatores químicos ou térmicos.

B = Envelhecimento devido a DP

Fonte: Compacting – The Key to Power Capacitors [22].

Esta transformação e/ou evolução dos conceitos de degradação está fortemente ligada ao avanço tecnológico obtido para as matérias-primas dos capacitores e, conseqüente otimização dos projetos desses equipamentos nas últimas décadas [21-23,25-27]. Ainda, o crescimento do conhecimento sobre os fenômenos físicos e químicos correlatos, bem como as tecnologias modernas de medição têm contribuído significativamente para o melhor entendimento sobre a degradação dos capacitores de potência [28-37].

Também tem sido crescente a base de conhecimento de qualidade da energia elétrica (QEE), tema onde estão inseridas várias categorias, como a distorção das formas de onda das grandezas elétricas, dentro desta, se destacando as distorções harmônicas.

Essa crescente abordagem na área de harmônicos se deve, a pelo menos, duas razões: a proliferação das denominadas cargas não lineares e a atual necessidade de se fornecer ou consumir energia elétrica de qualidade. A interseção dessas duas razões é a implementação de ações de mitigação, onde, freqüentemente, estão inseridos os capacitores de potência [4-7,38,39].

Neste contexto, cabe levar em conta os fatores determinantes para o desempenho do capacitor de potência sob componentes harmônicos, dada a influência destes nas grandezas do sistema elétrico.

## **1.1 Objetivos**

Apesar das normas pertinentes aos capacitores de potência mencionarem e dedicarem cláusulas específicas a sua aplicação na presença de distorção harmônica, a literatura não apresenta esta correlação de forma didática e científica.

Este trabalho busca, prioritariamente, elucidar a influência dos componentes harmônicos no desempenho dos capacitores de potência. Como o tópico requer a análise dos fenômenos de degradação dos capacitores, o desenvolvimento de uma proposição teórica para esse assunto na abrangência de interesse, também faz parte dos objetivos deste trabalho.

Além disso, pode-se buscar uma análise crítica das cláusulas normativas correlatas, bem como, sugerir práticas de engenharia para os casos abrangidos pelo tema central.

## 1.2 Relevância

A crescente proliferação de cargas não-lineares nos sistemas de energia elétrica tem levado a valores maiores de “poluição” harmônica. Esta condição tem sido motivo de mau desempenho do sistema elétrico e cargas ligadas ao mesmo, ou, pelo menos de redução da qualidade da energia elétrica fornecida. Somado a isto, é crescente também o número de cargas instaladas sensíveis a esta condição, principalmente, em consumidores comerciais e industriais.

Por outro lado, as concessionárias de energia elétrica têm convivido recentemente com uma alteração significativa do modelo do setor, que tem resultado principalmente numa necessidade emergente de alta competitividade.

Este novo perfil para as concessionárias de energia elétrica implica, entre outros, a necessidade de maximização do uso de sistemas de geração, transmissão e distribuição existentes e conseqüente otimização dos investimentos na expansão da capacidade.

Alguns exemplos de ganhos marginais otimizados têm sido as instalações de elementos de compensação reativa, destacando-se os bancos de capacitores séries ou em derivação, compensadores estáticos de reativos e dispositivos FACTS [4-7,40]. Uma importância especial deve ser dada aos bancos de capacitores em derivação, que podem ser componentes de outras soluções, e por seu custo competitivo, conseguem uma enorme disseminação na cadeia de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como, nos sistemas elétricos industriais e comerciais.

A relevância do trabalho proposto está exatamente na grande incidência de capacitores de potência em sistemas com a presença de harmônicos. Ele se justifica, ainda, por um histórico de resultados insatisfatórios em aplicações neste contexto.

Na prática empresarial, a relevância supracitada significa contribuir

para transformar planejamentos otimizados em resultados correspondentes.

### **1.3 Escopo**

A primeira parte do trabalho apresenta o objeto de análise de maneira a especificar e informar sobre os principais itens de projeto, matéria-prima e manufatura dos capacitores de potência de projeto só-filme, hoje sem dúvida a tecnologia predominante. Essas informações são imprescindíveis para a abordagem sobre a degradação dos capacitores de potência a longo prazo, principalmente para o melhor entendimento dos fenômenos e investigações experimentais apresentadas.

Uma abordagem breve sobre alguns conceitos de distorção harmônica possibilitou uma proposta teórica para qualificar as solicitações adicionais devidas aos componentes harmônicos. Em alguns itens, esta proposta é sustentada por ou confrontada com resultados práticos.

As análises qualitativa e quantitativa das solicitações adicionais permitem adiante uma análise crítica de cláusulas normativas pertinentes, abrangendo os principais documentos utilizados mundialmente, incluindo o Brasil.

Por último, todo o escopo estudado permite conclusões a respeito das práticas de engenharia adotadas para a aplicação de capacitores de potência sob componentes harmônicos, bem como, sobre a adequabilidade das normas atuais e emergentes (projetos de norma). Ainda, são apresentadas proposições para investigação teóricas e práticas, a fim de incrementar o conhecimento de engenharia no tema central discutido, como também na degradação de longa duração dos capacitores.

### **1.4 Metodologia**

Foi dedicado um período bastante representativo à pesquisa bibliográfica através de livros e periódicos especializados para a aquisição de

conhecimento sobre a questão em envolvendo capacitores de potência harmônicos.

Visto a ausência anterior abordagem direta e detalhada sobre o tema de interesse, passou-se a dedicar a pesquisa sobre os fenômenos de degradação de capacitores através de periódicos de fabricantes e instituições de pesquisa independentes, com destaque para aquelas com grupos dedicados às investigações em materiais dielétricos.

Este estudo foi auxiliado e/ou complementado através de literatura científica na área de química.

Discussões breves foram desenvolvidas com fabricantes de capacitores e profissional com experiência na área de análise físico-química.

As literaturas utilizadas para o tema harmônicos foram principalmente as normas IEEE. Alguns casos práticos foram desenvolvidos com base em estudos de casos reais.

A metodologia para avaliar as solicitações dielétricas aos capacitores de potência pelos harmônicos utiliza cálculos computacionais específicos, análise gráfica, e desenvolvimento analítico a partir das condições de contorno identificadas para o problema proposto.

O acervo de normas ABNT, IEC e ANSI foi bastante explorado contemplando edições do passado, vigentes e até futuras, no caso dos projetos de norma.

## **1.5 Contribuição**

Uma abordagem científica detalhada sobre o desempenho dos capacitores de potência sob componentes harmônicos, levando-se em conta os projetos atualmente praticados para tais equipamentos de alta tensão e

cláusulas normativas correntes, é a principal contribuição deste trabalho.

Como subproduto, porém de grande importância, deve-se mencionar a discussão apresentada para os mecanismos de degradação de longa duração, a qual encontra-se atualmente mais próxima dos laboratórios de investigações de materiais dielétricos do que das discussões de engenharia. Pode-se afirmar que se trata de uma transição que implicará, em breve, novas otimizações de projetos, novos métodos de ensaios e diagnósticos, entre outros.

As discussões sobre os parâmetros de projeto dos capacitores só-filme, as principais matérias-primas e conceitos correlatos, podem ser vistas como contribuições secundárias deste trabalho, cujo conteúdo pode ser ampliado através das bibliografias referenciadas e complementares.

## **CAPÍTULO 2 – CAPACITORES DE POTÊNCIA DE ALTA TENSÃO**

Objetivando um melhor entendimento dos capítulos seguintes deste trabalho, optou-se por apresentar de forma mais detalhada o objeto principal de análise, ou seja, os capacitores de potência de alta tensão. A idéia é mostrar os principais aspectos de projetos e matérias-primas empregadas, focando a relevância desses no desempenho dos capacitores de potência.

O tipo de projeto atualmente consagrado pela indústria é o denominado “só-filme”, que pode ser utilizado também para baixa tensão na ordem de centenas de Volts. Para este projeto, as principais matérias-primas são o filme polimérico e o líquido impregnante.

Os projetos emergentes para capacitores de potência de alta tensão incluem os denominados filmes metalizados. Esta tecnologia já utilizada em baixa tensão, apresenta a característica de auto-recuperação como fator diferenciador. Sob o aspecto construtivo, os eletrodos são constituídos de camadas finas de vapor metálico depositadas nos filmes de PP. Para uma melhor abordagem deste projeto, bem como dos fenômenos físico-químicos presentes, deve ser consultada a bibliografia complementar [41].

No texto, são relatadas técnicas de manufatura do capacitor ou da matéria-prima para enriquecimento do tópico abordado. Algumas aplicações de capacitores de potências são citadas, sendo que uma abordagem mais detalhada dessas pode ser obtida através das bibliografias referenciadas ou complementares.

### **2.1 Capacitores de potência – conceito e breve histórico**

O termo capacitância expressa a habilidade de um sistema de condutores e material dielétrico em armazenar eletricidade ou carga elétrica, sob determinado valor de diferença de potencial.

Por definição:

$$C = \frac{Q_c}{V}, \text{ onde}$$

C = capacitância,

$Q_c$  = quantidade de carga armazenada, e

V = diferença de potencial.

Portanto, a capacitância está presente em inúmeros contextos dos sistemas elétricos.

Entretanto, um equipamento fabricado para explorar essa definição é particularmente denominado capacitor. Obviamente, apenas esta apresentação conceitual não identifica o objeto de estudo proposto; portanto, uma descrição breve da evolução dos capacitores para sistemas elétricos de potência torna-se bastante didática e conveniente neste tópico.

Até o final do século XIX, não havia surgido qualquer necessidade de capacitores para a indústria. Nessa ocasião, vários profissionais demonstraram teoricamente os benefícios técnicos e econômicos que os capacitores poderiam oferecer ao melhorar o fator de potência de instalações elétricas.

Como consequência, vários experimentos foram realizados com capacitores em sistemas de corrente alternada. Porém, a conclusão foi de que seus projetos eram muito onerosos e de baixa confiabilidade. A principal razão eram disrupções devido ao sobreaquecimento nos materiais isolantes em decorrência de altas perdas dielétricas.

Ainda, tendo como fundamento as experiências de Faraday, em 1830, com relação à influência dos diferentes materiais na capacitância de um sistema de condutores e, na sua quantificação, através do conceito da constante dielétrica, optou-se pela pesquisa na área de materiais para viabilizar

o capacitor.

Como resultado do desenvolvimento dos materiais, houve uma redução drástica nas perdas dielétricas e no volume de materiais empregados nos capacitores.

Atualmente, os capacitores de potência são componentes de grande importância e necessidade nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, auxiliando na exploração do uso otimizado da rede, evitando ou retardando investimentos ao longo de toda a cadeia de suprimento de energia elétrica.

Algumas das aplicações dos capacitores de potência constituem importantes temas de engenharia de sistemas elétricos de potência na busca de sua melhor eficiência. Alguns exemplos podem ser rapidamente citados: compensação série ou em derivação de potência reativa, regulação de tensão através de compensadores estáticos, filtros para sistemas de transmissão em corrente contínua, correção de fator de potência e mitigação de distorções harmônicas em sistemas industriais, regulação de tensão ao longo de redes de distribuição, além de outros.

## 2.2 Projetos modernos de capacitores de potência

A essência dos capacitores de potência está no chamado sistema dielétrico. Isto é facilmente justificado quando se foca a função básica deste equipamento, que é fornecer potência reativa. Utilizando-se equações da física, tem-se:

$$Q = \omega C V^2, \quad (1)$$

onde:

$Q$  = potência reativa gerada pelo capacitor;

$\omega$  = frequência angular da tensão aplicada;

$V$  = tensão (diferença de potencial) aplicada ao capacitor e

$C$  = capacitância do capacitor.

A expressão a seguir se aplica a capacitores de placas paralelas de capacitância  $C$ :

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}, \quad (2)$$

onde:

$\varepsilon$  = constante elétrica do material dielétrico

$\varepsilon_0$  = constante dielétrica para o vácuo,

$A$  = área sob os eletrodos, e

$d$  = distância entre os eletrodos.

Considerando-se as equações:

$$q = \frac{Q}{A \cdot d}, \quad (3)$$

$$E = \frac{V}{d}, \quad (4)$$

onde:

$q$  = potência reativa por unidade de volume,

$E$  = suportabilidade ao campo elétrico ou estresse elétrico no dielétrico,

$V$  = tensão aplicada a um dado capacitor.

De (1) e (2), tem-se:

$$Q = \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot V^2 \quad (5)$$

Simplificando as grandezas  $\omega$ ,  $\varepsilon$  e  $\varepsilon_0$  consideradas constantes para uma dada aplicação:

$$Q = K \cdot \frac{A}{d} \cdot V^2 \quad (6)$$

De (3), (4) e (6), tem-se:

$$q \cdot A \cdot d = K \frac{A}{d} \cdot E^2 \cdot d^2, \text{ ou}$$

$$q = K \cdot E^2 \quad (7)$$

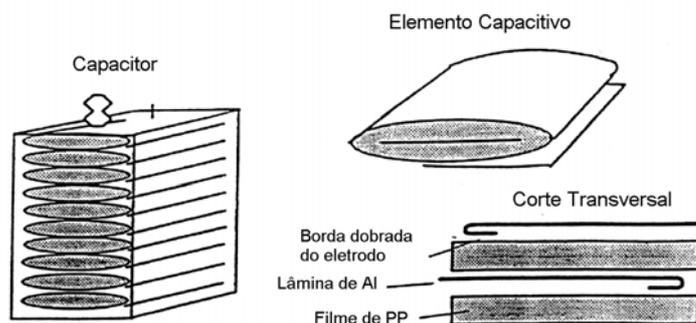
Desta forma, justifica-se um grande empenho em aprimorar o sistema dielétrico através da escolha de materiais adequados. Isto possibilita aumentar a densidade de potência e reduzir o custo da energia reativa produzida.

Como antecipado, outro parâmetro importante para o sistema dielétrico é o fator de perdas próprio. Eventuais perdas dielétricas elevadas implicam o aquecimento do capacitor e a limitação da potência reativa a ser fornecida, além de outros efeitos indesejáveis.

Portanto, o que os projetos contemporâneos de capacitores de potência têm buscado é a melhor performance dos sistemas dielétricos dos mesmos.

O projeto atualmente praticado para capacitores de potência de alta tensão, tipo “só-filme”, consiste de um certo número de elementos capacitivos, cada qual, por sua vez, consistindo de várias camadas finas de filme polimérico como dielétrico e finas lâminas de alumínio como eletrodos. Estes elementos são empilhados dentro de um invólucro metálico, denominado lata do capacitor, e conectados em série e/ou paralelo entre si, a fim de se obter a capacitância e tensão nominais da unidade capacitiva completa ou capacitor. Adicionalmente, os elementos capacitivos são impregnados com um fluido especial e instalados em ambiente hermético.

A figura 2.1 ilustra a sua composição básica:



**Figura 2.1 – Capacitor de potência e elemento capacitivo**

Fonte: Modern High Voltage Power Capacitors for Optimal Reliability [21].

Talvez, atualmente, o principal parâmetro de projeto seja o valor de estresse dielétrico aplicado, onde os materiais dielétricos são utilizados no “máximo” de seus limites, pois, lembrando, a potência a ser fornecida é proporcional ao quadrado da tensão aplicada ao capacitor. Isto implica um estresse dielétrico da ordem de 10 vezes maior para os capacitores de potência, se comparados aos demais equipamentos elétricos.

Para efeito de ilustração, os valores típicos para os estresses dielétricos para os capacitores são:

- a) para o projeto com papel: 18 kV/mm (décadas de 70/80)
- b) para o projeto só-filme: 50 a 80 kV/mm (década de 80/90)

Portanto, pode-se notar que realmente o desenvolvimento dos dielétricos dos capacitores permitiu um ganho na densidade de potência dos capacitores nas últimas décadas. Entretanto, traz consigo a necessidade de um conhecimento bastante aprofundado sobre as propriedades e limitações dos materiais e projetos utilizados.

Estas características, em conjunto com as aplicações dos capacitores, determinam fenômenos constituintes do processo de degradação e/ou falhas do sistema dielétrico, delineando os limites operativos. Sob o prisma do projeto,

esses limites dependem de critérios, tais como, o tipo de borda dos eletrodos, a dimensão da borda, o valor de estresse dielétrico, o dimensionamento dos elementos capacitivos, entre outros.

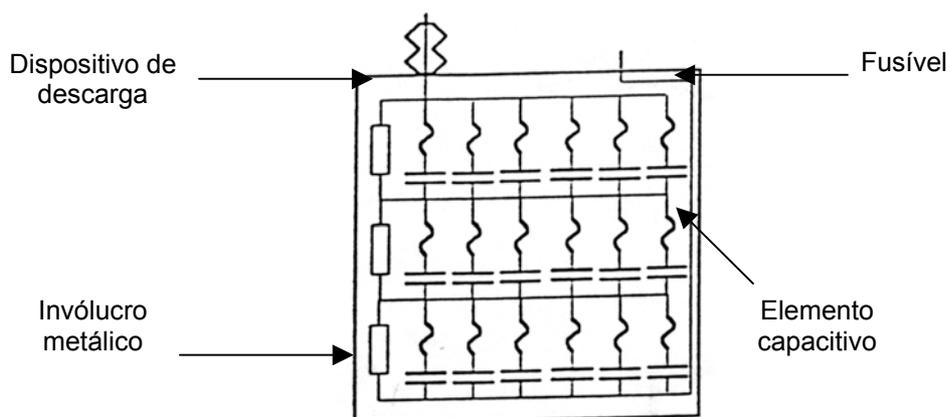
Ainda, os procedimentos de manufatura são determinantes para se obter o desempenho projetado, destacando-se, por exemplo, o armazenamento, manuseio e controle de qualidade das matérias-primas, a bobinagem dos elementos capacitivos e a impregnação do capacitor.

É importante observar que algumas investigações [21] têm apontado que os mecanismos de falhas a curto ou longo prazo, no último caso, o envelhecimento, estão diretamente ligados ao processo projeto-fabricação dos capacitores. Isto significa que um melhor entendimento dos fenômenos que se apresentam vinculados aos denominados “pontos fracos” do sistema dielétrico permitiria melhorias de desempenho e otimização dos projetos dos capacitores.

Entretanto, como as causas dos pontos fracos podem ser várias, como partículas, bolhas (espaços vazios), impurezas e irregularidades químicas, não existe um modelo matemático que possa verdadeiramente descrever todos os diferentes fenômenos.

Outro aspecto importante e freqüentemente em pauta, a ser abordado no que refere ao projeto de unidades capacitivas, é a tecnologia adotada para os fusíveis. As tecnologias atualmente disponíveis são: fusíveis internos, fusíveis externos e sem fusíveis ou “fuseless”.

Um exemplo de projeto de capacitor com fusíveis internos é mostrado na figura 2.2.



**Figura 2.2 – Esquema exemplo para capacitores com fusíveis internos**

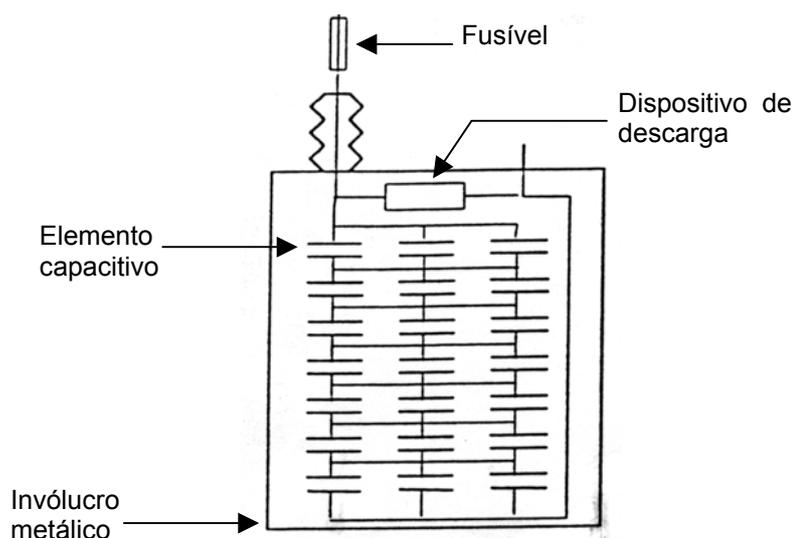
Fonte: Modern High Voltage Power Capacitors for Optimal Reliability [21].

A proposta básica desse projeto é desconectar instantaneamente qualquer elemento em curto-circuito após uma falha dielétrica.

Dentro desse propósito, este projeto possui um número de elementos capacitivos maior se comparado às outras tecnologias de fusíveis. Assim, têm-se elementos com tamanho e potência reduzidos, de forma que a operação de um fusível tem normalmente uma influência desprezível na continuidade de operação do capacitor ou banco de capacitores, por exemplo, não produzindo maiores variações de capacitância e de distribuição de tensões. Deve ser citada, como característica particular da tecnologia em questão, a necessidade de se garantir a operação segura dos fusíveis em diferentes condições de tensão, bem como, a suportabilidade desses às descargas devido a sobretensões temporárias. Normalmente estes requisitos são preenchidos com a adoção de um número menor possível de elementos conectados em paralelo.

Não há restrições para a manufatura de unidades capacitivas (ou latas) de maiores potências com fusíveis internos, entretanto o mesmo não ocorre para unidades com potências menores, como por exemplo, dezenas de Kvar.

O arranjo básico de um capacitor com fusível externo é mostrado na figura 2.3.



**Figura 2.3 – Esquema exemplo para capacitores com fusíveis externos**

Fonte: Modern High Voltage Power Capacitors for Optimal Reliability [21].

A tensão nominal deste projeto usualmente pode ser maior se comparada à tecnologia de fusíveis internos, e por conseqüência, o número de elementos capacitivos em série também. Como não existe um requisito para um número mínimo de elementos em paralelo, normalmente é utilizado um número mínimo de elementos conforme as possibilidades práticas. Assim, os elementos são usualmente maiores se comparados com aqueles para capacitores de fusíveis internos.

Ainda, como implicação prática, bancos de capacitores com fusíveis externos são compostos por unidades (capacitores) de potência relativamente baixa, quando comparadas à potência total (do banco). Isto se faz necessário para que uma operação de fusível não implique um acréscimo de tensão maior que 10% nas unidades remanescentes.

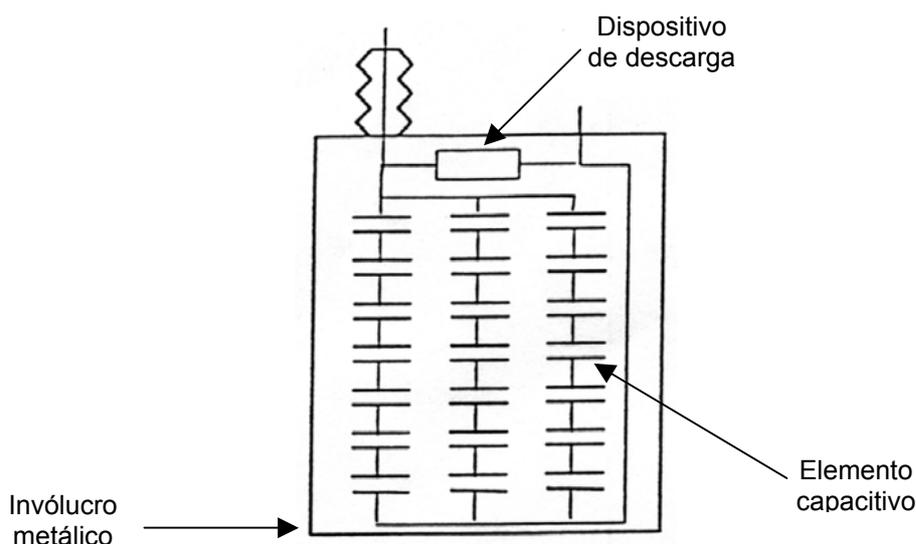
As unidades capacitivas com fusíveis externos possuem potências típicas na faixa de 200 a 500 Kvar, as quais são menores do que as normalmente praticadas para a tecnologia de fusíveis internos.

A tecnologia de capacitores sem fusíveis está baseada na idéia de que

um curto-circuito num elemento capacitivo possa resultar um novo ponto de conexão elétrica efetiva através da solda de duas lâminas-eletrodo. Isto é possível para os projetos de capacitores de só-filme mais modernos.

As características principais desta tecnologia são a possibilidade de usar unidades capacitivas maiores, o não requisito de se ter um certo número de unidades ou de elementos em paralelo, e a possibilidade de se ter reduzidas variações de capacitância e acréscimo de tensão nos elementos remanescentes quando da falha de elementos.

A figura 2.4 apresenta um esquema exemplo para esta tecnologia.



**Figura 2.4 – Esquema exemplo para capacitores sem fusíveis**

Fonte: Modern High Voltage Power Capacitors for Optimal Reliability [21].

Outros aspectos a serem destacados para a tecnologia em questão são: a necessidade de se limitar a energia da descarga interna que ocorre no ponto de falha a fim de se reduzir o risco de danos em elementos adjacentes e nos componentes de isolamento da unidade capacitiva; a possibilidade de arranjar os elementos internos a fim de se obter gradientes de tensão reduzidos entre elementos de cadeias diferentes.

É importante notar que a breve discussão apresentada neste capítulo sobre os mecanismos de falhas dos capacitores, bem como a abordagem mais detalhada sobre os fenômenos de degradação a ser apresentada no capítulo 3, são qualitativa e quantitativamente válidas para as 3(três) tecnologias apresentadas para fusíveis.

Além dos aspectos de projeto sucintamente discutidos neste item, outros tópicos podem ser investigados, tais como, dispositivos de descarga, configurações de bancos de capacitores, configurações internas de capacitores, suportabilidade a sobretensões temporárias, filosofias de proteção residual, e outros. Estes tópicos não fazem parte do cerne da questão em análise neste trabalho, portanto não serão discutidos. Outrossim, eles são de grande relevância para o tema “Capacitores de Potência” e são amplamente abordados na literatura e, particularmente, nas normas pertinentes.

## **2.3 Dielétricos**

Os dielétricos, filme polimérico e líquido impregnante, são as principais matérias-primas empregadas na construção dos capacitores de potência. Ambos, bem como a interação entre eles, são fatores determinantes para o desempenho dos capacitores e o conhecimento sobre estes tópicos é fundamental para a análise dos fenômenos de envelhecimento.

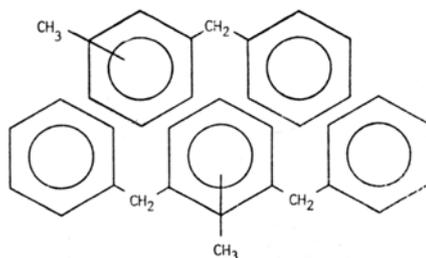
### **2.3.1 Líquidos impregnantes**

Desde a proibição do uso do ASCAREL ou PCB (Bifenil Policlorado) em vários países (o Brasil, inclusive), nas décadas de 70 e 80, um grande esforço em pesquisa foi desenvolvido para se obter um substituto ambientalmente aceitável e adequado para capacitores de potência papel-filme e só-filme. Como consequência, vários líquidos impregnantes foram propostos e testados, inclusive em produtos comercializados. Alguns exemplos são metil isopropil bifenil (MIPB), isopropil naftaleno, tricresil fosfato (TCP), fenilmetil silicone e n-decano.

Após, pelo menos, uma década de muita discussão sobre vantagens, desvantagens e adequabilidade dos impregnantes propostos, uma mistura de benziltolueno e dibenziltolueno (M/DBT) está estabelecida como um impregnante particularmente adequado para capacitores de potência de só-filme. Este impregnante é fabricado diretamente a partir do tolueno, o qual é o mais barato dos hidrocarbonetos aromáticos.

As principais características do M/DBT são: alta aromaticidade, baixa viscosidade mesmo em baixas temperaturas e bom desempenho sobre altos estresses dielétricos. Esta associação propicia um notável comportamento no que se refere a DP, comparativamente com os outros impregnantes desenvolvidos.

A estrutura química do M/DBT é apresentada na figura 2.5.



**Figura 2.5 – Estrutura química do M/DBT**

Fonte: A New Impregnant for HV Power Capacitors [27]

As tabelas 2.1 e 2.2 apresentam respectivamente as propriedades físicas e elétricas do M/DBT.

**Tabela 2.1**  
**Propriedades físicas do M/DBT**

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	Valor médio
Cor	ASTM-D2129	----	Ligeiramente amarelo
Índice refrativo a 25°C	ASTM-D1807	----	1,578
Densidade específica a 20°C	ASTM-D1810	g/cm <sup>3</sup>	1,006
100°C			0,948
Coeficiente de expansão térmica (20 – 100°C)	----	----	7,6 x 10 <sup>-4</sup>
Viscosidade cinemática a 50°C	ASTM-D445	CSt	2,8
20°C			6,5
- 30°C			100
Ponto de fluidez	ASTM-D97	°C	< -50
Pressão de vapor a 20°C		Torr	5 x 10 <sup>-3</sup>
100°C			1,1
Ponto de fulgor	ASTM-D92	°C	144
Ponto de ignição	ASTM-D92	°C	154
Solubilidade em água a 25°C	ASTM-D1533	ppm	400
Conteúdo de água	ASTM-D1533	ppm	< 100
Acidez	ASTM-D644	MgKOH/g	< 0,01
Solubilidade em gás a 25°C N <sub>2</sub>	ASTM-D2945	%	3,7
O <sub>2</sub>		Vol/Vol	1,9
Tensão superficial 25°C		Dynes/cm	36

Fonte: Catálogo JARYLEC C101 [42].

**Tabela 2.2**  
**Propriedades elétricas do M/DBT**

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	Valor médio
Constante dielétrica a 25°C	IEC 247	---	2,66
Perdas dielétricas – 50Hz – 100°C	IEC 247	---	< 0,004
Resistividade – 100°C	IEC 247	Ω x cm	> 9 x 10 <sup>14</sup>
Tensão de disrupção 25°C (eletrodos conforme VDE – 2mm)		kv	> 70
Absorção de H <sub>2</sub>	IEC 247	Cm <sup>3</sup> / h	2,3

Fonte: Catálogo JARLEC C101 [42].

As propriedades elétricas podem ser consideradas bastante satisfatórias pela combinação: alta tensão de disrupção, elevada absorção do gás hidrogênio, baixas perdas dielétricas e alta resistividade por volume. Adicionalmente, o M/DBT apresenta boa compatibilidade com o polipropileno (PP) utilizado como elemento dielétrico.

Algumas recomendações são normalmente dadas pelos fabricantes do M/DBT e cumpridas pelos fabricantes de capacitores de potência. A seguir, são

descritos exemplos dessas recomendações e itens de controle de qualidade aplicáveis ao M/DBT.

Comumente, o M/DBT é estocado em tanques industriais sem requisitos específicos. O transporte pode ser efetuado em tambores convencionais. Em ambas as situações o M/DBT poderia ser diretamente utilizado, entretanto alguns tratamentos podem ser feitos buscando uma garantia adicional de suas propriedades.

Para a redução das perdas dielétricas pode ser efetuado o tratamento com terra ativada. Esse procedimento deve ser sempre efetuado para o líquido a ser regenerado, após o procedimento de impregnação.

A terra ativada a ser utilizada, por exemplo, argila POROCEL ou ATTAPULGUS, pode requerer um tratamento de secagem a 150°C por 24 horas. A quantidade de terra a ser usada deve ser entre 0,3 e 3% do líquido, dependendo da qualidade de ambos.

A eficiência do tratamento do impregnante é maior quando a temperatura é menor, desde que a viscosidade da mistura seja baixa o suficiente para permitir a transferência dos íons. Sendo o M/DBT um fluido de baixíssima viscosidade, o referido tratamento pode ser feito à temperatura ambiente. A duração do tratamento depende das qualidades da terra e do líquido, sendo normalmente de 1 a 3 horas.

A eficiência do tratamento com terra ativada é avaliada pela medição do valor do fator de perdas ( $\text{tg}\delta$ ). Esse fator é usualmente menor que 0,002, medido a 90°C e 50Hz.

Para o procedimento de secagem, deve ser observado o valor limite de solubilidade em água, à temperatura ambiente, de 400ppm, apesar do conteúdo normalmente ser menor que 100ppm de água.

Um tratamento de desgaseificação à temperatura ambiente através de uma coluna sob  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  mmHg pode ser suficiente, visto a sua característica de baixa viscosidade.

Algumas recomendações são dadas pelos fabricantes do M/DBT, especificamente para a impregnação de capacitores de potência. Recomenda-se uma duração de 24 horas, à pressão de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  mmHg, numa temperatura que pode variar da ambiente até aproximadamente  $80^{\circ}\text{C}$ , dependendo do filme de PP empregado. Após o selamento, o capacitor deve ser estabilizado por um tratamento térmico entre  $80$  e  $90^{\circ}\text{C}$  por duas noites.

Por último, propõe-se relatar sobre a compatibilidade do M/DBT com outros materiais. A estabilidade do M/DBT na presença de terras ativadas, PCB e chumbo tem sido avaliada através de ensaios, com resultados satisfatórios [42]. Algumas precauções e procedimentos de ensaio devem ser tomados para garantir a compatibilidade do M/DBT com juntas de vedação e soldas.

Outro tópico que deve ser colocado em pauta é a utilização de aditivos nos impregnantes e seus efeitos. Tem sido reportados importantes melhorias no desempenho das isolações impregnadas de capacitores de potência, particularmente, em altas temperaturas [27]. A influência positiva das concentrações de aditivos, normalmente a base de epoxi, tem sido evidenciada em ensaios de durabilidade elétrica de capacitores.

Entretanto, deve ser salientado que a presença de aditivos tem por muitas vezes implicado um aumento das perdas elétricas dos capacitores, dependendo da natureza química dos aditivos e da concentração utilizada. Este fenômeno pode inclusive resultar num efeito contrário ao esperado, ou seja, na redução da expectativa de vida elétrica dos capacitores.

### **2.3.2 Filmes dielétricos**

A principal característica dos filmes dielétricos utilizados nos projetos

de capacitores de potência de alta tensão é a alta suportabilidade à ruptura dielétrica. Esta característica permite que os capacitores de potência possam operar com níveis de estresse dielétrico muitíssimo maiores do que aqueles utilizados em qualquer outro equipamento elétrico.

Basicamente, o filme utilizado em projetos de capacitores de potência é o polímero polipropileno biaxialmente orientado (PP). Isto se justifica pelo seu baixo custo comparativo e excelente desempenho nas aplicações usuais.

As propriedades principais do polipropileno são as elétricas: constante dielétrica, fator de perdas, resistividade, número de pontos fracos ou defeitos elétricos, e suportabilidade dielétrica; as físicas e dimensionais: rugosidade da superfície, resistência à tensão (mecânica), alongamento, encolhimento sob calor; além da pureza química e cristalinidade.

Algumas destas propriedades estão listadas nas tabelas 2.3 e 2.4.

**Tabela 2.3**  
**Características do PP aferidas em ensaios normalizados**

Espessura nominal ( $\mu\text{m}$ )	Resistência à tensão (Mpa)		Dilatação (%)		Encolhimento sob calor (%)		Conteúdo de impurezas (ppm)		Resistividade ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	Fator de perdas	Tensão de ruptura (Kv)		Número de pontos fracos/ $\text{m}^2$
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	p/ capacitor	p/ isolamento			Média	Mínima	
6											(1)	—	(1)
											1,5 mínimo		5 máximo
7.5											(1)	—	(1)
											1,7 mínimo		5 máximo
9											2,5 mínimo	—	4 máximo
12											3,0 mínimo	—	3 máximo
15	127 (mínimo)	127 (mínimo)	230 (máximo)	30 (mínimo)	8 (máximo)	8 (máximo)	100 (máximo)	500 (máximo)	$10^{16}$ (mínimo)	$3 \times 10^{-4}$ (máximo)	3,5 mínimo	—	2 máximo
18											7,0 mínimo	4,0 mínimo	
22											9,0 mínimo	5,0 mínimo	
25											10,0 mínimo	6,0 mínimo	-----
30											12,0 mínimo	7,0 mínimo	
35											14,0 mínimo	8,0 mínimo	

Nota: (1) Valores de referência

Fonte: NORMA JIS C2330-1978 [43].

**Tabela 2.4**  
**Propriedades elétricas do PP**

Propriedade	Valor	Unidade
Constante dielétrica	2,25	---
Fator de perdas	$\leq 2 \cdot 10^{-4}$	---
Resistividade	$> 10^{15}$	Ohm * m
Número de pontos fracos	$\leq 2$	1 / m <sup>2</sup>

Fonte: Catálogo da Tervakosko Capacitor Materials – 1994 [44].

As propriedades principais descritas para o PP são fundamentais para o desempenho do capacitor de potência. Algumas correlações podem ser citadas para ilustrar melhor esta afirmação.

O número de pontos fracos do PP é determinante para o comportamento do capacitor sob estresses dielétricos em ensaios, e principalmente, durante a sua vida útil. A característica de rugosidade da superfície do PP, normalmente definida através do denominado *space factor*, é determinante para a qualidade da impregnação do sistema dielétrico do capacitor. Por sua vez, uma impregnação com boa qualidade propicia um desempenho melhor sob o aspecto de se minimizar as atividades de DP. As demais características físicas são importantes para se garantir variações dimensionais mínimas e sob controle, permitindo-se conceber uma adequada manufatura e projeto. A pureza química está relacionada com as perdas dielétricas posteriormente obtidas para o capacitor.

Deve-se enfatizar que os processos de manufatura do PP são decisivos para a obtenção das características pretendidas. O PP pode ser fabricado pelos processos denominados *tentering* ou *blown-bubble*. Nos dois processos, o PP é bi-orientado, entretanto, estas técnicas resultam em diferentes propriedades relacionadas à morfologia inicial dos filmes.

No processo *tentering*, o filme é formado a partir de uma massa fundida de cadeias do polímero (*pellet*), fortemente extrudada através de aberturas

gradativamente estreitas, refrigerado, reaquecido e subseqüentemente estirado em duas direções para formar lâminas finas. O processo *blown-bubble* consiste na utilização do gás nitrogênio pressurizado no interior da bolha de PP para proporcionar a orientação cruzada (*cross machine orientation*). Esta técnica se aplica apenas ao PP.

Como antecipado, os PP manufacturados pelos processos supra descritos, possuem propriedades diferentes entre si, implicando em algumas particularidades na manufatura e características dos capacitores de potência. Não têm sido relatadas maiores restrições na utilização de qualquer deles, mas algumas características comparativas específicas têm sido apontadas, por fabricantes de capacitores, por exemplo:

- a) o filme *tentering* apresenta uma melhor uniformidade na espessura e permite um maior controle da capacitância dos capacitores.
- b) filme *blown-bubble* apresenta uma característica de rigidez dielétrica mais uniforme.

Algumas investigações [45,46] mais detalhadas têm sido efetuadas em capacitores de potência fabricados com os dois tipos de filme para uma melhor avaliação das suas performances, focando-se principalmente: perdas dielétricas, atividades de DP; ensaios de durabilidade. As implicações nos processos de manufatura dos capacitores também são discutidas.

Os fabricantes de PP comumente apresentam algumas instruções para uso desse polímero em capacitores. Estas instruções normalmente consistem na observância dos seguintes tópicos: interação com os Líquidos impregnantes; procedimentos de bobinamento dos elementos capacitivos em atmosfera limpa e com baixas tensões mecânicas; dimensionamento do fator de espaçamento dos capacitores e elementos capacitivos; e processo de impregnação.

Finalizando a dissertação sobre os filmes de PP, deve-se citar que a

morfologia e impurezas determinam ou caracterizam as propriedades já relatadas. Os estudos desenvolvidos sobre a estrutura do PP têm trazido informações fundamentais para possibilitar a obtenção de materiais cada vez mais apropriados para a manufatura dos capacitores de potência. Algumas dessas informações são apresentadas a seguir.

As propriedades mecânicas do PP são fortemente determinadas pelas regiões amorfas do polímero, decorrentes de uma provável cristalização secundária.

A cristalinidade, orientação e peso molecular exercem influência na suportabilidade à ruptura do filme de PP, sendo que, verifica-se melhor propriedade de estabilidade, após a impregnação, para filmes altamente cristalinos e orientados.

As resinas contêm vestígios de catalisadores da polimerização, além de outros materiais orgânicos ou inorgânicos de baixo peso molecular adicionados durante o processo de fabricação.

A influência direta desse material extrínseco é normalmente detectada pela medição das perdas dielétricas. Em síntese, pode-se afirmar que os parâmetros morfológicos determinantes para se obter filmes de PP superiores em todas as propriedades são: cristalinidade, orientação e peso molecular.

### **2.3.3 Interação entre impregnante e filme**

A análise das interações entre os dielétricos impregnante e filme polimérico é de fundamental importância para se garantir o bom desempenho do projeto de capacitores de potência. O principal requisito a ser cumprido é uma impregnação com a necessária qualidade, e essa está bastante relacionada com a velocidade e a quantidade de inchamento do filme sob esse processo.

Para a apresentação deste tópico, fica restrita a análise ao par M/DBT e PP, sendo esses dielétricos os de maior aplicação no projeto de capacitores objeto deste trabalho. Porém, deve ser ressaltado que dielétricos diferentes desses podem resultar em comportamentos bastante diferentes daqueles aqui apresentados.

O inchamento pode ser medido numa pequena amostra de filme mergulhada no impregnante, donde se obtém a grandeza de interesse através do aumento de peso ou da espessura do objeto. Apesar de muito importante, este método apresenta a desvantagem de não levar em conta as forças mecânicas presentes no capacitor, pois, no caso real, o filme não está livre para encolher ou inchar em todas as direções.

Devido ao interesse de se estudar o inchamento do filme de PP nas condições reais, ou próximas dessas, dois métodos foram desenvolvidos e são apresentados em [42].

Esses métodos consistem basicamente em medir a evolução da espessura de uma pilha de elementos capacitivos mantidos sob uma carga mecânica constante, ou da pressão em uma pilha de elementos capacitivos mantidos dentro de molduras fixas. Eles permitem avaliar a influência de diferentes parâmetros no inchamento do PP, tais como, impregnante, natureza do filme, temperatura de impregnação, pressão mecânica aplicada nos elementos capacitivos, temperatura e duração do tratamento térmico após impregnação e temperatura de secagem do filme.

Alguns resultados de experimentos são apresentados a seguir ilustrando a influência da natureza do PP, ou do seu processo de fabricação.

Os objetos de análise são uma pilha de elementos capacitivos com filme "A", fabricado pelo processo *blown-bubble* e outra pilha com filme "B", fabricado pelo processo *tentering*.

Demais dados:

- Pilha de elementos com o filme “A” – espessura pesada =  $15,3\mu\text{m}$  ; fator de espaçamento = 9%; 1.030 camadas de lâmina de alumínio ( $6\mu\text{m}$ ); 2.600 camadas de PP.
- Pilha de elementos com o filme “B” – espessura pesada =  $13,7\mu\text{m}$  ; fator de espaçamento = 13%; 1.150 camadas de lâmina de alumínio ( $6\mu\text{m}$ ); 2.840 camadas de PP.

Ambas as pilhas foram impregnadas com o M/DBT e foram comparadas entre si através dos métodos de ensaio previamente referidos [42], em temperaturas variáveis desde o ambiente até  $115^{\circ}\text{C}$ .

Os dois tipos de filme apresentaram comportamentos bastante distintos, donde pode-se destacar:

- O filme “A” não apresentou inchamento para temperaturas abaixo de  $60^{\circ}\text{C}$ , enquanto que o filme “B” apresentou uma grande quantidade de inchamento mesmo à temperatura ambiente.
- Nas temperaturas superiores, o filme “A” apresentou maiores incrementos de espessura ou pressão sobre a pilha. Ao contrário, o inchamento do filme “B” é praticamente independente da temperatura. Assim, o filme “B” é provavelmente mais relaxado do que o filme “A”, tendendo a encolher ou inchar sob os efeitos de pressão e temperatura.

Os resultados brevemente apresentados acima enfatizam a importância dos fenômenos interativos entre o PP e o M/DBT, ou entre outros pares de dielétricos para capacitores de potência.

Outro aspecto importante a ser avaliado é a eventual alteração de propriedades físicas desejáveis dos dielétricos após a impregnação e contato por longos períodos de tempo com o impregnante. Procedimentos de ensaio

[42] contemplando o armazenamento dos dielétricos em vasos fechados e em altas temperaturas têm sido efetuados para longas durações. Medições, para o PP, da tensão na ruptura e do alongamento na ruptura; e para o M/DBT, da acidez e do conteúdo de PP, têm demonstrado que não há alteração das propriedades físicas de ambos os dielétricos no uso em capacitores de potência.

## 2.4 Comentários finais ao capítulo

O grande desafio colocado ao longo do século (XX) aos especialistas da área tem sido o de tornar, o mais prático possível, os conceitos físicos básicos da grandeza capacitância, com um custo, anteriormente, viável, e atualmente, cada vez mais competitivo.

O caminho percorrido foi principalmente o desenvolvimento de materiais dielétricos mais eficientes para o propósito em questão. Aliás, esta área está tão próxima ao capacitor de potência que os fabricantes dos dielétricos possuem unidades fabris dedicadas a este mercado, sendo que a pesquisa e desenvolvimento é centrada no objeto final. Desta forma, fornecedores de filmes de PP e impregnantes constroem e testam capacitores de potência permanentemente para a avaliação dos seus produtos.

Neste processo de evolução do projeto e manufatura de capacitores, vários marcos poderiam ser citados, entretanto, opta-se aqui por mencionar apenas dois:

- a introdução do filme polimérico (PP),
- o processo de substituição do PCB pelo M/DBT.

A introdução do PP se deu de forma gradativa, primeiramente, em composição com o papel, posteriormente como único dielétrico sólido.

A primeira fase permitiu dobrar a densidade de potência. A principal

função do papel passou a ser possibilitar a impregnação adequada ao sistema dielétrico.

A segunda fase foi possível devido ao desenvolvimento de filmes de PP e métodos de impregnação adequados. Isto implicou uma grande redução das perdas dielétricas.

Os trabalhos desenvolvidos para a substituição do PCB propiciaram o surgimento de impregnantes biodegradáveis com características superiores também em outros aspectos. Esta transição também serviu para se adquirir um melhor conhecimento sobre a importantíssima função desempenhada pelo líquido impregnante no contexto do capacitor de potência.

Esses marcos citados ilustram a evolução dos projetos de capacitores buscando um melhor desempenho. Também mostram como é importante a interação entre dielétrico sólido e impregnante. Aliás, atualmente, o comportamento do sistema dielétrico do capacitor, durante e após a impregnação, parece depender mais da natureza do filme e das técnicas adotadas, do que do impregnante (M/DBT).

Portanto, para se avaliar o desempenho de capacitores de potência ao longo de sua vida, é de fundamental importância conhecer as bases teóricas que sustentam os projetos, os limites dos materiais utilizados, os fenômenos físicos envolvidos, os acessórios utilizados e respectivas funções, as condições de instalação e aplicação.

Quanto à aplicação, este termo inclui a finalidade a que se destina o banco de capacitores, a configuração elétrica adotada, o esquema de proteção adotado, entre outros. Algumas aplicações podem trazer solicitações explícitas bastante específicas, tais como: circuitos de ensaio de alta tensão ou de proteção contra surtos elétricos. Outras, aparentemente convencionais, podem implicar em solicitações também particulares em virtude da interação do capacitor com o sistema elétrico. Este é o exemplo da aplicação de capacitores

em sistemas na presença de distorções harmônicas, cujo exemplo clássico é o filtro de potência. Entretanto, várias outras situações podem implicar em circunstâncias similares devido, por exemplo, aos fenômenos de ressonância harmônica.

As solicitações adicionais impostas pelos componentes harmônicos são justamente a abordagem central deste trabalho. Esta abordagem requer a análise da degradação dos capacitores a longo prazo e da influência dos componentes harmônicos nesse processo. É nesta direção que se desenvolve os capítulos subsequentes.

## **CAPÍTULO 3 – DEGRADAÇÃO DOS CAPACITORES DE POTÊNCIA**

### **Introdução**

As alterações promovidas para os projetos de capacitores de potência nas últimas décadas implicaram uma substancial mudança na análise de fenômenos relacionados ao envelhecimento e/ou degradação desses equipamentos.

Até a geração dos capacitores com dielétrico misto, papel e filme, análises abordando a degradação devido a fenômenos térmicos eram bastante documentadas, o mesmo acontecendo com aquelas pertinentes a fenômenos dielétricos. Entretanto, com o advento dos capacitores só-filme, os quais apresentam perdas elétricas comparativamente muitíssimo reduzidas, passou-se a abordar com maior ênfase a chamada degradação dielétrica.

Naturalmente, a análise da degradação de capacitores de potência passou a ser feita através do estudo diferenciado de fenômenos já conhecidos e de novos fenômenos relativos aos capacitores só-filme. Neste conjunto de fenômenos físicos e químicos, alguns são considerados mais predominantes e, portanto, serão destacados para o entendimento do assunto proposto.

Sob a motivação supra apresentada, este capítulo apresenta numa seqüência didática uma descrição sucinta dos fenômenos e suas implicações inerentes à degradação dos capacitores de potência. Para isto, são apresentados os chamados efeitos das bordas dos eletrodos na distribuição de campos elétricos de forma aplicada aos capacitores de potência, a incidência das atividades de DP e respectiva influência da temperatura, os mecanismos físico-químicos da degradação dos dielétricos, citações e conclusões teóricas sobre esse tema ainda incipiente, descrições de experimentos desenvolvidos a fim de elucidar e fixar o conteúdo apresentado e, também, uma abordagem final mais direcionada para subsidiar o foco de estudo proposto.

### 3.1 Descargas parciais em capacitores de potência

#### 3.1.1 Efeito das bordas dos eletrodos

“Quando uma tensão alternada relativamente alta é aplicada a um capacitor de potência, o seu óleo impregnante é submetido a uma ruptura dielétrica local ou a um processo de Descargas Parciais (DP) devido aos campos elétricos elevados impostos às proximidades das bordas dos eletrodos.” [30]

Esta afirmativa, comumente encontrada na literatura, considera o sistema dielétrico do capacitor sem “pontos fracos”, ou seja, devidamente manufaturado para se obter elementos capacitivos, conexões e impregnação com a qualidade requerida.

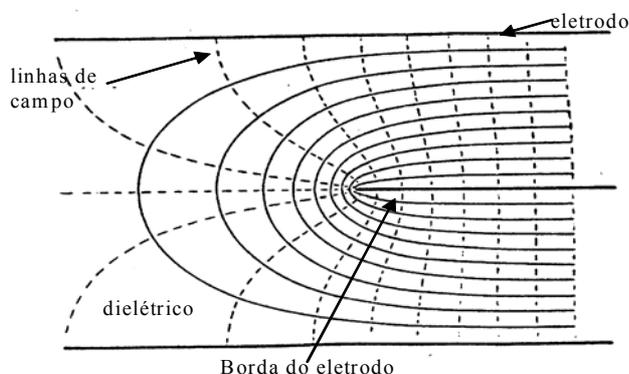
Agora, supondo que uma tensão alternada é aplicada de forma gradativa, e ainda, partindo-se de um valor menor que a tensão nominal do capacitor ( $V_n$ ) e aumentando-a lentamente, haverá um valor consistente a ser alcançado, no qual um número significativo de DP começará a ocorrer. Este valor de tensão é referido como a tensão de inepção de descargas parciais (TIDP) do sistema dielétrico do capacitor.

O valor da TIDP está relacionado com o valor da tensão suportável de longa duração, comumente citada como  $E_\infty$  e o estresse dielétrico nominal do sistema dielétrico dos capacitores.

Como já caracterizado, quando a tensão alterada aplicada a um sistema dielétrico de capacitores é aumentada lentamente, as DP deveriam ocorrer primeiramente na região de maior estresse dielétrico. No caso dos capacitores de potência, nas bordas dos eletrodos.

A seguir, é apresentada uma justificativa teórica simplificada para esta afirmação. A figura 3.1 ilustra o mapeamento do campo elétrico de um sistema

dielétrico de capacitores de placas paralelas, o que é representativo para um capacitor de potência real.



**Figura 3.1 – Mapeamento do campo elétrico num sistema dielétrico típico de capacitores de potência**

Fonte: Partial Discharge Considerations in Capacitor Design [30].

As linhas de campo equipotenciais são representadas como parábolas e a distância entre elas representa a medida do estresse dielétrico naquela região.

Para linhas equipotenciais mais próximas entre si, tem-se maior estresse dielétrico, e, obviamente, para linhas equipotenciais mais distantes entre si, tem-se menor intensidade de campo elétrico.

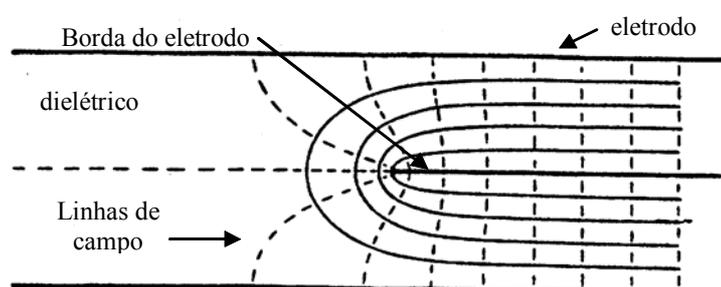
Nota-se que à direita da borda do eletrodo interno, figura 3.1, as linhas equipotenciais são igualmente espaçadas. Esta distância representa o estresse nominal do sistema.

Diferentemente, as linhas equipotenciais agrupam-se com espaçamentos não constantes entre si nas proximidades da borda do eletrodo interno, indicando maior estresse dielétrico nesta região.

Portanto, num sistema dielétrico de capacitores bem construído, espera-se que o início das atividades de DP esteja associado com as bordas das lâminas condutoras (eletrodos).

Estendendo-se a análise da relação entre a TIDP e as bordas dos eletrodos, tem-se como exemplo agora um segundo sistema dielétrico de capacitores apresentado na figura 3.2.

Este sistema possui um dielétrico de espessura menor e uma tensão aplicada, entre as lâminas eletrodos, inferior ao do exemplo anterior (figura 3.1), de modo a se obter o mesmo estresse dielétrico nominal.



**Figura 3.2 – Mapeamento do campo elétrico num sistema dielétrico de capacitores de potência com a espessura do dielétrico menor do que na figura 3.1**

Fonte: Partial Discharge Considerations in Capacitor Design [30].

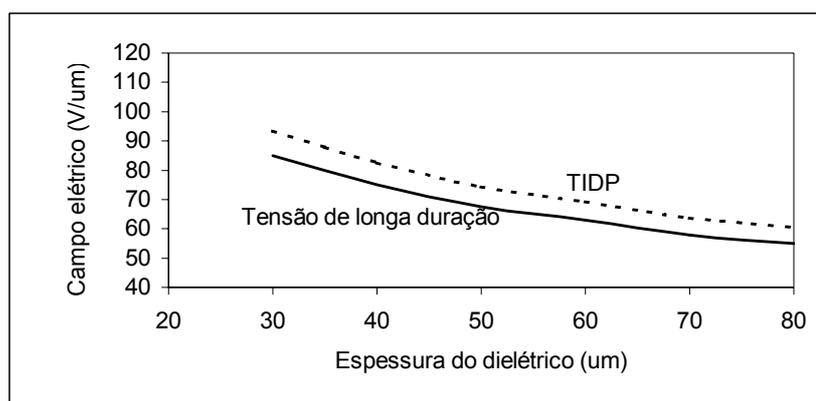
Como na análise anterior, os espaçamentos entre as linhas de campo equipotenciais tendem a se reduzir à medida que se aproximam das bordas das placas paralelas, as quais representam os eletrodos. Entretanto, a intensidade do campo elétrico (espaçamento entre as linhas equipotenciais) nas bordas já não é proporcionalmente tão mais elevada (espaçamento entre as linhas tão mais reduzido) quanto no exemplo anterior que utiliza um dielétrico de maior espessura.

Em outras palavras, o incremento na intensidade do campo elétrico na borda dos eletrodos, em relação à região à direita desta borda, é menor na ilustração da figura 3.2.

Como conclusão, pode-se afirmar que a TIDP por unidade de espessura do dielétrico é maior para um sistema dielétrico de capacitores com

menor espessura do dielétrico em relação a outro sistema com maior espessura.

Medições efetuadas para avaliar a variação da TIDP e da  $E_{\infty}$  com a espessura do dielétrico, em capacitores de potência do tipo só-filme, [26] ilustram também a relação entre estas tensões e estão mostradas na figura 3.3.



**Figura 3.3 – Variação da tensão de longa duração ( $E_{\infty}$ ) e da tensão de inibição de descargas parciais (TIDP) com a espessura do dielétrico**

Fonte: Power Capacitors [26].

### TIDP e TEDP

O conceito da TIDP foi colocado no tópico anterior como parâmetro para dissertar sobre o efeito das bordas dos eletrodos nos capacitores de potência. Entretanto, as propriedades do capacitor de potência referentes às DP devem ser descritas, no mínimo, pelo par TIDP e TEDP (Tensão de extinção de descargas parciais), em função da temperatura do dielétrico.

Os níveis de TIDP e TEDP são principalmente determinados pelos seguintes parâmetros:

- a) espessura do dielétrico,
- b) temperatura do dielétrico,

- c) tipo do líquido impregnante,
- d) tempo no qual a tensão aplicada é maior que a TIDP,
- e) tipo de borda do eletrodo,
- f) pressão hidrostática do fluido, e
- g) conteúdo de umidade residual no sistema dielétrico.

Desta forma, a determinação da TIDP e TEDP deve incluir um procedimento de ensaio específico, descrevendo principalmente a forma de aplicação da tensão e um valor de referência para a temperatura do dielétrico.

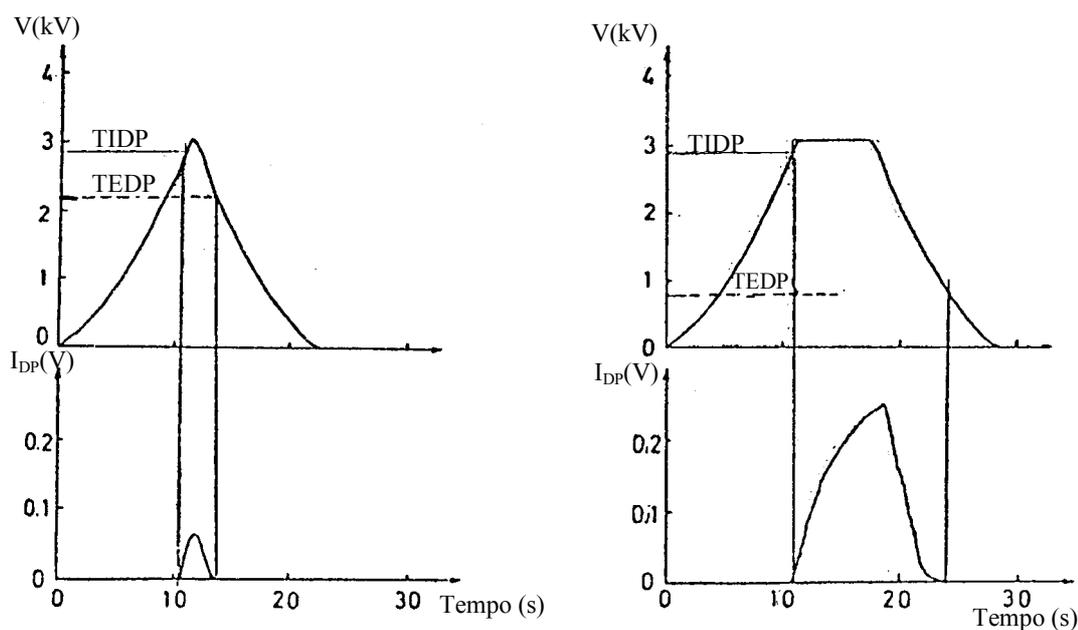
Normalmente, estes valores de referência são obtidos através de ensaio com tensão alternada com valores aplicados gradativa e linearmente em uma taxa, por exemplo, de 500V/s, sob temperatura controlada.

Alguns ensaios com capacitores de potência do tipo só-filme têm indicado valores comparativos como os mostrados a seguir [42]:

- a)  $T = 24^{\circ}\text{C}$ ; TIDP = 1,0 p.u.; TEDP = 0,76 p.u.
- b)  $T = -45^{\circ}\text{C}$ ; TIDP = 1,0 p.u.; TEDP = 0,51 p.u.
- c)  $T = -50^{\circ}\text{C}$ ; TIDP = 1,0 p.u.; TEDP = 0,46 p.u.

Deve ser ressaltado que, na prática, as formas de onda da tensão aplicada podem diferir significativamente das utilizadas nos ensaios. O tempo no qual o capacitor de potência é exposto às condições de DP é, também, uma variável importante para se determinar a TEDP, essa última normalmente mais sensível a estas variações do que a TIDP.

A figura 3.4 ilustra esta afirmação, mostrando diferentes critérios para aplicação de tensão durante ensaios.



**Figura 3.4 – Determinação da TIDP e TEDP através de diferentes métodos de ensaio**

Fonte: On the Meaning of PDIV and PDEV [48].

A figura 3.4 mostra claramente que a intensidade de DP acumulada implica uma menor TEDP, ou seja, incrementando ainda mais o tempo sob atividades de DP.

### 3.1.2 Influência da temperatura ambiente

Outro aspecto a ser analisado no estudo das atividades de DP em sistemas dielétricos de capacitores é o respectivo comportamento sob baixas temperaturas.

Normalmente, o ponto chave nesta análise é a viscosidade do óleo impregnante. Em baixas temperaturas tem-se um alto valor de viscosidade, o que significa baixo valor de fluidez. Inversamente, os valores de viscosidade são baixos em altas temperaturas.

Iniciando-se um processo de ruptura dielétrica local num sistema dielétrico de capacitores, o processo de DP progredirá rapidamente para altos valores de viscosidade do óleo impregnante, pois esta condição impede a

dispersão dos gases decompostos nas redondezas da falha incipiente. O mesmo processo ocorrerá de forma mais lenta para baixos valores de viscosidade, nos quais a dispersão dos gases decompostos na suposta ruptura dielétrica se dará mais rapidamente.

Portanto, a estabilidade dielétrica sofre forte influência com a variação da temperatura do óleo impregnante, podendo ser mais vulnerável em baixos valores de temperaturas.

### **3.2 Degradação dielétrica dos capacitores de potência**

Após terem sido apresentados os principais aspectos particulares de influência para as atividades de DP em capacitores de potência, pode-se passar agora à análise dos respectivos mecanismos de degradação dielétrica do mesmo equipamento.

As DP têm sido citadas na literatura como agentes de excitação em reações químicas que implicam na degradação dos capacitores de potência, principalmente do dielétrico sólido, ou seja, dos filmes de polipropileno (PP). Este processo pode ocorrer mesmo para baixos valores de DP, como 1pC [32-34].

O resultado final deste processo é a instabilidade dos sistemas dielétricos dos capacitores de potência e conseqüente redução do tempo de sua vida útil.

#### **3.2.1 Degradação do sistema dielétrico**

A degradação dos sistemas dielétricos dos capacitores sob a influência de estresses elétricos é comumente dividida em duas categorias, sendo:

- a) o impacto direto de elétrons em áreas do filme próximas à interface eletrodo – dielétrico, ou
- b) a ruptura do dielétrico em regiões com baixa densidade de DP, ocasionando plasmas localizados e conseqüente interação com a

superfície do filme de forma altamente agressiva.

A primeira alternativa está normalmente vinculada às falhas mais facilmente detectadas, devido a defeitos construtivos ou sistemas dielétricos em estágio já avançado de degradação. As descargas causam erosão, *tracking*<sup>1</sup> e decomposição generalizada de áreas localizadas, indicando um primeiro estágio para disrupções dielétricas iminentes.

A segunda alternativa pode ser considerada aquela de maior ocorrência nos capacitores modernos e é tratada como objeto principal da análise que se segue. Ela requer um raciocínio mais abrangente e o estudo de fenômenos que evidenciem a tese a seguir:

A atividade das cargas elétricas cria radicais livres<sup>2</sup> no filme polimérico que podem reagir com o oxigênio, se presente, ou umidade absorvidos, causando quebra de cadeias ou a formação de várias ligações covalentes intermoleculares no polímero.

Em outras palavras, a formação de radicais livres resulta adiante na propagação de reações químicas<sup>3</sup> subseqüentes, causando a deterioração das propriedades iniciais e desejáveis do filme polimérico.

Ainda, estes mecanismos de degradação podem ser analisados sob duas condições: estando o sistema dielétrico sob sobretensões oscilatórias de baixa frequência ou, sob a tensão de operação, incluindo sobretensões de relativa longa duração e mais moderadas.

### **O mecanismo de degradação sob sobretensões oscilatórias, por exemplo,**

---

<sup>1</sup> *Tracking* é a degradação progressiva da superfície de um material sólido isolante por descargas locais formando caminhos condutores ou parcialmente condutores. Isto normalmente ocorre devido à contaminação da superfície.

<sup>2</sup> Radical livre é qualquer átomo ou molécula com um elétron desemparelhado e eletricamente inerte, por exemplo, • H, • OH, • CH<sub>3</sub>, sendo suficientemente estável para ser detectado e investigado.

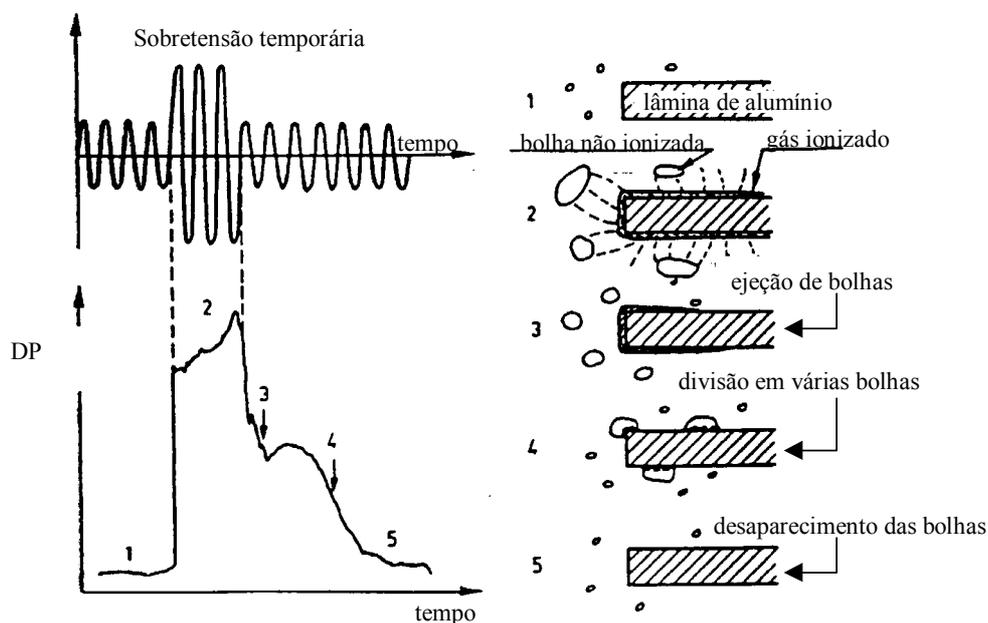
<sup>3</sup> Reação por radicais livres é o processo no qual os substratos, intermediários ou produtos finais são radicais livres.

### em ensaios de durabilidade [16,18,31]

Quando um estresse dielétrico maior é aplicado ao capacitor, podem ser originados gases, principalmente, nas bordas dos eletrodos. Este ambiente propicia o aparecimento de DP na camada de gás aderente ao eletrodo, posteriormente ocorrendo a ejeção de pequenas bolhas no líquido.

Após o desaparecimento da sobretensão, as DP desaparecem gradativamente de acordo com a eliminação da camada de gás em forma de bolhas. Este processo depende da característica, do impregnante, de permitir um rápido restabelecimento das propriedades dielétricas representada pela baixa alta viscosidade e alta absorção de gás.

Este mecanismo é mostrado seqüencialmente na figura 3.5.



**Figura 3.5 – Mecanismo de DP para uma sobretensão temporária imposta ao sistema dielétrico do capacitor**

Fonte: All Film Power Capacitors: Endurance Tests and Degradation Mechanisms [31].

### O mecanismo de degradação sob tensões operativas [31]

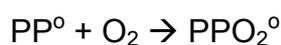
O sistema dielétrico do capacitor pode sofrer uma redução da sua



Entretanto, a formação de radicais livres  $R^\circ$  não pode ser atribuída à incidência de descargas elétricas nos capacitores atualmente fabricados (capacitores só-filme preenchidos com o impregnante M/DBT), mas sim, às reações de transferência de cargas nos eletrodos [33,34]. Portanto, a origem destes radicais  $R^\circ$  está muito provavelmente no impregnante, em seus aditivos ou até em algumas impurezas, tais como água ou oxigênio solubilizado. Genericamente, os radicais  $R^\circ$  são originados de moléculas mais propícias a serem oxidadas ou reduzidas nos eletrodos. Estas reações eletroquímicas<sup>4</sup> levam à formação de cátions e ânions. Esses radicais podem reagir diretamente com o polímero ou passar por reações químicas subseqüentes produzindo os radicais  $R^\circ$ .

A segunda etapa do mecanismo de decomposição dos radicais de PP ( $PP^\circ$ ) depende da presença ou não de oxigênio. Em princípio, pode-se pensar em mecanismos de decomposição sob ausência, deficiência, ou até na presença de oxigênio.

Por razões didáticas, é analisada uma suposta presença de uma concentração substancial de oxigênio, onde os macroradicaís  $PP^\circ$  produzem radicais peróxidos ( $PPO_2^\circ$ ) e, então, hidroperóxidos ( $PPO_2H$ ).



Estes hidroperóxidos decompõem-se criando outros macroradicaís livres, desta forma aumentando a concentração inicial desses e autoacelerando a oxidação do PP. Isto pode ocorrer por:

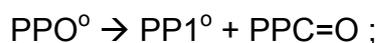
Decomposição térmica,




---

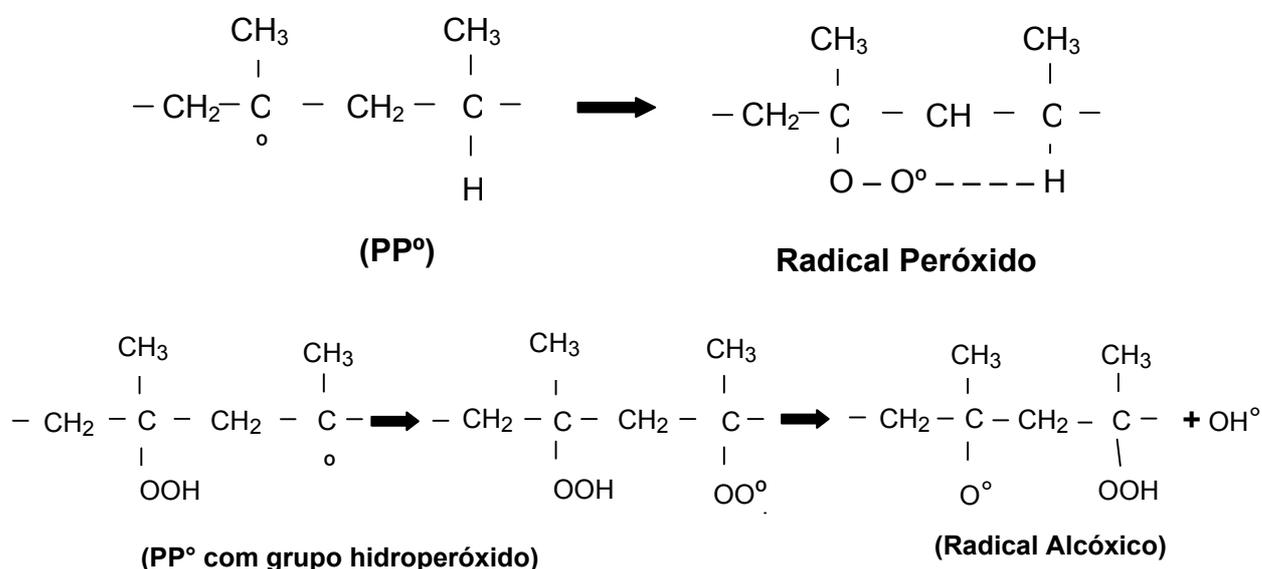
<sup>4</sup> Reação eletroquímica ou eletrólise é uma reação de oxi-redução provocada pela corrente elétrica.

ou pela reação de eliminação denominada por fissão  $\beta$  (Beta)<sup>5</sup>,



Onde  $\text{PP1}^\circ$  é um fragmento de uma macromolécula PP.

A figura 3.7 mostra exemplos de reações químicas que ilustram a decomposição de radicais de polipropileno na presença de oxigênio, na Fórmula de Kekulé.



**Figura 3.7 – Exemplos de reações químicas de degradação do PP na presença de oxigênio**

Fonte: Effect of Partial Discharges on Impregnated Polypropylene Films [34].

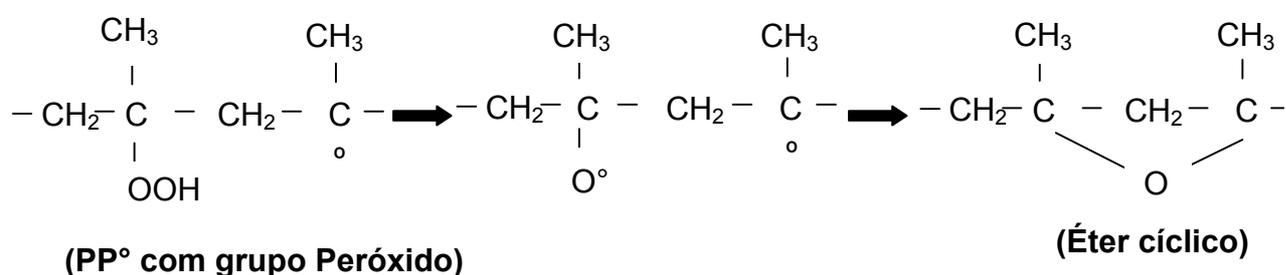
As conseqüências práticas são a fissão de cadeias macromoleculares, a formação de fragmentos de baixa massa molecular, suas solubilizações no líquido, a aquebradização do polímero e a redução da respectiva tensão de disrupção dielétrica.

Realmente, alguns estudos de degradação termo-oxidativa em polipropileno e/ou polietileno têm demonstrado que os radicais livres reagem

<sup>5</sup> A reação de eliminação denominada fissão  $\beta$  implica na quebra de cadeias originada em carbonos  $\beta$ .

prontamente com o oxigênio molecular ( $O_2$ ) formando radicais peróxidos [34]. Por sua vez, os instáveis radicais peróxidos combinam com grupos funcionais mais estáveis resultando em quebras de cadeias e redução do respectivo peso molecular.

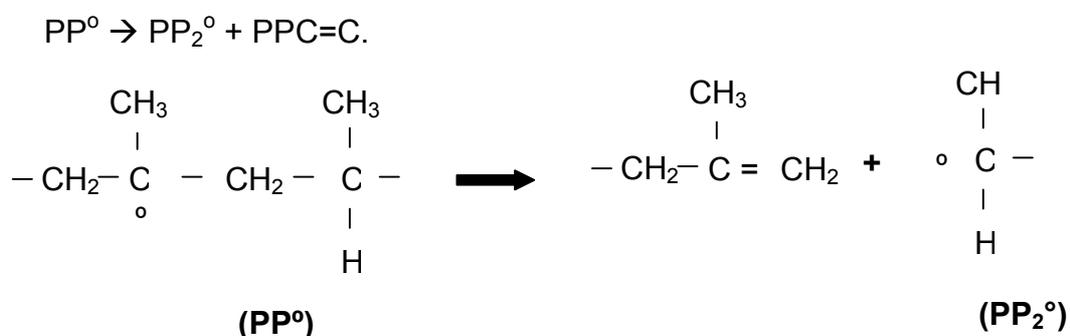
Por razões de objetividade, os casos de sistemas com traços de oxigênio não são motivo de análise neste estudo, entretanto, são mostradas, na figura 3.8, algumas possíveis reações, considerando-se os impregnantes aromáticos.



**Figura 3.8 – Exemplos de reações químicas de degradação do PP com traços de oxigênio**

Fonte: Effect of Partial Discharges on Impregnated Polypropylene Films [34].

Na maioria dos capacitores de potência comercializados, onde verifica-se a ausência ou deficiência de oxigênio, os radicais alquil terciários presentes no PP são submetidos à reação de eliminação denominada fissão  $\beta$ , cuja fórmula reduzida é mostrada a seguir e a respectiva Fórmula Kekulé é mostrada na figura 3.9.



**Figura 3.9 – Reação química de eliminação – Fissão  $\beta$  – sem a presença de oxigênio**

Fonte: Effect of Partial Discharges on Impregnated Polypropylene Films [34]

Desta vez o processo não é acelerado pelos hidroperóxidos e, desta forma, esse composto permanece com menor importância em relação às fissões da cadeia oxidativa. Portanto, é prevista uma redução da tensão de ruptura dielétrica do filme com uma taxa menor em relação àquela com a presença de oxigênio.

### **3.2.3 Degradação acelerada do polipropileno**

A análise físico-química dos filmes poliméricos envelhecidos, utilizados em capacitores de potência, tem mostrado que a sua degradação ocorre de maneira bastante heterogênea, ou seja, as propriedades do polipropileno são pontualmente reduzidas. Desta forma, a degradação poderia ocorrer apenas em alguns pontos.

Além disso, sob condições normais, as variações das características fundamentais dos filmes (ou dos sistemas dielétricos completos) ocorrem a longo prazo, dificultando o seu estudo. Isso leva ao desenvolvimento de métodos que permitam acelerar este processo de degradação, mantendo-se representativas as informações coletadas em relação aos fenômenos verificados na prática.

Uma técnica que pode ser utilizada para tal propósito é a degradação acelerada de filmes de polipropileno impregnados através da saturação do líquido impregnante com oxigênio. A validade deste método é discutida a seguir.

A questão que se apresenta é referente às influências da oxidação do líquido impregnante, bem como dos seus subprodutos, no processo de envelhecimento do filme.

Os processos de oxidação de líquidos impregnantes desenvolvidos em alguns experimentos [35] têm fornecido principalmente as seguintes informações:

- O processo não apresenta retardo inicial e não atinge o equilíbrio ao longo do tempo. Ao contrário, em ensaios de longa duração, a concentração de subprodutos aumenta mais rapidamente com o tempo. Isto sugere que o **processo de oxidação é auto-catalítico**.
- Sob **campo elétrico, o processo é incrementado**. Isto é indicado pelo aumento da concentração dos subprodutos, principalmente na primeira etapa da oxidação, e justifica-se pelas reações de transferência de cargas, as quais criam os radicais livres, iniciando-se a oxidação do impregnante, bem como, a degradação do filme.
- A concentração de subprodutos de oxidação implica um **aumento da condutividade elétrica do líquido impregnante**.

As investigações utilizando modelos de capacitores com impregnantes termo-oxidados têm indicado taxas de oxidação do líquido relativamente baixas, se comparadas com o decréscimo da tensão de ruptura dielétrica no mesmo período de ensaio. Isto leva a concluir que a oxidação térmica, no caso de líquidos saturados com  $O_2$ , não é um fator determinante da degradação elétrica de filmes poliméricos, em ensaios de envelhecimento acelerado. O fraco incremento verificado na degradação dos filmes poliméricos em líquidos fortemente oxidados é justificado apenas pelo aumento da condutividade elétrica do fluido, e não pelas propriedades químicas dos subprodutos da oxidação.

Outro aspecto conclusivo dessas investigações é o fato das regiões degradadas, ou termo-oxidadas, do filme das amostras sob ensaio estarem necessariamente vinculadas a altos estresses dielétricos, ou seja, entre os eletrodos ou próximo às suas bordas. Isto reafirma a idéia da não influência qualitativa do oxigênio ou da oxidação do líquido na deterioração química do filme polimérico.

### 3.2.4 Avaliação da durabilidade de filmes poliméricos sob DP

A avaliação da influência das DP sob o desempenho de sistemas de isolamento não é normalmente uma tarefa fácil devido à dificuldade de se determinar previamente parâmetros importantes como: a TIDP, os subprodutos da atividade de DP e respectivos efeitos e, outros.

Genericamente, pode-se concluir apenas sobre a forte dependência entre o tempo para ruptura e a espessura do dielétrico, sendo que, comumente, uma pequena variação na espessura do filme implica uma substancial variação do tempo para ruptura.

As investigações experimentais desenvolvidas para tal propósito [29,35], especificamente nos sistemas baseados em filmes poliméricos, normalmente indicam como a principal grandeza de avaliação o intervalo de tempo médio para atingir a ruptura dielétrica, o qual é medido com um estresse superior ao associado à TIDP, mas inferior à suportabilidade dielétrica do filme. Este critério visa assegurar que a degradação do filme sob ensaio seja unicamente devida a ação das DP e não seja influenciada por campos elétricos intensos aplicados à amostra.

Outras grandezas e informações normalmente monitoradas são a magnitude das DP, a distribuição da incidência das DP por ângulos de fase (da tensão senoidal aplicada), pulsos referentes a DP, além da observância do tipo de degradação encontrada nas superfícies dos filmes.

### 3.3 Síntese teórica

A teoria apresentada neste capítulo para a degradação dos capacitores de potência relaciona fortemente esta questão às atividades de DP. Esta relação é consistente com o efeito das bordas nos eletrodos dos capacitores e os mecanismos superficialmente citados ou supostos na literatura ao longo das últimas décadas [22-25,30].

Realmente, os fabricantes têm tentado intensivamente eliminar a ocorrência de DP durante as condições de operação normal dos capacitores, visto o efeito negativo na vida da isolação.

Foi mostrado que qualquer partícula localizada entre ou nas interfaces do eletrodo ou dielétrico, ou interna à isolação, é capaz de produzir DP localizadas sob estresses elétricos elevados. Estas descargas criam espécies ativas capazes de ataque agressivo, usualmente resultando na formação de componentes de baixo peso molecular, os quais surgem da degradação da isolação polimérica.

Estes fenômenos físico-químicos podem sofrer alterações em função de fatores como variações maiores de temperatura, estresses elétricos e a presença ou não de oxigênio.

Quanto ao último fator citado, é assumida apenas uma alteração na velocidade da ocorrência dos fenômenos de degradação dielétrica dos capacitores, preservando, praticamente, os aspectos qualitativos. Esta teoria valida as investigações de degradação acelerada utilizando-se impregnantes saturados em oxigênio.

Assumindo estas proposições teóricas, são apresentadas a seguir algumas informações obtidas de experimentos práticos os quais servem como elementos de exercício e validação dos conceitos ora apresentados.

### **3.4 Investigações experimentais**

Neste tópico pretende-se relatar e descrever algumas investigações desenvolvidas por instituições de pesquisa no tocante às atividades de DP e fenômenos de degradação em capacitores de potência.

O objetivo principal é aferir as afirmações teóricas descritas neste capítulo, bem como aplicá-las para o entendimento dos métodos de

investigação e análise dos resultados obtidos.

Para um melhor entendimento sobre o desenvolvimento das investigações citadas, são dadas informações básicas sobre as instituições respectivas, os arranjos e instrumentos utilizados, procedimentos e objetos sob ensaio.

Esta parte do estudo pode ser vista como uma oportunidade para sedimentar alguns conceitos não muito óbvios, já que pelo seu caráter ilustrativo, este tópico torna-se também um bom exercício de fixação dos conhecimentos.

### **3.4.1 Descargas parciais em modelos de capacitores só-filme com impregnantes de naturezas diferentes [33]**

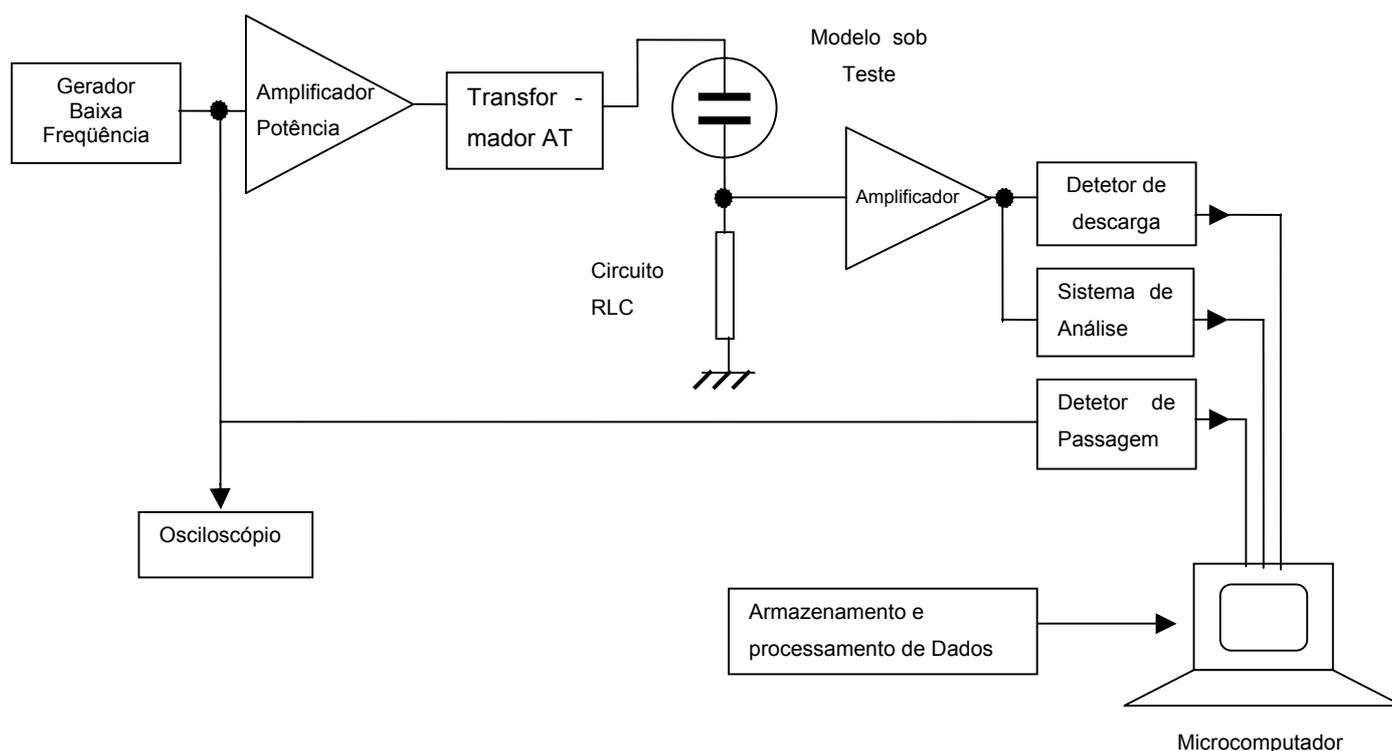
A investigação descrita a seguir foi desenvolvida no Laboratório de Eletrostática e Materiais Dielétricos, associado à “Université J. Fourier”, Grenoble, França.

O ponto central deste estudo é a avaliação de desempenho de capacitores só-filme (polipropileno) com dois tipos de líquidos impregnantes, um de natureza aromática e o outro alifática.

O objeto de estudo é um modelo de capacitor composto de um invólucro de politetrafluoretileno (PTFE), o qual contém dois eletrodos metálicos, planos e paralelos. A execução dos eletrodos é em alumínio bem polido com diâmetros de 10 e 40 mm. Estes eletrodos são separados por dois filmes de PP bruto, em ambos os lados, e com espessura média de 15  $\mu\text{m}$ .

Duas molas são utilizadas para pressionar os eletrodos nas lâminas de PP, as quais são previamente impregnadas. Este conjunto, imerso em líquido impregnante, resulta numa capacitância de aproximadamente 50 pF.

Os dois líquidos avaliados foram o n-decano, alifático, com grau de pureza maior ou igual a 99,3%, e o benziltolueno, aromático, tratado com terra ativada e filtrado através de filtro de porosidade de  $0,2 \mu\text{m}$ . O circuito de ensaio utilizado é mostrado na figura 3.10.



**Figura 3.10 – Circuito de ensaio**

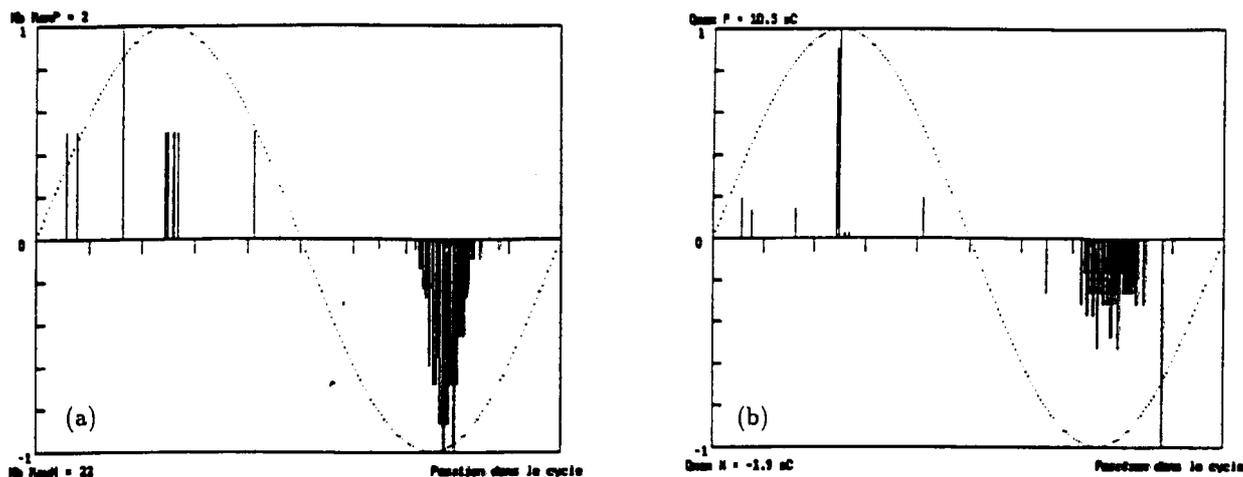
Fonte: Discharges in All-PP Films Model Capacitors [33]

A concepção do arranjo desta experiência não é abordada, entretanto, deve ser esclarecido que os componentes à direita do modelo de capacitor sob ensaio (incluindo o circuito RLC) formam o sistema de análise digital.

Este sistema obtém para cada descarga: o número seqüencial do ciclo senoidal no teste; sua posição de fase durante o respectivo ciclo da onda (cada ciclo é dividido em 250 frações, denominadas como janelas de fase); e a respectiva carga medida.

O método de ensaio constitui-se em elevar a tensão aplicada ao modelo de capacitor em degraus de 300 V. Quando da ocorrência de

descargas, elas foram analisadas durante um intervalo de 5 minutos com o mesmo valor de tensão. Um gráfico (3.1) de resposta típico deste ensaio é mostrado, onde são representados os números de descargas em função das janelas de fase e intensidade média relativa da descarga em função das janelas de fase.



**Gráfico 3.1 – Distribuição de descargas positivas e negativas em função das janelas de fase; (a) número relativo de descargas; (b) intensidade média relativa das descargas. Eixos (sem escala definida) vertical e horizontal, número de descargas em p.u. e janelas de fase no ciclo, respectivamente**

Fonte: Discharges in All-PP Films Model Capacitors [33]

Adicionalmente, as descargas foram posteriormente localizadas através da respectiva luz emitida utilizando-se conversores de imagem. Para tal, o eletrodo metálico de maiores dimensões foi substituído por uma lâmina de vidro coberta com uma camada condutora transparente.

Para a determinação adequada da TIDP, os valores encontrados foram qualitativamente avaliados no que se refere às distribuições por janelas de fase dos impulsos obtidos para vários valores de tensão. Isto previne a interpretação errônea de ruído no sistema de ensaio. Maior exatidão na obtenção da TIDP foi obtida usando-se duas características conhecidas dos DP: as taxas médias de repetição e as cargas médias medidas.

A seguir, a tabela 3.1 resume os valores das TIDP, das taxas de repetição e das cargas máximas respectivos aos dois líquidos utilizados nesta pesquisa, para várias amostras do modelo de capacitor sob investigação:

**Tabela 3.1 – Resumo dos principais resultados obtidos para cada impregnante**

Líquido Impregnante	TIDP (kV)	Taxa de Repetição (s <sup>-1</sup> )	Carga Máxima (pC)
Aromático	7 a 7,5	> 10	0,6 a 2 pC
Alifático	4,4 a 4,8	> 0,1	~ 1 pC

Fonte: Discharges in All-PP Films Model Capacitors [33].

Algumas informações adicionais aferidas ou obtidas através da análise dos resultados desta investigação devem ser ressaltadas, tais como:

- Para modelos com ambos líquidos impregnantes, as descargas foram visualizadas através do sistema de detecção de luz emitida, principalmente, nas bordas do eletrodo. Para o impregnante aromático foram observadas também descargas entre os eletrodos.
- Através de conversores de imagem e um dispositivo de filmagem, pôde ser observado que as DP tiveram início nas bordas dos eletrodos.
- Quanto à medição por detecção de luz emitida, verificou-se que para valores de tensões superiores a TIDP (7,8 e 5,7kV; impregnantes aromático e alifático, respectivamente), houve um incremento no número de pontos luminosos, bem como das suas intensidade de luz emitida, para ambos os impregnantes.

Portanto, a localização das descargas através da detecção de luz comprova experimentalmente o efeito das bordas dos eletrodos apresentado no item 3.1.

Numa segunda etapa da investigação, tomou-se como objeto de teste o modelo de capacitor impregnado com líquido alifático e variou-se a espessura

do elemento dielétrico, alterando-se o número de filmes de PP.

A tabela 3.2 mostra os resultados obtidos:

**Tabela 3.2 – TIDP x Espessura do Dielétrico**

Espessura do Dielétrico ( $\mu\text{m}$ )	13,6	27,2	40,8	54,4
TIDP (kV)	2,7 a 3,0	4,4 a 4,8	5,0 a 5,3	7,0 a 7,2

Fonte: Discharges in All-PP Films Model Capacitors [33].

Tomando-se os valores da Tabela 3.2, pode-se verificar que a TIDP é proporcional à raiz quadrada da espessura de polipropileno. Estes dados são consistentes com a afirmação de que o incremento da intensidade do campo elétrico na borda dos eletrodos para dielétricos de espessuras menores é proporcionalmente menor, como descrito em 3.1.

Por último, outra importante informação obtida através dessas investigações foi a não variação significativa do valor da TIDP dentro da faixa de temperatura de 20 a 80° C, donde pode-se inferir uma significativa estabilidade térmica dos modelos ensaiados.

#### **3.4.2 Efeitos das descargas parciais em filmes de polipropileno impregnados [34]**

Esta investigação também foi desenvolvida no Laboratório de Eletrostática e Materiais Dielétricos associado à “Université J. Fourier”.

O intuito principal foi conhecer melhor os fenômenos relacionados aos mecanismos de degradação dos filmes de PP devido a descargas de baixa magnitude observadas para níveis de tensão ligeiramente superiores à TIDP.

O objeto de ensaio foi um filme de PP de espessura igual a 13,6  $\mu\text{m}$  colocado entre um eletrodo plano e outro esférico de aço inoxidável com diâmetro de 2,5 mm. A célula de ensaio foi construída em politetrafluoretileno (PTFE), a qual foi preenchida com o líquido impregnante M/DBT.

O sistema de medição e armazenamento de dados utilizados foi o mesmo descrito na investigação anteriormente estudada [33]. A localização posterior das descargas também foi realizada através de uma câmera equipada com uma janela de fibra ótica, substituindo-se o eletrodo metálico plano por uma lâmina de vidro revestida por uma camada condutora e transparente.

Ainda, os filmes foram analisados utilizando-se um espectroscópio tipo FTIR (espectrômetro IRTF com um microscópio de tecnologia espectral em IR – infravermelho).

Na primeira etapa da investigação procurou-se avaliar a dependência das características das DP em relação ao valor da tensão aplicada.

Para o sistema dielétrico considerado, a TIDP medida foi igual a 1,6 kV. Então, optou-se por medir as respectivas cargas para tensões entre 1,6 e 2,4 kV.

Destas medições, pôde-se verificar que as cargas constatadas para as DP foram sempre baixas, normalmente  $< 2$  pC, desta forma, compatível com a condição discutida em 3.2. A taxa de repetição das descargas aumentou proporcionalmente com a tensão, sendo que para o valor de tensão aplicada igual a 2,5 kV eficaz, esta grandeza tornou-se maior do que a faixa do detetor utilizado, i.e., maior do que 2,4 kHz. As cargas médias apresentaram-se independentes da tensão aplicada e com valores de 0,2 e 0,4 pC para descargas positivas e negativas, respectivamente.

Para consolidar os resultados expostos acima, deve-se citar que numa série de 1000 descargas registradas sem interrupção, os valores máximos de carga foram 0,6 e 4 pC, para a tensão aplicada de 1,6 e 2,4 kV, respectivamente.

A segunda etapa desta investigação objetivou a medição da resistência à disrupção de filmes de PP após degradação, comparando-a aos valores anteriormente encontrados para o mesmo material, porém, novo.

O processo de envelhecimento, baseado na primeira etapa da investigação, consistiu da aplicação de uma tensão de 2 kV eficaz (25% maior do que a TIDP) durante 30 minutos. A somatória dos valores das cargas das descargas durante este processo foi registrada.

Logo após, a tensão de disrupção era medida utilizando-se a mesma célula com uma tensão de corrente contínua, com forma de onda tipo rampa e taxa de crescimento igual a 500 V/s. Vale observar que nesta medição não se modifica o estágio de degradação do filme.

O procedimento foi repetido para o mesmo líquido impregnante, agora aditivado com epóxi. Nesta condição, o número e a carga das descargas mostraram-se maiores.

A tabela 3.3 resume os resultados desta etapa da investigação:

**Tabela 3.3 – Avaliação do envelhecimento de filmes de PP para o impregnante M/DBT com e sem aditivos a base de epóxi**

Impregnante	$\Sigma$ Cargas Medidas (nC)	Tensão Disrupção (kV)		Variação negativa da Tensão de Disrupção (%)
		Filme PP novo	Filme PP envelhecido	
BenzilTolueno	1	9	5,5	39
BT + epóxi	10	9	7	22

Fonte: Discharges in All-PP Films Model Capacitors [33]

Na terceira e última etapa desta investigação, focou-se a análise espectroscópica FTIR de filmes degradados. Devido às interferências no sistema de micro-análise, não foi possível utilizar filmes finos como o de espessura igual a 13,6  $\mu\text{m}$ . Entretanto, foram estudados filmes de 65  $\mu\text{m}$ , envelhecidos com uma tensão aplicada de 8 kV, aplicando-se os mesmos procedimentos já mencionados para o filme de 13,6  $\mu\text{m}$ .

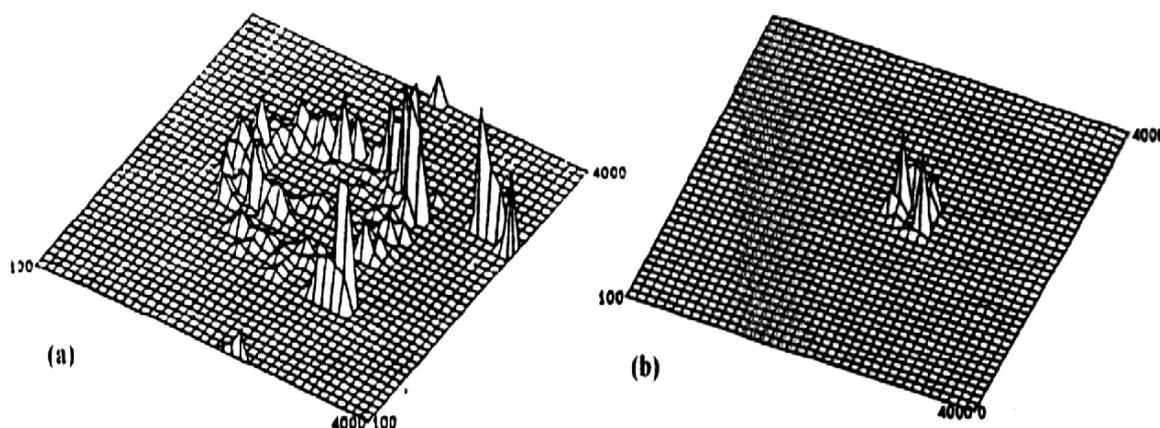
O líquido impregnante utilizado foi o M/DBT, obtendo-se um somatório de cargas, devido às descargas, menor que 10 nC.

Pôde-se verificar algum ataque químico localizado em torno da área de contato do eletrodo esférico.

Para uma análise microespectroscópica, o filme foi colocado num dispositivo de mapeamento computadorizado, com incrementos de 100  $\mu\text{m}$  de comprimento nas duas direções e o espectro foi obtido com uma abertura de 100 x 100  $\mu\text{m}$ .

No espectro FTIR foi observado um pico de absorção<sup>3</sup> a 1020  $\text{cm}^{-1}$  associado com outra faixa a 670  $\text{cm}^{-1}$ . As maiores absorções foram encontradas em alguns pontos num círculo de diâmetro aproximadamente igual a 2,2 mm, como indica a figura 3.11(a).

Estas faixas de picos de absorção têm sido freqüentemente observadas em sistemas dielétricos compostos de PP impregnados por vários líquidos de diferentes naturezas.



**Figura 3.11 – Representação tridimensional da diferença entre a absorção para um filme de PP, espessura igual a 65 $\mu\text{m}$ , impregnado com (a) M/DBT e (b) M/DBT aditivado em epóxi**

Fonte: Effect of Partial Discharges on Impregnated Polypropylene Films [34].

<sup>3</sup> Os picos de absorção são regiões do espectro, comprimento de onda, onde determinada espécie apresenta absorção.

Não foram encontrados picos de absorção na área de contato do eletrodo esférico com o filme. Portanto, pôde-se excluir a hipótese de que a degradação estudada seria causada pela condução elétrica no filme sob altos campos elétricos. Desta forma, reafirmou-se a ação das DP neste processo de degradação, de maneira consistente ao apresentado em 3.2 para o fenômeno de degradação do PP.

Quando se utilizou um aditivo à base de epóxi para o impregnante M/DBT, a área do filme degradada foi dada por um círculo de diâmetro igual a 0,6 mm e localizada ao redor da área de contato da esfera como ilustra a figura 3.11(b). Houve, obviamente, uma redução significativa da superfície degradada.

Como forma de reforçar estas deduções, os mesmos procedimentos de ensaios foram desenvolvidos com o impregnante n-decano aditivado da mesma forma, ou seja, à base de epóxi. Todas as observações feitas anteriormente, para o impregnante M/DBT aditivado à base de epóxi, são aplicáveis a esta última verificação. Enfatizando, a forma de degradação e as faixas de absorção foram idênticas, independentemente do tipo de impregnante básico utilizado, o que evidencia o processo de degradação do PP, como apresentado em 3.2.

Por último, uma análise global desta investigação, que consistiu de três etapas, permite as seguintes afirmações:

- O estudo de descargas em PP impregnados não possibilitou relacionar a natureza dos grupos químicos observados nas áreas degradadas com o decréscimo da tensão de ruptura do filme.
- A análise e medição da área degradada pela técnica FTIR foram bastante consistentes com o estudo efetuado pela técnica de luz emitida.
- A ação dos aditivos à base de epóxi no sentido de atenuar o decréscimo da tensão de ruptura após o processo de envelhecimento, aparentemente, está relacionada com as prováveis reações ocorridas

com as espécies formadas pelas descargas, originando depósitos detectados sobre o filme. Desta forma, haveria uma barreira para a degradação do PP.

Essas afirmações contribuem para a consolidação da teoria apresentada para a degradação do PP do capacitor através das atividades de DP de baixos níveis.

### **3.4.3 Degradação de filmes de polipropileno impregnados em corrente alternada [32]**

Trata-se de outra investigação desenvolvida no Laboratório de Eletrostática e Materiais Dielétricos – Grenoble – França, desta vez em conjunto com a Varilec – França.

O tema em questão é a avaliação da degradação de filmes de PP impregnados sob estresse dielétrico de corrente alternada, com uma variante: a utilização de aditivos epóxidos. Isto foi desenvolvido a partir do envelhecimento do PP sob alto estresse elétrico e posterior verificação de grandezas tais como, perdas elétricas, tensão de ruptura local, vida útil, bem como análises físico-químicas.

O arranjo de ensaio consiste de dois filmes de PP pressionados, através de molas, entre dois eletrodos de alumínio com diâmetro igual a 8 mm. Os filmes de PP possuem espessura igual a 15  $\mu\text{m}$  e são impregnados por líquido desgaseificado introduzido numa célula de teflon sob vácuo. O líquido impregnante é uma mistura que consiste principalmente de mono e dibenziltolueno (M/DBT), purificada pela passagem através de uma coluna de alumina e filtrada.

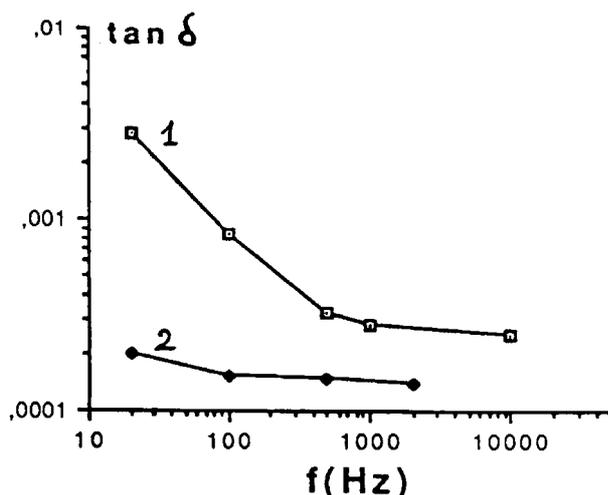
As variações ensaiadas para esse impregnante são M/DBT puro (líquido A) e M/DBT com epóxido (líquido B).

O envelhecimento do PP foi efetuado com um estresse dielétrico de

aproximadamente 137 kV/mm (tensão aplicada de 4,1 kV) a 80° C, sendo a atividade de DP controlada por um circuito de detecção tipo RLC com sensibilidade igual a 1 pC.

A fim de avaliar ainda a influência de impurezas, os modelos de capacitor foram ensaiados com líquidos impregnantes puros, impregnantes contendo  $10^{-4}$  mol/L de picrato de tri-isoamilamônio (PTIA), impregnantes saturados em água ( $\text{CH}_2\text{O} = 1,6 \times 10^{-3}$  mol/L) e impregnantes saturados em oxigênio.

O primeiro aspecto analisado, após o envelhecimento dos capacitores modelos, foi o relativo às perdas elétricas dos filmes de PP. As perdas elétricas foram medidas indiretamente com uma célula para medição de condutância e, de uma maneira geral, o aumento do fator de perdas<sup>6</sup> ( $\text{tg } \delta$ ) foi pequeno, mesmo para modelos que sofreram disrupção dielétrica num período relativamente curto de tempo. Como exemplo, é ilustrada no gráfico 3.2, a variação do fator de perdas verificada para a condição de líquido saturado em oxigênio.



**Gráfico 3.2 – Variação do fator de perdas ( $\text{tg } \delta$ ) em função da frequência para um filme de PP de espessura igual a 13,6  $\mu\text{m}$  após envelhecimento (curva 1); e novo (curva 2)**

Fonte: ac Degradation of Impregnated Polypropylene Films [32].

<sup>6</sup> O fator de perdas ( $\text{tg } \delta$ ) representa o grau de perdas de energia elétrica de um isolador e é um teste padronizado para avaliar a performance de materiais dielétricos e sistemas de isolamento.

A informação básica obtida nesta análise é que o aumento do fator de perdas dos capacitores modelos se deveu principalmente ao aumento da condutividade do líquido e, em bem menor proporção, ao aumento das perdas dielétricas do filme.

Em outras palavras, as falhas ou degradações ocorridas não podem ser atribuídas diretamente à presença de impurezas no impregnante que, por sua vez, está relacionada com o aumento do fator de perdas do capacitor modelo.

Portanto, pode-se realmente atribuir a criação dos radicais livres  $R^\circ$  às impurezas do impregnante, mas a degradação do PP depende de uma segunda etapa, ou seja, das reações orgânicas, como descrito em 3.2.2.

O estudo estatístico da duração da vida dos capacitores modelos não foi possível devido ao longo tempo (maior de 1800 horas) verificado para o caso de impregnantes purificados e o número limitado de células de ensaio (16 unidades).

Para uma sinalização do grau de envelhecimento dos modelos ensaiados, foram medidas as tensões de disrupção utilizando-se a aplicação de uma tensão alternada no modo “rampa” na taxa de 500 V/s. Os valores médios encontrados foram 8,7 kV para o líquido A, e 11,1 kV para o líquido B. Para a quase totalidade dos casos, a disrupção ocorreu na periferia da área sob campo elétrico ou entre os eletrodos.

Outra verificação consistiu na medição da suportabilidade dielétrica local dos filmes de PP impregnados, extraídos dos modelos ensaiados. Vários extratos do filme foram ensaiados, classificando-os em regiões submetidas (CE) ou não a campos elétricos (NCE), bem como com relação ao líquido impregnante utilizado.

A tabela 3.4 mostra os valores médios medidos para as tensões de disrupção:

**Tabela 3.4 – Valores médios da tensão de ruptura dos filmes de PP impregnados**

Item	Tensão de Ruptura (V)			
	Líquido A		Líquido B	
Antes do envelhecimento	8750		8750	
Após o envelhecimento	Área NCE	Área CE	Área NCE	Área CE
Líquidos puros	8650	8700	8600	8750
Líquidos + TIAP	7750	6950	8550	8150
Líquidos saturados em água	8250	6950	-	-
Líquidos saturados em O <sub>2</sub>	8300	6050	8050	8100

Fonte: ac Degradation of Impregnated Polypropylene Films [32].

Além dos dados mostrados na tabela 3.4, pode-se ainda ressaltar as seguintes verificações:

- Para os líquidos com o eletrólito PTIA, alguns pontos da região NCE apresentaram uma tensão de ruptura menor (7%). Entretanto, esta variação foi bastante superior no caso da região CE (20%).
- Para os líquidos saturados em oxigênio, a redução média da tensão de ruptura verificada na região CE foi de aproximadamente 30% no caso do líquido A. Para o líquido B a variação da mesma medida foi irrelevante para as regiões CE e NCE.

Essas verificações enfatizam o papel de excitação das reações químicas desempenhado pelas DP, com resultados práticos nas áreas denominadas CE.

Partindo-se agora para uma observação visual do PP envelhecido durante um período de tempo relativamente longo, observa-se que a degradação gradativa do filme ocorreu sobre um perímetro circular na periferia da região sob estresse elétrico e sempre sob os eletrodos. Esta degradação apresentou-se superficial (camada < 1  $\mu\text{m}$ ) sem atingir o outro lado do filme.

Para impregnantes com aditivos em epóxi, os filmes apresentaram uma

menor degradação, sendo também a área atingida menor. Para o PP submetido ao envelhecimento de curta duração (líquido saturado em oxigênio), não foi visualizada a degradação do filme, apesar da grande atenuação medida para a suportabilidade dielétrica.

Isto implica uma independência entre erosão e baixa suportabilidade dielétrica, o que foi comprovado experimentalmente. Filmes erodidos, ou não, apresentaram a mesma distribuição estatística para a tensão de disrupção.

Outro ponto de grande importância investigado foi a relação da tensão aplicada (ou estresse dielétrico) e o grau de envelhecimento verificado. Para tal, foram utilizados capacitores modelos impregnados com o líquido A (sem aditivos) saturado em oxigênio. A tabela 3.5 apresenta os valores médios do tempo de vida dos modelos sob ensaio, bem como, a tensão de disrupção de extratos dos filmes em regiões sob estresse dielétrico (CE).

**Tabela 3.5 – Tensões de disrupção de filmes de PP para diferentes estresses elétricos**

<b>Tensão Aplicada (kV<sub>eficaz</sub>)</b>	<b>2</b>	<b>3,6</b>	<b>4,1</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<i>Gradiente de tensão (V<sub>eficaz</sub>/μm)</i>	67	120	135	167	200
Tempo de vida médio (h)	3100	85	25	12	0,3
Tensão de disrupção do PP (V)	7000	6800	6100	6400	8300

Fonte: ac Degradation of Impregnated Polypropylene Films [32].

A partir da análise da tabela 3.5 pode-se desenvolver uma analogia entre os resultados obtidos para o maior e menor gradiente de tensão. Para gradientes elétricos entre 67 e 135 kV/mm, o tempo de vida parece depender da tensão aplicada. A disrupções dos capacitores modelos parecem ocorrer quando a suportabilidade dielétrica do PP atinge um certo valor crítico.

Ao contrário, o envelhecimento em 200 kV/mm induz um tempo de vida muito pequeno, sem uma redução acentuada da suportabilidade dielétrica residual. Isto pode ser justificado pela detecção de descargas parciais com

valores maiores para este nível de estresse dielétrico.

Para confirmar a dependência do grau de envelhecimento do capacitor, ou do PP, em relação ao gradiente de tensão aplicado, efetuou-se o mesmo ensaio anterior, porém com o impregnante pressurizado com um valor de 4 MPa. A tabela 3.6 mostra que o envelhecimento para o gradiente de 200 kV/mm foi nitidamente afetado pela pressurização imposta, ao contrário do ocorrido para o gradiente de 135 kV/mm. Em particular, a suportabilidade dielétrica atingiu o mesmo nível para os dois gradientes, indicando um processo de envelhecimento similar quando DP não podem se desenvolver por um longo período de tempo.

**Tabela 3.6 – Tempo de vida e tensão de ruptura de filme de PP impregnado após o envelhecimento com uma pressão hidrostática de 4 MPa**

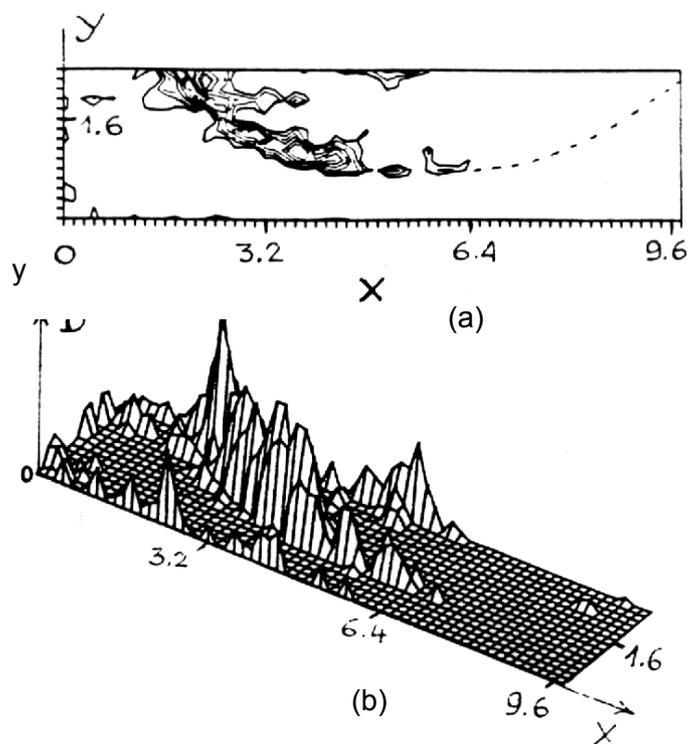
Tensão aplicada (kV eficaz)	Tempo de vida (h)	Tensão de ruptura (v)
4,1	25	6200
6	11	6200

Fonte: ac Degradation of Impregnated Polypropylene Films [32]

Esta investigação é bastante rica na identificação dos mecanismos de degradação sob sobretensões temporárias, por exemplo, estresses dielétricos maiores que 2,0 p.u., e sob sobretensões operativas, para valores menores de estresses dielétricos. Para estresses elétricos menores prevalece a degradação do PP, conforme apresentado em 3.2.

Por último, para se obter mais informações sobre o mecanismo de degradação do PP sob estresses térmico e elétrico, foram medidas algumas características físico-químicas após o envelhecimento do filme na condição de curta duração, isto é, com o impregnante A saturado em oxigênio.

Através de microespectroscopia FTIR e um dispositivo de mapeamento, foram obtidos os gráficos da distribuição da faixa de absorção a  $1710\text{ cm}^{-1}$  da oxidação do PP, conforme ilustra a figura 3.12.



**Figura 3.12 – (a) Distribuição da absorção a  $1710\text{ cm}^{-1}$  na degradação do PP. O círculo pontilhado circunscreve a borda da área sob campo elétrico; e (b) Respectiva representação tridimensional. Os valores dos eixos X e Y estão indicados em mm.**

Fonte: ac Degradation of Impregnated Polypropylene Films [32].

A Figura 3.12(a) mostra que os grupos oxidados de PP são encontrados próximos à borda do eletrodo na área sob estresse elétrico. A representação tridimensional da figura 3.12 (b) caracteriza a heterogeneidade da oxidação do polímero. A fraca intensidade das faixas de oxidação na maioria dos pontos dificulta a avaliação do fenômeno e pode ser atribuída à dissolução dos elementos subprodutos no impregnante. Uma cromatografia permitiu medir uma redução média da massa molecular do polímero de aproximadamente 40% na área oxidada, sendo que não foi verificada oxidação na parte central da área sob estresse elétrico. Isto foi atribuído à falta de oxigênio, o qual é consumido na periferia do eletrodo.

#### 3.4.4 Síntese das observações experimentais

Através das investigações experimentais anteriormente apresentadas convenientemente de maneira parcial e resumida, algumas observações valem ser ressaltadas. Tentar-se-á expor estas observações de maneira didaticamente organizada para que se permita um correlacionamento facilitado com a teoria pertinente apresentada para a degradação de capacitores de potência:

- O envelhecimento elétrico dos filmes de PP em capacitores de potência é fortemente incrementado por impurezas, tais como, eletrólitos, água ou oxigênio, adicionadas ao líquido impregnante.
- Entretanto, a oxidação térmica do impregnante e do filme não tem papel significativo na degradação dielétrica dos capacitores de potência (modelos) ensaiados.
- A degradação elétrica dos filmes de PP segue o mecanismo geral de oxidação dos polímeros, sendo que o campo elétrico dá início ao processo pela criação de radicais primários ( $R^\circ$ ).
- Modelos de capacitores envelhecidos apresentam uma tensão de disrupção dos filmes de PP consideravelmente reduzida nas regiões sob estresse elétrico. Entretanto, esta grandeza não sofre variação fora destas regiões.
- A degradação dos filmes de PP para vários experimentos ocorre com DP de baixos valores de carga, isto é, da ordem de unidades de pC. Mesmo com cargas acumuladas de baixos valores, verifica-se uma redução considerável da tensão de disrupção dos filmes.
- Filmes de PP degradados não apresentam necessariamente danos aparentes nas superfícies. A redução da sua suportabilidade dielétrica pode ser justificada pelas mutações químicas do material. A propósito, a medição da tensão de disrupção é normalmente um dos ensaios

adotados no controle de qualidade durante a fabricação de filmes poliméricos para capacitores [43-45].

- O desempenho do impregnante possui uma forte influência nas atividades de DP em capacitores de potência. Para impregnantes em M/DBT com aditivos a base de epóxi, tem-se observado uma degradação mais atenuada do PP, mesmo para valores e frequência de descargas comparativamente maiores. Isto pode ser justificado pela observação de que nos capacitores cujos líquidos impregnantes são aditivados a base de epóxi, a respectiva ação das DP, quando prolongadas, pode formar um filme fino através da polimerização da molécula de epóxi sobre a superfície do filme de PP.
- Os aditivos em epóxi podem reduzir significativamente o envelhecimento dielétrico do PP, mas não têm influência sobre a sua oxidação térmica.

Enfim, os fenômenos de degradação de capacitores de potência a longo prazo têm sido investigados sob o prisma da degradação dielétrica do PP. Várias outras conclusões importantes, porém, específicas, podem ser obtidas a partir da correlação dos dados coletados em ensaios. Uma correlação emergente e que tende a ser bastante exercida é aquela entre o espectro de fase e classificação das DP.

### **3.5 Medição de DP para diagnóstico em capacitores de potência**

A seguir, é descrita sucintamente uma força tarefa proposta e desenvolvida pelo CIGRE, SC15 para desenvolver investigações de DP em capacitores de potência reais, visando, concluir sobre os métodos e circuitos de ensaios atuais para medição de DP, determinar a influência dos ensaios de durabilidade e defeitos de manufatura sobre as atividades de DP e, propor recomendações sobre as medições de DP [37].

Como motivação para tal decisão, foi citado o interesse em monitorar e diagnosticar o estado do sistema dielétrico do capacitor a fim de se reduzir as

taxas de falhas, principalmente devido aos altos valores atuais de potência reativa por unidade. Adicionalmente, pode-se verificar o grande desenvolvimento dos métodos de medição de DP, através de técnicas digitais que possibilitam maiores informações sobre o fenômeno.

Como pode ser visto, os objetivos da força tarefa a ser descrita e deste trabalho não são coincidentes. Entretanto, ambos utilizam o conhecimento relativo às atividades de DP em capacitores. Como consequência, alguns conceitos e condições assumidos neste capítulo são evidenciados e/ou suportados, na prática, pelos resultados das investigações desenvolvidas pelo CIGRE.

Deve ser dada atenção especial ao conceito de nível de atividade de DP e estresses dielétricos respectivos.

Os objetos utilizados para investigação foram capacitores especialmente manufaturados com diferentes tipos de bordas de eletrodos, configurações internas variadas, sendo que alguns propositalmente apresentavam defeitos internos.

As investigações foram realizadas em 3 diferentes laboratórios, utilizando-se 3 diferentes circuitos de medição. Os níveis de ruído na medição variaram em função do arranjo de ensaio, sendo esses de 5pC, 20 a 50pC (simulando condições reais de medição em campo) e 100 pC.

Os ensaios efetuados consistiram de envelhecimento, aplicação de sobretensões, elevação de temperatura e verificação de defeitos pré-conhecidos. Durante as medições de DP, alguns parâmetros foram medidos ou calculados, por exemplo: nível de ruído (pC), TIDP ( $\%V_n$ ), magnitude dos pulsos de DP (pC), tensão de ruptura (kV), ângulo de fase dos primeiros pulsos de DP em cada ciclo da tensão aplicada, energia de DP, número de DP, faixa do espectro da DP, entre outros.

Os ensaios de envelhecimento foram efetuados com diferentes valores de temperatura e estresse dielétrico. Genericamente, os ensaios foram realizados em temperaturas de 20 a 75°C, com tensões aplicadas de  $1,4V_n$  ou maior, e duração entre 1 e 5.500h.

Ainda, deve ser destacado que foram medidas duas faixas de valores para a TIDP. A primeira, para os chamados pulsos esporádicos, com valores de 1,6 a 2,0 p.u. (em relação a  $V_n = 1,0$  p.u.) e DP associadas com magnitudes máximas de 10 a 40 pC. A segunda faixa da TIDP, para os denominados pulsos repetitivos, apresentou valores de 1,9 a 2,5 p.u. com DP associados com magnitudes máximas entre 160 e 8000 pC. Os valores e faixas indicadas são médios e verificados em ensaios de envelhecimento de no máximo 500h.

Outro ensaio similar, porém com uma duração de 5500h, mostrou pares coordenados de tensão aplicada e magnitude de DP iguais a 2,0 p.u. – 100 pC; e 2,43 p.u. – 8800pC.

Os ensaios de sobretensões foram realizados, em geral, com valores de  $2,25 V_n$  do capacitor ou elemento capacitivo, com duração entre 0,3 e 1s, sobrepostas às tensões aplicadas iguais a  $V_n$  ou  $1,1.V_n$ .

Os resultados indicaram uma dependência entre a duração das atividades de DP em relação: ao tipo construtivo do elemento capacitivo, à duração da sobretensão e à temperatura do dielétrico.

O ensaio de temperatura consistiu em medir a TIDP a partir de baixas temperaturas (-25°C) até a temperatura de 15°C. Foi encontrada uma relação quase que linear e diretamente proporcional para TIDP e a temperatura.

O ensaio de verificação de defeitos consistiu na medição de DP em elementos com bordas de eletrodos não dobradas (quando deveriam ser) e elementos com impregnação deficiente, ou seja, com possível presença de cavidades de ar internas aos enrolamentos, comparando-se os resultados com

os encontrados para elementos capacitivos sem defeitos.

A combinação dos valores dos ângulos de fase dos primeiros pulsos com o valor da TIDP permitiram identificar o tipo de defeito presente, ou seja, bordas dos eletrodos não dobrados, impregnação deficiente ou nenhum.

Por fim, as investigações desenvolvidas permitiram elaborar recomendações sobre métodos de medições de DP em laboratórios ou ambientes industriais, e a sua adequabilidade para os capacitores de potência.

Ainda, concluiu-se que a medição de DP pode ser uma ferramenta eficaz para a avaliação do estado do sistema dielétrico do capacitor e a confiabilidade respectiva. Isto pode ser obtido pela combinação dos parâmetros: TIDP, ângulos de fase dos primeiros pulsos positivos e negativos de DP, largura do espectro de DP para cada meio ciclo, energia do espectro de DP (em alguns casos). Deve ser observado que essa proposta não permite diagnosticar garantidamente defeitos relativos a poucos pontos fracos num único elemento de uma unidade capacitiva, antes da disrupção desse elemento.

### **3.6 Comentários sobre a degradação dos capacitores de potência**

A degradação dos capacitores de potência a longo prazo está fortemente relacionada com a atividade de DP e, num segundo momento, à perda das características originais do PP.

Nesta cadeia degradativa, os critérios de projeto, fabricação e aplicação, o líquido impregnante e a temperatura do sistema dielétrico são determinantes para o desempenho do capacitor.

Investigações experimentais puderam consolidar a proposição teórica apresentada e, ainda, sugerem métodos para a avaliação de capacitores de potência através de ensaios de curta-duração diferentes dos usualmente

praticados.

A recente força tarefa desenvolvida através do CIGRE [37] demonstra a potencialidade das DP como parâmetro para diagnóstico de capacitores de potência. Por outro lado, evidencia a dificuldade de se praticar ensaios para detecção de DP em unidades capacitivas (latas) reais, principalmente, em ambiente industrial.

Esta investigação indicou que para demonstrar efetivamente a atividade de DP em capacitores de potência reais, recém manufaturados, faz-se necessário atingir uma TIDP da ordem de 2,0 p.u., em relação à tensão nominal, com DP da ordem de centenas de pC. Alguns pulsos, denominados esporádicos, ocorreram com uma TIDP da ordem de 1,6 p.u., com DP de dezenas de pC. Vale lembrar que a precisão da medida de DP em capacitores é sempre menor em unidades ou elementos capacitores de maior capacitância.

As condições de degradação adicionais dos capacitores, na prática, normalmente ocorrem para tensões superiores, porém próximas à nominal. Para esta condição também está relacionado um determinado nível de atividades de DP. Da mesma forma, há uma TIDP correspondente, implicando em pulsos, possivelmente da ordem de unidades ou poucos dezenas de pC ao longo da vida do capacitor. Nestas condições de contorno, além de possíveis outros fenômenos, ocorre a degradação do PP, ou do sistema dielétrico, ou do capacitor de potência.

Desta forma, esta condição de degradação adicional, ou seja, além da prevista em projeto, é considerada neste trabalho para estresses dielétricos maiores do que aqueles verificados para uma TIDP que permita atividades de DP de baixos níveis, a qual denominaremos “TIDP<sub>b</sub>”. Esta definição é uma das orientações básicas para o desenvolvimento do próximo capítulo.

## **CAPÍTULO 4 - CAPACITORES DE POTÊNCIA SOB COMPONENTES HARMÔNICOS**

### **4.1 Reações eletroquímicas e as descargas parciais**

No capítulo 3, durante a análise do fenômeno de degradação do PP em capacitores de potência, foi relatado que a criação dos radicais livres  $R^\circ$  não poderia ser atribuída diretamente à incidência de descargas elétricas, pelo menos para os capacitores projetados e manufaturados com a tecnologia atual. Realmente, sob condições normais, a atividade de DP se restringe a valores ínfimos (pC), não sendo possível o ataque degradativo direto ao polímero impregnado.

Desta forma, a criação de  $R^\circ$  foi atribuída a reações de transferência de cargas nos eletrodos. Esta conclusão implica assumir que o capacitor de potência pode ser visto também como ambiente propício a reações eletroquímicas, especificamente, a eletrólise.

A eletrólise, cujo termo significa "decomposição pela corrente elétrica", é uma reação de oxi-redução provocada pela corrente elétrica. Para tal reação, faz-se necessária a presença de alguns elementos, quais sejam: célula ou cuba eletrolítica, eletrodos positivo e negativo, gerador, e principalmente, a energia. Esta última pode ser vista, na eletrólise, como a quantidade de eletricidade (Q).

Retornando ao capacitor de potência, têm-se os seguintes componentes presentes: invólucro, normalmente metálico; eletrodos de folha de alumínio; filmes de polipropileno; líquido impregnante. Adicionalmente, quando energizado, pode-se admitir também a presença de DP.

Neste momento, não se faz necessário levar em conta os valores dessas descargas e sob quais circunstâncias ocorrem.

Portanto, segue uma analogia qualitativa do funcionamento do capacitor de potência e a ocorrência da eletrólise.

Numa cuba eletrolítica, o gerador não pode criar ou destruir elétrons, mas, sua função limita-se a "injetá-los" no circuito eletroquímico pelo seu pólo negativo e "aspirá-los" pelo pólo positivo. Esta característica unidirecional leva à necessidade de uma fonte de corrente contínua. Naturalmente, este fluxo de elétrons se dá através do eletrólito. A energia suprida pelo gerador provoca a reação de oxi-redução, transferindo elétrons de um elemento para outro, realizando uma reação não espontânea. Ainda, deve ser considerada a possibilidade da denominada eletrólise ígnea, onde existe a liberdade de movimento de íons presentes no eletrólito (ou solução).

Identificando os elementos da eletrólise na cuba eletrolítica "capacitor de potência", atribui-se primeiramente a função do gerador ao sistema elétrico. Entretanto, a "injeção" de elétrons, através dos eletrodos, não necessariamente ocorre de forma contínua, mas seguramente na ocorrência de DP. Essas descargas elétricas, ou quantidade de eletricidade, correspondem à energia fornecida à reação eletroquímica. A transferência de elétrons se dá entre elementos (moléculas) propícios de serem oxidados ou reduzidos, presentes no líquido impregnante em forma de aditivos ou impurezas (água, oxigênio solubilizado, íons, etc.). Desta forma, acaba-se de atribuir a função do eletrólito ao líquido impregnante. Portanto, a atividade da eletrólise nos capacitores de potência está diretamente relacionada com a atividade de DP e as características do líquido impregnante.

Uma primeira análise superficial quantitativa de ocorrência da eletrólise em capacitores de potência pode ser desenvolvida através das Leis de Faraday, que se baseiam em experimentos.

A primeira Lei de Faraday: A **massa** de substância eletrolisada é diretamente proporcional à **quantidade de eletricidade** que atravessa o eletrólito (solução), ou seja:

$$m = k_1 \cdot Q, \quad (1)$$

onde:

$m$  = massa eletrolisada da substância;

$Q$  = quantidade de eletricidade,

$K_1$  = constante

Segunda Lei de Faraday: A mesma quantidade de eletricidade eletrolisa **massas de substâncias diferentes** que são proporcionais aos respectivos **equivalentes-grama** de oxi-redução, ou seja:

$$m = k_2 E_g, \quad (2)$$

onde:

$E_g$  = equivalente-grama de qualquer substância.

$k_2$  = constante

A união das duas leis, (1) e (2), resulta em:

$$m = k \cdot E_g \cdot Q, \quad (3)$$

$k$  = constante

e, a Equação Geral da Eletrólise:

$$m = \frac{1}{96.500} \cdot E_g \cdot Q \cdot r, \quad (4)$$

onde:

96.500 coulombs = 1 Faraday,

$r$  = rendimento total de eletrólise.

A equação geral da eletrólise é facilmente aplicada em processos de eletrólise industriais, onde se necessita mensurar a massa eletrolisada (normalmente o produto desejado), a quantidade de eletricidade ou energia

elétrica necessária e o rendimento total de processo. Este último depende de diversos fatores, como o arranjo físico-químico da eletrólise, assumindo valores entre 0 e 1. Normalmente, procura-se obter valores mais próximos de 1, o que significa máxima eficiência nos processos industriais, tais como o refino eletrolítico de metais como o cobre, zinco, chumbo e outros.

Para o caso dos capacitores de potência, a eletrólise se apresenta como um subproduto da energização desses componentes em um sistema elétrico de potência e, de acordo com a teoria apresentada neste trabalho, um subproduto inconveniente.

Em princípio, sendo as impurezas do líquido impregnante e as atividades de DP os principais agentes da reação em discussão, deve-se avaliar a incidência e forma de atuação desses.

As impurezas presentes nos líquidos impregnantes, tais como, água, oxigênio solubilizado, íons, e também, aditivos, parecem intrínsecos aos líquidos impregnantes correntes. Vale lembrar, que não se trata de uma desvantagem particular do M/DBT, ao contrário, as suas características são em geral superiores aos impregnantes precedentes. Desta forma, não há uma expectativa ou demanda atual para a eliminação desses elementos.

Quanto às atividades de DP, os projetos e técnicas de manufatura contemporâneos têm buscado a redução da probabilidade de sua ocorrência, pelo menos, dentro dos limites de solicitação dielétrica impostos pelas normas pertinentes. Entretanto, a atividade de DP em níveis mínimos (pC) não significa uma demanda imediata para melhoria ou aperfeiçoamento dos projetos de capacitores de potência, portanto, trata-se de um fenômeno realmente presente no contexto para as aplicações usuais.

Complementando a analogia, espera-se um rendimento bastante baixo para a eletrólise em análise, obviamente, por se tratar de uma reação que se apresenta como subproduto, e, alheia aos propósitos dos capacitores de

potência, bem como, pelo seu caráter intermitente. Como exemplo, pode-se citar como deficiências desse "sistema eletrolítico" a ausência de uma fonte real de corrente contínua como fornecedora de eletricidade e a presença de um eletrólito irregular.

Pelo exposto acima, a produção dos radicais livres  $R^\circ$ , através de eletrólise, poderia ser atenuada ou limitada pela redução da quantidade de eletricidade (Q) presente, ou seja, pela redução dos níveis de atividades de DP. Isto pode ser obtido, evitando-se solicitações dielétricas que ultrapassem as tensões de injeção de DP (TIDP). A cada ocorrência deste tipo, pode ser atribuído um acúmulo de carga elétrica e, conseqüentemente, uma quantidade de eletricidade (Q).

#### **4.2 Reações orgânicas e as descargas parciais**

No item anterior, é analisada a produção dos radicais livres  $R^\circ$  e a respectiva correlação quantitativa com as incidências ou nível de atividades de DP. No entanto, faz-se necessário avaliar também as implicações quantitativas do número de radicais livres produzidos para as reações orgânicas subseqüentes.

Os radicais livres  $R^\circ$ , normalmente cátions ou ânions, formam o insumo básico para a degradação do polipropileno (PP) ou pelo menos, para a etapa inicial deste processo, que é a criação do macroradical  $PP^\circ$ . Portanto, um incremento no número de  $R^\circ$  implica uma incidência maior de reações orgânicas de degradação do PP.

Para estabelecer uma relação de proporcionalidade melhor quantificada, dever-se-ia, pelo menos, avaliar e concluir sobre dois fatores presentes no fenômeno particular em questão:

- as reações em cadeia devido à formação de novos macroradicais e radicais a partir da etapa inicial;
- um eventual fenômeno de saturação do processo de degradação diante de

um número elevado de R<sup>o</sup> produzidos.

Sobre o primeiro aspecto, pode-se afirmar com convicção que a degradação do PP por reação de quebras de cadeia é auto-catalítica. Portanto, a formação de radicais livres tem como importantes conseqüências para a análise, a degradação do PP, propriamente dita, e a produção de novos radicais livres. Conclui-se, então, que se tem uma relação exponencial positiva crescente entre o produto final, degradação do PP, e o insumo radicais livres, ou mais além, as atividades de DP no capacitor de potência.

Entretanto, deve ser ressaltado que uma quantificação desta relação, ou a sua proporcionalidade, requer uma análise de alto nível de complexidade, considerada fora do objetivo deste trabalho. Para ilustrar essa afirmação, pode-se mencionar que o mecanismo de envelhecimento elétrico de materiais poliméricos pode ser analisado com o enfoque de uma reação química de ordem N, com a seguinte velocidade ou taxa de variação no tempo da concentração de qualquer das substâncias envolvidas:

$$-\frac{dC}{dt} = -KC^N, \quad (5)$$

onde:

C = concentração de qualquer das substâncias envolvidas,

t = tempo de reação,

K = constante específica de velocidade,

N = ordem da reação.

Por exemplo, a ordem da reação<sup>7</sup> depende do número de grupos funcionais que participam da reação e não tem uma relação direta com o

---

<sup>7</sup> A ordem da reação indica a dependência da velocidade da reação em relação à concentração de reagente, sendo determinada experimentalmente.

coeficiente estequiométrico<sup>8</sup> dos reagentes e produtos envolvidos. Aliás, sequer identificar os grupos funcionais seria uma tarefa bastante extensa para ser cumprida neste trabalho. A constante K é dada pela Teoria de Arrhenius que relaciona a velocidade de reação: à temperatura, à energia de ativação e ao fator de frequência.

Considerando-se que o mecanismo em estudo não se trata de uma exceção, a velocidade da reação aumenta com o aumento da temperatura. Esta temperatura de alguma forma poderia estar relacionada com a magnitude e incidência das DP. Uma maneira vislumbrada para a obtenção de uma formulação do mecanismo de degradação em análise seria o desenvolvimento de investigações experimentais específicas.

Quanto ao mencionado possível fenômeno de saturação do processo de degradação em análise, pode-se comentar que não existe expectativa para tal. Reações relacionadas com a degradação de polímeros normalmente findam somente na ausência ou extinção do material em deterioração. Estando o horizonte de análise bastante aquém desse estágio, a possibilidade de ocorrência de saturação está descartada. Ou seja, durante todo o processo de degradação considerado nesta dissertação para o capacitor, haverá a presença das reações com a formação dos radicais ou macroradicais.

### **4.3 Síntese - Degradação dos capacitores**

Portanto, pode-se sintetizar os dois itens anteriores com a afirmação de que a degradação dos filmes de PP em capacitores de potência está muito provavelmente positiva e exponencialmente relacionada com as atividades de DP desenvolvidas nesses equipamentos, sendo que uma quantificação desta relação exigiria um grande esforço em análises e investigações experimentais na área de físico-química.

---

<sup>8</sup> O coeficiente estequiométrico determina as relações quantitativas (mol, massa e volume) entre as substâncias participantes de uma reação química.

#### 4.4 Solicitações adicionais impostas pelos componentes harmônicos

Como já exposto no item 3.1, o capacitor de potência está permanentemente submetido a altos valores de estresse dielétrico, atualmente, variando na faixa de 50 a 80 kV/mm. Esta característica traz consigo a necessidade de se escolher a tensão nominal do capacitor de potência com base na tensão efetiva de operação do sistema no qual se pretende instalá-lo, levando em conta a influência do próprio capacitor ou banco de capacitores.

Por outro lado, a necessidade de potência reativa no menor custo e, sendo esta grandeza proporcional ao quadrado da tensão aplicada entre os terminais do capacitor de potência, faz com que não se possa praticar o dimensionamento majorado dos dielétricos sem critérios bem definidos.

Estas condições de contorno têm levado alguns técnicos a especificar capacitores de potência com tensão nominal superior à tensão efetiva de operação das suas instalações na ordem de 5%.

Esta margem de segurança parece atingir o equilíbrio entre segurança, custos inicial e final, e vida útil prolongada para a maioria das aplicações.

Entretanto, vale ressaltar que este critério leva em conta apenas as condições clássicas de regime dos sistemas elétricos, usualmente as sobretensões temporárias de longa duração na frequência industrial. Ainda, ocorre frequentemente a escolha da tensão nominal levando-se em conta apenas os valores eficazes das sobretensões de operação esperadas.

O que se pretende avaliar neste tópico são as solicitações dielétricas adicionais impostas aos capacitores de potência em sistemas com a presença de distorções harmônicas de tensão.

## **Distorção harmônica de tensão e limites praticados**

Inicialmente, são apresentados os conceitos básicos de distorção harmônica de tensão, imprescindíveis ao desenvolvimento desta avaliação e, ainda, mencionados alguns limites praticados e impostos por normas internacionais e pelas entidades brasileiras competentes.

### **Distorção da forma de onda de tensão**

Uma das medidas da distorção harmônica é a Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT), definida como:

$$DTHT = \frac{1}{V_1} \cdot \left[ \sum_{h=2}^{\infty} V_h^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

onde:

$V_1$  = Valor eficaz da componente fundamental da tensão

$h$  = ordem harmônica

$V_h$  = Valor eficaz da componente harmônica de ordem  $h$  da tensão

Este conceito (DTHT) está diretamente relacionado com a elevação de aquecimento num resistor puro, ou seja, é derivado do valor eficaz:

$$\left( \frac{P_h}{P_f} \right) = (DTHT)^2, \quad (7)$$

onde:

$P_h$  = potência dissipada no resistor puro devido às tensões de ordens harmônicas,  $h = 2, 3, \dots$

$P_f$  = potência dissipada no resistor puro devido à tensão fundamental

Nota-se que este fator é aplicável, então, no estudo do acréscimo das perdas devidas às tensões harmônicas, não sendo adequado para avaliar as solicitações dielétricas impostas pelos componentes harmônicos.

Ainda, a relação  $\left(\frac{P_h}{P_f}\right) = (DTHT)^2$  só é válida para cargas resistivas puras, objeto utilizado para o estudo e definição dos fatores de distorção harmônica. Portanto para as cargas R-L usuais, essa igualdade não é válida.

Portanto, o estudo correto da solicitação dielétrica deve levar em consideração, por exemplo, o nível da tensão de crista, e isto, requer conhecimento da amplitude e defasamento angular em relação à componente fundamental.

Numa hipótese conservadora, isto é, considerando a situação mais crítica, na qual as tensões harmônicas significativas em magnitude estariam todas elas, com os respectivos picos em fase com a fundamental, define-se o Fator de Amplitude:

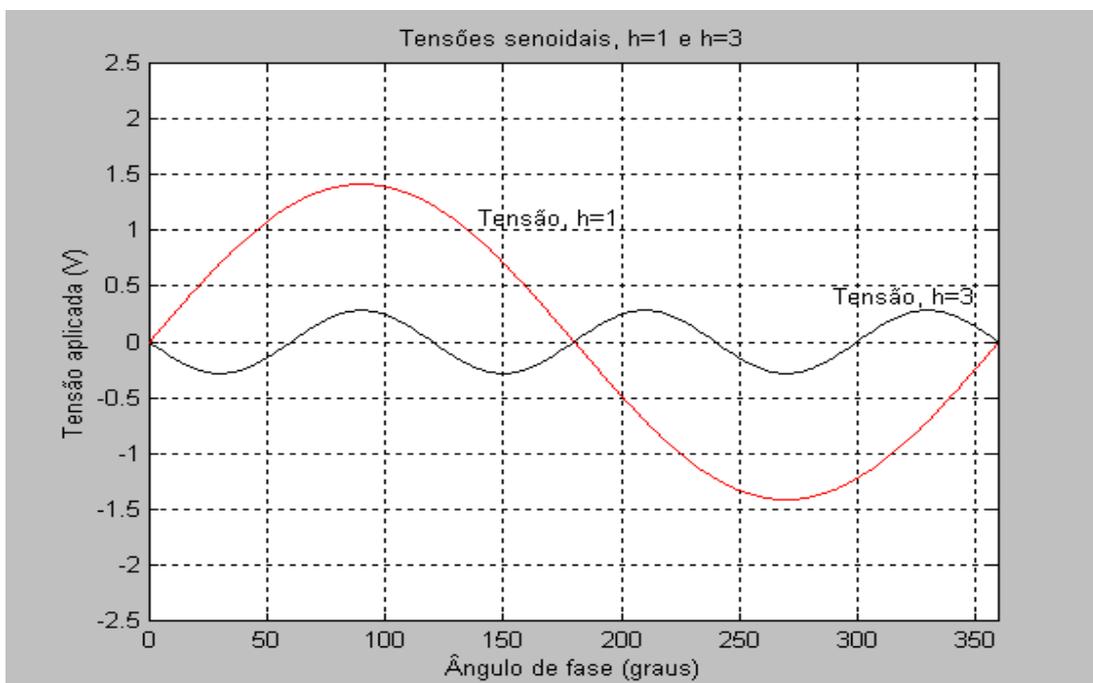
$$\text{Fator de Amplitude} = \frac{1}{V_1} \cdot \sum_{h=2}^{\infty} V_h \quad (8)$$

Verifica-se, então, que uma distorção da forma de onda da tensão pode gerar valores de crista consideravelmente elevados em relação ao valor de crista da componente fundamental. Em outras palavras, uma forma de onda com valor eficaz de tensão num nível aceitável pode ter um valor de crista indesejável ao sistema elétrico.

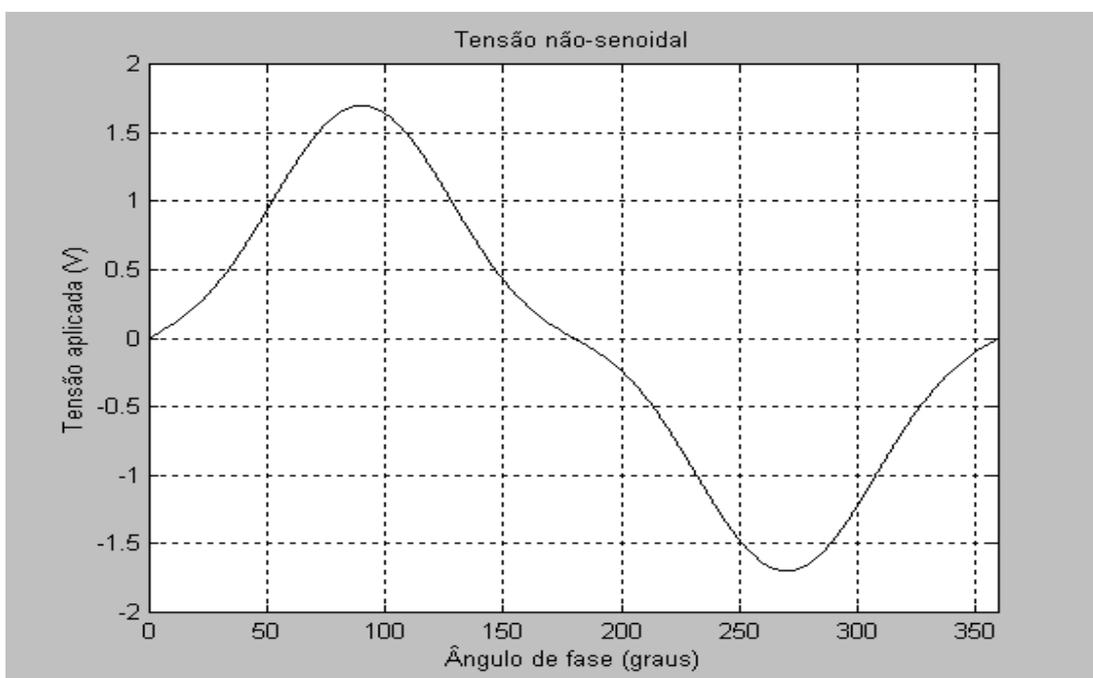
Os gráficos a seguir ilustram esta situação, onde:

- Valor eficaz da tensão fundamental: 1,0V
- Valor de crista da tensão fundamental: 1,41V
- Valor eficaz da tensão harmônica de ordem 3: 0,2V (20%)
- Valor de crista da tensão harmônica de ordem 3: 0,28V
- Valor eficaz da tensão total: 1,02V (102% da tensão fundamental)

- Valor de crista da tensão total: 1,69V (120% da tensão fundamental).

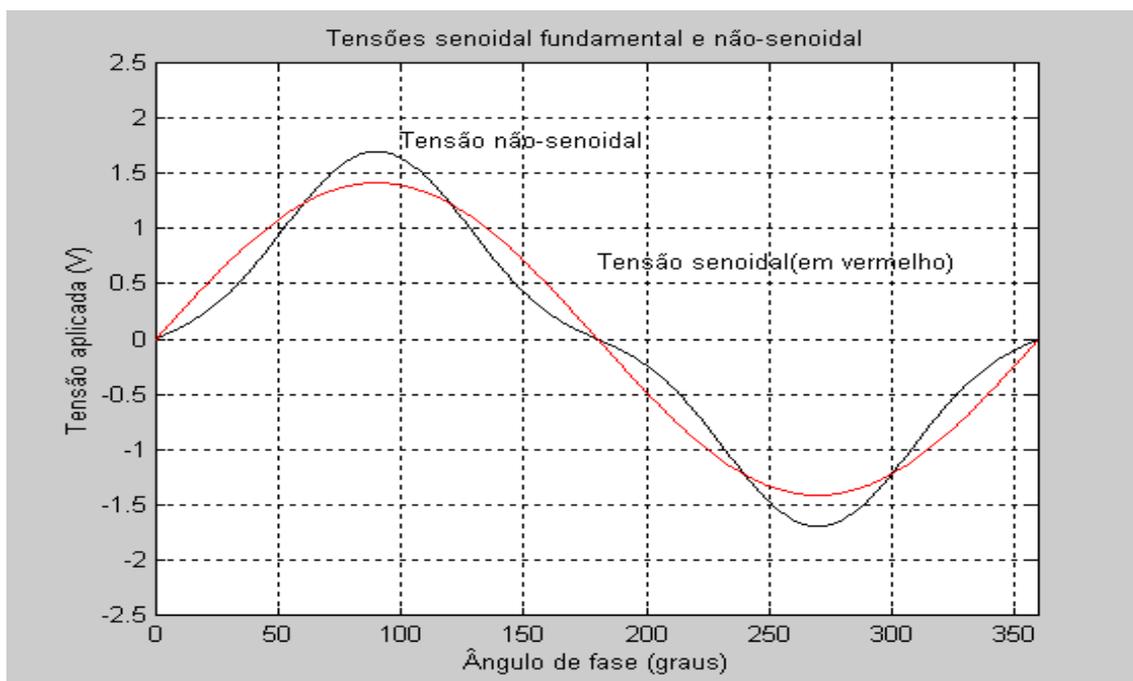


a) Forma de onda de tensões senoidais fundamental e harmônica de ordem 3



b) Forma de onda de tensão não-senoidal

(somatória das tensões senoidais fundamental e harmônica de ordem 3)



c) Formas de onda de tensões senoidal fundamental e não-senoidal

#### Gráfico 4.1 – Formas de onda de tensões fundamental e harmônica

Fonte: Cálculo computacional específico.

#### Limites e critérios praticados

A norma sobre limites de distorção harmônica de melhor aceitação mundial e mais utilizada atualmente, principalmente em se tratando de grandes consumidores industriais e comerciais, é a norma IEEE Std 519-1992. Esta norma, resumidamente, atribui ao consumidor o controle da geração de correntes harmônicas e, às concessionárias, o controle dos níveis de distorção de tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) com o consumidor.

Os limites de distorções de tensão estabelecidos pela IEEE-519, no PAC, são mostrados na tabela abaixo:

**Tabela 4.1**

#### Limites de distorção de tensão conforme IEEE Std 519-1992

Tensão no PAC (kV)	Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT)	
	Por Consumidor (%)	Total (%)
69kV e abaixo	3,0	5,0
69kV (exclusive) 161kv	1,5	2,5
161kV (exclusive) e acima	1,0	1,5

Fonte: Norma IEEE Std 519-1992 [5].

No Brasil, o ONS – Operador Nacional do Sistema está definindo alguns limites para distorção harmônica [51], cujos valores são apresentados na tabela a seguir:

**Tabela 4.2**  
**Limites globais de distorção de tensão, expressos em % da tensão fundamental, conforme ONS**

Limites Globais para Tensões Harmônicas			
Tensão nominal < 69 kV		Tensão nominal ≥ 69 kV	
ÍMPARES		ÍMPARES	
3, 5, 7	5,0	3, 5, 7	2,0
9, 11, 13	3,0	9, 11, 13	1,5
15 a 25	2,0	15 a 25	1,0
≥ 27	1,0	≥ 27	0,5
PARES		PARES	
2, 4, 6	2,0	2, 4, 6	1,0
≥ 8	1,0	≥ 8	0,5
DTHT (%)	6,0	DTHT (%)	3,0

Fonte: Padrões de Desempenho da Rede Básica - ONS [51].

#### 4.5 Análise comparativa entre as solicitações dielétricas impostas ao capacitor sob componentes harmônicas e os limites admissíveis por norma

A norma brasileira de especificação de capacitores define a tensão máxima permissível em regime contínuo como a tensão nominal ( $V_n$ ) do capacitor de potência de alta tensão, sem nenhum fator de sobretensão. Fatores de sobretensão entre  $1,10xV_n$  e  $1,30xV_n$  são especificados apenas para períodos de tempo limitados entre 12 horas e 1 minuto, respectivamente.

Inicialmente, propõe-se analisar uma situação de energização permanente com a tensão nominal. Nesta condição, tem-se a expectativa da vida útil total projetada para o capacitor de potência. Adicionalmente, existe a idéia de não haver uma atividade significativa de DP, visto que a tensão de injeção de descargas parciais de baixos níveis ( $TIDP_b$ ) está diretamente relacionada com a tensão suportável de longa duração ( $E_\infty$ ), sendo a primeira de valor, pelo menos, igual à última referenciada. É importante acrescentar algumas informações ao agora exposto:

- $E_{\infty}$  normalmente é igual ou superior à  $V_n$ , sendo que esta relação depende dos critérios de projeto adotados,
- Uma atividade significativa de DP deve ser entendida neste item como aquela passível de ser detectada pelos métodos de ensaios usuais nos processos de controle de qualidade para fabricação de outros equipamentos elétricos, com valores iguais a unidades de pC. No caso dos capacitores de potência, esses níveis de DP normalmente não podem ser medidos nas unidades manufaturadas, mas certamente contribuem para uma degradação adicional a longo prazo, como descrito no capítulo anterior.
- Uma relação entre  $TIDP_b$  e  $E_{\infty}$  pode ser obtida de ensaios de desenvolvimento e outros procedimentos experimentais [26].

Baseado no exposto, pode-se estabelecer as seguintes condições de contorno para o prosseguimento da análise comparativa proposta:

$$E_{\infty} \geq V_n = 1,0 \text{ p.u.}$$

$$TIDP_b \ 1 = V_n = 1,00 \text{ p.u.}_{\text{crista}}$$

$$TIDP_b \ 2 = 1,10 \times V_n = 1,10 \text{ p.u.}_{\text{crista}}$$

Portanto, ficam estabelecidas duas condições de projeto comumente verificadas na prática. Vale ressaltar que tais condições não são plenamente avaliadas ou verificadas por procedimentos de normas. Por exemplo, não se pode garantir que a  $TIDP_b$  seja menor, maior ou igual a 110% da tensão nominal.

Entretanto, para a análise comparativa pretendida, não se faz necessário utilizar os valores exatos da  $TIDP_b$  para se obter melhores resultados, visto que os valores 1,00 e 1,10 p.u. são apenas referências. Aliás, a determinação precisa da  $TIDP_b$  requer o conhecimento integral do projeto dos capacitores e respectivo desempenho avaliado através de testes de desenvolvimento.

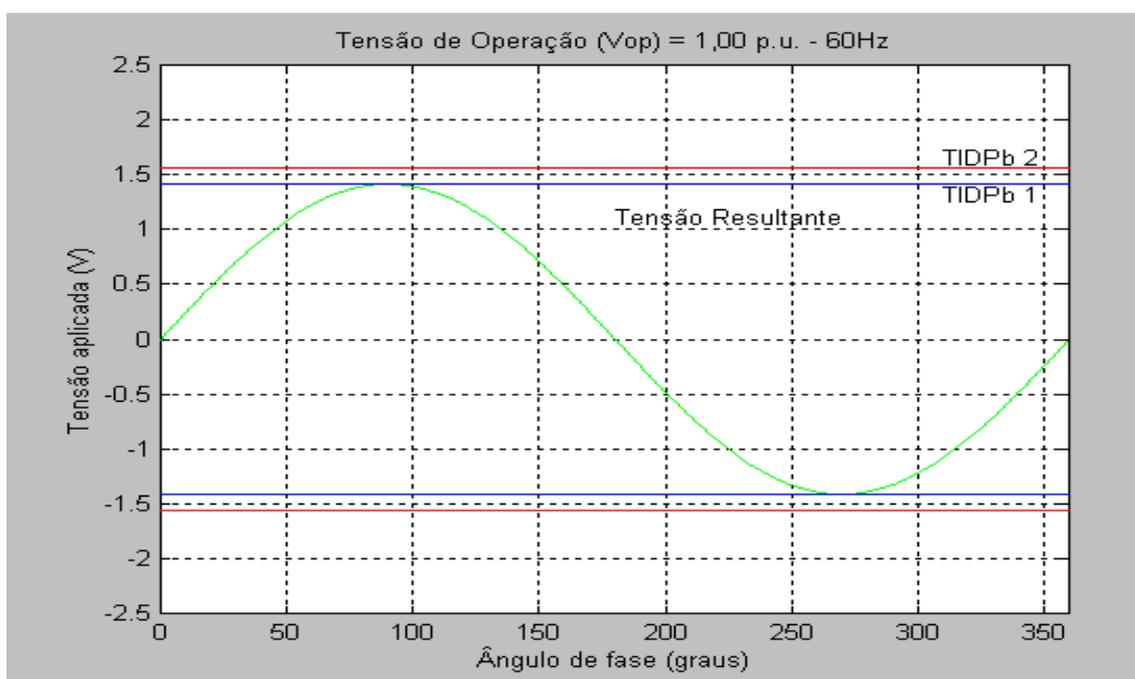
### **Situação1a**

Resumidamente, a primeira situação de análise, ou situação 1a, pode

ser representada pela equação  $V_{op} = 1,00 \text{ p.u. (eficaz)} = 1,00 \text{ p.u.}_{\text{crista}}$  (nas devidas bases), onde:

- $V_{op}$  é o valor eficaz da tensão real de operação do capacitor de potência; e
- $V_{op_{\text{crista}}}$  é o valor de crista da tensão real de operação do capacitor de potência.

Segue, também, a representação da forma de onda de tensão da situação 1a:



#### Gráfico 4.2 – Situação 1a - Tensão aplicada eficaz de 1,0 p.u. à frequência fundamental

Nota: Para possibilitar uma interpretação mais imediata para os gráficos Tensão aplicada (V) x Ângulo de fase (graus) neste e nos itens 4.5 e 4.6, considerar a seguinte padronização:

- a. Tensão nominal eficaz =  $1V = 1,00 \text{ p.u.}$
- b. Tensão nominal de crista =  $1,41 V_{\text{crista}} = 1,00 \text{ p.u.}_{\text{crista}}$
- c. As retas horizontais na cor azul indicam o valor da TIDP<sub>b</sub>1.
- d. As retas horizontais na cor vermelha indicam o valor da TIDP<sub>b</sub>2.
- e. Onde aplicável, o termo “Tensão Respectiva 60 Hz” indica a forma de onda da tensão fundamental, com valor de crista igual ao da tensão resultante do mesmo gráfico.

Fonte: Cálculo computacional específico.

### Situação 1b

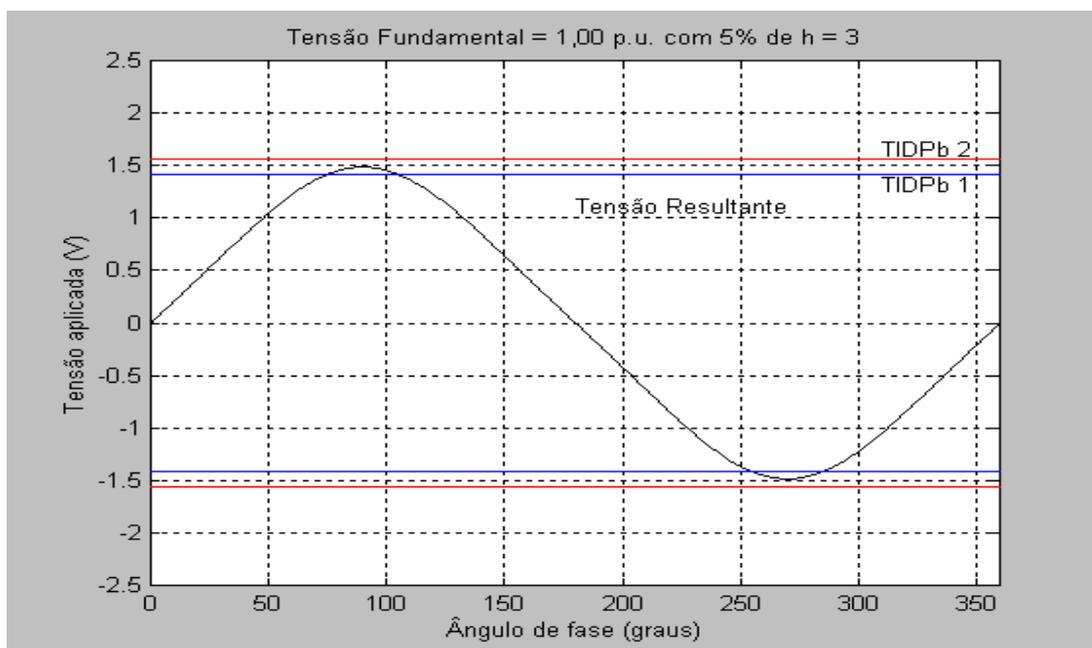
Prosseguindo, admite-se uma energização permanente com uma tensão eficaz à frequência fundamental também igual a 1,00 p.u., acrescida de uma distorção harmônica de 5% para a ordem harmônica 3.

Esta nova situação, 1b, possui as seguintes expressões:

$$V_{op} = 1,00 \text{ p.u.},$$

$$V_{op} = 1,05 \text{ p.u.}_{\text{crista}}$$

e pode ser representada pelo gráfico a seguir:



**Gráfico 4.3 – Situação 1b - Tensão aplicada eficaz de 1,00 p.u., com 5% de distorção harmônica de ordem 3**

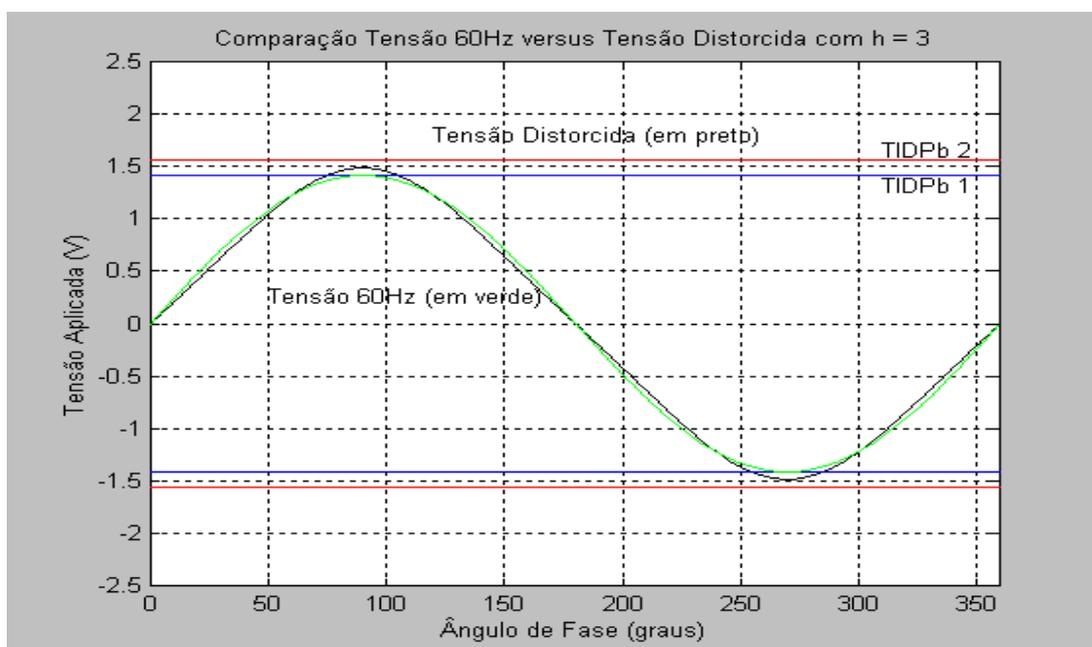
Nota: A fim de se considerar a situação mais crítica, toma-se a hipótese na qual as cristas das formas de onda das tensões harmônicas são coincidentes na escala de tempo, critério idêntico àquele do cálculo do Fator de Amplitude.

Fonte: Cálculo computacional específico.

**Análise para TIDP<sub>b1</sub>:** as  $V_{op}$  eficazes para as situações 1a e 1b são inferiores à suposta TIDP<sub>b1</sub>, entretanto, a  $V_{op_{crista}}$  para a situação 1b é superior à TIDP<sub>b1</sub>, diferentemente do que ocorre na situação 1a. Deve-se esclarecer que a TIDP<sub>b</sub> deve ser analisada através de valores instantâneos, e não faz

sentido físico uma correlação direta com valores eficazes. Todavia, a abordagem anterior é importante para explicitar o mecanismo das solicitações dielétricas adicionais impostas por componentes harmônicos de tensão aos capacitores. Portanto, apesar da proposital distorção da interpretação física, espera-se obter uma abordagem mais didática.

Sendo a  $V_{op\text{crista}}$  maior que a  $TIDP_{b1}$ , existe um intervalo de tempo, para cada meio período da forma de onda de tensão, no qual poder-se-ia entender que ocorrem as atividades de DP. O gráfico 4.4 ilustra esta exposição:



**Gráfico 4.4 – Tensão distorcida ( $h = 1$  e  $h = 3$ ) x Tensão fundamental ( $h = 1$ )**

Fonte: Cálculo computacional específico.

O que se quer dizer é que num intervalo equivalente a 17% do ciclo completo, o capacitor está submetido a um estresse dielétrico maior do que aquele que correspondente a 100% da tensão eficaz nominal, sem distorção harmônica. Nessa última situação, o capacitor de potência não atingiria a condição de atividade de DP.

Entretanto, considerando-se a distorção harmônica de 5%, situação que pode ser comumente verificada na prática, tem-se uma situação "não

prevista" para o funcionamento do capacitor. Pode-se afirmar, pelo menos, que existe efetivamente uma degradação adicional do capacitor devido à presença da distorção harmônica.

**Análise para TIDP<sub>b2</sub>:** para as situações 1a e 1b, o valor de TIDP<sub>b2</sub> não é alcançado, portanto não ocorrem atividades de DP.

### Situação 2a

Em prosseguimento à mesma análise, supõe-se um capacitor de potência energizado com 10% de sobretensão na frequência fundamental durante 12 horas para cada período total de 24 horas. Nesta condição, situação 2a, os limites estabelecidos na norma brasileira de especificação [10] ficam atendidos, e também, não é ultrapassada a TIDP<sub>b2</sub>.

Entretanto, seguramente, o capacitor projetado para TIDP<sub>b</sub> = TIDP<sub>b1</sub> teria uma vida útil real menor em relação ao projetado para TIDP<sub>b2</sub>.

### Situação 2b

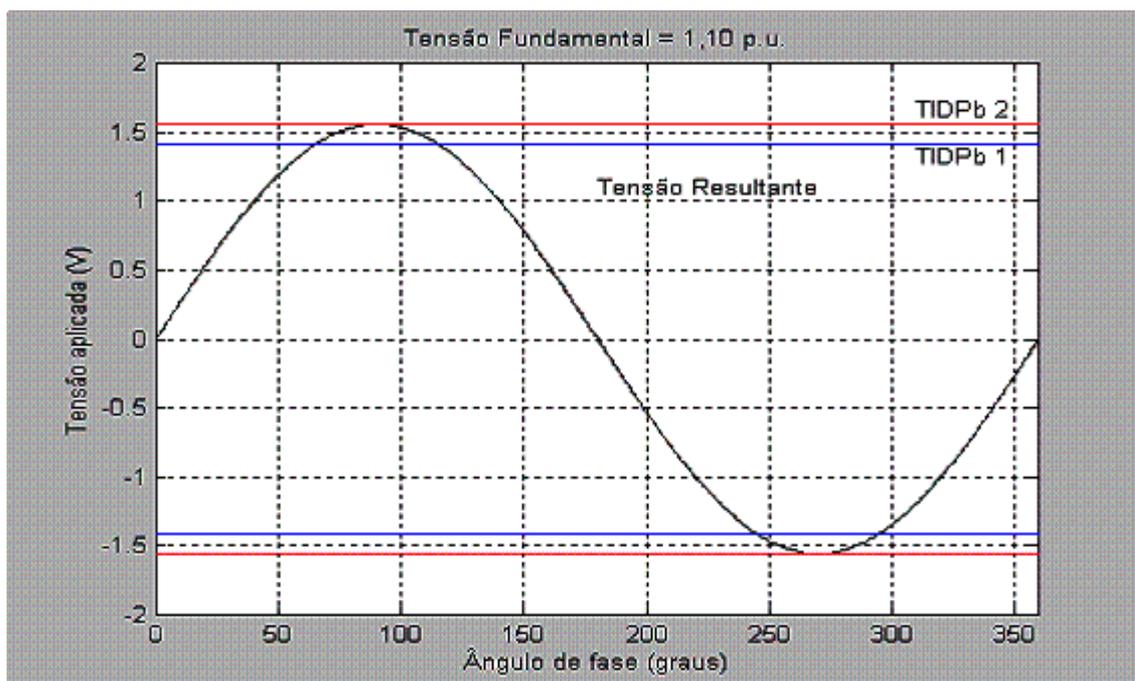
Agora, convenientemente, poder-se-ia supor um sistema com uma distorção harmônica de tensão de 46%, por exemplo, na ordem harmônica 3 (situação 2b). Pode-se tratar de uma suposição extrema, mas didaticamente é bastante interessante. É possível imaginar que essa condição seja equivalente àquela descrita imediatamente anterior, ou seja, para uma sobretensão de 10%?

Realmente, em termos de valores eficazes, as duas situações se equivaleriam (2a e 2b), mas, o mesmo não se pode dizer para a solicitação dielétrica imposta a um banco de capacitores. Segue uma demonstração desta analogia.

Recapitulando, na situação 2a, tem-se:

$$V_{op} = 1,10 \text{ p.u.} = 1,10 \text{ p.u.}_{\text{crista}} = TIDP_{b2} > TIDP_{b1},$$

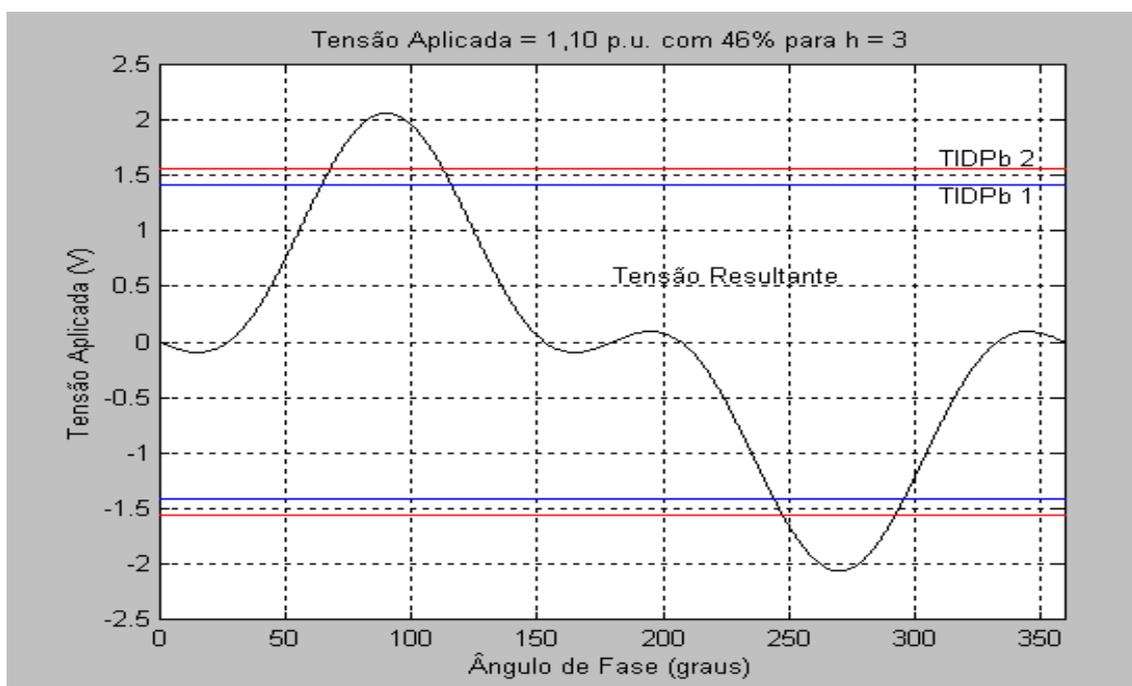
o que está demonstrado no gráfico 4.5.



**Gráfico 4.5 – Situação 2a - Tensão aplicada eficaz de 1,10 p.u. à frequência fundamental**

Fonte: Cálculo computacional específico.

Para a situação 2b, tem-se o gráfico 4.6, correspondente:



**Gráfico 4.6 – Situação 2b - Tensão aplicada eficaz de 1,10 p.u., incluindo 46% de distorção harmônica de ordem 3**

Fonte: Planilha de cálculos específicos.

$$V_{op} = 1,10 \text{ p.u.} = TIDP_{b2} > TIDP_{b1},$$

$$V_{op} = 1,46 \text{ p.u.}_{\text{crista}} > TIDP_{b2} \gg TIDP_{b1}$$

O gráfico 4.6 mostra que nos intervalos determinados pela interseção da forma de onda de tensão e as linhas de 1,10 p.u.<sub>crista</sub>, ultrapassa-se também o valor da  $TIDP_{b2}$ , o que não ocorre para situação 2a. Isto significa dizer que durante um período de 28 e 25% do tempo total de energização em 110% da tensão eficaz nominal, as condições para as atividades de DP, para  $TIDP_{b1}$  e  $TIDP_{b2}$ , respectivamente, são verificadas.

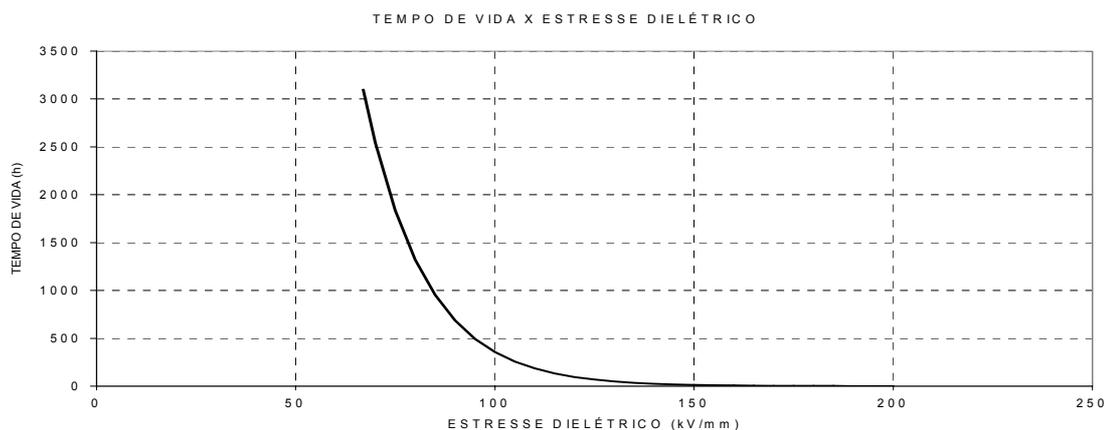
Tomando-se novamente a analogia em andamento, deve-se afirmar que a medição direta dos intervalos de tempo, com valores de tensão instantâneos maiores do que a  $TIDP_b$ , não exprime a relação entre as solicitações apresentadas nas situações 2a e 2b.

Uma tentativa de avaliar esta solicitação adicional poderia usar dois raciocínios induzidos ou já demonstrados neste trabalho.

O primeiro consiste em relacionar o nível de atividades de DP com o nível de estresse dielétrico ao qual está submetido o capacitor de potência. No experimento descrito em 3.4.1, verifica-se, através de detecção de luz emitida, um incremento do número de descargas com o gradiente de tensão aplicado a partir da  $TIDP$ .

No tópico 3.4.3, onde estão relatados experimentos para avaliar a degradação do polipropileno submetido a estresses dielétricos em tensão alternada, é mostrado que o tempo de vida médio dos capacitores tem uma relação exponencialmente decrescente com o gradiente de tensão (kV/mm) aplicado. A partir da tabela 3.5 do capítulo 3, pode-se obter a curva mostrada no gráfico 4.7.

Deve ser lembrado que os experimentos são efetuados com tensão aplicada senoidal à frequência industrial.



**Gráfico 4.7 – Curva experimental: Tempo de Vida médio do Capacitor x Gradiente de Tensão aplicado**

Fonte: Interpolação dos dados da Tabela 3.5.

Num segundo momento, conclui-se, no item 4.3 deste capítulo, que a degradação do PP em capacitores de potência está, provavelmente, exponencialmente relacionada com as atividades de DP. Correlacionando-se estes raciocínios, pode-se estabelecer uma relação teórica entre as eventuais solicitações adicionais impostas por componentes harmônicos e a degradação consequente dos capacitores de potência.

As solicitações adicionais são então representadas pela energia adicional disponível para o processo de degradação do PP, através das atividades de DP, e pelo estresse dielétrico adicional aplicado, tomando-se os valores de crista. A degradação adicional resultante é indicada pela redução do tempo de vida médio do capacitor.

Primeiro, opta-se por trabalhar numa região da curva do gráfico 4.7, compreendida entre os valores de 67 e 167 kV/mm. Este procedimento implica considerar a degradação do capacitor devido a baixos níveis de DP, ou seja, aquela devida à degradação da suportabilidade dielétrica do filme de PP, o que representa a maioria dos casos relativos ao estudo de distorção harmônica. Desta forma, evita-se levar em conta disrupções dielétricas no capacitor devido a altos valores de descargas.

Ainda, tomou-se o valor de 67 kV/mm como o gradiente de projeto, o

qual representa adequadamente as práticas atuais.

Segundo, a eventual energia adicional depende fundamentalmente da magnitude e da forma de onda da tensão aplicada, comparadas aos parâmetros compatíveis à frequência fundamental.

Desta forma, essa energia poderia ser representada pela área delimitada pela forma de onda da tensão aplicada e a reta formada pelos pontos referentes à  $TIDP_b$  e  $TEDP_b$ .

Como mostrado em 3.1, os instantes  $TIDP_b$  e  $TEDP_b$  dependem da forma de onda da tensão aplicada. Para os casos de maior intensidade de DP acumulada, tem-se um valor comparativamente menor de  $TEDP_b$ , e conseqüentemente, uma área (energia) maior.

Considerando-se que se pretende desenvolver uma análise comparativa entre as formas de onda senoidais e distorcidas, e admitindo-se a razoável similaridade entre essas, procede-se a simplificação  $TIDP_b = TEDP_b$ . Esta igualdade é realmente verdadeira para a análise do impregnante puro [36]. Em outras palavras, não se espera variações significativas para as relações  $TIDP_b / TEDP_b$  nos casos de interesse neste estudo.

Dentro do contexto apresentado, a formulação proposta para a avaliação das solicitações adicionais impostas ao capacitor pelos componentes harmônicos inclui uma equação empírica que leva em conta o estresse elétrico, seguida de uma discussão analítica complementar para a comparação das formas de onda das tensões aplicadas.

Equação empírica proposta:

$$TVR = TVP \cdot e^{-\alpha \cdot \Delta GTA}, \quad (9)$$

onde:

TVR é o tempo de vida médio real do capacitor em p.u. Este valor considera a degradação do capacitor devido a estresses elétricos

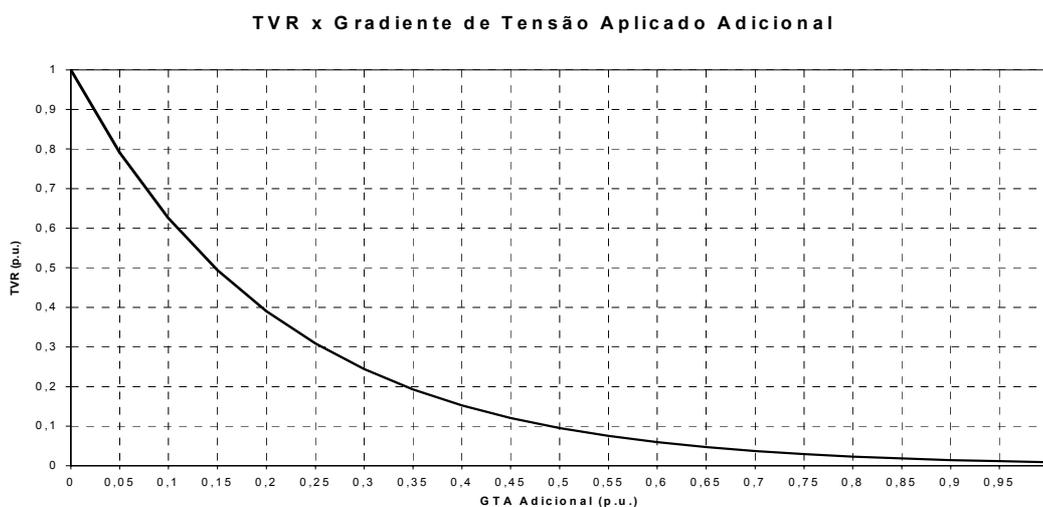
relativos a uma sobretensão aplicada senoidal à frequência fundamental.

TVP é o tempo de vida médio previsto em projeto, considerando-se gradientes de tensão aplicados iguais ou inferiores ao de projeto, em p.u.

$\Delta$ GTA é o gradiente de tensão aplicado adicional ao capacitor, considerando-se que o gradiente de projeto se refere a 100 ou 110% da tensão nominal (valor de pico), em p.u.. Por exemplo, para uma tensão de pico aplicada de 120%, e TIDP<sub>b</sub> igual a 1,10 p.u., tem-se um  $\Delta$ GTA igual a 10% ou 0,10p.u..

$\alpha$  representa um fator que relaciona o tempo de vida médio do capacitor e o gradiente de tensão adicional aplicado, considerando-se as atividades de DP para estresses dielétricos referentes a 1,10 a 2,00 p.u. do valor da tensão nominal.

A seguir, está apresentada a curva produzida pela fórmula proposta (9), considerando  $\alpha = 4,7$ , de acordo com os dados experimentais apresentados no gráfico 4.7.



**Gráfico 4.8 – Curva Tempo de Vida Real (TVR) x Gradiente de Tensão Aplicado Adicional ( $\Delta$ GTA)**

Fonte: Cálculo computacional específico.

Os resultados obtidos por esta curva podem ser comparados com outros obtidos através de equações apresentadas na literatura para mensurar a vida útil prevista para capacitores [4,7], tendo em vista os efeitos de sobretensões à frequência fundamental e térmicos. Segue exemplo:

$$\frac{TVR}{TVP} = \left[ \frac{1}{S \times T} \right]^\beta \quad (10)$$

onde:

$\frac{TVR}{TVP}$  é o valor em p.u. da vida útil estimada, em relação às condições nominais,

T é a temperatura máxima do dielétrico, em p.u. da nominal,

S é a sobretensão, em p.u. da nominal,

$\beta$  é um expoente de valor típico da ordem de 7 a 9.

Para esta equação, admitindo que o capacitor opera dentro da sua faixa nominal de temperatura e com uma sobretensão de 5%, para  $\beta = 7$ , tem-se uma relação  $\frac{TVR}{TVP} = 0,71$  p.u..

Para a formulação aqui proposta (9), representada pelo gráfico 4.8, considerando que o gradiente de tensão leva em conta 100% da tensão nominal especificada,  $\Delta GTA = 0,05$  p.u. e  $\alpha = 4,7$ , o valor encontrado para  $\frac{TVR}{TVP}$  é de 0,79 p.u..

Considerando que ambas as fórmulas são baseadas em investigações experimentais, ou seja, dependem de aspectos tais como projeto do capacitor, matéria-prima, manufatura, etc.; os resultados podem ser considerados bastante consistentes.

Deve-se enfatizar que a fórmula proposta (9) tem o propósito primeiro de avaliar as solicitações adicionais devidas às distorções harmônicas, donde se

espera melhores resultados para  $\Delta GTA$  de até 0,9 p.u.. Desta forma, pretende-se considerar a degradação do PP pelos fenômenos descritos e detalhados em 3.2.

Deve ser lembrado, que a fórmula proposta (9) representa a degradação do capacitor de potência devido ao estresse elétrico adicional representado pelo valor de crista da tensão aplicada. O fator “ $\alpha$ ” proposto foi obtido através de ensaios com uma tensão aplicada senoidal à frequência industrial. Entretanto, para uma dada tensão aplicada com forma de onda distorcida por componentes harmônicos, poderia-se obter um valor de “ $\alpha$ ” diferente, devido à diferença entre os valores de energia disponíveis no processo de degradação do capacitor (ou PP). Estes valores de energia podem ser representados pelas áreas delimitadas pelas formas de onda de tensão e a reta da  $TIDP_b = TEDP_b$ , como já sugerido.

Apesar da fórmula aqui proposta não quantificar a influência da forma de onda, a comparação gráfica entre a tensão aplicada (distorcida) e a respectiva tensão senoidal à frequência fundamental de mesmo valor de crista, permite avaliar sobre a maior ou menor condição crítica relativa. Este exercício analítico é efetuado para os casos exemplos teóricos e práticos apresentados a partir deste item.

Primeiro, propõe-se a aplicação da fórmula proposta para calcular o TVR num caso teórico baseado no exemplo apresentado no item 4.4, gráfico 4.1b.

Dados:

Valor da tensão em 60 Hz: 1,00 p.u.

Valor da tensão harmônica de ordem 3: 0,2 p.u.

TVR = ?                  TVP = 1,00 p.u.                   $\alpha = 4,7$  (proposto)

a) Para um capacitor de  $TIDP_{b1} = 1,00$  p.u.  $\rightarrow \Delta GTA = 0,20$  p.u.

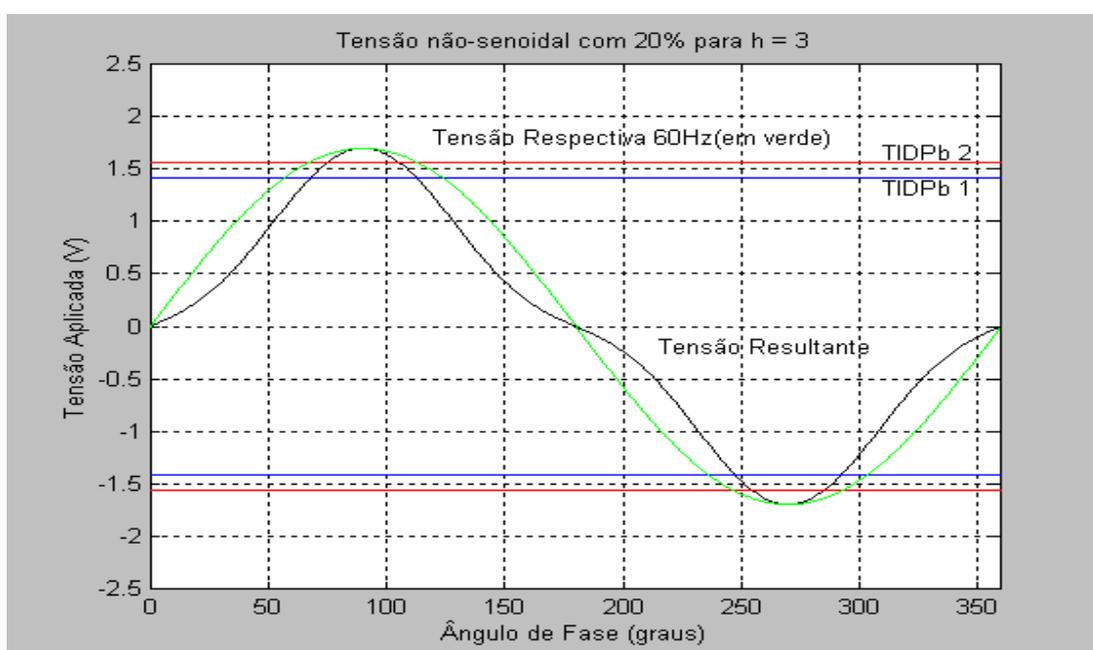
$$TVR = TVP \cdot e^{-\alpha \cdot \Delta GTA}$$

$$TVR = 1,00 e^{-4,7 \cdot 0,20}$$

$$\text{TVR} = 0,39 \text{ p.u.}$$

Este resultado implica um TVR igual a 39% do TVP, ou seja, uma redução de 61% da vida útil projetada para o capacitor.

Entretanto, considerando que a área acima de  $\text{TIDP}_b1$  para a tensão real aplicada ( $A_h$ ) é 68% da respectiva área para a tensão fundamental ( $A_{60}$ ), a degradação real do capacitor deve resultar numa perda de vida útil mais atenuada. Ver gráfico 4.9.



**Gráfico 4.9 – Tensão não-senoidal – Caso teórico**

Fonte: Cálculo computacional específico.

b) Para  $\text{TIDP}_b2 = 1,10 \text{ p.u.} \rightarrow \Delta\text{GTA} = 0,10 \text{ p.u.}$

$$\text{TVR} = 0,63 \text{ p.u.}$$

A relação entre as áreas acima da  $\text{TIDP}_b2$  é  $\frac{A_h}{A_{60}} = 0,65$ , portanto, a degradação real do capacitor deve resultar numa redução de vida útil mais atenuada. Ver gráfico 4.9.

O caso teórico apresentado indica situações críticas de aplicações de

capacitores de potência. A fórmula proposta provavelmente implicou degradações maiores do que as reais, devido ao alto valor de crista da tensão e a não consideração da forma de onda real da tensão aplicada.

Para casos diferentes do apresentado, a fórmula proposta pode implicar uma situação inversa ou até pode não representar uma divergência significativa em relação ao que se pode inferir para a prática. Estes aspectos poderão ser examinados através dos casos práticos apresentados no item 4.6.

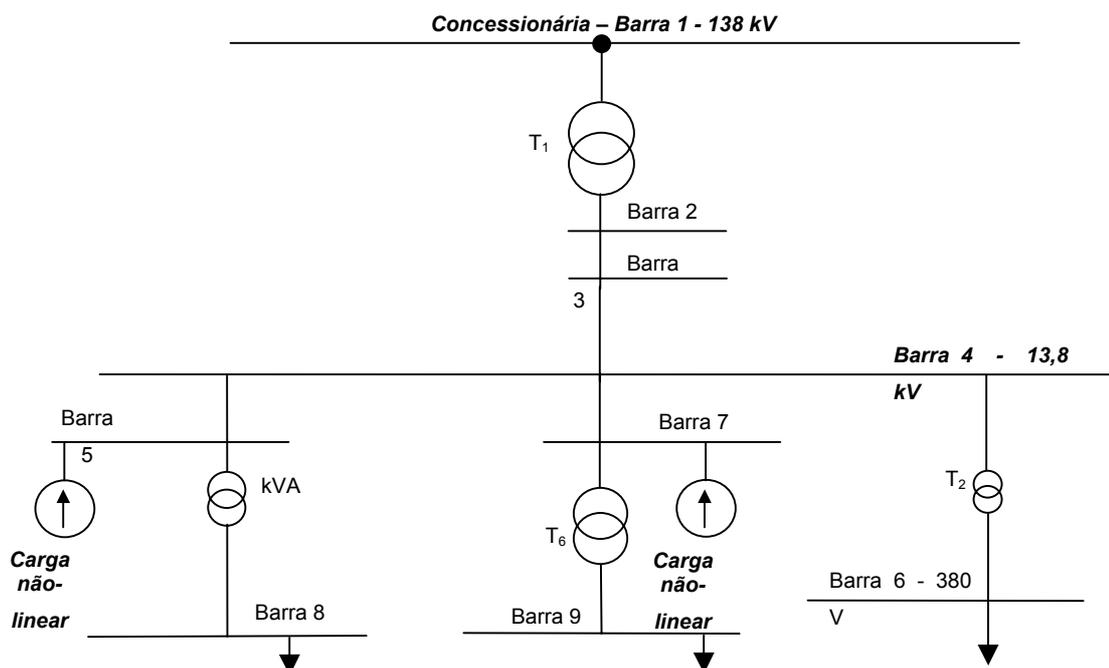
#### **4.6 Análise qualitativa e quantitativa - casos práticos**

A fim de melhor exemplificar, bem como, evidenciar a aplicação da metodologia apresentada para a avaliação das solicitações adicionais devido aos componentes harmônicos, são mostrados dois casos práticos e reais referentes a sistemas elétricos de unidades industriais, com os cenários anterior e posterior à mitigação da distorção harmônica.

Os valores apresentados neste item para as distorções harmônicas totais, distorções harmônicas individuais, bem como as formas de onda mostradas, são resultados de medições efetuadas, considerando um percentil de 90%, e ainda, condições operativas predominantes. Outros critérios ou condições de medição poderiam implicar resultados diferentes.

##### **Caso Prático 1**

A primeira indústria em questão, caso prático 1, tem energia elétrica suprida por uma rede de 138kV conectada a um transformador principal de 6,25 MVA. Trata-se de uma indústria eletrointensiva possuindo duas cargas não-lineares concentradas. O diagrama unifilar simplificado deste sistema é apresentado na figura 4.1.



**Figura 4.1 – Diagrama unifilar da indústria do caso prático 1**

Para correção dos valores de fator de potência, fez-se necessária a instalação de bancos de capacitores nas barras 4 e 6, com potências de 3,8 e 1 Mvar, respectivamente.

A imprescindível instalação dos bancos de capacitores implicou elevados níveis de distorção harmônica total de tensão (DTHT) nas barras do sistema em estudo. Medições de fluxo de harmônicos indicaram valores de DTHT de 12 e 15% para as barras 4 e 6, respectivamente, onde estão instalados os bancos de capacitores. Referindo-se à metodologia proposta em 4.5, são apresentadas a seguir as implicações destas condições para os bancos de capacitores instalados.

#### **Caso Prático 1 – Dados para a Barra 4 – Antes da mitigação**

Tensão de operação - 60 Hz: 1,0 p.u.

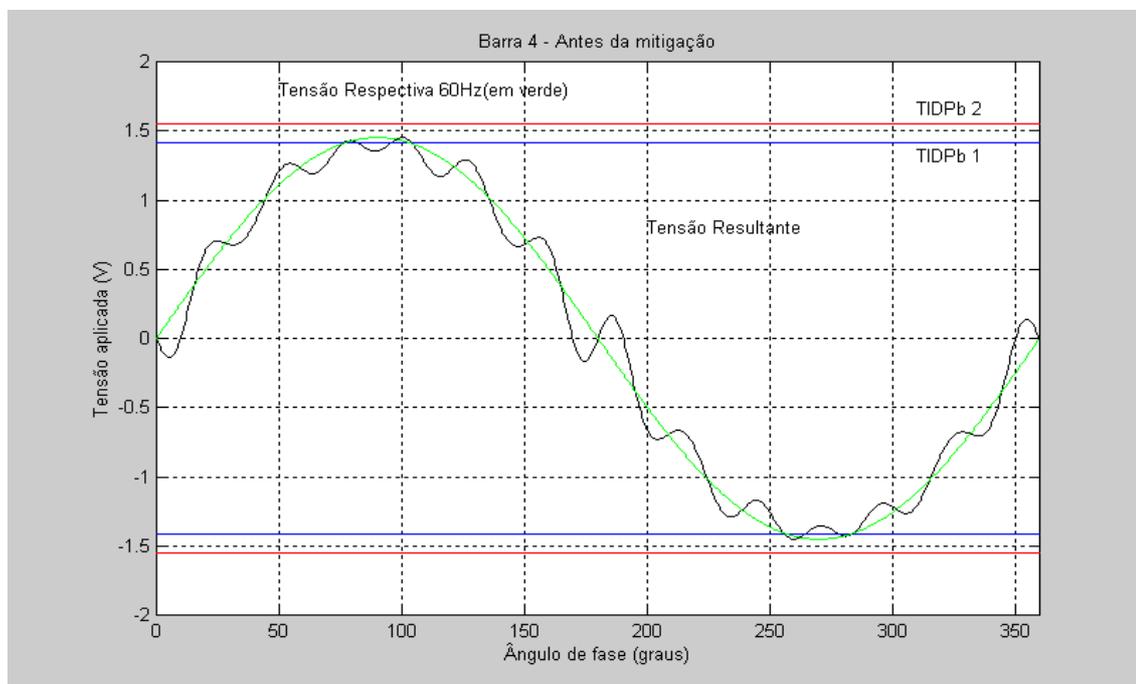
DTHT: 12% →  $V = 1,0064$  p.u.

Distorções harmônicas individuais:

5h = 2%; 7h = 1,5%; 9h = 0,8%; 11h = 6,8%; 12h = 1%;

13h = 9,2%; 15h = 0,8%; 17h = 1,8% e 19h = 0,6%.

Forma de onda da tensão resultante, gráfico 4.10.



**Gráfico 4.10 – Tensão resultante na Barra 4 – Antes da mitigação**

Fonte: Cálculo computacional a partir de medições específicas.

Valor de crista da tensão resultante: 1,0265 p.u.crista

Desta forma, tem-se:

**a) TIDP<sub>b1</sub>**

$\Delta\text{GTA}$  (p.u.)            0,027                                    TVR (p.u.)            0,88

$\alpha$  (valor proposto)    4,7     $A_h/A_{60}$             0,52

A partir da relação entre as áreas  $\left(\frac{A_h}{A_{60}} = 0,52\right)$  pode-se inferir um TVR maior que 88%, pelo menos, aproximando-se do TVP.

**b) TIDP<sub>b2</sub>**

Para esta situação,  $\Delta\text{GTA} = 0$ , portanto, o TVR = TVP = 1,00 p.u.

### Caso Prático 1 – Dados para a Barra 6 – Antes da mitigação

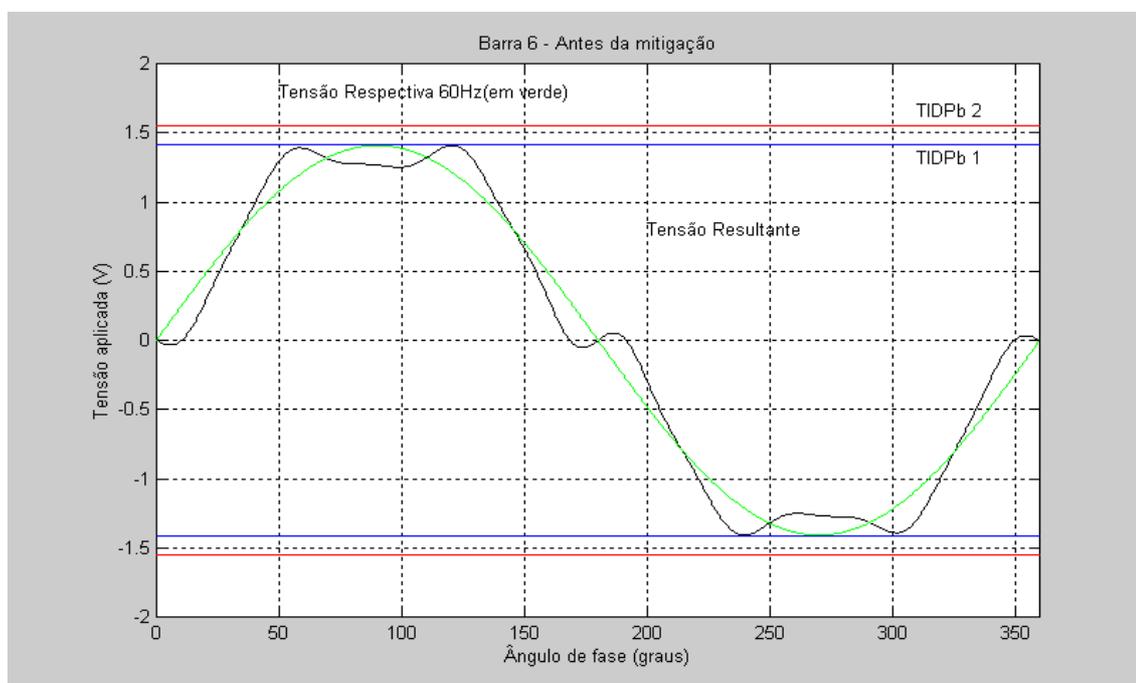
Tensão de operação - 60Hz: 1,0 p.u.

DTHT: 15% →  $V = 1,0112$  p.u.

Distorções harmônicas individuais:

5h = 14,8%; 7h = 3%; 9h = 1%; 10h = 0,8%; 11h = 3%; e 13 h = 0,6

Forma de tensão resultante, gráfico 4.11:



### Gráfico 4.11 – Tensão aplicada na Barra 6 – Antes da mitigação

Fonte: Cálculo computacional a partir de medições específicas.

Valor de crista da tensão resultante: 0,9961 p.u.<sub>crista</sub>

Desta forma, para TIDP<sub>b1</sub> e TIDP<sub>b2</sub>, tem-se:

$\Delta GTA = 0$      $TVR = TVP = 1,00$  p.u.

Os valores de TVR, maior que 0,88 p.u. e 1,00 p.u., encontrados para

as barras 4 e 6, respectivamente, mesmo com  $TIDP_b = 1,00$  p.u., podem causar surpresa se correlacionados apenas com os valores de distorção harmônica de 12 e 15%.

Uma possível falsa impressão de condição dielétrica crítica pode ser descaracterizada por uma análise das formas de onda das tensões resultantes.

Para ambas as tensões das barras, os valores instantâneos praticamente não atingem a  $TIDP_b1$ , não caracterizando a atividade de DP. Particularmente, nem os valores eficazes de tensão aplicada são consideravelmente superiores ao valor nominal.

Ainda assim, considerando-se o planejamento e projeto adequados de sistemas elétricos, condições de funcionamento similares a essa não são prováveis, visto que podem ser nocivas a outras funcionalidades.

Desta forma, deve-se proceder a mesma análise anterior, porém considerando-se implementada a mitigação para distorções harmônicas.

Para o caso específico, optou-se pela instalação de filtros de potência, sendo um deles na barra 4, utilizando o banco de capacitores projetado para a correção de fator de potência. Isto visa a otimização dos custos de mitigação de distorção harmônica, sendo largamente adotado. Após a implementação dos filtros, obteve-se valores medidas de DTHT de até 4,2 e 4,8% para as barras 4 e 6, respectivamente.

### **Caso Prático 1 - Dados para a Barra 4 – Após a mitigação da distorção harmônica**

Tensão de operação - 60Hz: 1,0 p.u.

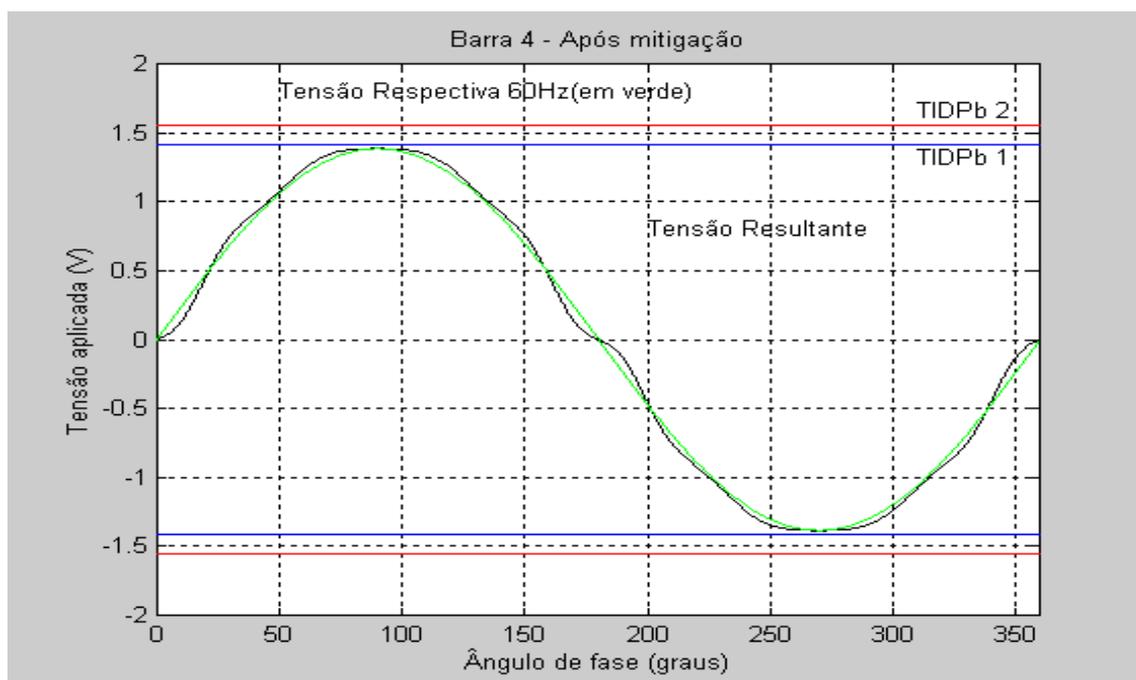
DTHT: 4,2% → Tensão V = 1,0002 p.u. (barra)

Distorções harmônicas individuais:

5h = 2%; 7h = 1,8%; 9h = 3%; 11h = 1,4% e 13h = 0,3%.

Vale lembrar que os limites de distorção harmônica de tensão total e individuais não foram ultrapassados, sendo a mitigação proposta satisfatória.

Forma de onda da tensão resultante, gráfico 4.12:



**Gráfico 4.12 – Tensão resultante na barra 4 – Após mitigação**

Fonte: Cálculo computacional a partir de medições específicas.

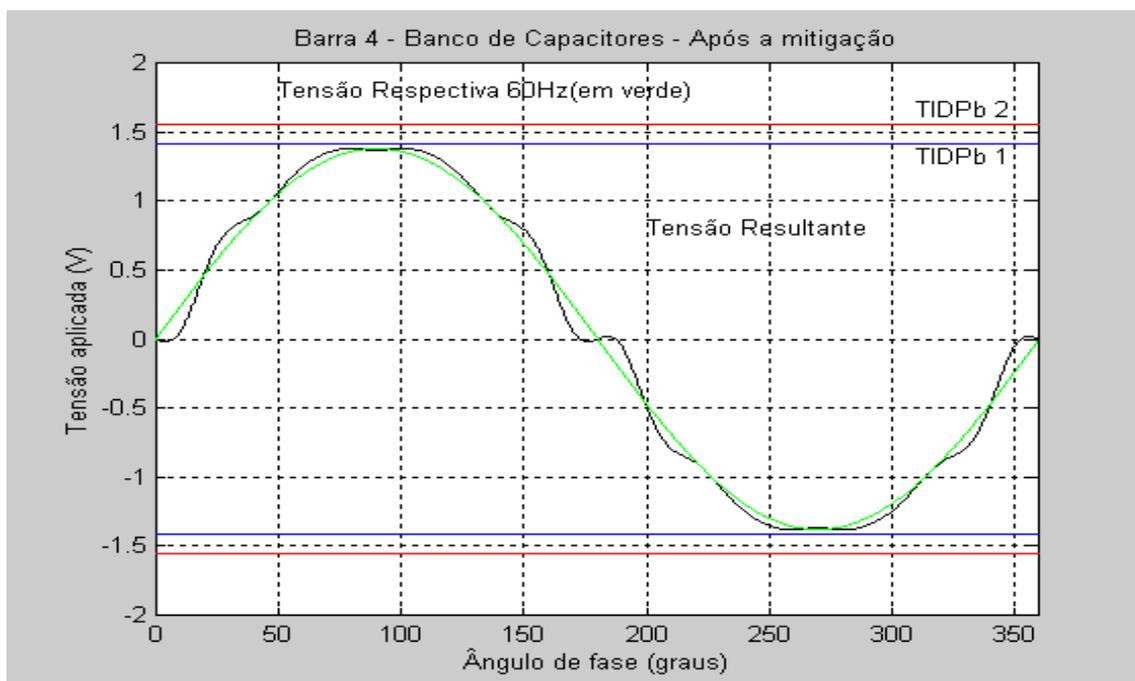
Valor de crista da tensão resultante: 0,9790 p.u. (barra)

Para o banco de capacitores, tem-se:

$$V_{\text{bco capacitores}} = 1,0018 \text{ p.u.};$$

$$V_{\text{bco capacitores}} = 0,97582 \text{ p.u. crista.}$$

Estes valores consideram a elevação de tensão decorrente da instalação do reator em série com o banco de capacitores para a composição do filtro (5h). A forma de onda da tensão resultante é apresentada no gráfico 4.13.



**Gráfico 4.13 – Tensão resultante no banco de capacitores da barra 4 – Após mitigação**

Fonte: Cálculo computacional a partir de medições específicas.

Portanto, a tensão aplicada no banco de capacitores não atinge o valor da  $TIDP_{b1}$ , sendo  $TVR = TVP = 1$  p.u.

### **Caso Prático 1 – Dados para a Barra 6 – Após a mitigação da distorção harmônica**

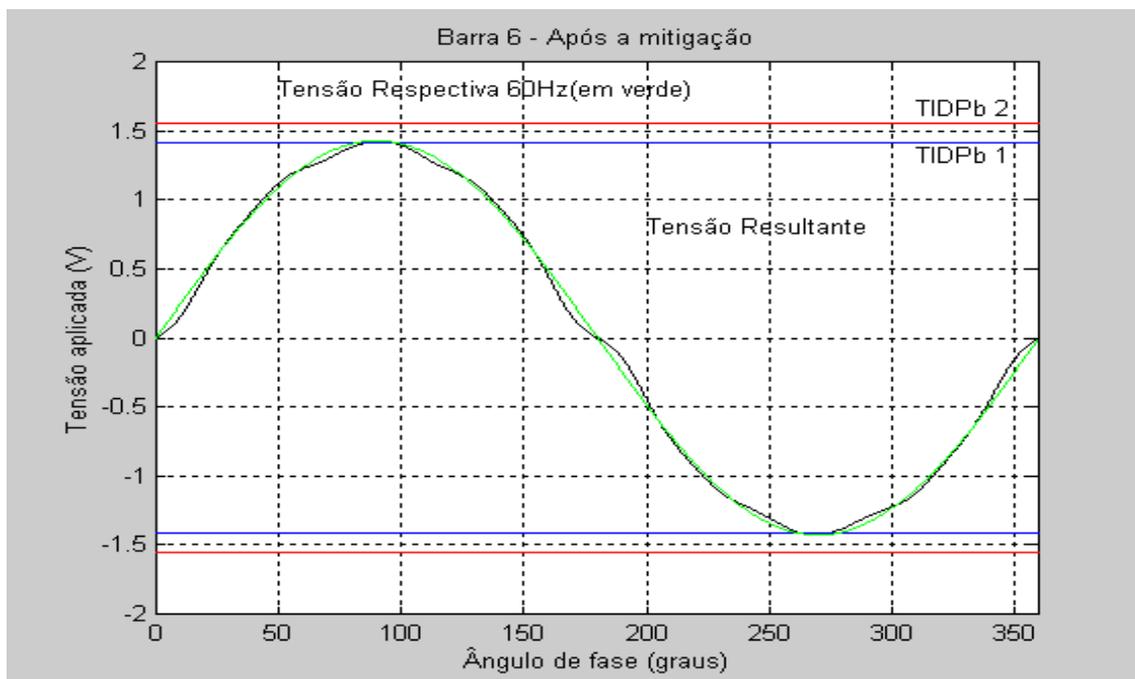
Tensão de operação - 60Hz: 1,0 p.u.

DTHT: 4,8%  $\rightarrow V = 1,0001$  p.u.

Distorções harmônicas individuais:

5h = 2%; 7h = 3%; 8h = 0,5%; 9h = 0,7%; 11h = 1,2% e 13h = 0,6%.

Forma de onda da tensão resultante, gráfico 4.14:



**Gráfico 4.14 – Tensão resultante na barra 6 – Após mitigação**

Fonte: Cálculo computacional a partir de medições específicas.

Valor de crista da tensão resultante: 1,0094 p.u.<sub>crista</sub>

Desta forma, tem-se:

**a) TIDP<sub>b1</sub>**

$\Delta$ GTA (p.u.)            0,01                                    TVR (p.u.)            0,95

$\alpha$  (valor proposto)    4,7     $A_h/A_{60}$             0,74

A relação  $\frac{A_h}{A_{60}}$  indica um TVR maior que 95%, aproximando-se do TVP.

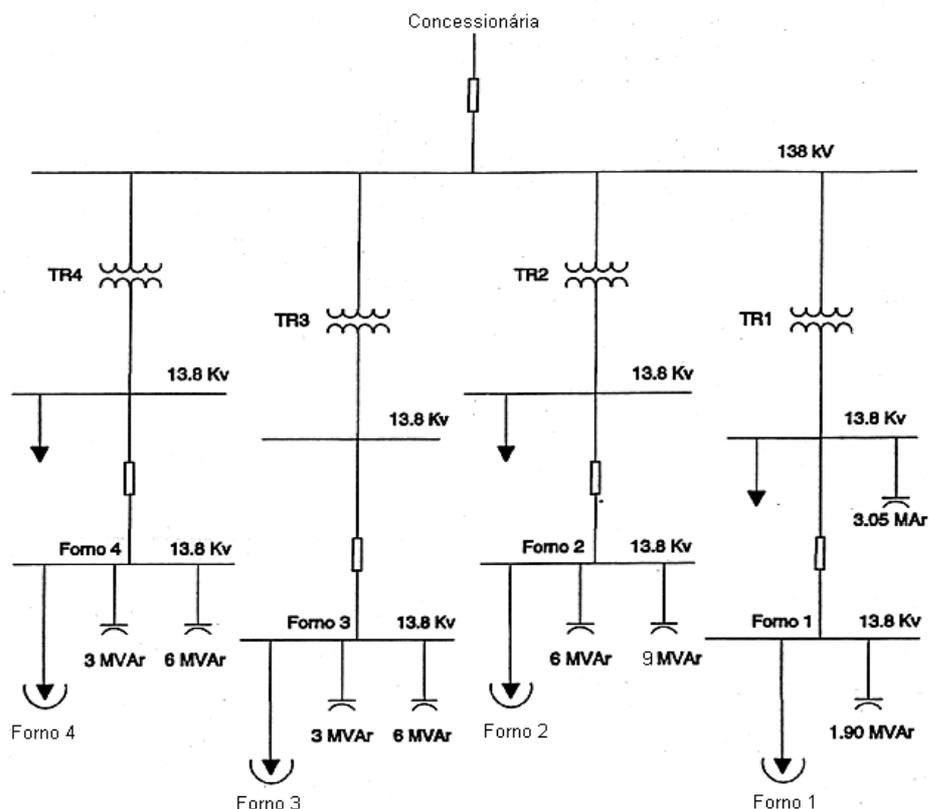
**b) TIDP<sub>b2</sub>**

$\Delta$ GTA = 0  $\rightarrow$  TVR = TVP = 1,00 p.u.

Os valores encontrados para TVR indicam que não existe uma situação de significativa redução da vida útil dos capacitores após implementada a mitigação, em conformidade com as recomendações e/ou normas específicas.

## Caso Prático 2

O segundo caso prático relata um estudo de fluxo de harmônicos num sistema elétrico pertencente a uma indústria metalúrgica possuidora de fornos de redução. O diagrama unifilar parcial e simplificado é apresentado na figura 4.2.



**Figura 4.2 – Diagrama Unifilar da indústria do caso prático 2**

Primeiramente, foram realizadas medições de harmônicos, verificando-se valores elevados nas barras da subestação da indústria, com destaque para as barras de 13,8 Kv respectivas aos fornos 2 e 3. Os valores de DTHT medidos foram de 6,8 e 13,45%, com a seguinte composição:

### Barra Forno 2

DTHT = 6,80%;

Distorções harmônicas individuais:

2h = 1,0%; 3h = 2,4%; 4h = 6,0%; 5h = 1,9%; e 6h = 0,7%.

### Barra Forno 3

DTHT = 13,45%;

Distorções harmônicas individuais:

2h = 1,9%; 3h = 12,5%; 4h = 0,9%; 5h = 3,4%; 6h = 2,9%; e 7h = 0,7%.

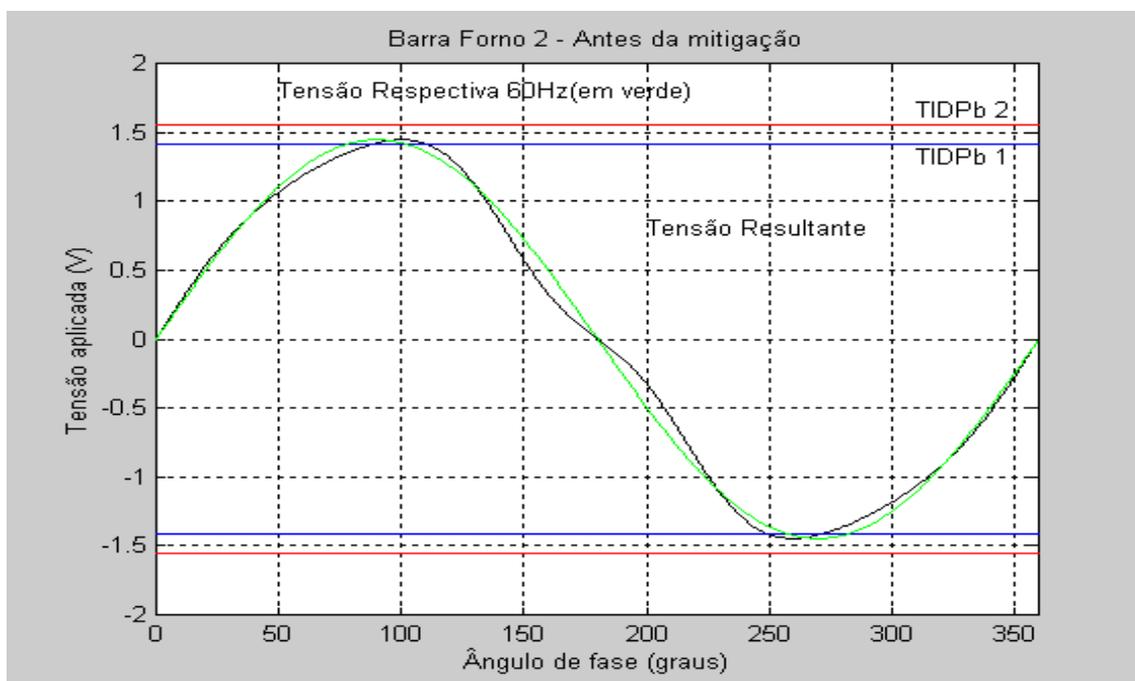
Considerando os valores medidos, segue a análise das implicações sobre os capacitores instalados nas Barras Forno 2 e Forno 3.

### Caso Prático2 - Dados para a Barra Forno 2 – Antes da Mitigação

Tensão de operação – 60 Hz: 1,0 p.u.

Tensão resultante: 1,0016 p.u.

Forma de onda da tensão resultante, gráfico 4.15.



**Gráfico 4.15 – Tensão resultante na Barra Forno 2 – Antes da mitigação**

Fonte: Cálculo computacional a partir de medições específicas.

Valor de crista da tensão resultante: 1,0225 p.u. crista

Desta forma, tem-se:

**a) TIDP<sub>b1</sub>**

$\Delta\text{GTA}$ (p.u.)	0,023	TVR (p.u.)	0,90
$\alpha$ (valor proposto)	4,7	$A_h/A_{60}$	0,90

A relação  $\frac{A_h}{A_{60}} = 0,90$  indica um TVR maior do que 90%, possivelmente não muito maior devido aos valores próximos de energia envolvida pra as situações de ensaio ( $A_{60}$ ) e real( $A_h$ ).

**b) TIDP<sub>b2</sub>**

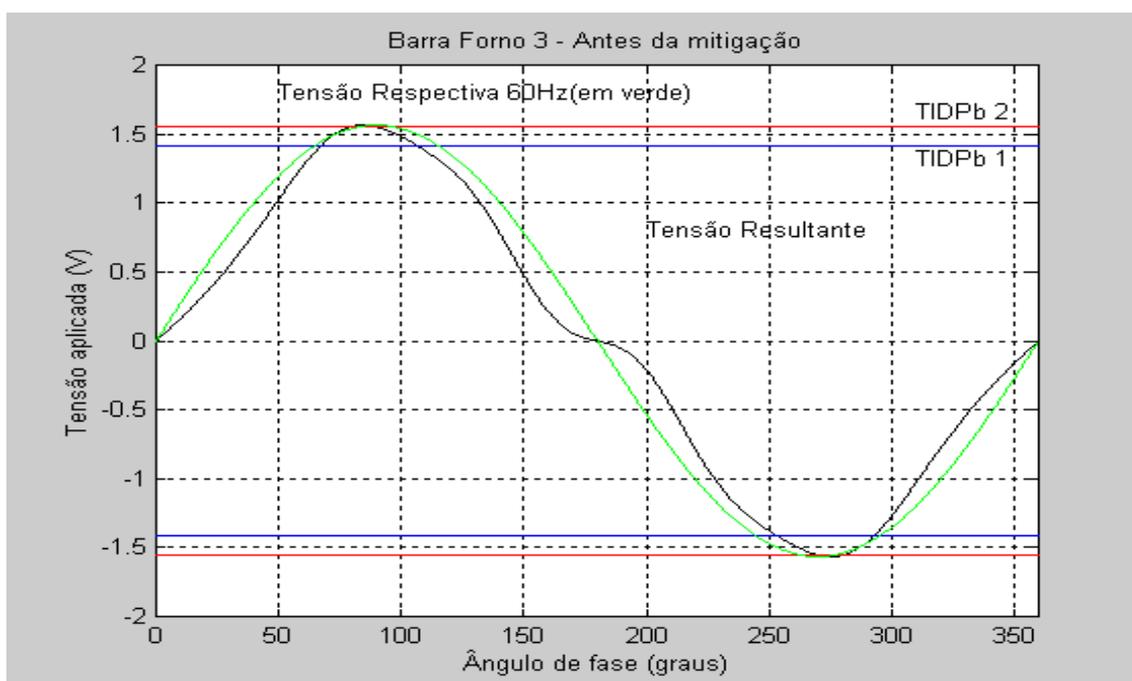
Para esta situação,  $\Delta\text{GTA} = 0$ , portanto, o  $\text{TVR} = \text{TVP} = 1,00$  p.u.

**Caso Prático 2 - Dados para a Barra Forno 3 – Antes da Mitigação**

Tensão de operação – 60 Hz: 1,0 p.u.

Tensão resultante: 1,0083 p.u.

Forma de onda da tensão resultante, gráfico 4.16.



**Gráfico 4.16 – Tensão resultante na Barra Forno 3 – Antes da mitigação**

Fonte: Cálculo computacional a partir de medições específicas.

Valor de crista da tensão resultante: 1,1066 p.u. crista

Desta forma, tem-se:

**a) TIDP<sub>b1</sub>**

$\Delta$ GTA (p.u.)	0,107	TVR (p.u.)	0,60
$\alpha$ (valor proposto)	4,7	$A_h/A_{60}$	0,78

A relação  $\frac{A_h}{A_{60}} = 0,78$  indica uma degradação real mais atenuada em relação à calculada.

**b) TIDP<sub>b2</sub>**

$\Delta$ GTA p.u.	0,007	TVR (p.u.)	0,97
$\alpha$ (valor proposto)	4,7	$A_h/A_{60}$	0,71

A relação  $\frac{A_h}{A_{60}} = 0,71$  indica uma degradação real mais atenuada em relação à calculada, possivelmente se aproximando bastante do TVP.

Os resultados encontrados para o caso prático 2, antes da mitigação, apontam uma redução da vida útil menor para uma DTHT = 6,8% e uma redução bastante relevante para uma DTHT = 13,45%, considerando-se o projeto de capacitor dimensionado para TIDP<sub>b</sub> igual à tensão nominal do barramento associado.

A implementação da mitigação consistiu na instalação de filtros nas barras Forno 2 e Forno 3, utilizando-se os bancos de capacitores existentes de 9 e 6 MVar respectivamente.

Esta mitigação implicou valores menores de DTHT, como a seguir:

Barra Forno 2, DTHT = 4,10%, e

Barra Forno 3, DTHT = 1,56%.

Desta forma, optou-se por analisar as situações após a mitigação para a Barra Forno 2 e para o banco de capacitores instalado nesta barra como

componente do filtro de potência.

### Caso prático 2 – Dados para a Barra Forno 2 – Após a mitigação

Dados para a Barra Forno 2, nesta condição posterior:

DTHT = 4,10%

Distorções harmônicas individuais:

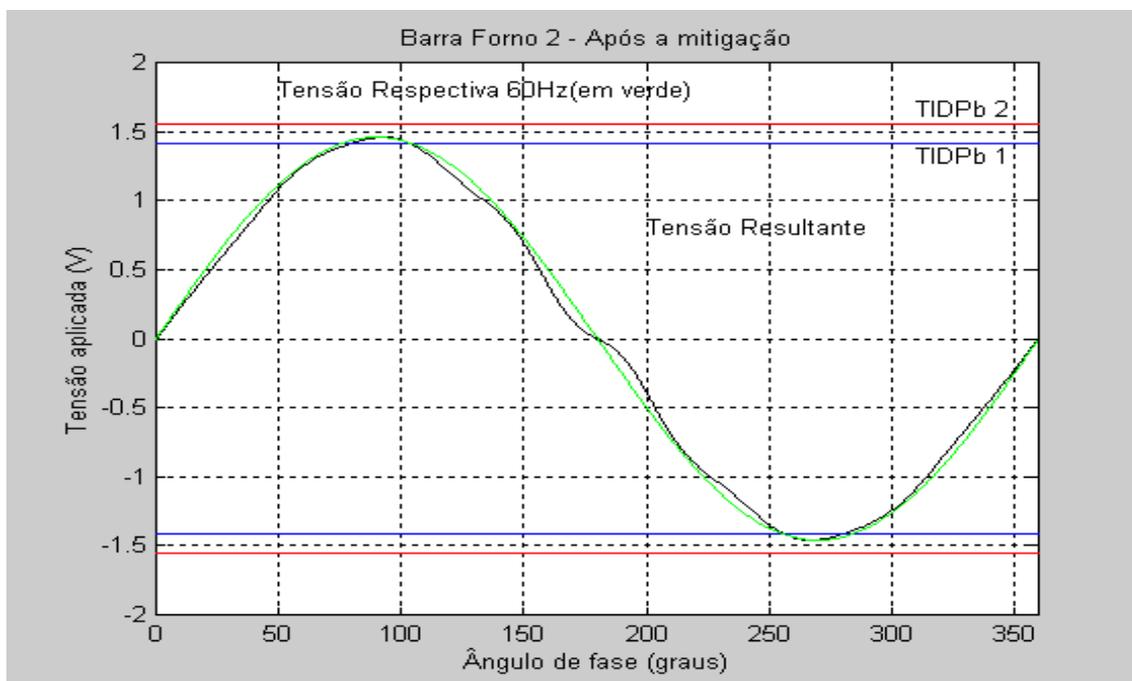
2h = 0,7%; 3h = 3,2%; 4h = 0,3%; 5h = 1,1%; 6h = 0,9%; e 7h = 1,5%;

8h = 2%; 9h = 0,8%; 10h = 0,3%; e 11h = 0,2%.

Tensão de operação 60 Hz: 1,0 p.u.

Tensão resultante: 1,0003 p.u.

Forma de onda da tensão resultante, gráfico 4.17.



**Gráfico 4.17 – Tensão resultante na Barra Forno 2 – Após a mitigação**

Fonte: Cálculo computacional a partir de medições específicas.

Valor de crista da tensão resultante: 1,0312 p.u.-crista

Desta forma, tem-se:

### a) TIDP<sub>b1</sub>

$\Delta\text{GTA}$ (p.u.)	0,031	$\text{TVR}$ (p.u.)	0,86
$\alpha$ (valor proposto)	4,7	$A_h/A_{60}$	0,84

A relação  $\frac{A_h}{A_{60}} = 0,84$  indica uma degradação real mais atenuada em relação à calculada.

### b) TIDP<sub>b2</sub>

Para esta condição,  $\Delta\text{GTA} = 0$ , portanto, o  $\text{TVR} = \text{TVP} = 1,00$  p.u.

Para o banco de capacitores de 9 MVar, considerando-se a instalação do reator em série para a composição do filtro (3,5h), tem-se:

$$V_{\text{bco capacitores}} = 1,0005 \text{ p.u.};$$

$$V_{\text{bco capacitores}} = 1,0318 \text{ p.u. crista.}$$

A forma de onda da tensão resultante é apresentada no gráfico 4.18.



**Gráfico 4.18 – Tensão resultante no banco de capacitores da barra Forno 2 – Após mitigação**

Fonte: Cálculo computacional a partir de medições específicas.

Desta forma, tem-se:

**a) TIDP<sub>b1</sub>**

$\Delta\text{GTA}$ (p.u.)	0,032	$\text{TVR}$ (p.u.)	0,86
$\alpha$ (valor proposto)	4,7	$A_h/A_{60}$	0,86

A relação  $\frac{A_h}{A_{60}} = 0,86$  indica uma degradação real mais atenuada em relação à calculada.

**b) TIDP<sub>b2</sub>**

Para esta condição,  $\Delta\text{GTA} = 0$ , portanto, o  $\text{TVR} = \text{TVP} = 1,00$  p.u.

Deve-se enfatizar, que a análise desses casos práticos considera sempre a tensão de operação (60Hz) igual a 1,00 p.u., antes e após a instalação dos bancos de capacitores, o que indica sistemas regulados eficazmente e propicia melhores resultados.

Na prática, esta condição não ocorre necessariamente. Portanto, torna-se válido considerar a hipótese de 5% (por exemplo) de sobretensão na frequência fundamental, a fim de reavaliar alguns dos valores de TVR encontrados.

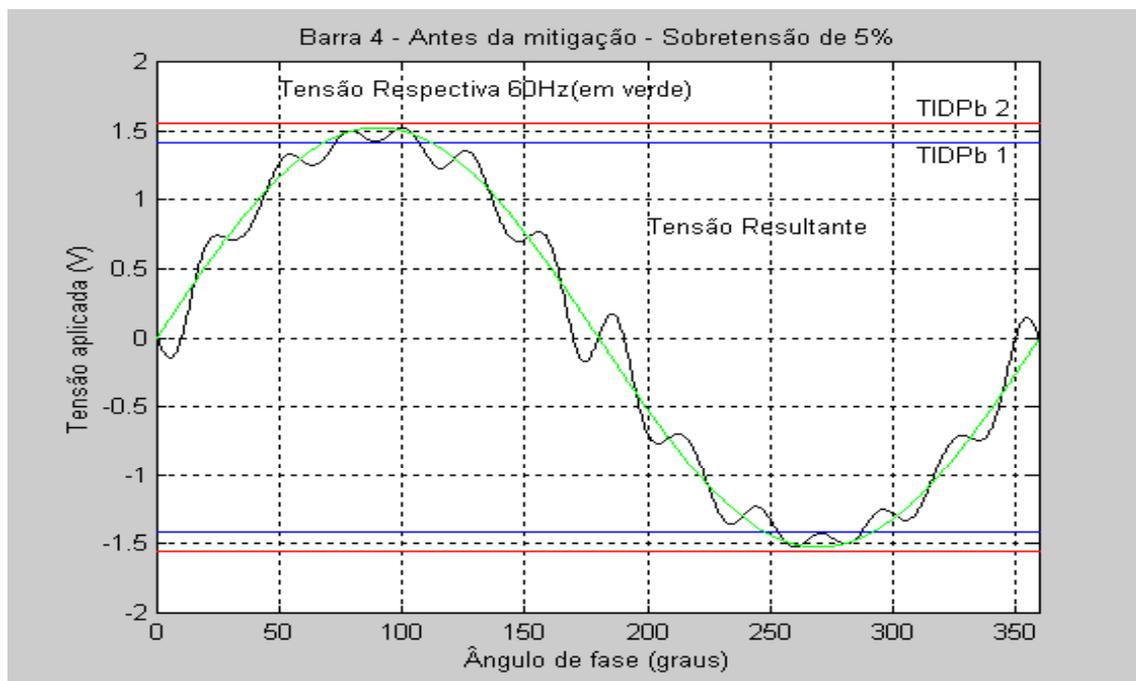
**Casos Práticos – Sobretensão de 5%**

Para o caso prático 1, Barra 4 – antes da mitigação, ter-se-ia:

Tensão de operação 60 Hz: 1,05 p.u.

Tensão resultante: 1,0567 p.u.

Forma de onda da tensão resultante, gráfico 4.19.



**Gráfico 4.19 – Tensão resultante na Barra 4 com 5% de sobretensão – Antes da mitigação**

Fonte: Cálculo computacional a partir de medições específicas.

Valor de crista da tensão resultante: 1,0778 p.u.<sub>crista</sub>

Desta forma, tem-se:

**a) TIDP<sub>b1</sub>**

$\Delta\text{GTA}$  (p.u.)                      0,078                                      TVR (p.u.)                      0,69

$\alpha$  (valor proposto)              4,7     $A_h/A_{60}$                       0,77

A relação  $\frac{A_h}{A_{60}} = 0,77$  indica uma degradação real mais atenuada em relação à calculada.

**b) TIDP<sub>b2</sub>**

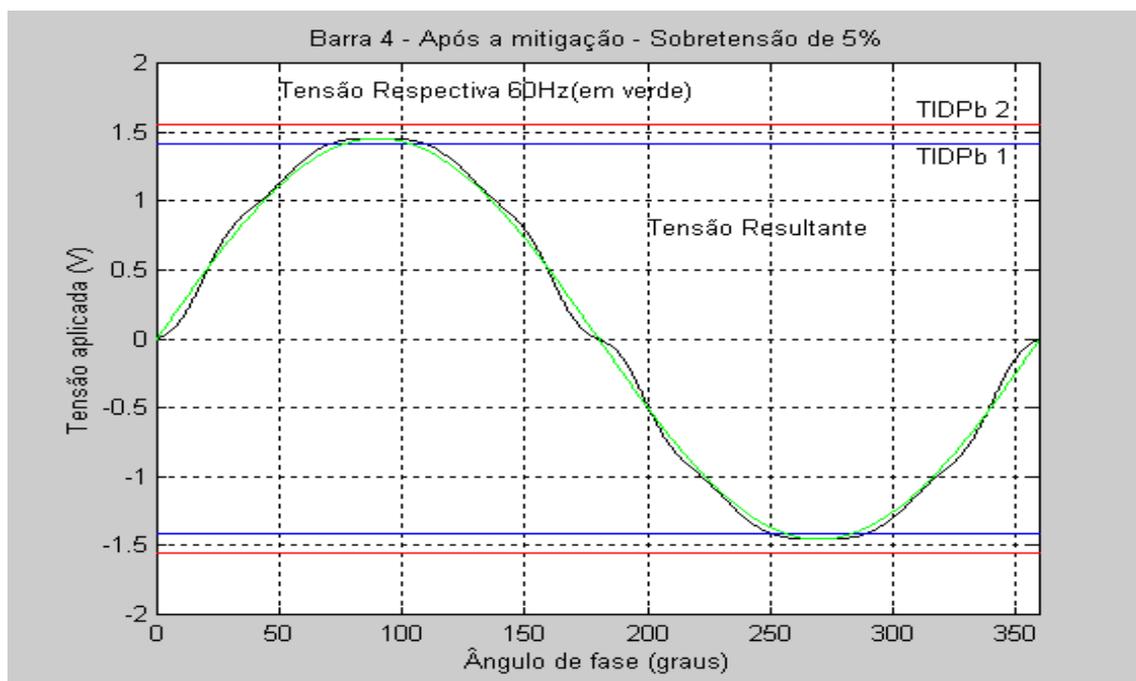
Para esta condição,  $\Delta\text{GTA} = 0$ , portanto, o TVR = TVP = 1,00 p.u.

Agora, considera-se ainda o caso prático 1, Barra 4, porém após a mitigação:

Tensão de operação 60 Hz: 1,05 p.u.

Tensão resultante: 1,0502 p.u.

Forma de onda da tensão resultante, gráfico 4.20.



**Gráfico 4.20 – Tensão resultante na Barra 4 com 5% de sobretensão – Após a mitigação**

Fonte: Cálculo computacional a partir de medições específicas.

Valor de crista da tensão resultante: 1,0280 p.u.<sub>-crista</sub>

Desta forma, tem-se:

**a) TIDP<sub>b1</sub>**

$\Delta$ GTA (p.u.)	0,028	TVR (p.u.)	0,88
$\alpha$ (valor proposto)	4,7	$A_h/A_{60}$	1,46

A relação  $\frac{A_h}{A_{60}} = 1,46$  indica uma degradação real maior do que a calculada, provavelmente, de forma bastante significativa.

### b) TIDP<sub>b2</sub>

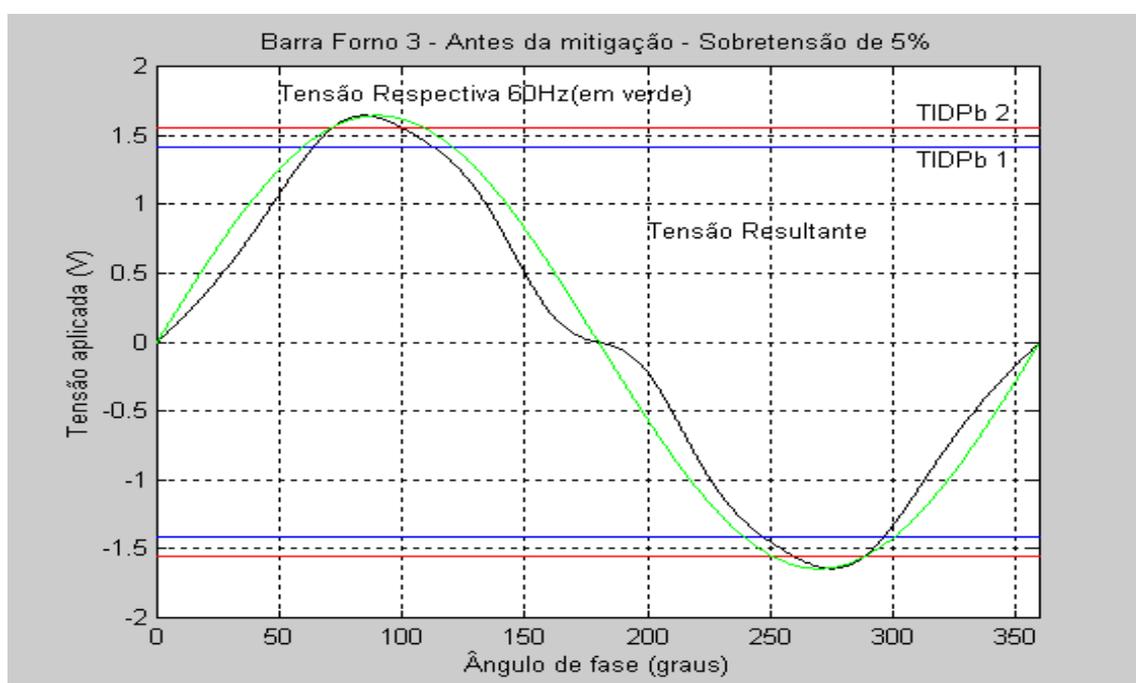
Para esta condição,  $\Delta GTA = 0$ , portanto, o TVR = TVP = 1,00 p.u.

Por último, toma-se o caso prático 2, Barra Forno 3.

Tensão de operação 60 Hz: 1,05 p.u.

Tensão resultante: 1,0587 p.u.

Forma de onda da tensão resultante, gráfico 4.21.



**Gráfico 4.21 – Tensão resultante na Barra Forno 3 com 5% de sobretensão – Antes da mitigação**

Fonte: Cálculo computacional a partir de medições específicas.

Valor de crista da tensão resultante: 1,1620 p.u.<sub>crista</sub>

Desta forma, tem-se:

### a) TIDP<sub>b1</sub>

$\Delta GTA$ (p.u.)	0,162	TVR (p.u.)	0,47
---------------------	-------	------------	------

$\alpha$ (valor proposto)	4,7	$A_h/A_{60}$	0,79
---------------------------	-----	--------------	------

A relação  $\frac{A_h}{A_{60}} = 0,79$  indica uma degradação real menor em relação à calculada.

#### **b) TIDP<sub>b2</sub>**

$\Delta$ GTA (p.u.)	0,062	TVR (p.u.)	0,75
---------------------	-------	------------	------

$\alpha$ (valor proposto)	4,7	$A_h/A_{60}$	0,76
---------------------------	-----	--------------	------

A relação  $\frac{A_h}{A_{60}} = 0,76$  indica uma degradação real menor em relação à calculada.

### **4.7 Comentários finais ao capítulo**

Para se avaliar as solicitações adicionais impostas aos capacitores de potência, devido aos componentes harmônicos, optou-se por um exame qualitativo e quantitativo dos mecanismos de degradação do sistema dielétrico em questão.

Uma reflexão sobre a interação das atividades de DP e as reações eletroquímicas e orgânicas que envolvem o fenômeno de degradação dos capacitores de potência permitiu estabelecer relações que, se não quantificam as grandezas envolvidas, pelo menos, esclarecem o papel dos agentes, participantes e objetos.

Estabelecido este conceito básico, pôde-se desenvolver uma abordagem devidamente sustentada sobre as solicitações adicionais impostas aos capacitores de potência pelos componentes harmônicos de tensão. A discussão foi centrada na solicitação dielétrica à qual o sistema dielétrico do capacitor é submetido, no caso de formas de onda de tensão distorcidas por harmônicos, levando-se em conta os seus valores instantâneos. Tendo-se em vista os valores propostos de sobretensão e distorções harmônicas, procedeu-se uma análise comparativa entre aplicações e condições diversas. Esta

análise permitiu identificar a energia das DP como uma variável importante para a deteriorização do capacitor de potência.

Posteriormente, procurou-se estabelecer uma relação de proporcionalidade entre o nível de estresse dielétrico imposto ao capacitor de potência e o grau de degradação resultante, considerando-se sempre o fenômeno como de longa duração. Para tal, foram utilizados dados obtidos de experimentos.

Os resultados dos desenvolvimentos relatados permitiu estabelecer uma equação empírica que busca quantificar a perda de vida útil do capacitor de potência devido às solicitações dielétricas adicionais impostas pelas tensões harmônicas, seguida de uma análise gráfica para comparação das energias das atividades de DP.

A partir de casos práticos de aplicação de bancos de capacitores para correção de fator de potência e como componentes de filtros de harmônicos em duas diferentes instalações industriais, objetivou-se exercitar e consolidar a teoria apresentada, tornando o conteúdo abordado mais próximo do cotidiano do engenheiro de sistemas de potência.

Os resultados obtidos para os casos práticos possibilitaram observações que valem ser discutidas.

No caso prático 1, foram apresentados altos valores de distorção harmônica de tensão (12 e 15%), porém, esta condição não implicou altos valores de tensão eficazes ou de crista. Conseqüentemente, não foram obtidos tempos de vida reais menores do que o projetado.

Para o mesmo caso prático, porém com uma suposta sobretensão de 5%, na frequência fundamental, foram verificadas condições provavelmente críticas para o projeto com a  $TIDP_b1$ , mesmo com valores moderados de DTHT. Este resultado foi ditado pela energia proveniente das DP devida às formas de onda das tensões resultantes.

No caso prático 2, valores de distorções harmônicas de tensão comparativamente menores já puderam produzir alguma redução no TVR dos capacitores. As condições analisadas basicamente se caracterizaram por valores de tensão de cristas maiores, porém com valores de energia das DP menores.

Uma rápida comparação entre os casos práticos 1 e 2 permite concluir sobre a forte dependência do TVR calculado em relação à forma de onda da tensão resultante, determinada pela magnitude e ordem dos harmônicos.

Outro ponto a mencionar se refere à eficiência conseguida para as mitigações dos casos práticos apresentados.

Ainda, pôde-se enfatizar e comprovar a importância dos parâmetros de projeto que determinam a  $TIDP_b$  no desempenho dos capacitores sob componentes harmônicos, entre outras características.

Em geral, foram apresentados situações, parâmetros e resultados numéricos advindos da tese desenvolvida, aplicados a casos concretos, validando a metodologia proposta.

Por último, pôde-se concluir que as formas de onda e magnitudes da tensão aplicada se apresentaram como determinantes para o desempenho dos capacitores de potência.

Distorções harmônicas de tensão não implicam necessariamente solicitações dielétricas maiores, quando comparadas com a onda senoidal pura. Além disto, situações distintas em que a DTHT é a mesma, podem resultar em solicitações dielétricas desiguais, com impacto diferenciado na vida útil do capacitor.

## **CAPÍTULO 5 – ANÁLISE CRÍTICA DAS CLÁUSULAS NORMATIVAS PERTINENTES**

Após a avaliação da influência dos componentes harmônicos sobre o desempenho dos capacitores de potência, levando-se em conta a grande importância do fenômeno da atividade de DP e das formas de onda da tensão aplicada, segue uma análise crítica sucinta das principais normas pertinentes (IEC, ANSI/IEEE, ABNT).

O objetivo é correlacionar os limites e requisitos de desempenho estabelecidos pelas normas e/ou cláusulas de especificação, e as recomendações dadas para instalação e operação dos capacitores de potência, ao exposto nos capítulos anteriores.

Os tópicos principais a serem discutidos são sobretensões permissíveis de longa duração, critérios para a escolha da tensão nominal e aplicação sob componentes harmônicos.

Dentro destes tópicos, para melhor caracterizar as diretrizes normativas correspondentes, é feita separadamente uma análise para normas européias, norte-americanas e nacionais, nesta seqüência, sendo posteriormente também realizada uma análise comparativa entre elas.

Adicionalmente, alguns pontos complementares são brevemente apresentados e correlacionados com o conteúdo deste trabalho.

### **5.1 Sobretensões permissíveis de longa duração**

A norma **IEC** [15,19] apresenta uma tabela para os níveis de tensão permissíveis, como segue:

**Tabela 5.1**  
**Tensões de Longa Duração – IEC 60871-1 – Projeto 33/260/FDIS**

Tipo	Tensão (valor eficaz)	Duração máxima	Observações
Frequência nominal	$1,00 V_n$	Contínua	Valor médio mais elevado durante um período qualquer de energização
Frequência nominal	$1,10 V_n$	8h para período de 24h	Regulação e flutuação da tensão do sistema
Frequência nominal	$1,15 V_n$	30 min para período de 24h	Regulação e flutuação da tensão do sistema
Frequência nominal	$1,20 V_n$	5 min	Elevação da tensão na carga leve do sistema
Frequência nominal	$1,30 V_n$	1 min	
Frequência nominal mais harmônicos	Valor tal que a corrente não exceda o valor máximo indicado na norma		

Fonte: Projeto final de norma IEC - 33/260/FDIS [15]

O texto inclui a afirmativa de que as sobretensões que podem ser toleradas, sem uma deterioração significativa do capacitor, dependem da sua duração, do número total de sobretensões e da temperatura do capacitor.

Em relação ao conteúdo relativo às tensões de longa duração, deve-se destacar no projeto de norma em elaboração [15]:

- a) Houve uma redução de 12 para 8h para a duração máxima do valor de sobretensão de  $1,10V_n$ , se comparada à edição atual da mesma norma. Essa tolerância prevista para comportar flutuações e regulações de tensão nos sistemas elétricos foi reduzida, provavelmente, pela possibilidade operacional de se reduzir os tempos demandados por elas, e ainda, principalmente, visam a preservação dos capacitores, reduzindo-se os períodos de estresses dielétrico acima do nominal.

Também, reforça-se a idéia de que este valor de sobretensão contribui para uma degradação adicional do capacitor a longo prazo. Portanto, pode-se dizer da possibilidade de atividades de DP nestes patamares de sobretensão, como descrito nos capítulos 3 e 4 deste trabalho.

- b) Adota-se como referência e limites os valores eficazes da tensão aplicada. Portanto, não há nenhuma restrição quanto a eventuais valores de crista de formas de onda distorcidas comparativamente elevados, como já

demonstrado no capítulo 4.

- c) Redução exponencial da duração máxima para fatores de sobretensão maiores do que 1,10.

Como já discutido no capítulo 4, sobretensões maiores implicam níveis de degradação exponencialmente maiores, sendo, portanto, natural a limitação dos períodos pertinentes. Adicionalmente, o projeto de norma assume que sobretensões maiores que  $1,15 V_n$  não ocorrem mais que 200 vezes na vida útil do capacitor.

O conteúdo da seção “Guia de Aplicação” no item de sobretensão é idêntico ao da norma ABNT NBR 10671 vigente, devendo ser consideradas as abordagens pertinentes quando da análise dessa.

Nos itens relativos às tolerâncias da norma **ANSI/IEEE** [14], está especificada uma potência reativa máxima, para regime contínuo, de 135% da potência nominal. Este valor contempla os efeitos combinados devido: às tensões aplicadas maiores que a nominal, mas inferiores aos limites estabelecidos; às tensões harmônicas superpostas à tensão na frequência fundamental; e à capacitância excedente em relação ao valor nominal, dentro do limite estabelecido. Para a tensão aplicada, está previsto um limite de 110% do valor eficaz da tensão nominal e um valor de crista não excedendo  $1,2 \times \sqrt{2} \times V_n$  (eficaz), incluindo os componentes harmônicos, mas excluindo transitórios.

Dentre estas tolerâncias apresentadas para as características nominais, pode-se destacar que o limite para a tensão aplicada leva em conta também o valor de crista desta grandeza, com uma margem de 20%, maior do que aquela do valor eficaz (10%). Desta forma, infere-se que alguma distorção desfavorável da forma de onda da tensão é considerada.

Considerando a análise desenvolvida no capítulo 4, poder-se-ia avaliar as implicações desta concessão sobre a vida útil do capacitor ou se isso implicaria necessariamente na majoração do respectivo sistema dielétrico.

A cláusula de “Guia para Aplicação” enfatiza que a vida útil do capacitor é reduzida por sobrestresses elétricos, sobreaquecimento, alterações químicas, danos físicos ou variações repetidas de temperatura.

Esta frase realmente leva em conta os principais fatores contribuintes para os fenômenos de degradação, indicando como eles podem se manifestar na prática. É interessante notar que é apontada a forma de degradação através de alterações (reações) químicas, o que é compatível com o conteúdo apresentado no capítulo 4.

Outro item da mesma cláusula especifica um número total de 300 sobretensões aplicadas ao sistema dielétrico como permitido na vida útil do capacitor. Não são previstas superposição de transitórios ou componentes harmônicos.

Levando-se em conta a natureza da maioria das aplicações dos capacitores, bem como, os períodos de regulação e flutuação de tensão dos sistemas elétricos, este número parece otimizado, ao contrário do que se possa pensar numa primeira análise. As amplitudes e respectivas durações previstas estão apresentadas na tabela 5.2.

**Tabela 5.2**

**Tensões de Longa Duração – IEEE Std 18-1992**

<b>Duração</b>	<b>Fator sobretensão temporária (x <math>V_n</math>)</b>
6 ciclos	2,20
15 ciclos	2,00
1 s	1,70
15 s	1,40
1 min	1,30
30 min	1,25

Fonte: IEEE Standard for Shunt Power Capacitors [14].

Esta condição limite pre-estabelecida pode significar, por exemplo, no tempo de operação do capacitor:

- 300 minutos (0,0029% da vida útil) sob 30% de sobretensão; ou

- 9.000 minutos (0,0856% da vida útil) sob 25% de sobretensão.

Ainda, é considerado que não haveria nenhum outro ciclo de sobretensão temporária com valor maior que 110%  $V_n$  durante a vida do capacitor.

Nota: Está considerada uma vida útil de, pelo menos, 20 anos em conformidade com a expectativa descrita na norma em análise.

Para a norma de especificação da **ABNT** [10], os valores permissíveis de tensão e as respectivas durações máximas são indicados na tabela 5.3, a seguir:

**Tabela 5.3**  
**Tensões de longa duração – Norma ABNT – NBR 5282**

Tipo	Tensão (valor eficaz)	Duração máxima	Observações
Frequência nominal	$1,00V_n$	Contínua	$V_n$ é escolhido como valor médio mais elevado durante um período qualquer de energização do capacitor, considerando-se o aumento da tensão provocada pela ligação do banco e o perfil de tensão no local da instalação (ver NBR 10671)
Frequência nominal	$1,10 V_n$	12h para período de 24h	
Frequência nominal	$1,15 V_n$	30 min para período de 24h	
Frequência nominal	$1,20 V_n$		Ver nota 3
Frequência nominal	$1,30 V_n$		Ver nota 3
Frequência nominal	Valor tal que a corrente não exceda o valor indicado na norma (ver também mais harmônicos NBR 10671)		

NOTAS

1. Para valores de tensão compreendidos entre  $1,00 V_n$  e  $1,10 V_n$ , a duração da sobretensão devida, por exemplo, à queima de unidades, deve ser limitada ao tempo necessário para a reposição das condições normais de funcionamento, conforme nota 2.
2. A amplitude da sobretensão que pode ser tolerada sem significativa deterioração do capacitor depende da sua duração, do número total de sobretensões e da temperatura do capacitor.
3. As sobretensões indicadas nesta tabela foram assumidas considerando que valores superiores a  $1,15 V_n$  não ocorrem mais que 200 vezes durante a vida do capacitor.
4. Os capacitores projetados conforme esta Norma podem operar até 12h por período de 24h com até 110% da tensão nominal, desde que a tensão de crista, incluindo todos os harmônicos, não exceda  $1,2 \sqrt{2}$  vezes a tensão nominal, e a potência máxima não exceda 144% da potência nominal.

Fonte: Norma ABNT NBR 5282 – Junho/1998 [10].

Da tabela 5.3 pode-se extrair algumas analogias em relação à teoria apresentada para a influência dos componentes harmônicos sobre o

desempenho dos capacitores de potência, como descrito na seqüência.

Sobretensões menores, por exemplo até  $1,10 V_n$ , são mais toleráveis, ou seja, podem ocorrer por um período de tempo maior. Entretanto, podem ser vinculados a tais sobretensões menores, fenômenos de degradação dos capacitores.

Uma análise quantitativa das reais sobretensões requer uma interação com o projeto do capacitor, pois, a tensão nominal ( $V_n$ ), por definição, é o valor eficaz da tensão senoidal para o qual o capacitor é projetado.

Já nesta primeira análise, percebe-se uma consistência com a afirmação de que a degradação dos capacitores está relacionada com a atividade de DP nos aspectos intensidade e duração, sendo estas variáveis correlacionadas com a magnitude e duração das sobretensões.

Ainda, as sobretensões são permitidas considerando que valores superiores a  $1,15 V_n$  não correm mais que 200 vezes durante a vida do capacitor, conforme nota da norma. Estas restrições são compatíveis com uma relação positiva e exponencial entre a magnitude da sobretensão aplicada e a degradação do capacitor, conforme aquela apresentada para determinar a redução da vida útil do capacitor para gradientes de tensão maiores que o nominal ou de projeto.

Ou seja, a limitação do número de sobretensões mais elevadas evita uma deterioração mais rápida do capacitor, o que poderia ocorrer antes mesmo da degradação do PP.

O Guia para Aplicação da ABNT [11-13] apresenta uma grande preocupação em limitar os estresses dielétricos e térmicos impostos aos capacitores de potência, bem como, de ressaltar a necessidade de se analisar aspectos particulares de cada aplicação e/ou capacitor. Estas cláusulas podem ser diretamente relacionadas com o conteúdo apresentado para a degradação

dos capacitores e à necessidade de se interagir com os projetos particulares de cada equipamento.

Neste guia de aplicação, permite-se exceder as sobretensões máximas permissíveis especificadas na NBR 5282 – Junho / 1998, mediante uma atenuação das condições de temperatura e acordo com o fabricante.

Ainda, duas frases merecem ser analisadas com maior critério:

- a) Os limites de sobretensão à frequência industrial, dados na NBR 5282, são válidos desde que não ocorram simultaneamente com sobretensões transitórias.
- b) A tensão de crista não deve exceder 1,41 vezes o valor eficaz indicado.

Ambas as afirmações não constam da norma de especificação e representam limites mais rígidos para aplicação dos capacitores de potência.

Na primeira afirmação (a), a expressão "sobretensões transitórias" deve ser entendida como sobretensões de curta duração (ou sobretensões oscilatórias a frequência industrial) devido a fenômenos do sistema elétrico que não sejam a flutuação e regulação de tensão, pois estes são contemplados pelos limites de sobretensões já apresentadas na norma.

Infere-se que tais sobretensões transitórias não se referem àquelas denominadas de alta frequência, uma vez que estes surtos podem ocorrer de maneira imprevisível e naturalmente se superpõe ao valor da tensão de frequência industrial no respectivo instante.

A segunda (b) restringe-se à possibilidade do capacitor operar com tensões aplicadas, cuja forma de onda eventualmente distorcida, produza elevados valores de crista. Apesar desta afirmação não estar referenciada à aplicação em sistemas na presença de distorção harmônica, pode-se ressaltar

que este critério coincide com a abordagem apresentada no capítulo 4, onde se procura demonstrar as solicitações adicionais devido a certas formas de onda de tensão distorcidas, ou não exatamente senoidais. A frase em análise, por si só, indica a relevância de se levar em conta os valores de estresses dielétricos instantâneos, não se restringindo aos limites indicados por valores eficazes de tensão.

Novamente, é ressaltada a necessidade de se conhecer a forma de onda da tensão e características do sistema pertinente, sobretudo se existem fontes de harmônicos. Deve-se destacar que a abordagem no capítulo 4 para determinação das solicitações adicionais impostas pelos componentes harmônicos está centrada na forma de onda da tensão resultante aplicada aos capacitores de potência.

## 5.2 Critérios para a escolha da tensão nominal

A seção de Guia de Aplicação da norma **IEC** [15,19] enfatiza a necessidade de a especificação técnica incluir detalhes quanto ao comportamento da tensão do sistema elétrico, a fim de se garantir a escolha adequada da tensão nominal do capacitor. Sendo que este item se equivale em conteúdo ao item respectivo da ABNT, os comentários desenvolvidos para aquela norma são aplicáveis a esta. Critérios particulares são propostos para capacitores de filtros de potência, os quais serão apresentados no item 5.3.

Também na seção de Guia de Aplicação, a norma **ANSI/IEEE** contém as orientações para a escolha da tensão nominal do capacitor. Neste contexto, justifica-se a necessidade de se especificar sobretensões permissíveis maiores para o capacitor, se comparadas com outros equipamentos, pelo fato deste equipamento produzir uma elevação de tensão no ponto de conexão.

O texto dessa norma procura ilustrar a necessidade de se contemplar os aspectos particulares do sistema e/ou aplicação na especificação da tensão nominal.

Por sua vez, o Guia de Aplicação da **ABNT** [12,13] apresenta várias cláusulas com critérios e/ou orientações para a escolha da tensão nominal. Basicamente, a intenção é garantir que tal escolha leve em consideração a tensão máxima operativa do sistema no local de instalação, considerando-se o aumento da tensão provocado pela operação do banco de capacitores, evitando-se o comprometimento da sua vida útil.

Estas cláusulas podem ser vistas como uma explanação exemplificada dos conceitos apresentados na norma NBR 5282 – Especificação, a fim de enfatizar a importância de praticá-los, bem como, propor maneiras de fazê-lo. Duas cláusulas extremas, em relação a abordagem dada neste item, devem ser ressaltadas, como segue:

- a) Caso nenhuma informação contrária seja disponível, deve ser assumido que a tensão nominal do capacitor será igual à tensão nominal do sistema.
- b) Deve ser evitada uma excessiva margem de segurança na escolha da tensão nominal ( $V_n$ ), pois, isto resultaria numa diminuição da potência efetiva disponível, quando comparada com a potência nominal.

Ambas, conjuntamente, traduzem perfeitamente a necessidade de especificar adequada e detalhadamente a aplicação dos capacitores de potência, visando não obter um desempenho insatisfatório em curto prazo (primeira cláusula) e não onerar a solução em questão (segunda cláusula). Como já discutido neste trabalho, esta tarefa implica conhecer o projeto dos capacitores e os fenômenos de degradação dielétrica associados.

A necessidade de se especificar adequadamente a tensão nominal dos capacitores de potência é mais uma vez evidenciada no item de inspeção inicial, quando se propõe que seja verificada a variação de tensão obtida e posterior comparação ao valor esperado, imediatamente após a energização. Este valor deve estar dentro dos limites nominais do capacitor.

Tratamento particular é dado aos períodos de carga leve do sistema para monitoração das grandezas reais através de medição.

### 5.3 Aplicações sob componentes harmônicos

A norma **IEC** [15,19] aborda a especificação de capacitores de potência sob componentes harmônicos através da limitação da tensão total, fundamental mais harmônicas, a um valor tal que não implique uma corrente maior do que 1,30 vezes a nominal (para capacitância real igual a nominal).

Especificamente para capacitores destinados a filtros de potência, a norma IEC traz definições, requisitos e ensaios adicionais.

Através de anexo, primeiramente são apresentadas definições específicas entre as quais deve-se destacar:

- a) Potência nominal do capacitor – é a soma aritmética das potências geradas nas freqüências fundamental e harmônicas.

Dentro dessa definição, as potências harmônicas devem ser consideradas para projeto, ensaios e aplicação.

- b) Tensão nominal – é a soma aritmética dos valores eficazes das tensões fundamental e harmônicas, ou a tensão calculada através da potência nominal e a reatância capacitiva na freqüência nominal, qualquer que resulte o maior valor.

Esta definição implica dimensionar o capacitor para um estresse dielétrico comparativamente superior às demais aplicações, tendo em vista a possível superposição das tensões harmônicas consideradas. Consequentemente há uma elevação da  $TIDP_b$  do capacitor, evitando-se um possível aumento do processo de degradação deste equipamento, como demonstrando no capítulo 4.

- c) Corrente nominal – é a raiz quadrada da soma dos valores quadráticos das correntes nominais nas freqüências fundamental e harmônicas.

Naturalmente, esta definição intenciona contemplar os efeitos térmicos da condução da corrente resultante a fim de permitir o correto dimensionamento do próprio capacitor ou banco de capacitores e acessórios.

Nas cláusulas pertinentes a ensaios dielétricos, o anexo normativo propõe novos valores de tensão que levam em conta a presença dos componentes harmônicos. Desta forma, procura-se ensaiar o capacitor em condições compatíveis com a aplicação respectiva.

A mesma idéia é aplicada ao ensaio de estabilidade térmica, levando-se em conta as definições particulares de tensão e potência nominais.

No que se refere a sobrecargas, está determinado que o valor para a máxima corrente permissível deve ser acordado entre o fabricante e o usuário. Não existe uma cláusula particular para o item "Tensões de longa duração", donde pode-se inferir que a adequação do sistema dielétrico do capacitor está considerada garantida pela adoção da definição apresentada no anexo normativo em análise.

A norma **ANSI/EEEE** [14] não dedica cláusulas específicas à aplicação sob componentes harmônicos. Os limites para tal condição são contemplados conjuntamente no item relativo a tolerâncias, conforme apresentado no item 5.1 deste.

Adicionalmente, são consideradas eventuais correntes de sobrecarga devido a altos valores de tensões fundamental e harmônicas. É enfatizado o limite de  $1,8 \times I_n$ , respeitando-se também os limites especificados para a potência e tensão.

A norma **ABNT** de especificação [10] apresenta algumas restrições

para sistemas na presença de distorções harmônicas. A tabela 5.3, anteriormente apresentada, limita a sobretensão no valor eficaz correspondente ao valor da corrente máxima permissível, ou seja,  $1,31 I_n$ , ou até  $1,44 I_n$ , se for considerado um valor de capacitância real de  $1,10 C_n$ , o que é permitido por norma. Estes fatores de sobrecorrente são destinados a ter em conta efeitos combinados dos harmônicos e das sobretensões até  $1,10 U_n$ , conforme a cláusula de Tensões de longa duração.

Os limites impostos de sobretensões, tendo-se em vista a operação dos capacitores de potência sob frequência nominal mais harmônicos, parecem não refletir as solicitações adicionais às quais estão submetidos os capacitores. Como analisado no capítulo anterior, valores de tensão eficazes correspondentes aos valores limites de sobrecorrentes estabelecidos, na norma em análise, podem implicar em altos valores de crista de tensão aplicada aos capacitores. Isto resultaria em uma atividade relevante de DP durante a operação do capacitor, devido aos altos gradientes de tensão impostos ao sistema dielétrico.

Entretanto, em contrapartida ao conceito anteriormente apresentado, a mesma norma apresenta uma nota na qual é afirmado que os capacitores de potência podem operar até 12h por período de 24h com até 110% da tensão nominal, desde que a tensão de crista, incluindo todos os harmônicos, não exceda  $1,2 \times \sqrt{2}$  vezes a tensão nominal, e a potência máxima não exceda 144% da potência nominal.

Desta forma, o limite imposto para valores de crista da tensão aplicada representa a importância de se levar em conta os gradientes máximos de tensão, não se restringindo aos valores eficazes das tensões resultantes com forma de onda distorcidas. Esta ponderação está em conformidade com o apresentado no capítulo anterior. Ainda, deve-se ressaltar que a nota normativa em discussão tem importância particular para a aplicação sob componentes harmônicos, pois neste caso, este requisito torna-se mais importante na análise de tensões de longa duração, e na prática, pode prevalecer sobre os limites

apresentados na tabela 5.3.

A norma NBR 5282 contém ainda um anexo normativo para a especificação de requisitos adicionais para capacitores de filtros de potência.

A exemplo da norma IEC, este anexo apresenta uma definição particular para a tensão nominal, como sendo, a soma aritmética dos valores eficazes da tensão fundamental e harmônica, ou, como a tensão calculada a partir da potência nominal e reatância capacitiva na frequência nominal, o que for maior. Deve-se ressaltar que a potência nominal a ser utilizada neste cálculo é a soma aritmética das potências geradas pela frequência fundamental e pelos harmônicos.

Ainda, dois aspectos correlacionados com a especificação de capacitores de filtros de potência merecem uma abordagem sob a luz da norma em análise.

Primeiro, seguindo rigorosamente a orientação já discutida neste item, que limita o valor de crista da tensão aplicada, incluindo todos os harmônicos, ao valor de  $1,2 \times \sqrt{2} \times V_n$ , nota-se que os requisitos adicionais para capacitores de filtros de potência no que se refere à tensão nominal, descritos no anexo, estão parcialmente cumpridos. Portanto, vale ressaltar novamente a importância de tal nota complementar.

Segundo, pode-se discutir e/ou propor a extensão dos requisitos constantes do anexo normativo em análise a quaisquer capacitores a serem instalados na presença de distorções harmônicas, visto que para tais aplicações, têm-se também formas de onda distorcidas, implicando as mesmas eventuais solicitações dielétricas adicionais. Esta circunstância pode ser facilmente visualizada em estudos de fluxo de componentes harmônicos em sistemas elétricos de potência e é ilustrada no capítulo 4, caso prático 1, barras 4 e 6 – antes da mitigação.

Seguindo a análise do anexo normativo, são estabelecidos valores específicos de tensão de ensaio, os quais levam em conta a presença de tensões harmônicas na aplicação dos capacitores, coerentemente com a definição particular de tensão nominal.

Agora, passa-se à análise do projeto de norma do Guia de Aplicação (ABNT) [13], no tópico de maior interseção com o conteúdo deste trabalho, apresentado no anexo denominado "Aplicação de banco de capacitores em sistemas elétricos na presença de harmônicos".

Inicialmente, deve ser destacado no tópico "Condições Gerais" que o valor de 110% da tensão Nominal ( $V_n$ ) é considerado literalmente como condição máxima de operação prevista em projeto. Ainda, indica que o conjunto especificado de tolerâncias visa atender os efeitos decorrentes dos seguintes fatores:

- a) Tensão máxima permitida no sistema igual à 1,05 p.u..
- b) Variação da capacitância de até + 10%.
- c) Existência de componentes harmônicos, sendo a DTHT < 6% para tensões menores que 69KV, e a DTHT < 3% para tensões maiores que 69KV, conforme recomendado pelo ONS [51].

Todas essas condições são compatíveis com as análises e propostas desenvolvidas neste trabalho, porém não cobrem todas as aplicações sob componentes harmônicos, como mostrado nos itens 4.4 a 4.7 e 5.6.

É enfatizada a necessidade de se considerar os aspectos: ressonâncias harmônicas e suportabilidade às tensões operativas, considerando-se a aplicação para o cálculo de banco de capacitores na presença de harmônicos.

No item "Ressonâncias Harmônicas", é apresentado um cálculo

simplificado para a ordem harmônica de ressonância, e ainda, é recomendado informar ao fabricante do capacitor sobre as ordens harmônicas menores que a 13ª. Este procedimento é sugerido para barramentos de consumidores. Ressalta-se que esta metodologia trata individualmente a(s) barra(s) onde está(ão) instalado(s) o(s) banco(s) de capacitores. Para muitas situações em sistemas elétricos industriais, o procedimento sugerido no mesmo tópico para o sistema de concessionária, ou seja, o estudo da penetração harmônica através de programa(s) computacional(is) pode trazer soluções mais eficazes e mais otimizadas. Ainda, deve-se estar atento à possibilidade da presença de componentes harmônicos de ordem maior que 13 com valores significativos, principalmente se acompanhada de sobretensões, como analisado no capítulo anterior.

Quanto ao dimensionamento de banco de Capacitores em sistemas elétricos com harmônicos, é proposta uma metodologia de cálculo de tensão nominal do banco de capacitores, sendo esta a soma da tensão à frequência fundamental e a tensão harmônica total ( $U_{th}$ ).

Por sua vez, a  $U_{th}$  é calculada pela fórmula proposta pelo documento "Equipment producing harmonics and conditions governing their connection to the mains power supply" [39], elaborado pelo "Working Group 36.05 – CIGRE – Harmonics, voltage unbalance, voltage dips and voltage fluctuations".

Tal fórmula é apresentada a seguir:

$$U_{th} = \sum_{n=1}^3 U_{rn}, \text{ onde}$$

$U_{rn}$  = tensão harmônica resultante para cada faixa de harmônicos ( $n = 1, 2$  e  $3$ ), e calculada como a seguir:

$$U_{rn} = \sqrt[a]{\sum (U_h)^a}, \text{ onde}$$

$U_h$  = tensão harmônica da ordem "h".

a = constante, conforme tabela 5.4 a seguir:

**Tabela 5.4**  
**Índices para cálculo da Tensão harmônica resultante para cada faixa**

Faixa (n)	Ordem harmônica	Índice (a)
1	$h \leq 7$	a = 1
2	$8 \leq h \leq 13$	a = 1,4
3	$h \geq 13$	a = 2

Fonte: Projeto de revisão da norma ABNT NBR 10671 [13].

A constante "a" depende das faixas nas quais as magnitudes e ângulos de fase das tensões harmônicas individuais podem ser consideradas aleatoriamente variáveis.

Os valores atribuídos na tabela 5.4 para a variável "a", expressam as seguintes condições de contorno:

- a) a = 1 – valor válido para tensões harmônicas com magnitude constante, e ângulo de fase podendo variar aleatoriamente entre 0 e 90°.
- b) a = 1,4 – valor válido para tensões harmônicas cuja magnitude pode variar aleatoriamente entre 50 e 100% do valor máximo, e o ângulo de fase pode variar aleatoriamente entre 0 e 270°.
- c) a = 2 – valor válido para tensões harmônicas cuja magnitude pode variar aleatoriamente entre 0 e o valor máximo, e o ângulo de fase pode variar aleatoriamente entre 0 e 360°.

Desta forma, tem-se uma nova proposição para o dimensionamento de bancos de capacitores em sistemas elétricos na presença de componentes harmônicos. A principal alteração é a adoção de um novo método de cálculo da tensão nominal. O item "Considerações Finais" esclarece que se trata de uma proposta intermediária entre o cálculo pela somatória aritmética das tensões fundamental e harmônicas, considerado mais conservativo, e o cálculo que

utiliza a somatória quadrática das mesmas tensões, o qual ameniza o efeito dos componentes harmônicos.

Cabe, sob o prisma do conteúdo deste trabalho, apresentar alguns comentários e/ou ponderações para a proposição agora apresentada. O Método de cálculo apresentado para a somatória dos efeitos das tensões harmônicas [39] visa obter uma tensão resultante para o sistema elétrico de concessionárias e usuários, bem como, para os respectivos equipamentos. Portanto, este modelo foi elaborado para o tratamento de efeitos prejudiciais diversos em sistemas elétricos com características genéricas, na tentativa de cobrir a maioria das situações. Como o próprio texto referenciado no projeto de norma em análise esclarece, as experiências de sistemas diferentes podem divergir e alguma adaptação pode se fazer necessária.

Outro aspecto interessante a ser ressaltado, se refere às afirmativas seguintes com relação aos efeitos das tensões harmônicas de baixa ordem em equipamentos do usuário:

- a) Não há efeitos indesejáveis em valores de magnitude menores que 5%;
- b) Alguns fenômenos indesejáveis podem ser observados para valores entre 5 e 10%;
- c) Fenômenos indesejáveis ocorrem freqüentemente para valores maiores que 10%.

Ainda, estes valores convêm ser considerados sob a luz do conceito dos níveis de compatibilidade e imunidade definidos para o propósito específico.

Deve-se, portanto, discutir de uma maneira mais aprofundada a compatibilidade do modelo apresentado ao caso específico dos capacitores de potência.

Nota-se que valores de distorção harmônica de 5% (neste caso,

considerar a tensão fundamental igual a 95%, conforme adotado pela IEC), para uma ordem harmônica, por exemplo, podem implicar um mau desempenho dos capacitores em questão, enquanto esta situação foi considerada pouco relevante sob o aspecto de compatibilidade. Esta questão foi amplamente discutida no capítulo 4, lembrando que os capacitores de potência são projetados para operar sob altos valores de estresses dielétricos, tornando-se mais vulneráveis a sobretensões, o que não ocorre com os demais equipamentos para sistemas de potência. Esta afirmação pode ser reforçada com o relato de que alguns especialistas [39] da área têm citado que alguns dispositivos, como os capacitores, podem ser sobrecarregados quando os níveis de compatibilidade definidos são superimpostos na tensão de alimentação, mesmo estes equipamentos sendo construídos de acordo com as normas nacionais existentes.

Finalizando, deve ser mencionado que o dimensionamento de capacitores parece ser objeto de discussão corrente e atual nas comissões normalizadoras brasileiras.

#### **5.4 Tópicos complementares**

Algumas considerações normativas são apresentadas a seguir, as quais se correlacionam com o conteúdo apresentado neste trabalho. Os principais tópicos abordados são sobrecargas, temperatura de operação e manuseio dos capacitores de potência.

A norma ANSI/IEEE [14] contém um item denominado "Internal Partial Discharge Level", onde existe a afirmativa de que os capacitores não devem ser danificados pelas DP, quando energizados sob quaisquer condições de temperatura ambiente ou tensão de regime contínuo permitidas pela mesma norma.

Entretanto, o conceito de injeção de DP muitas vezes está ligado a atividades comparativamente elevadas, com valores de carga de centenas de

pC. Realmente, descargas com valores mais elevados normalmente significariam falhas incipientes oriundas de defeitos de manufatura. Diretamente relacionado a este nível de atividade de DP está o conceito e valor da TIDP. Portanto, a TIDP está diretamente relacionada com a tensão nominal e sobretensões especificadas, e conduz vários aspectos e/ou parâmetros de projeto.

Deve-se estar atento, entretanto, às atividades de DP em níveis menores, como dezenas de pC, que apesar de não serem tratadas como indicadores de defeitos, são agentes do processo de degradação dos capacitores, e podem estar relacionados a valores comparativamente baixos de TIPD, ou a TIDP<sub>b</sub>. Esta abordagem está melhor apresentada nos capítulos 3 e 4.

Pode-se destacar ainda o alerta quanto à conveniência de se realizar os testes de tensões aplicada em campo sob temperaturas amenas a fim de se evitar danos ao sistema dielétrico do capacitor. Isto se justifica pela alteração negativa do desempenho do sistema dielétrico, especialmente quanto à função de impregnação, sobre altas e baixas temperaturas, como descrito no capítulo 3.

O Guia de Aplicação da ABNT [12,13] recomenda que na medida do possível, capacitores com longo período de armazenamento (2 ou 3 anos) sejam pré-aquecidos durante 6 horas, ou energizados a uma tensão reduzida antes de sua energização definitiva, para que o líquido isolante volte a circular. Esta exigência está fundamentada na necessidade de interação entre o dielétrico sólido (PP) e o impregnante, para se obter o desempenho esperado nos valores de estresses dielétricos projetados. Este aspecto foi discutido nos capítulos 2 e 3 deste trabalho.

O pré-aquecimento mencionado serviria para um restabelecimento do estado de impregnação inicial, evitando-se o surgimento de atividades de DP ou até disrupções em pontos fracos possivelmente ocasionados no período de

armazenagem.

No item Inspeção e Manutenção Periódicas, chama-se a atenção para duas notas, transcritas abaixo:

- a) Em caso de suspeita de vazamento da unidade capacitiva, deve-se providenciar a retirada e envio da mesma para o fabricante para as devidas providências.
- b) Bancos com falhas excessivas das unidades e/ou fusíveis devem ser inspecionados com maior frequência. Além das recomendações anteriores, as inspeções podem também incluir medições de tensões e correntes harmônicas e/ou transitórias para assegurar que os mesmos encontram-se dentro dos limites das características nominais do capacitor. O fabricante deve ser consultado para assistência.

A primeira nota (a) é consistente com a característica de hermeticidade do sistema elétrico do capacitor e da identificação da presença do oxigênio, mesmo em reduzidíssimas partes, como agente de aceleração do fenômeno de degradação dos capacitores. Esta influência foi analisada no capítulo 3 deste trabalho.

A segunda nota aqui apresentada (b) indica medições de componentes harmônicos como procedimentos adicionais para a avaliação de bancos de capacitores que apresentam falhas excessivas. Esta indicação induz à idéia de que falhas sistemáticas de bancos de capacitores estão, na prática, muitas vezes relacionadas com a presença de distorções harmônicas, o que reforça a necessidade de um critério particular para a especificação de capacitores para tal aplicação.

Todas as normas analisadas enfatizam que sobrecargas reduzem a vida dos capacitores, e, portanto, as condições de funcionamento (isto é, temperatura, tensão e corrente) devem ser rigorosamente controladas e especificadas.

Ainda, as normas esclarecem que devido aos diferentes projetos de capacitores e outros fatores envolvidos, não é possível abranger por simples regras todas as aplicações. Esta afirmativa torna bastante válida a avaliação detalhada proposta no Capítulo 4 para o caso dos componentes harmônicos.

## 5.5 Aspectos evolutivos

Para se obter uma visão mais ampla e efetiva das cláusulas normativas apresentadas neste capítulo, torna-se válido apresentar alguns aspectos evolutivos das normas e tentar compreendê-los sob o prisma do conteúdo principal deste trabalho.

A norma IEC 60871-1, vigente, contém os mesmos requisitos no que se refere a sobretensões e aplicações em filtros de potência em relação ao projeto de norma analisado. Portanto, na seção de sobrecarga, não há uma recomendação para a observância dos valores de crista de tensão, enquanto que na seção do Guia de Aplicação – sobretensões, observa-se que os valores de crista dessas não devem ultrapassar 1,41 vezes o respectivo valor eficaz.

É importante observar que esta norma suprimiu a especificação do ensaio de ionização ou descargas parciais, anteriormente presente na Publicação 70 (documento antecessor), por exemplo, de 1967. Isto se deu por dificuldades práticas para realização do ensaio, mas, recentemente tem sido motivo de discussão a viabilidade de novamente especificá-lo [37]. Este ensaio hoje é substituído pelo ensaio de durabilidade, IEC 60871-2 [18].

A Norma IEEE std 18-1992 especifica valores limites de tensão eficaz diferentes para cada duração máxima pertinente (sobretensões momentâneas), e um valor limite único para a tensão de crista. Além disso, são especificados valores de tensões transitórias e número de ocorrências por ano.

Não existe um tratamento particular para a especificação de capacitores para filtros de potência. Pode-se observar que a norma

equivalente na década de 60, USAS – C55.1 – 1968, já especificava valores limites para os capacitores bastante próximos aos atuais, a exceção do valor de crista máximo da tensão aplicada, que não era especificado.

A norma ABNT NBR 5282 – 1988, edição anterior àquela objeto de análise neste capítulo, apresenta basicamente os mesmos limites para as grandezas de maior interesse, ou seja, tensão, corrente, temperatura e potência.

Por sua vez, a norma NBR 10671 – Guia para instalação, operação e manutenção tem sofrido algumas alterações as quais valem ser ressaltadas. Na edição de 1977 (com o número NBR-5060) os critérios para a escolha da tensão já mencionavam a necessidade de se levar em conta a tensão efetiva de operação, a influência do próprio capacitor e a presença de harmônicos. Entretanto, esses critérios levavam em conta apenas o valor eficaz de tensão, não havendo uma restrição quantificada para formas de onda desfavoravelmente distorcidas.

Já na edição de 1989, o item de sobretensão referenciava a norma de especificação, NBR 5282, a qual já contemplava o limite para o valor de crista da tensão aplicada.

Entre critérios e recomendações expostos nas normas, percebe-se que houve uma troca de prioridade ou ênfase entre o estresse térmico, anteriormente, e o dielétrico, no presente, no que se refere aos componentes harmônicos.

Deve-se observar também que as normas ABNT NBR 5282 e NBR 10671 (projeto de norma) atuais apresentam critérios diferentes para a escolha da tensão nominal de capacitores para filtros de potência.

Ambos os conteúdos estão em anexos normativos e tem-se a idéia que prevaleça o conteúdo do Guia de aplicação (projeto de norma). Esse último,

inclusive, apresenta-se mais abrangente, considerando o anexo aplicável a qualquer capacitor previsto para sistemas elétricos na presença de harmônicos.

Outra observação a ser feita em relação às normas ABNT é a divergência de critérios para a especificação da tensão nominal compreendida pelo valor limite de  $1,2 \times \sqrt{2} \times V_n$  na NBR 5282, e o valor de 1,41 vezes o valor limite de sobretensão, na NBR 10671, além do caso particular para filtros de potência. Esse último parece ter o objetivo de enfatizar esta importante aplicação, devido às suas particularidades e, às vezes, complexidade.

Outro aspecto importante a destacar, é a predominância crescente das normas IEC, com a participação efetiva de representantes dos EUA e conseqüente inclusão de cláusulas particulares para este mercado. Isto indica uma tendência de consolidação da IEC como órgão de normalização mundial em eletricidade.

## 5.6 Visão crítica e análise comparativa

A fim de avaliar a aplicação das cláusulas normativas discutidas nos itens 5.1 a 5.5, propõe-se proceder a especificação das tensões nominais dos casos práticos 1 e 2, Barras “4” e “Forno 2” respectivamente, após a mitigação, apresentados no Capítulo 4.

Partindo do caso prático 1, Barra 4, após a mitigação, tem-se:

Dados para o banco de capacitores após o reator

$V = 1,003 \text{ p.u. e } 0,98 \text{ p.u.}_{\text{crista}}$

DTHT → 7,0% (5h = 2,2%, 7h = 2,2%, 9h = 5,2%, 11h = 3,4% e 13h = 1,4%)

Critério IEC:

Focando o banco de capacitores, isoladamente, tem-se em princípio, a

especificação da tensão nominal ditada pelo valor eficaz, ou seja,  $V_n = 1,00$  p.u.

Entretanto, deve-se considerar o banco de capacitores como componente do filtro de potência e, atendendo o anexo normativo respectivo, tem-se:

$$V_n = V_{60\text{hz}} + V_h \quad (h = 5, 7, 9, 11, \text{ e } 13)$$

$$V_n = 1,44 \text{ p.u.}$$

Critério ANSI/IEEE:

Não são estabelecidos critérios particulares para capacitores sob componentes harmônicos. Sendo os valores eficaz e de crista praticamente iguais a 1,00 p.u., o mesmo valor pode ser adotado para a tensão nominal do banco de capacitores. Portanto,  $V_n = 1,00$  p.u.

Critério ABNT:

Levando-se em conta as normas vigentes, a abordagem para o critério IEC é também válida para a ABNT.

Agora, propõe-se especificar a tensão nominal do banco de capacitores através da metodologia proposta no projeto de norma para o Guia de Aplicação no anexo normativo relativo à aplicação sob componentes harmônicos.

$$U_{r1} = 0,022 + 0,022 \Rightarrow U_{r1} = 0,044 \text{ p.u.}$$

$$U_{r2} = \sqrt[1,4]{0,052^{1,4} + 0,034^{1,4} + 0,014^{1,4}} \Rightarrow U_{r2} = 0,076 \text{ p.u.}$$

$$U_{r3} = 0$$

$$U_{th} = 0,044 + 0,076 \Rightarrow U_{th} = 0,120 \text{ p.u.}$$

$$U_n = U_1 + U_{th}$$

$$U_n = 1,00 + 0,12 \rightarrow U_n = 1,12 \text{ p.u.}$$

Agora, para o caso prático 2, Barra Forno 2 (banco 6 Mvar), após a mitigação, tem-se;

Dados

V= 1,001 p.u. e 1,03 p.u. crista

DTHT = 4,1% (2h = 0,7%, 3h = 3,2%, 4h = 0,3%, 5 h = 1,1%, h= 0,9%, 7h = 1,5%, 8h = 2%, 9h = 0,8%, 10h = 0,3% e 11h = 0,2%)

Critério ANSI/IEEE:

Pela norma vigente,  $V_n = 1,00 \text{ p.u.}$

Critério ABNT:

Pelo projeto de norma do Guia de Aplicação, anexo normativo relativo à aplicação sob componentes harmônicos, tem-se:

$$U_{r1} = 0,007 + 0,032 + 0,003 + 0,011 + 0,009 + 0,015 \Rightarrow U_{r1} = 0,077 \text{ p.u.}$$

$$U_{r2} = \sqrt[1,4]{0,02^{1,4} + 0,008^{1,4} + 0,003^{1,4} + 0,002^{1,4}} \Rightarrow U_{r2} = 0,025 \text{ p.u.}$$

$$U_{r3} = 0$$

$$U_{th} = 0,077 + 0,025 \rightarrow U_{th} = 0,102 \text{ p.u.}$$

$$U_n = U_1 + U_{th}$$

$$U_n = 1,00 + 0,10 \rightarrow U_n = 1,10 \text{ p.u.}$$

Os diferentes resultados encontrados, por eles próprios, exprimem a necessidade de se investigar melhor os critérios normativos.

Os valores encontrados para os valores eficazes de tensão calculados ficaram bastante próximos a 1,00 p.u., donde conclui-se que os limites normalizados para tensões de longa duração são facilmente atendidos, mas não são parâmetros apropriados para a especificação da tensão nominal dos capacitores. Para os valores de crista de tensão, mesmos reduzidos valores de distorção harmônica podem representar maiores solicitações elétricas. Essa condição depende fundamentalmente das ordens harmônicas existentes ou predominantes na tensão resultante. Harmônicos de baixa ordem contribuem normalmente para condições mais críticas, o contrário ocorrendo para harmônicos de ordem elevada.

Portanto, o valor de crista da tensão resultante não pode ser facilmente obtido através da soma aritmética dos componentes harmônicos. Este critério pode levar a dimensionamentos excessivos como demonstrado no cálculo exemplo do caso prático 1. Entretanto, é uma prática que previne a degradação precoce dos capacitores aplicados sob harmônicos. Uma maneira de evitar dimensionamentos majorados seria considerar apenas as 3 ou 5 ordens harmônicas mais relevantes.

O critério proposto no projeto de norma para o Guia de Aplicação da ABNT apresentou resultados mais ponderados e adequados, principalmente para o caso exemplo onde predominam harmônicos de ordens maiores. Entretanto, isto se deve à ponderação quanto à variação da magnitude e ângulo de fase, como apresentado no item 5.3. Diferentemente, a metodologia apresentada no Capítulo 4 se baseia na interação dos diversos harmônicos na construção da forma de onda da tensão resultante, considerando as cristas das ondas em fase.

Portanto, a metodologia em proposição na ABNT não necessariamente é adequada a todos os casos de distorção harmônica. Por exemplo, pode-se avaliar a eficácia da mesma para casos com harmônicos exclusivamente de ordens elevadas.

Possivelmente, poder-se-ia considerar essa metodologia como orientativa, mas enfatizar a conveniência de se estudar mais detalhadamente cada aplicação em particular, principalmente aquelas com fontes concentradas de harmônicas ou filtros de potência.

## **CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES**

O trabalho apresentado cumpriu o objetivo prioritário de elucidar os fatores que influenciam o desempenho dos capacitores de potência sob componentes harmônicos.

Foi realizado um estudo do sistema dielétrico dos capacitores, seus componentes e respectivos papéis, estabelecendo uma base de conhecimento que possibilitou o estudo dos fenômenos de degradação dos capacitores a longo prazo, analisando-se as alterações das propriedades do referido sistema dielétrico. É importante observar que a evolução dos projetos dos capacitores implicou em evidenciar diferentes aspectos de degradação ao longo dos últimos anos, mas, principalmente, evidenciam a necessidade de conhecê-los como meio de obter melhores performances.

A próxima etapa foi associar o sistema elétrico do capacitor e as respectivas degradações ao longo da vida, aos fenômenos físico-químicos compatíveis e seus agentes.

Esta associação pôde ser melhor determinada a partir de investigações desenvolvidas nos últimos 6 anos. O estudo dessas investigações possibilitou uma formulação teórica para a degradação dos capacitores de potência a longo prazo. Esta formulação teórica apresenta-se consistente com várias observações teóricas e experimentais precedentes, consistindo-se de um conjunto de fenômenos devidamente correlacionados. Esta abordagem científica mais abrangente e coesa permitiu atribuir parâmetros qualitativos e quantitativos para os mecanismos de degradação a longo prazo dos capacitores. Como conseqüência, obteve-se uma razoável aplicabilidade dos conhecimentos teóricos em práticas de engenharia.

Esta aplicabilidade da teoria da degradação dos capacitores pode ser explorada para vários objetivos, desde a avaliação de protótipos, matérias-primas, etc., até diagnósticos de equipamentos após algum período de

instalação.

Em conformidade com o tema deste trabalho, procurou-se aplicar os conhecimentos teóricos, primeiramente, na elucidação das influências dos componentes harmônicos sobre o desempenho dos capacitores de potência.

O modelamento para tal propósito iniciou-se com a identificação dos principais elementos do sistema “capacitores de potência em degradação de longa duração” e respectivos papéis, e pelo desenvolvimento de uma analogia entre os parâmetros científicos e de engenharia.

Também foram consideradas as influências dos componentes harmônicos sob as características das grandezas dos sistemas elétricos, destacadamente a tensão.

A análise conjunta dos mecanismos de degradação dos capacitores e das distorções harmônicas indicou a forma de onda da tensão resultante como uma importante fonte de informações para se avaliar as denominadas eventuais solicitações adicionais devidas aos componentes harmônicos.

Neste ponto, poder-se-ia considerar a questão núcleo deste trabalho já bastante discutida e com um grau de esclarecimento significativo.

Entretanto, considerando-se os dados qualitativos e quantitativos disponíveis no conteúdo desenvolvido, optou-se por desenvolver uma metodologia tentativa para mensurar as implicações das eventuais degradações adicionais dos capacitores devido aos componentes harmônicos.

Desta forma, foi proposta uma equação empírica e uma metodologia analítica complementar baseadas em: dados obtidos em investigações experimentais, na teoria apresentada para os mecanismos de degradação dos capacitores, e nas formas de onda dos casos específicos.

Os resultados, obtidos através da aplicação dessa formulação em casos práticos, mostraram-se adequados e consistentes com outras formulações. Possíveis melhorias são mencionadas no item 6.2.

No que se refere à análise das cláusulas normativas, primeiro, pôde-se concluir que várias restrições e/ou limites especificidades para aplicação ou operação podem ser facilmente justificados ou esclarecidos pelo conteúdo deste trabalho.

Os critérios para a especificação de capacitores de potência sob componentes harmônicos têm sido divergentes entre as principais entidades normalizadoras ao longo dos anos. Entretanto, existe um explícito consenso com relação à necessidade de se limitar os valores de cristas da tensão aplicada. Isto também está bastante evidenciado neste trabalho.

Por último, deve-se destacar a iniciativa da comissão de estudo da ABNT em buscar metodologias mais eficazes para a especificação de capacitores de potência sob componentes harmônicos. Esta disposição vem contribuir para a relevância deste trabalho, donde, espera-se também uma contribuição no sentido inverso, ou seja, a aplicação dos conceitos apresentados e discutidos nesta dissertação na elaboração de cláusulas normativas.

## **6.1 Contribuição para os critérios de especificação**

A ação de especificar equipamentos elétricos representa a capacidade de organizar os mais diversos conceitos de engenharia de sistemas, produtos e projetos, bem como, aqueles mercadológicos, acompanhada da necessária antevisão dos resultados práticos com exatidão.

Portanto, especificar vai muito além de coletar dados em boletins técnicos, e ainda, é uma especialidade de grande impacto nos resultados empresariais.

Obviamente, existem várias questões em aberto nesta especialidade se renovando ao longo do tempo, o que, entre outros, compõem os riscos de engenharia. Dentro desse contexto, este trabalho vem contribuir prioritariamente sobre a questão capacitores de potência x componentes harmônicos.

A principal contribuição deste é levar aos engenheiros encarregados de especificar capacitores de potência para sistemas elétricos, na presença de distorções harmônicas, o contexto e implicações pertinentes, para se desenvolver a habilidade de mensurar os devidos riscos, que se somam aos já conhecidos.

Em outras palavras, a formulação proposta no capítulo 4 pode até ser validada e aperfeiçoada na prática, entretanto, entende-se a elucidação do tema proposto como o fator mais importante.

## **6.2 Proposições para outros trabalhos**

Considerando que os assuntos degradação de capacitores de potência e aplicação destes sob componentes harmônicos têm sido pouco explorados na bibliografia recente, e ainda, as notórias relevâncias desses temas, alguns trabalhos complementares, ou não, podem ser propostos na mesma área.

Estudos complementares poderiam abranger:

- a) Investigação prática da relação entre a vida útil dos capacitores de potência e o estresse elétrico aplicado para a faixa de 1,10 a 2,00 p.u. Como resultado, teria-se uma curva mais representativa para o caso de degradação de longa duração.
- b) Investigação prática da relação entre a  $TIDP_b$  e  $TEDP_b$  para os tipos de capacitores de alta tensão fabricados atualmente. Adicionalmente, pode-se avaliar variações provenientes de tensões com formas de onda não puramente senoidais.

- c) Avaliações dos itens a) e b) supra, considerando-se uma grande faixa de temperatura. Como resultado, poderia-se consolidar as faixas de operação dos capacitores de potência para os projetos mais modernos.

Outros trabalhos na área poderiam ter as seguintes abordagens:

- a) Desenvolvimento de ensaios de durabilidade elétrica, contemplando o envelhecimento ou degradação a longo prazo com maior eficácia, se comparado com o atualmente normalizado. Esta proposta poderia adotar a saturação do impregnante em oxigênio, viabilizando estágios mais avançados de envelhecimento.
- b) Análise, monitoramento e diagnóstico em capacitores de potência através da medição do grau de degradação do PP.
- c) Análise da degradação dos capacitores de potência de baixa tensão construídos com a tecnologia de filme metalizado. Este trabalho contemplaria os mecanismos de degradação específicos para este tipo construtivo.
- d) Análise complementar do tema anterior, para o caso específico da aplicação sob componentes harmônicos.
- e) Análise científica comparativa entre os mecanismos de degradação de capacitores de potência de curta e longa duração, bem como a interação entre eles.
- f) Metodologia para aplicação de capacitores de potência distribuídos em redes de distribuição primárias e secundárias, sob o enfoque dos harmônicos e respectivos fenômenos.

Enfim, vários trabalhos podem ser desenvolvidos dentro dos temas abordados neste trabalho. Inclui-se ainda, trabalho de título idêntico com abordagem e/ou metodologia diferenciada, por exemplo usando técnicas de probabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. Harmonics and Capacitors – Applying Capacitors in the Harmonic Environment. Issue 5, nov. 1985.
- [2] *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. Harmonics and Capacitors – Effects of Capacitors in a Harmonic Environment. Issue 4, jun. 1985.
- [3] BONNER, J.A., HURST, W.M., ROCAMORA, R.G., DUDLEY, R.F., SHARP, M.R., TWISS, J.A. Selecting Ratings for Capacitors and Reactors in Applications Involving Multiple Single – Tuned Filters. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 10, n. 1, jan. 1995.
- [4] MOORE, A. H. Application of Power Capacitor Electrochemical Rectifier Systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Industry Applications*, v. 1A-13, n. 5, p. 399-406, sept./oct. 1977.
- [5] IEEE STANDARDS BOARD. IEEE std. 519-1992 – *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. USA, 1993.
- [6] ALVES, M.F. *Dimensionamento e Especificação de Filtro de Harmônicos*. Outubro 1990 (Curso ministrado).
- [7] ALVES, M.F. Critérios para Especificação e Projetos de Filtros de Harmônicos. *Eletricidade Moderna*, p. 30-40, jun. 1994.
- [8] IEC TC33, Publication 70 – *Power Capacitors*, 1967.
- [9] RIBEIRO, C.F. *Harmonics in Power Capacitors. Analysis of the Existing Standards*. apr 1974.
- [10] ABNT, NBR 5282. *Capacitores de Potência em Derivação para Sistema de Tensão Nominal acima de 1000V*. Junho 1988.
- [11] ABNT, NBR 5060. *Guia para Instalação e Operação de Capacitores de Potência*, julho 1977.
- [12] ABNT, NBR 10671. *Guia para Instalação e Operação de Capacitores de Potência*, maio 1989.
- [13] ABNT-COBEI. *Projeto Norma NBR 10671 – Guia para Aplicação de Capacitores de Potência em Derivação – Procedimento*, agosto 1999.
- [14] IEEE STANDARDS BOARD. IEEE std. 18-1992 – *Shunt Power Capacitors*, USA, feb. 1993.

- [15] IEC-TC33. Final Draft International Standard – 33/260/FIDS, Revision of IEC 60871-1: *Shunt Capacitors for a.c. Power Systems Having a Rated Voltage above 1000V – Part 1: General, Testing and Rating – Safety Requirements – Guide for Installation and Operation*. Maio 1997.
- [16] ABNT, NBR 5282 – *Capacitores de Potência em Derivação para Sistema de Tensão Nominal acima de 1000V – Especificação*, junho 1998.
- [17] NEMA, NEMA CP1-1968. *Shunt Capacitors*, 1989.
- [18] IEC TC33. Committee Draft for Vote – 33/292/CDV, *Shunt Capacitors for a.c. Power Systems having a Rated Voltage above 1000V – Part2: Endurance Testing*. jun. 1998.
- [19] IEC TC33, IEC 871-1. *Shunt Capacitors for a.c. Power Systems having a Rated Voltage above 660V- Part 1: General – Performance, Testing and Rating – Safety Requirements – Guide for Installation and Operation*, 1987.
- [20] USAS INSTITUTE, USAS C55.1-1988. USA Standard – *Shunt Power Capacitors*, feb. 1968.
- [21] ERIKSSON, E. *Modern High Voltage Power Capacitors for Optimal Reliability Performance*. ABB Capacitors AB.
- [22] STENERHAG, B., WIRSÉN, L.E. Compacting The Key to Power Capacitors. *Asea Journal*, n. 3, 1984. p. 8-13.
- [23] LÖVKVIST, T. *Performance of a modern power capacitor design*.
- [24] SARJEANT, W.J. Capacitors. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 25, n. 5, p. 861-922, oct. 1990.
- [25] SHAW, D.G., CICHANOWSKI, S.W., YIALIZIS, A. A Changing Capacitor Technology – Failure Mechanisms and Design Innovations. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. EI-16, n. 5, p. 399-416, oct. 1981.
- [26] YOSHIDA, Y., NISHIMATSU, M. Power Capacitors. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. EI-21, n. 6, p. 963-973, dec. 1986.
- [27] BERGER, N., JAY, P. A New Impregnant for HV Power Capacitors. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. EI-21, n. 1, p. 59-63, feb. 1986.
- [28] INOUE, Y., YOSHIDA, Y. Diagnostic Methods for Capacitors. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 21, n. 6, p. 1.033-1.036, dec. 1986.

- [29] BOZZO, R., CENTURIONI, L., GUASTAVINO, F. Measuring the Endurance of Films in Partial Discharges. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 6, p. 1.050-1.056, dec. 1993.
- [30] *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. Partial Discharge Considerations in Capacitor Design. Issue 7, jun. 1986.
- [31] FOURNIÉ, R. All Films Power Capacitors: Endurance Tests and Degradation Mechanisms. *EDF Bulletin*, n. 1, p. 17-25, 1990.
- [32] SEBILLOTTE, E., THEOLEYRE, S., SAIDS, GOSSE B., GOSSE, J.P. ac Degradation of Impregnated Polypropylene Films. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 27, n. 3, p. 557-565, jun. 1992.
- [33] NEMAMCHA, M., GOSSE, J.P., GOSSE, B. Discharges in All-PP Films Model Capacitors. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 3, p. 315-323, june 1993.
- [34] NEMANCHA, M., GOSSE, J.P., GOSSE, B. Effect of Partial Discharges on Impregnated Polypropylene Films. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 1, n. 4, p. 578-584, aug. 1994.
- [35] GADOUM, A., GOSSE, B., GOSSE, J.P. Accelerated ac Degradation of Impregnated PP Films. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 27, n. 3, p. 557-565, jun. 1992.
- [36] FORSTER, E.O. Partial Discharge and Streamers in Liquid Dielectrics – The significance of the Inception Voltage. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 6, p. 941-946, dec. 1992.
- [37] CESARI, S., HANTOUCHE, C. MURAOKA, T., POULIQEN, B. Partial Discharge Measurement as a Diagnostic Tool. *ELECTRA*, n. 181, p. 24-51, dec. 1998.
- [38] IEEE STANDARDS BOARD. IEEE std. 1159-1995 – *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. USA, nov. 1995.
- [39] CIGRÉ – W.G. 36.05. Equipment Producing Harmonics and Conditions Governing their Connection to the Mains Power Supply. *ELECTRA*, n. 123, p. 22-37, 19 .
- [40] ABB CAPACITORS AB. *Input Data for Filter / Capacitor Bank Design*, 1996.
- [41] REED, C.W., CICHANOWKI, S.W. The Fundamental of Aging in HV Polymer-film capacitors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 1, n. 5, p. 904-922, oct. 1994.

- [42] JARYLEC C101, Catalogue.
- [43] JIS. *Polypropylene Films for Electrical Purposes – C2330*, Japanese Industrial Standard, 1978.
- [44] TERVAKOSKI CAPACITOR MATERIALS. *Biaxially Oriented Polypropylene Films*, 1994.
- [45] CLOAREC, M. PPR – *Double – Side Rough Polypropylene Film for All Film Capacitors*. Bolloré Technologies, nov. 1989.
- [46] RASAMEN, V. *On the Comparison of Rough Bubble Film and Rough Tenterline Film in All-Film Capacitors*, 1996.
- [47] BERGER, N., ÖSTERLUND, E., RÄSÄNEN, V., STAIGHT, J., TAMIC, L. Interaction between Polypropylene Films and Capacitor Impregnants. *Electra*, n. 140, feb. 1992.
- [48] STENERHAB, B. *On the Meaning of PDIV and PDEV*, CIGRE, 1983.
- [49] FELTRE, R. *Fundamentos da Química*. São Paulo: Moderna, 1990. Volume único.
- [50] ALLINGER, N. L., CAVA, M. P., DE JONGH, D.C., JOHNSON, C. R., LEBEL, N. A., STEVENS, C.L. *Química Orgânica*. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.
- [51] ONS, Submódulo 2.2 – *Padrões de Desempenho da Rede Básica* (Minuta), 2000.

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- (A1) ABNT, NBR-5469. *Capacitores – Terminologia*, novembro, 1986.
- (A2) BERGER, N. *Influence of the Drying Temperature on the Capacitance Evolutions in All-Film Elements*, CIGRE WG15-02/TF3, 1989.
- (A3) CAMPOS, W.A. *Askareis*. CEMIG – 02118 – COPDEN – 0143, 1994.
- (A4) COOPER POWER SYSTEMS. *Evaluation of safety and Reliability Aspects of Capacitor installations*. Bulletin 91.023, may. 1991.
- (A5) COOPER POWER SYSTEMS. *Power Capacitor Technology: Progress through Innovation*. Bulletin 86.014, apr. 1992.
- (A6) COOPER POWER SYSTEMS. *The EX-7L Power Capacitor: In Inside Story*. Bulletin 88.010, feb. 1990.
- (A7) DANIKAS, M.G., The Definitons Used for Partial Discharge Phenomena. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 6, p. 1.075-1.081, dec. 1993.
- (A8) GAO, L.Y., TU, D.M., ZHOU, S.C., ZANG, Z.L. The influence of Morphology on the Eletrical Breakdown Strength of Polypropylene Film. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 25, n. 3, p. 535-540, june. 1990.
- (A9) GOURNAY, P., LESAIN, O. Initiation and Propagation Thresolds of Positive Prebreakdown Phenomena in Hydrocarbom Liquids. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 1, n. 4, p. 702-708, aug. 1994.
- (A10) GULSKI, E. Digital Analysis of Partial Discharges. *Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 2, n. 5, p. 822-837, oct. 1995.
- (A11) HANTOUCHE, C., FORTUNE, D. Digital Measurement of Partial Discharges in Full-sized Power Capacitor. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 6, dec. 1993.
- (A12) HIDMAN, P., HOLMGREN, T., JONSSON, W. *A Test Installation of a Self-tuned ac Filter in the Konti-Skan 2 HUDC Link*. IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference, jun. 1995.
- (A13) ITEL. *Capacitores de Potência*. 1981.
- (A14) JARYLEC. *Hyginie, Safety, Environment*, jan. 1994.

- (A15) *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. Capacitor Reliability: Short-Term Testing and Product Life. *Issue 8*, nov. 1986.
- (A16) *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. Capacitor Technology Advancements Enhance – Design of Large Capacitor Banks. *Issue 15*, june. 1989.
- (A17) *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. Comparison of Internally and Externally Fuse Power Capacitors. *Issue 14*, oct. 1988.
- (A18) *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. Evaluating Today's All-Film Capacitors. *Issue 2*, jan. 1985.
- (A19) *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. General Capacitor Fusing Criteria. *Issue 9*, mar. 1987.
- (A20) *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. Grounded Versus Ungrounded Substation Capacitor Banks. *Issue 21*, oct. 1991.
- (A21) *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. Group Capacitor Fusing. *Issue 10*, may. 1987.
- (A22) *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. Harmonics and Capacitors Dynamic Overvoltages. *Issue 6*, jan. 1986.
- (A23) *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. Individual Capacitor Fusing. *Issue 12*, oct. 1987.
- (A24) *KILOVAR BRIEFS* – McGRAW EDISON. Overvoltages on Capacitor Banks – De-energization Transients. *Issue 1*, nov. 1984.
- (A25) KREUGER, F.H., GULSKIE, KRIVDA, A. Classification of Partial Discharges. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 6, p. 917-931, dec. 1993.
- (A26) LAGHARI, J.R., CYGAN, P., KHECHEN, W. A Short Method of Polypropylene Film using Step-stress Tests. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 25, n. 6, p. 1.180-1.182, 1990.
- (A27) LEASINT, O., TOBAZEON, R. Study of the Generation by Sharp Electrodes of a Gaseous Phase in Dielectric Liquids Subjected to High AC or Step Voltages. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. EI-20, n. 2, p. 269-273, apr. 1985.
- (A28) LEWIS, T. J. Basic Electrical Processes in Dielectric Liquids. *Transactions on Electrical Insulation*, v. 1, n. 4, aug. 1994.
- (A29) McGRAW-EDISON. Capacitors – All – film Units with Edisol® Dielectric

*Fluid – Design and Testing Practices*. Bulletin R230-90-6, sep. 1984.

- (A30) NISHIMATSU, M., INOUE, Y. Tests of Dielectric Materials for Power Capacitors. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 21, n. 6, p. 1.057-1.059, dec. 1986.
- (A31) POMPILI, M., MAZZETTI, C., LIBOTTE, M. The Effect of the Definition Used in Measuring Partial Discharge Inception Voltage. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 6, p. 1.002-1.006, dec. 1993.
- (A32) ROBINSON & PARTNERS. A Versatile Discharge Detector. *Co-operative Electrical Research Journal*, n. 21, apr. 1963.
- (A33) ROBINSON & PARTNERS. *Use and Applications of the E.R.A. Discharge Detector Model3*. Bulletin, v. 4, Issue 6, nov. 1962.
- (A34) RODEHED, C., GUSTAFSSON, A., GEDDE, U.W. Electrical Strength and Chemical Surface Analysis of Polypropylene after Exposure to External Partial Discharges. *Transactions on Electrical Insulation*, v. 25, n. 6, p. 1.066-1.076, dec. 1990.
- (A35) TOBAZÉON, R. Prebreakdown Phenomena in Dielectric Liquids. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 1, n. 6, p. 1.132-1.147, dec. 1994.
- (A36) UMEMURA, T., AKIYAMA, K. Accelerated-Life Testing of Power Capacitor Dielectric Systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. EI-22, n. 3, p. 309-316, june 1987.
- (A37) VANBRUNT, R.J. Physics and chemistry of Partial Discharge and Corona – Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 1, n. 5, p. 761-784, oct. 1994.
- (A38) YAMASHITA, H. Partial Discharge Measurements in Dielectric Liquids under Impulse Voltage. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 6, dec. 1993.
- (A39) ZINGALES, G. Present State and Prospects of Standardization on PD Measurements. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 6, dec. 1993.