Campus de São Carlos

**DIELÉTRICOS LÍQUIDOS: UM PARALELO ENTRE
NORMAS E FENÔMENOS FÍSICOS**

Autor: Rogério José Ramos Moreira

Orientador: Prof. Tit. Ruy Alberto Corrêa Altafim

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

DIELÉTRICOS LÍQUIDOS: UM PARALELO ENTRE NORMAS E FENÔMENOS FÍSICOS

Autor: Rogério José Ramos Moreira

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Tit. Dr. Ruy A. C. Altafim

**São Carlos
2000**

Class.	TESE-EESC
Cutt.	3799
Tombo	0110/00

1084137

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M838d   Moreira, Rogério José Ramos
Dielétricos líquidos : um paralelo entre normas e
fenômenos físicos / Rogério José Ramos Moreira. -- São
Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.
Área: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Rui A. C. Altafim.

1. Dielétricos líquidos. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ROGÉRIO JOSÉ RAMOS MOREIRA**

Dissertação defendida e aprovada em 07-02-2000
pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular **RUY ALBERTO CORRÊA ALTAFIM (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **DIÓGENES PEREIRA GONZAGA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **JOÃO SINÉZIO DE CARVALHO CAMPOS**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)

Profª. Associada **VILMA ALVES DE OLIVEIRA**
Coordenadora da Área de Engenharia Elétrica

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*Ao meu pai,
meu primeiro e grande professor*

Ao Professor Doutor Ruy Alberto Corrêa Altafim, pela excelente orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP pela colaboração.

A minha irmã e ao marido, a minha mãe pelas orações, e ... a DEUS, que sempre iluminou o meu caminho durante mais esta jornada.

ÍNDICE

	Lista de Figuras	i
	Lista de Tabelas	iv
	Resumo	vi
	Abstract	vii
1.	INTRODUÇÃO	1
2.	ISOLANTES LÍQUIDOS	4
2.1	Características Básicas de Isolantes Líquidos	4
2.2	Tipos de Isolantes Líquidos Encontrados	5
2.2.1.	Óleo Isolante Mineral	6
2.2.2	Isolante Líquido Sintético	6
2.3	Solubilidade dos Gases e dos Líquidos	8
2.4	Considerações sobre a Mistura dos Líquidos Isolante	10
2.5	Óleo Regenerado e Método de Tratamento	11
2.5.1	Técnicas de Filtração	11
2.5.2	Centrífugas	12
2.5.3	Sistema Termo-Vácuo	12
2.6	Comentários Finais	12
3.	MOBILIDADE, CONDUÇÃO, “PRÉ-BREAKDOWN” E “BREAKDOWN” DE LÍQUIDOS ISOLANTES	14
3.1	Mobilidade	14
3.1.1	Introdução	14
3.1.2	Experimentos e Meios de Estimulação	14
3.1.3	Mobilidade de Cargas em Líquidos Isolantes	18

3.1.4	O Efeito da Estrutura Molecular	22
3.1.5	Movimento de Cargas Induzidas no Líquido	26
3.2	Condução	27
3.2.1	Introdução	27
3.2.2	Condução em Campos Baixos e Elevados	28
3.2.3	Correntes Causadas por Partículas Sólidas	29
3.2.4	Efeito de Impurezas Gasosas	30
3.3	“Pre-Breakdown” e “Breakdown”	31
3.3.1	Introdução	31
3.3.2	O Efeito dos “Streamers” em Líquidos Isolantes em Condições de Campos Uniformes	32
3.3.3	O Efeito da Pressão em Líquidos Isolantes	42
3.3.3.1	Agulha Catodo	44
3.3.3.2	Agulha Anodo	47
3.3.4	Aplicação de Tensão AC em líquidos Isolantes em “Gaps” Longos	53
3.3.4.1	Início do “Streamer”	54
3.3.4.2	Mecanismo Envolvido em explosões	56
3.3.4.3	Propagação dos “Streamers” Positivos Diretos	58
3.3.4.4	Propagação dos “Streamers” Negativos Diretos	60
3.3.4.5	“Streamers” Positivos e Negativos com Explosões	61
3.3.5	Comentários Gerais	62
3.3.6	Conclusões	63
4.	NORMAS E TESTES PADRONIZADOS	65
4.1	Ensaio Físicos, Químicos e Elétricos Realizados com Líquidos Isolantes por Companhias de Energia	68
4.1.1	Propriedades Químicas (BCC(4), ABNT(5), LAC(23))	69

4.1.2	Propriedades Físicas	72
4.1.3	Propriedades Elétricas	76
5.	TESTES DE ENSAIOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ELÉTRICOS, REALIZADOS COM ÓLEO DE MAMONA	80
5.1	Introdução	80
5.2	Características do Óleo de Mamona	80
5.2.1	Estrutura Molecular	81
5.2.2	Obtenção do Óleo de Mamona	82
5.3	Testes Realizados em Laboratório	83
6.	Conclusão	100
7.	Referência Bibliográficas	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Medidas de Mobilidades	16
Figura 2	Medidas de Mobilidades em Temperaturas	17
Figura 3	A Mobilidade de Cargas sob o Efeito do Campo Elétrico para Diferentes Temperaturas	20
Figura 4	Deslocamentos de Líquidos e Íons	27
Figura 5	Características de Corrente de Campo para uma Alta Purificação de Nitrobenzeno	29
Figura 6	Crescimento dos “Streamers” em Hidrocarbono Puro (agulha catodo 2×10^6 figuras sem pulso trapezoidal	33
Figura 7	Influência da Concentração CCL_4 nas Velocidades do “Streamer” Negativo em Ciclohexano sob Tensão com Primeiro “Gap” de 2 mm; Raio de Ponta $3 \mu\text{m}$; Tensão 33 kV	34
Figura 8	Desenvolvimento de “Streamers” Secundários (0,3 “gap”, agulha catodo 2×10^6 estrutura sem pulso trapezoidal	35
Figura 9	“Yamashita”	38
Figura 10	Comparação do Crescimento do “Streamer” Primário Esm Marrol 70 Puro e Contaminado por DMA (agulha ânodo, 1,27 cm “gap” 2×10^6 estruturas, pulso trapezoidal	41
Figura 11	Equipamento de Eletro-ótica e Célula Teste	44
Figura 12	Kelly (agulha) Catodo	48
Figura 13	(a) Imagem Convertida da Câmara de Três Desenvolvimentos em Tolueno. “Gap” 0,24 cm, 500 ms entre Figuras, Pulso Trapezoidal, Tensão de cristade 65 kV, Pressão 0,1 Mpa . (b) Tensão de Crista de 90 kV e Pressão 0,8 Mpa. (c) Tensão de Crista de 90 kV e Pressão de 1,0 Mpa. (d) Tensão de Crista de 104 kV e Pressão 1,5 Mpa	49

Figura 14	Imagem Convertida da Câmara em “Breakdown” Elétrico em N-Hexano. “Gap” de 22 cm, 50 ms entre Estruturas, Pulso Trapezoidal, Tensão de Crista de 78 kV, Pressão 0,625 Mpa	50
Figura 15	Efeito da Pressão em n-hexano, Agulha Anoda	51
Figura 16	Influência da Pressão Hidrostática na Agulha Catodo em Ciclohexano Tensão 28 kV, “Gap” de 1 mm, Raio de Ponta de 5 μ m, Tempo de intervalo 7 μ s	53
Figura 17	Característica de “Streamers” Positivo e Negativo. Geometria Ponta/Plano. “Gap” de 8 cm. Raio de Ponta 40 μ m. Diâmetro do Plano 5 cm	55
Figura 18	Tensão de “Breakdown” V_0 e V_1 pelo Tamanho do Fio L (14 cm esfera-plano, d=30cm, a=11mm, 10kV, 12 min, condições fixas do óleo)	56
Figura 19	Tensão de “Breakdown” V_b e V_1 pela Frequência na Tensão de “Breakdown” na geometria Haste-Plano ($V=4$ mm, d=35mm,. 10 kV, 2 min, várias condições do óleo)	57
Figura 20	Imagem do “Streamer” Positivo (x: 20 cm μ s/cm, y: 8 cm/cm e sinais correspondentes, μ s/dm, $U_i = 380$ kV, geometria haste-plano, r=1cm, d=60cm)	59
Figura 21	Comparação de Probabilidade de “Breakdown” com Superfície Prensadas, d = 10 cm	60
Figura 22	Comprimento de Propagação do “Streamer” em Função da Tensão de Impulso Aplicada com 1cm de Ponta	62
Figura 23	Tensão Interfacial (entre água – óleo) - Equipamento Eletrônico, Ensaio Utilizado para Detectar Contaminantes Polares Solúveis e Produtos de Oxidação	85
Figura 24	Tensão Interfacial (entre água – óleo) - Equipamento Manual, Ensaio Utilizado para Detectar Contaminantes Polares Solúveis e Produtos de Oxidação	86

Figura 25	Viscosidade – Equipamento Utilizado para Medir a Resistência ao Escoamento de um Óleo	88
Figura 26	Rigidez Dielétrica – Equipamento Utilizado para Determinar a Tensão de Ruptura Dielétrica como uma medida da Capacidade de um Óleo Suportar Tensões Elétricas sem Falhar	90
Figura 27	Cor e Aparência – equipamento Utilizado para Expressar um Valor Numérico Baseado em Comparações com uma Série de Cores Padrões	92
Figura 28	Densidade – Equipamento Utilizado para Identificação do Tipo de Óleo ou para Indicar Mudanças Marcantes na Composição	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Concentração de Solubilidade de Diversos Gases no Óleo Isolante a 760 mmHg e 25°C	09
Tabela 2	Mobilidades de Cargas Carregadas em Hidrocarbonos (sem purificação)	19
Tabela 3	Mobilidades de Elétrons em Vários Dielétricos Líquidos	22
Tabela 4	Propriedades Físicas de Fluidos Teste a 20°C	23
Tabela 5	Propriedades Dielétricas dos Fluidos em Teste (medidas em 1 kHz e a 23°C)	24
Tabela 6	Comparação de CC e CQ de Tensão de “Breakdown” dos Seis Fluidos (50 Hz AC, 2 kV/s de velocidade, campo uniforme, 2,5mm de “gap” , 1,5/50µs de impulso c.a. com 5 mm de “gap”, todos a 23°C)	25
Tabela 7	Comparação do Crescimento do “Streamer” Positivo e “Breakdown” em Vários Líquidos Hidrocarbonos (pulso trapezoidal, 25°C)	37
Tabela 8	Efeito de Aplicação de Tensão e Impurezas na Velocidade de Crescimento do “Streamer” Positivo. (agulha ânodo. “gap” com 2,54 cm, pulso trapezoidal)	40
Tabela 9	Efeito da Pressão em “Breakdown” Elétricos em Líquidos Hidrocarbonos, “gap” $0,25 \pm 0,02$ cm, pulso trapezoidal 4x3x4 µs)	45
Tabela 10	Efeito da Pressão em “Breakdown” Elétrico em N-Hexano, “ gap” $0,35 \pm 0,03$ cm, pulso trapezoidal 4x3x4 µs)	45
Tabela 11	Efeito da Pressão em “Breakdown” Elétrico em Líquidos Hidrocarbono, “ gap” $0,25 \pm 0,02$ cm, pulso trapezoidal 4x3x4 µs)	46
Tabela 12	Efeito da Pressão em “Breakdown” Elétrico em Líquidos N-Hexano , “ gap” $0,35 \pm 0,03$ cm, pulso trapezoidal 4x3x4 µs)	47
Tabela 13	Composição Média do Óleo de Mamona	81
Tabela 14	Ensaio e Métodos Utilizados para Valores Limites de Operação	97

Tabela 15	Especificações para Óleo Tipo “A” – Naftênico	98
Tabela 16	Especificações para Óleo Isolante Tipo “B” - Parafínico	99

RESUMO

O comportamento elétrico dos dielétricos líquidos ainda está muito aquém de ser completamente entendido. Diversos fenômenos são inexplicáveis e encontram-se na fase de meras observações laboratoriais. Dentro desse universo, normas técnicas e procedimentos de ensaios são elaborados para orientar os usuários desses materiais em aplicações. Neste contexto, este trabalho procurou inicialmente traçar um paralelo entre as principais pesquisas dos fenômenos físicos e as normas atuais, trazendo inclusive inúmeras contribuições sobre correções que necessitam ser efetuadas em algumas delas.

Ponto relevante do trabalho foi também o de desenvolver um procedimento para estudos de novos dielétricos líquidos. Aqui pôde-se estudar o óleo de mamona como dielétrico líquido e definir suas principais aplicações e características desejáveis que venham futuramente a possuir para ser um provável substituto do óleo transformar.

ABSTRACT

The electrical behavior of the dielectric liquid is still far away from being completely understood. Several phenomena are inexplicable and some are in the phase of mere laboratory observations. Within that universe, standards and test procedures are elaborated for guiding the users of those materials in specific applications. In that context, this work draws a parallel between the main researches of the physical phenomena and the current standards, bringing countless contributions besides a few corrections that need to be made in some of them.

The important point of the work was also to develop a procedure for the study of new dielectric liquids. Here the castor oil could be studied as a dielectric liquid and to define its main applications and desirable characteristics that should to possess in order to be a probable substitute of the transformer oil.

1 - INTRODUÇÃO

No interior de qualquer equipamento elétrico sempre existem materiais isolantes que permeiam o espaço entre condutores com diferentes potenciais, assegurando a isolação elétrica de suas partes vivas, eliminando riscos de danos ou curtos-circuitos e garantindo também uma perfeita refrigeração. Em sistemas de potência, como altas tensões e grandes fluxos de potência são envolvidos, a isolação elétrica de equipamentos, tais como, transformadores, disjuntores e capacitores, é comumente efetuada por um líquido isolante. Devido às grandes quantidades e custos envolvidos, esses líquidos geralmente constituem-se em óleos isolantes derivados do petróleo de base naftênica ou parafínica. Cabe enfatizar que eles possuem basicamente duas funções principais: o isolamento elétrico e resfriamento de todo o equipamento. No isolamento elétrico, a principal característica desejada dos isolantes é a de possuírem elevada rigidez dielétrica e no resfriamento, onde, grandes quantidades de calor originado pelas perdas intrínsecas necessitam ser dissipadas, a de possuírem baixa viscosidade.

Contudo, além destas duas características dos líquidos isolantes, outras são requeridas de acordo com as aplicações específicas.

Desde 1890, os óleos minerais derivados de petróleo, vêm sendo utilizados como os mais importantes isolantes líquidos, embora dependendo da qualidade e do processo de preparação e extração possam ter suas características elétricas e físico-químicas alteradas.

Outros líquidos isolantes mais estáveis, como os óleos sintéticos, existem, mas atualmente, seus custos mostram-se proibitivos para uso geral, sendo muitas vezes empregados apenas em equipamentos especiais.

Pesquisas que visam substituir os óleos minerais em larga escala esbarram sempre na eficácia e custo reduzido desses últimos.

No presente trabalho, decorrem duas vertentes de pesquisas:- uma destinada a encontrar novos líquidos isolantes e outra voltada a um melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos nas características dos isolantes. A primeira consiste basicamente em ensaiar novos líquidos isolantes quanto a suas características elétricas, físico-químicas e térmicas e classificá-los quanto ao seu uso. Como exemplo desses ensaios cita-se o ensaio de viscosidade, que analisa o escoamento dos líquidos e os classifica como adequado para o processo de refrigeração. Já, a segunda vertente das pesquisas procura encontrar parâmetros que estabelecerão diretrizes para elaboração de normas técnicas, testes e ensaios, voltados ao aprimoramento das características dos líquidos isolantes. Também exemplificando essas pesquisas, cita-se aquela destinada a estudar os fenômenos físicos que definem a rigidez dielétrica, uma das principais características dos líquidos isolantes empregados em sistemas de potência. Dai resultaram inúmeras considerações e resultados, dentre elas, a influência das impurezas existentes nos líquidos isolantes e condições ambientais que interferem no processo de ruptura elétrica.

Nesta dissertação, procurar-se-á abordar essas duas vertentes de pesquisas apenas quanto as características elétricas dos líquidos isolantes e também, estabelecer paralelos entre elas, procurando descrever seus objetivos e seus limites.

Para tanto, no segundo capítulo, são descritos os principais líquidos isolantes bem como suas características elétricas e físico-químicas. No terceiro capítulo, são apresentadas as principais pesquisas sobre os fenômenos físicos que envolvem a rigidez dielétrica, dentre eles, a mobilidade, processos de condução, “prebreakdown” (pré-descarga) e “breakdown” (descarga). No quarto capítulo, mostra-se como as normas elétricas baseiam-se e/ou são alteradas pelas pesquisas descritas no capítulo anterior. Também neste capítulo, descrevendo-se os ensaios realizados óleo de mamona e óleos vegetais procurar-se-á estabelecer

procedimentos para pesquisa de novos líquidos isolantes e identificar quais seus principais campos de aplicação.

2 – ISOLANTES LÍQUIDOS

2.1 – CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE ISOLANTES LÍQUIDOS

Para que isolantes líquidos tenham condições de isolar e de resfriar, eles devem estar isentos de umidade e de contaminantes, especialmente os isolantes polares. Mesmo em diminuta quantidade, a umidade reduz substancialmente a **rigidez dielétrica** do líquido isolante, impedindo-o de desempenhar uma de suas mais importantes funções.

Os isolantes devem também apresentar uma elevada resistência à oxidação e à formação de ácidos e de borras, que podem ocorrer, principalmente quando a temperatura do líquido se eleva, prejudicando assim a circulação nos ductos e conseqüentemente a refrigeração de todo o equipamento. É inevitável a oxidação de líquidos que entram em contato com o ar, por isso equipamentos de grande porte são selados e muitas vezes enchidos a vácuo.

Também é importante levar em consideração a composição química do isolante líquido, para que ele, ao entrar em contato com outros materiais existentes nos equipamentos, não se dissolva ou se danifique.

Para que se dissipe o calor interno dos equipamentos, o líquido deve necessariamente possuir baixa **viscosidade**, para circular com rapidez, principalmente nas condições ambientais. Contudo, como certos equipamentos podem ser instalados em ambientes com baixas temperaturas, é fundamental que o líquido mantenha também sua fluidez nessas condições. Daí a exigência de que os líquidos isolantes tenham um baixo ponto de fluidez [1].

Cabe ressaltar que cada equipamento e condições de operação exigem determinadas funções e características específicas do isolante líquido, para

garantir seu bom desempenho. As características de alguns equipamentos seguem abaixo:

- **Para transformadores:** refrigeração, isolamento e estabilidade à oxidação;
- **Para transformadores em Instalação Abrigada** refrigeração, isolamento, estabilidade à oxidação e não propagação de chama.
- **Para capacitores:** por ser um equipamento selado, a principal característica do fluido deverá ser a absorção de gases, além das funções de isolamento e preenchimento dos espaços vazios.
- **Para chaves, disjuntores e religadores** a extinção de arco e isolamento elétrico[2].

2.2 – TIPOS DE ISOLANTES LÍQUIDOS ENCONTRADOS

O líquido isolante mais usado mundialmente é o óleo isolante de base naftênica. Entretanto, existem óleos de base parafínica e líquidos sintéticos.

2.2.1 – ÓLEO ISOLANTE MINERAL

Segundo MILASCH, 1984[1], o óleo isolante mineral utilizado em aparelhos elétricos, tais como transformadores, disjuntores, reatores e religadores entre outros, é extraído do petróleo. Sua composição depende da qualidade do petróleo extraído e do processo que foi empregado em sua preparação. O processo de preparação é extremamente importante e é o que realmente determina a qualidade desse tipo de isolante.

Noventa e sete por cento (97%) do petróleo, bem dizendo cru, é de base parafínica e apenas três (3%) de base naftênica. Há anos, usam-se tanto o óleo isolante originado do petróleo de base parafínica quanto o de base naftênica, chamados de líquidos parafínicos ou naftênicos respectivamente. O óleo isolante mineral é constituído de uma mistura de hidrocarbonetos $H_3C - (CH_2)_n - CH_3$, com n variando de 2 a 27 em sua maioria, e estima-se cerca de 2.900 o número de compostos existentes, dos quais cerca de 90% ainda não foram identificados, por ser uma pesquisa muito dispendiosa e laboriosa. Como se conhecem características, comportamento e deterioração quanto ao uso desse material, uma análise desta natureza se faz desnecessária.

O óleo isolante parafínico era de grande uso até o ano de 1920, porém seu ponto de fluidez não era suficientemente baixo, para que pudesse ser utilizado em aparelhos elétricos instalados ao tempo, principalmente em regiões cujo inverno é rigoroso. Devido a esses inconvenientes, ele foi gradativamente sendo substituído pelo óleo naftênico, cujo ponto de fluidez situa-se a $-40^{\circ}C$. Contudo, também existem dados conflitantes relativos ao fato de como as propriedades dielétricas do óleo à base parafínico seriam afetadas durante sua utilização, ou mesmo, como uma mistura desse óleo com outro tipo de óleo isolante pode ser comparada com o óleo naftênico. Países europeus, o Japão e a Rússia concordam que a melhor maneira de testar um isolante líquido é colocá-lo em uso e acompanhar seu comportamento.[2]

2.2.2 – ISOLANTE LÍQUIDO SINTÉTICO

Os isolantes líquidos sintéticos são geralmente hidrocarbonetos aromáticos clorados, incolores, de alta densidade (1,40 a 1,55), baixa viscosidade, elevada resistência à oxidação e são, além disso, virtualmente incombustíveis, dispensando assim, certas precauções contra incêndios e auxilia

na absorção dos gases gerados pelo defeito incipiente no equipamento. Outros profissionais, tais como os do ramo do petróleo/lubrificantes, defendem a idéia de que os aromáticos são considerados causadores de relativos problemas ao desempenho, principalmente devido às suas características de reatividade, instabilidade química e tendência a formação de borra e lamas quando submetidos à temperaturas elevadas. O fato do óleo não ser absorvedor de gases, pode atuar mais como uma proteção auxiliar do equipamento do que indício de comprometimento, pois após a ação geradora de gás, a reação do alarme de certos equipamentos como transformador, já está presente, desligando o equipamento sem maiores danos. Num equipamento, cujo óleo é absorvedor de gás, a presença deste gás impede uma eficiente atuação do sistema de proteção, atrasando o desligamento do equipamento, o que poderá causar sérios danos.[3]

Para o emprego de líquidos sintéticos, torna-se necessário que certos equipamentos sejam especialmente construídos, dada à incompatibilidade do produto com certos materiais usados na fabricação ou isolamento. Paralelamente, os próprios líquidos sintéticos são de custo elevado, o que dificulta o aumento de sua produção[4].

O silicone é um isolante líquido sintético, produto à base de polidimetilsiloxano, cuja fórmula química é dada por:.

Embora estas moléculas tenham um caráter polar, suas ligações sendo fortes e flexíveis conferem-lhes alta mobilidade, fazendo com que a polarização resultante por dipolos intrínsecos seja nula ou desprezível, sem perda de sua característica elétrica.

Este óleo apresenta uma viscosidade mais elevada que a do óleo mineral, requerendo do equipamento que o utiliza uma área de troca térmica maior. O que vem a encarecer todo o equipamento.

Uma de suas excelentes características é possuir um alto ponto de fulgor, vindo a ser muitas vezes chamado de fluido de segurança. Também, durante seu processo de queima, ocorre a formação de sílica (areia) que se deposita na superfície, fazendo com que cesse a fonte de oxigênio e por conseguinte, a chama. Este fenômeno é conhecido como auto-extinção. Estas duas propriedades fazem com que ele seja recomendado para instalações onde o risco de incêndio deve ser minimizado[4].

2.3 – SOLUBILIDADE DOS GASES E LÍQUIDOS

A pressão, em geral, tem muito pouco efeito sobre a solubilidade dos líquidos ou sólidos em solventes líquidos, mas a solubilidade dos gases sempre aumenta com o aumento da pressão.

Por possuir esta propriedade é que a aplicação de vácuo nos líquidos torna eficiente a degasagem dos óleos isolantes.

A Lei de Henry estabelece que a concentração do soluto gasoso da solução C_g é diretamente proporcional à pressão parcial do gás sobre a solução, isto é:

$$C_g = K_g \cdot P_g \quad (1)$$

K_g = constante de Henry

Esta Lei de Henry, só é precisa para gases que não reajam significativamente com o solvente e para concentrações e pressões relativamente baixas.

Os gases gerados por defeitos de incipientes nos equipamentos permanecem no óleo isolante em função da pressão do sistema e da temperatura do óleo isolante.

A tabela 1, mostra a concentração de solubilidade de diversos gases no óleo isolante a 760 mmHg e 25^o C.

Gases como o hidrogênio, nitrogênio, monóxido de carbono e oxigênio, aumentam suas concentrações de solubilidade com o aumento da temperatura, enquanto que para gases como o metano, acetileno, dióxido de carbono, etileno, etano, diminuem sua solubilidade[3].

Tabela 1
Concentração de solubilidade de diversos gases no óleo isolante a 760 mmHg e 25^o C.

H ₂	Hidrogênio	7,0 % volume
N ₂	Nitrogênio	8,6 % Volume
CO	Monóxido de Carbono	9,0 % volume
O ₂	Oxigênio	16,0 % volume
CH ₄	Metano	30,0 % volume
CO ₂	Hidróxido de Carbono	120,0 % volume
C ₂ H ₆	Etano	280,0 % volume
C ₂ H ₄	Etileno	280,0 % volume
C ₂ H ₂	Acetileno	400,0 % volume

Em relação a solubilidade, se alguns desses gases não alçarem o limite de solubilidade no óleo, e com isso saírem da fase líquida, poderão permanecer no óleo, podendo causar estrago aos equipamentos.

Esta solubilidade de gases e suas variações no óleo isolante é mostrada no terceiro capítulo e os ensaios físico-químicos no quinto capítulo.

A quantidade de água existente no óleo isolante mineral, sob a forma dissolvida, em suspensão ou livre (depositada), representa um dos principais fatores adversos à isolação elétrica e consequentemente, à **rigidez dielétrica**. A quantidade de água em solução no óleo depende da temperatura e do grau de refino. Quanto maior a temperatura, maior será a quantidade de água dissolvida no óleo. Quanto mais refinado for o óleo, tanto menor será a solubilidade da água.

De certo modo, a exposição desse isolante ao ar úmido por vários dias, ocasiona uma quantidade maior de água.

2.4 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A MISTURA DE LÍQUIDOS ISOLANTES

A mistura de líquidos isolantes de características diferentes apresenta propriedades e características cujos valores são determinados pela média dos valores de cada um de seus componentes. Nesse caso, quando são misturados líquidos, que possuem características ruins, com líquidos de boas características isolantes, ocorre uma predominância das características ruins.

Assim sendo, após o processo de obtenção e beneficiamento do óleo isolante, alguns ensaios físico-químicos não apresentam o mesmo resultado, acarretando com isso a desconfiança e o receio de misturar óleos de diferentes procedência.

Fica evidente, que sempre que possível, deve-se evitar a mistura de isolantes líquidos. Mas quando necessário, há que se preocupar com o poder do solvente do óleo novo ante os componentes dos equipamentos nos quais serão utilizados, se tais óleos isolantes são adequados aos seus produtos.[3]

2.5– ÓLEO REGENERADO E MÉTODOS DE TRATAMENTO

Durante o processo de utilização do óleo, o mesmo tende a apresentar reações como a oxidação, alterando significativamente suas propriedades químicas/elétricas, chegando ao ponto de ser necessário a troca do óleo por outro em melhores condições.

Como o óleo oxidado é muito comum no meio elétrico e o custo de regeneração desse óleo é muito menor em relação ao óleo novo, a tendência de cada empresa elétrica é de montar o seu sistema de regeneração ou enviar os óleos a usinas regeneradoras, afim de reaproveita-lo. Mas existe cautela para a utilização deste tipo de óleo em níveis de tensão.

Existem companhias que limitam a utilização desses óleos em equipamentos usados ou recuperados. No entanto, o óleo isolante regenerado pode apresentar características idênticas às do óleo novo, pois durante este processo, além da separação das impurezas, expurga-se também moléculas oxidadas provenientes do óleo novo colocado em uso. Portanto após a regeneração do óleo sobrarão apenas as moléculas que não sofreram oxidação, apresentando maior resistência ao processo oxidativo e teoricamente maior período de vida útil.[3]

Desta forma, um óleo usado poderá ser novamente posto em condições satisfatórias de uso por recuperação. Os métodos físicos utilizados, eliminam partículas sólidas do óleo e diminuem o teor de água e gases dissolvidos para um nível aceitável. Estes processos incluem técnicas de filtração, centrifugação e tratamento a vácuo.

2.5.1 – TÉCNICAS DE FILTRAÇÃO

São utilizados filtros que consistem em forçar o óleo a atravessar sob pressão placas de celulosas, ou outro elemento filtrante. Esta técnica é utilizada

para a remoção de contaminantes em suspensão, com partículas maiores de 5 μm . Mas este sistema não promove a degasagem do óleo, e sim a remoção de uma parte da água contida no mesmo, dependendo da umidade do elemento filtrante.

Deve-se tomar cuidado com os filtros de papel, para que sejam de boa qualidade e que nenhuma fibra se desprenda do mesmo.

2.5.2 – CENTRÍFUGAS

Este processo não realiza a remoção de alguns contaminantes sólidos fixos como o filtro pode realizar. Mas pode reter uma maior quantidade de contaminantes por tempo.

Esta técnica é utilizada para uma primeira limpeza, quando grandes quantidades de óleo contaminados são tratados.

2.5.3 – SISTEMA TERMO-VÁCUO

Um eficiente equipamento de redução dos teores de gás e água de óleos isolantes, constituído por filtros aquecedores e câmara sob vácuo. Após filtração, o óleo é finamente pulverizado a quente na câmara sob vácuo, reduzindo os teores de água e de gases[5].

2.6 – COMENTÁRIOS FINAIS

De uma maneira geral, como pôde-se observar, líquidos ditos isolantes devem ser amplamente testados, tanto em laboratório quanto no campo, para terem suas qualidades comprovadas.

Também observa-se que suas características são fortemente influenciadas por agentes externos. A exemplo da rigidez dielétrica, que é dependente do teor de água, de partículas em suspensão e outros.

Esta característica elétrica dos líquidos é amplamente estudada como será visto no terceiro capítulo, onde serão abordado os parâmetros e fenômenos físicos envolvidos.

3 – MOBILIDADE, CONDUÇÃO, “PRÉ-BREAKDOWN” E “BREAKDOWN” DE LÍQUIDOS ISOLANTES

3-1- MOBILIDADE

3.1.1 – INTRODUÇÃO

O conhecimento apropriado sobre o movimento de carga em fluídos, em termos de elétron-átomo ou íon-átomo, oferece informações valiosas sobre a natureza em que o estado do líquido se encontra. Embora muitos trabalhos tenham sido realizados por pesquisadores para compreender estes mecanismos de condução em líquidos isolantes, dúvidas ainda existem, mas, em anos recentes, houve um progresso substancial nesta área e as medidas de mobilidades contribuíram em grande parte para este progresso.

Através de medidas de mobilidade obteve-se informações do processo de condução de cargas em “pre-breakdown”, sendo este um indício vital para o conhecimento do “breakdown”.

3.1.2 – EXPERIMENTOS E MEIOS DE ESTIMULAÇÃO

Para analisar as mobilidades de portadores de cargas em dielétricos líquidos, que geralmente são em pequenas quantidades, é necessário estimular e aumentar a densidade de carga de maneira controlada.

Os métodos mais utilizados por pesquisadores foram:

- (a) uma fonte química depositada em um eletrodo para gerar colunas densas de íons positivos e elétrons.
- (b) um raio x, usado para criar cargas positivas e negativas, tendo ainda a vantagem de que ele pode ser ajustado, para ter o líquido irradiado ou apenas a uma parte próxima do eletrodo, Com isso, sua energia varia para controlar densidades de cargas carregadas em excesso em seu local de geração.
- (c) uma luz ultra violeta, transmitindo elétrons, em um túnel de emissão de configuração metal-óxido-metal, onde este último libera elétrons através de elétrons aquecidos a 15.000 K para penetrar no filme fino de Al_2O_3 no eletrodo. E então alguns deles são injetados no líquido.
- (d) uma ponta de metal fino (eletrodo) que quando elevado a um potencial negativo ou positivo, suficientemente alto, produz um campo próximo em sua extremidade criando uma grande quantidade de elétrons ou íons positivos.
- (e) Laser disparado externamente, etc.

Em estudos realizados em anos anteriores a principal causa do fenômeno “breakdown”, em líquidos isolantes, foi a emissão de um campo a partir de um cátodo. Mais tarde estes dados iriam se alterar.

Segundo GALLAGHER, 1975 [6], a mobilidade de cargas carregadas é definida como sua velocidade de deslocamento por unidade de tensão elétrica, ou seja, uma carga atravessando uma determinada distância no líquido sob a influência de um campo elétrico uniforme em uma célula teste.

A figura 1 ilustra o arranjo para medidas de mobilidade, num processo de carga em excesso criada no eletrodo emissor, a partir de qualquer um dos métodos mencionados acima.

Uma mudança repentina no sinal através da resistência R detecta o movimento de cargas iônicas entre os eletrodos emissor (E) e receptor (C)

Figura 1 - Medidas de Mobilidades (GALLAGHER, 1975)

O tempo de trânsito para que as cargas carregadas desloquem uma distância (d) entre os eletrodos (E) e (C) é medido a partir de registro oscilográfico do sinal, obtido de R versus tempo. A mobilidade de carga μ é determinada do relacionamento:

$$\mu = \frac{d^2}{v.t} \quad (\text{cm}^2/\text{V.s}) \quad (2)$$

Esta equação significa que o campo interno no líquido é tomado como campo aplicado e que não é perturbado pela carga de deslocamento.

Outros experimentos foram realizados com o diodo (da figura 1) convertido para tríodo ou células do tipo tetrodo, através de inserção de grades (eletrodos) colocadas entre o emissor e o coletor. Essa técnica é similar à utilizada no estudos de gases. Estas grades servem como bloqueios elétricos, para controlar a passagem de cargas através do espaço entre os eletrodos fixos, definindo melhor a posição inicial da carga injetada. Para isso um limite superior do campo aplicado (até 25 kV/m) foi estabelecido, de modo que não houvesse um risco de descarga entre a grade e o emissor.

Em pesquisas realizadas por LAMP, 1991 [7], para analisar o movimento de elétrons em líquidos isolantes, em função da temperatura, foi utilizado um experimento mais sofisticado, mas parecido com o de GALLAGHER, 1975 [6]. O experimento é ilustrado na figura 2, onde a temperatura da célula teste era controlada por um circuito na conexão entre a célula e o reservatório. Em resposta a cada variação da temperatura da célula, obteve-se uma leitura de referência. Os resultados foram lidos por um osciloscópio e transmitidos a um computador.

Figura 2 – Medidas de Mobilidades (LAMP, 1991)

Estes experimentos serviam para analisar o movimento de cargas em líquidos isolantes.

3.1.3. MOBILIDADE DE CARGAS EM LÍQUIDOS ISOLANTES

Este trabalho analisa as cargas elétricas dos líquidos isolantes.

A tabela 2, onde se observam vários líquidos hidrocarbonetos não polares, fornece um resumo de mobilidades de íons negativos e positivos, que foram obtidas através da utilização de técnicas de tempo de trânsito para três diferentes métodos de estimulação.

O n-hexano é o líquido mais amplamente investigado, por possuir características adequadas, em temperaturas ambiente, tais como uma viscosidade baixa, que facilita o processo de filtração, e um ponto conveniente de ebulição (341 K) para propósitos de destilação e de purificação. Além disso, n-hexano, C_6H_{14} , é parte de série homóloga de hidrocarbonos de cadeia reta, de modo que qualquer dependência de μ (mobilidade) na estrutura molecular é imediatamente examinada por simples alteração da extensão da cadeia. Devido as mesmas razões, o hexano é amplamente utilizado para estudos sobre condução, pré-“breakdown” e “breakdown”, que serão vistos em seguida.

Na tabela 2 nota-se também que o método de injeção de cargas pode estar relacionado tanto com a mobilidade negativa μ_- quanto com a positiva μ_+ . Isto pode ser verdadeiro, uma vez que nunca foi estabelecido que cada forma de estimulação irá produzir uma espécie idêntica de cargas carregadas.

Segundo MILASCH, 1984 [1], dois fatores são particularmente responsáveis pela dispersão nos resultados: a dependência do líquido isolante mineral na preparação da amostra, e o movimento induzido no líquido

Tabela 2*Mobilidades de cargas carregadas em hidrocarbonos (sem purificação)*

(GALLAGHER, 1975)

MÉTODOS DE EXCITAÇÃO				
Líquidos	Raio		Fotoemissão	Campo de Emissão
	μ_-	μ_+	μ_-	μ_+
n-hexano	9,1	8,5	7,5	
n-heptano	6,6	4,2	11,0	2,4
n-octano	5,2	2,9	7,0	3,0
n-nonano	3,8	2,0		
n-decano	2,7	1,5	3,0	2,1
Benzeno			2,5	

No início das caracterizações dos materiais os resultados obtidos não eram reprodutíveis, pois os pesquisadores não controlavam parâmetros influentes, como exemplo, tipo e quantidades de contaminantes. No entanto após submeter a purificação, os resultados se assemelharam “independente da técnica utilizada”.

A verificação de como estas impurezas influenciam os dados e são uma das principais causadoras do processo de “breakdown”, vão ser analisadas nos itens subsequentes.

O modelo de experimento utilizado por LAMP, 1991 [7], teve por objetivo explicar a dependência da mobilidade dos elétrons em relação à temperatura dos líquidos de argônio. Os resultados obtidos são mostrados na figura 3. A temperatura influenciou a mobilidade dos elétrons independentemente do campo aplicado. Contudo a temperatura nas proximidades de mobilidades máximas é influenciada pelo decréscimo do campo aplicado. Este efeito é evidente para a temperatura de $-4,8$ K.

Figura 3 – A mobilidade de carga sob o efeito de campo elétrico para diferentes temperaturas (LAMP, 1991)

O produto da mobilidade versos viscosidade foi também analisado por GALLAGHER, 1975 [6], e notificou que a viscosidade alterava a mobilidade de cargas no líquido.

CHADBAND, 1980 [8], investigou vários fluidos de silicone de natureza química idênticas, mas com viscosidades que variavam de 10 a 10.000 (mm²/s), não encontrando nenhuma diferença significativa no valor da tensão de “breakdown”. Estes resultados indicam que a viscosidade tem pouco efeito sobre o processo de “breakdown”. Contudo, quando se analisa, conjuntamente o processo de refrigeração e o “breakdown”, observa-se que quanto menor a

viscosidade menor é a refrigeração e conseqüentemente ocorre aumento da temperatura com a possibilidade de haver ruptura dielétrica.

GALLAGHER, 1975 [6], também observou portadores rápidos de carga negativa em n-hexano purificados, e verificou que sua mobilidade era, pelo menos, 50 vezes maior do que nos valores obtidos anteriores.

A purificação foi conseguida removendo-se as impurezas por diferentes técnicas, dentre elas: agentes químicos, como sódio-potássio, “crivos” moleculares, sílica gel; repetidas técnicas de destilação a vácuo, bombeamento a vácuo prolongado nos líquidos, e uma exposição repetida desses líquidos a captadores de filme de bário. Em épocas recentes, filtros, centrífugas e sistema termo-vácuo são os meios mais usados.

Vários ciclos de purificação se fizeram necessários antes que uma espécie de portadores rápido fosse detectada.

Tabela 3

Mobilidades de elétrons em vários dielétricos líquidos. (GALLAGHER, 1975)

Líquidos	Formula Estrutural	Mobilidade ($\text{m}^2/\text{V.s}) \times 10^4$	b.d ($\text{kg}/\text{m}^3) \times 10^7$	Temperatura (K)
n-hexano	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$	0,09	44,2	296
n-pentano	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$	0,16	44,6	296
n-butano	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}_3$	0,40	47,7	296
Neopentano	$\text{C}(\text{CH}_3)_4$	55,0	104,9	296
Ciclohexano	C_6H_{14}	0,35	51,3	296
n-hexano	-	0,07	-	300
n-pentano	-	0,07	-	300
Benzeno	C_6H_6	0,60	-	300

Os resultados das mobilidades de elétrons em hidrocarbonos e em outros líquidos encontram-se listados na tabela 3.

Esses resultados mostram uma certa concordância entre dois pesquisadores quanto ao n-hexano, mas para n-pentano, existem divergências que podem ser explicadas devido às impurezas residuais no líquido.

As impurezas, ao invés de prender elétrons, alteram a seção cruzada de dispersão e por consequência, as mobilidades.

Na tabela 3, observam-se aspectos interessantes no que diz respeito ao efeito das estruturas moleculares nos resultados obtidos. Pode-se notar que os elétrons possuem mobilidades altas em neopentano que possuem moléculas quase esféricas; no n-hexano e no n-pentano, que possuem moléculas assimétricas de cadeia longa, dão origem a mobilidade baixa.

A estrutura molecular também é importante, como será visto a seguir. Se moléculas são ionizadas por irradiação, os elétrons que se movimentam, escapam de seus íons positivos, dissipam suas energias em uma certa distância antes de alcançar sua termalização. Esta distância de termalização, que é denotada por “b”, aumenta conforme a simetria molecular. Sendo “d” a densidade do material, o produto “bd” fornece a densidade normalizada, cujo resultados são coerentes com relação à densidade de cada material.

3.1.4 - O EFEITO DA ESTRUTURA MOLECULAR

Em experimentos realizados até então por pesquisadores, acreditava-se que o mecanismo de “breakdown” elétrico era afetado apenas por impurezas nos líquidos isolantes. Pouca atenção foi dada para o efeito da estrutura molecular. Entretanto, o estudo dos efeitos da estrutura molecular sobre as propriedades de fluidos dielétricos, segundo FORSTER, MAZZETTI, POMPILI E CECERE, 1991 [9], tornou-se possível com o advento de vários novos fluidos dielétricos sintéticos de composição bem definida.

Em testes realizados com n-hexano, foi possível mostrar que a estrutura molecular estava envolvida na condução de eletricidade em líquidos considerados isolantes.

A partir desses estudos, ficou evidente que a estrutura molecular e a simetria tinham influência sobre o processo de transporte.

Na presença de impurezas como oxigênio, umidade e outras, não é possível verificar a influência da estrutura molecular, pois essas impurezas envolvem as cargas e modificam sua estrutura inicial.

A densidade e a viscosidade assumem importância capital nesses estudos. Alguns valores para diferentes isolantes comerciais encontram-se listados na tabela 4 e as propriedades dielétricas dos fluidos em testes são mostradas na tabela 5.

Tabela 4

Propriedades físicas de fluidos teste (a 20°C) (FORSTER, 1991)

Tipo de fluido	Densidade (g/cc)	Viscosidade (Cs)
MDBT	1,006	6,5
DTE	1,035	5,8
DINP	0,970	125
PXE	0,988	8,0
PFFE	1,860	50
PPMS	0,960	10

*Descrição dos fluidos no anexo A.

Tabela 5

Propriedades dielétricas dos fluidos em teste (medidas em 1 kHz e 23⁰C)
(MAZZETTI, 1991)

Fluido Testado	ϵ $\pm 0,001$	$\tan\delta$ $\pm 5\%$	Condutividade ca extrapolada para 1 Hz	cc $\pm 5\%$
MDBT	2,650	0,00044	0,25	0,25
DTE	3,657	0,00173	4,70	4,70
DINP	4,766	0,0125	33,0	33,00
PXE	2,621	0,00058	0,04	0,07
PFFE	2,082	0,00026	0,03	0,08
PPNS	2,662	0,00017	0,02	0,06

Na tabela 5 a permissividade ϵ foi deduzida da proporção de carga e das medidas de ângulos, da perda dielétrica $\tan\delta$ e também as condutividades dc e ac.

Para comparar tensões de “breakdown” de impulsos dc e ca de seis fluidos, os seguintes testes foram realizados: (a) para dc foi utilizado uma geometria eletrodo ponta-esfera, com uma separação 0.5 cm entre eles; (b) em ac, tensões de “breakdown” foram determinadas com um teste entre 0 e 80 kV, aumentadas na proporção de 2 kV por segundo e determinadas por um voltímetro com memória. Os testes foram realizados adotando-se procedimentos padronizados, conforme será visto no capítulo V.

Os resultados destes ensaios encontram-se na tabela 6.

Tabela 6

Comparação de cc e ca de tensão de “breakdown” de seis fluidos (50 Hz ac, 2 kV/s de taxa, campo uniforme, 2,5 mm de “gap”, 1,5/50 μ s de impulso ca com 5 mm de “gap”, todos em 23⁰C) (POMPILI, 1991)

Fluido Testado	cc, kV	Impulso, ca Agulha Negativa	kV Agulha Positiva	Tempo para rompimento Agulha Negativa
MDBT	74 $\pm$ 4	102 $\pm$ 2	58 $\pm$ 1	4,8 $\pm$ 0,6
DTE	66 $\pm$ 6	105 $\pm$ 7	42 $\pm$ 1	10,8 $\pm$ 3,6
DINP	57 $\pm$ 5	58 $\pm$ 2	33 $\pm$ 1	4,2 $\pm$ 2,3
PXE	84 $\pm$ 3	87 $\pm$ 1	82 $\pm$ 1	9,7 $\pm$ 0,7
PFFE	64 $\pm$ 6	44 $\pm$ 1	61 $\pm$ 2	3,5 $\pm$ 0,7
PPMS	54 $\pm$ 4	75 $\pm$ 12	51 $\pm$ 1	13,8 $\pm$ 11,3

As variações das estruturas moleculares indicaram mais sensibilidade para causar ruptura elétrica, em impulso dc do que em impulso ac. Além disso, a independência frequência nas condutividades de estruturas aromáticas sugere que: em campos baixos a condução iônica ou eletrônica domina os processos de transporte de carga.

Alguns destes fluidos, submetidos a impulsos elevados, possuem tensões de “breakdown” mais elevado ou iguais para agulhas positivas do que para agulhas negativas. Diferentes de alguns resultados já obtidos para outras espécies, com estruturas moleculares semelhantes.

Em líquidos, como da família dos hidrocarbonetos alifáticos, valores de condutividades elevados causam tensões de “breakdown” mais baixas. O mesmo não acontece para fluidos com estruturas moleculares diferentes.

Sendo assim, existe uma relação de estrutura molecular e a propagação dos “streamers” que ocorre devido à afinidade eletrônica das moléculas nos líquidos.

3.1.5 – MOVIMENTO DE CARGAS INDUZIDAS NO LÍQUIDO

Conforme GRAY E LEWIS, 1969 [10], o trânsito de íons entre os eletrodos emissor e receptor provoca colisões entre eles. Essas colisões induzem no líquido um movimento na mesma direção, o que aumenta a velocidade do íon e produz uma mobilidade elevada. Este movimento direcionado de cargas carregadas devido ao líquido em movimento, pode criar pressões hidrostáticas. Este fenômeno é conhecido como “bombeamento de íons”.

Foram realizados testes com partícula neutra, a qual foi introduzida em uma célula teste que continha hexano, afim de observar o deslocamento desta com o movimento do líquido.

Na figura 4 tem-se a mostra de um líquido e curvas de tempo pelo deslocamento de íons. No campo de deslocamento de 10^5 V/m, a carga atravessou a lacuna de 15 mm em 2,4 segundos, mas, durante este percurso, o líquido deslocou-se de uma distância de aproximadamente $10,7 \times 10^{-3}$ m. O deslocamento do íon relativo ao líquido foi, portanto, apenas $4,3 \times 10^{-3}$ m, gerando uma mobilidade verdadeira de íon negativo de $1,8 \times 10^{-8}$ m²/Vs.

Com este resultado, pode-se concluir que os diferentes resultados (tabela 2) obtidos entre vários pesquisadores podem ser explicadas através do movimento do líquido, causadas por mudanças na geometria da célula teste utilizada e o modo de injeção de cargas. Também ficou constatado que as tensões intermediárias já ocasionavam pequenos movimento no líquido, enquanto que em baixas tensões o líquido permanecia estacionário.

D – Distância que o íon se move por movimento do líquido
 I - Tempo de transito do íon

Figura 4 - Deslocamento de líquido e íon [GRAY E LEWIS,1969]

Dessa forma, os pesquisadores concluíram que, quando o volume de líquido é colocado em movimento, ocorre uma instabilidade no sistema, e fica evidente que, dependendo do formato da célula teste, podem ocorrer erros nos resultados.

3.2 - CONDUÇÃO

3.2.1 - INTRODUÇÃO

A condução em líquidos dielétricos foi revista várias vezes. Neste capítulo, abordam-se as principais controvérsias relacionadas com a condutividade natural de líquidos, as quais ainda requerem explicações satisfatórias.

3.2.2 – CONDUÇÃO EM CAMPOS BAIXOS E ELEVADOS

LUNDGAARD, 1998 [11] e seus colaboradores, identificaram que, o aumento da tensão aplicada, resulta em uma maior movimentação das cargas podendo provocar o “breakdown”. Pesquisas sobre as características das correntes em relação ao campo aplicado, levaram a distinguir em dielétricos líquidos, regiões de campo baixo, intermediário e alto.

BRIERE, 1964 [12], em décadas passadas, observou em experimento realizado com nitrobenzeno altamente purificado, que em campos considerados baixos, menores do que 100 kV/m, a corrente eleva-se linearmente, obedecendo à lei de ohm. Em campos intermediários de até 2 MV/m, existe uma região em que a corrente tende a saturação; e em campos elevados acima de 10^8 V/m pode ocorrer o “breakdown”. Isto, logicamente, depende do meio em que estão sendo realizados os testes.

A figura 5, mostra os números (1) , (2) e (3), que indicam a aplicação de campo baixo, intermediário e alto, respectivamente, em meio líquido contendo nitrobenzeno altamente purificado.

Cargas em campos considerados baixos ou intermediários são, provavelmente, devido a impurezas químicas, tendo em vista ser praticamente impossível remover todos os traços de impurezas. As impurezas podem desassociar suas moléculas, em pares de íons, ficando altamente polar, como por exemplo a água. Assim com um campo pequeno aplicado no sistema, os íons recombinaem e deslocam para os eletrodos, dando origem a um fluxo de corrente e que as velocidades de deslocamento dos íons tornam-se maiores com o

aumento no campo, mostrado na região ohmica da figura 5. Isto é um forte indício de que as impurezas iônicas explicam a corrente de condução em campos baixos.

Figura 5 - Característica de corrente-campo para uma alta purificação de nitrobenzeno (BRIERE, 1964).

Como se pode observar, na própria região (3) da figura 5, observa-se que, em campos superiores 10^8 V/m, pode ocorrer o “breakdown”, e este fato está interligado ao processo de condução.

3.2.3 – CORRENTES CAUSADAS POR PARTÍCULAS SÓLIDAS

Se uma partícula sólida for colocada em um dielétrico líquido, entre dois eletrodos, ela polariza-se por ação eletrostática, é atraída para o cátodo, onde é instantaneamente adquiri uma carga. O ciclo se repete em um movimento oscilatório entre os eletrodos. Este movimento de partículas sólidas está diretamente ligado ao processo de “breakdown”.

Estas impurezas sólidas podem surgir entre os eletrodos, por várias razões, sendo principalmente a liberação de impurezas pela própria superfície da célula teste e do eletrodo-líquido. Com isso fica difícil neutralizar estas impurezas, visto que, as superfícies de célula teste, (tais como o vidro e o alumínio), podem desgastar-se facilmente, através de efeitos de cavitação associados com ultra-som. O ideal seria efetuar uma limpeza do recipiente e uma filtragem a cada teste.

3.2.4 – EFEITO DE IMPUREZAS GASOSAS

Uma outra forma de ocorrer o breakdown é através de impurezas gasosas. Uma pequena quantidade de oxigênio dissolvido em n-hexano aumentar a probabilidade do “breakdown”.

ALTAFIM, 1995 [13], utilizou um laser Nd:YAG para ionizar um gap com fluido, no caso o hexano, extremamente purificado que circulava e era filtrado no sistema de preenchimento, para produzir um plasma ionizado, para teste de isolamento deste dielétrico líquido.

Visto que em todos os casos estudados, os “streamers” (origem do “pré-breakdown”) originava-se na superfície do eletrodo, o laser foi disparado externamente sobre esta superfície. As separações utilizadas dos eletrodos variaram de 3 e 4 mm.

A incidência da luz (laser) sobre a superfície do eletrodo foi suficiente para fazer o líquido evaporar. Uma câmara de alta velocidade e iluminada pela luz do laser de íon argônio fotografou a lacuna de teste.

Para o laser com pulso de energia variando de 0,5 mJ a 20 mJ, uma bolha expandiu-se na superfície do eletrodo, separando o fluido do eletrodo, e variou seu tamanho de 500 μm a 2 mm, conforme a energia de pulsação aplicada. Observou-se também que pulsos de energia acima de 20 mJ provocou danos no líquido.

Sendo assim, é de extrema importância levar em conta o líquido usado em testes, que deve ser desgaseificado, para que se obtenha resultados expressivos.

3.3 – “PRÉ-BREAKDOWN E “BREAKDOWN”

3.3.1- INTRODUÇÃO

O estudo de fenômenos de “pré-breakdown” e de “breakdown” em dielétricos líquidos tem sido muito abordado por pesquisadores durante os últimos anos[6][7][14][15]. Através de técnicas avançadas, como osciloscópio digitadores, sistemas de detecção óptica rápidos, câmara conversora de imagens e espectroscopia óptica de luz emitida, muitas informações foram obtidas com estes processos. Hoje é possível acompanhar os diferentes estágios que levam o “breakdown” em dielétricos líquidos, sendo este processo precedido por eventos denominados streamers, que são ramificações ionizadas positivamente ou negativamente. Estas ramificações formadas possuem diferentes estruturas, conforme as condições das experiências realizadas. O formato desses streamers depende de muitos parâmetros, tais como a composição química do líquido, a tensão aplicada, a célula teste, o formato do eletrodo utilizado e outros. Os resultados dos diversos métodos e experimentos realizados

para tentar elucidar este processo são mostrados aqui com a intenção de auxiliar futuras pesquisas.

3.3.2 - O EFEITO DOS “STREAMERS” EM LÍQUIDOS ISOLANTES EM CONDIÇÕES DE CAMPO NÃO UNIFORMES

HEBNER, KELLY, FORSTER e FITZPATRICK, 1985 [14] registraram os processos de “pré-breakdown” e “breakdown” em n-hexano, tolueno e Marcol 70 (óleo naftênico), ambos em um estado puro e com impurezas selecionadas. O estudo foi realizado através de utilização da geometria ponta plano, onde observou que impurezas químicas afetam significativamente a tensão de “breakdown”.

YAMASHITA e AMANO, 1988[15] e BEROUAL E TOMBAZEON, 1986[16] também registraram estes processos para Marcol 70, 2,2,4 Trimetil Pentano e Ciclohexano, respectivamente.

O experimento utiliza câmaras de alta velocidade, líquidos finamente purificados e campos uniformes com eletrodos separados de 2 mm. Enquanto no estudo ponta plano o interstício investigava com variação de 3 a 5 mm com as mesmas técnicas fotográficas de alta velocidade.

FORSTER[17], FITZPATRICK[18] E HERNER[19], em 1982, mostraram que o surgimento dos “streamers” ocorria tanto no eletrodo negativa como no positivo. Para examinar a possibilidade de generalizar essas observações, estudos com impurezas bem definidas como grau químico N, N¹ Dimetilanilina (DMA), CCL₄, água e ar. As impurezas foram injetadas com o auxílio de uma seringa, sem contato com a atmosfera.

O pulso de tensão utilizado, foi de formato trapezoidal com um aumento de 4 μ s para a tensão de topo, permanecendo nesse nível durante 3 μ s e decaindo para zero em outro 4 μ s.

A agulha (eletrodo) usada nesse estudo era fonográfica e um disco de aço altamente polido, com 8,9 cm de diâmetro e bordas arredondadas.

Com a aplicação de potencial em hidrocarbonos puros, na agulha cátoda, os streamers parecem crescer de forma irregular, como é mostrado na figura 6. Estes “streamers” serão chamados de primários e possuem uma velocidade constante que varia de 2 a 3 km/s. Segundo Simpson, 1998[20], nos últimos estágios, seu crescimento lateral excede o crescimento vertical, com proporção média de crescimento de 10^4 cm/s.

Figura 6 - Crescimento dos “streamers” em hidrocarbônico puro
(agulha catodo, 2×10^6 estruturas/s, pulso trapezoidal) (HEBNER, 1985)

Foi sob essas condições no n-hexano, que o “breakdown” pôde ser observado ocasionalmente durante uma reversão de polaridade de tensão. O adicionamento de CCL_4 em ciclohexano, BEROUAL [16] observou que as

velocidades dos “streamers” negativos aumentam em fator de 10, Acima de 0,04 mol/l o aumento é menos significativo, conforme figura 7. O crescimento dos “streamers” em forma de galhos, em princípio, parece não ser o causador do “breakdown” em líquidos contaminados. No entanto os “streamers” considerados secundários, “streamers” que aparecem após o “streamer” primário, desenvolve-se com uma velocidade mais elevada que os “streamers” primários podem alcançar 32 km/s, segundo SIMPSON, 1998 [20], e podem ser o grande causador do “breakdown”(figura 8).

Figura 7 – Influência da concentração de CCL_4 nas velocidades do “streamers” negativo em Ciclohexano. Com primento de “gap” de 2mm; raio de ponta 3 μm ; Tensão 33 kV. (BEROUAL, 1986)

O desenvolvimento dos “streamers” considerados secundários, na agulha catodo, pode ser visto mais nitidamente em líquidos contaminados, o que explica o valor elevado da tensão de “breakdown” em líquidos puros.

Segundo FORSTER, 1982 [17], existe um efeito da polaridade sobre os “streamers”. No “streamer” positivo pode ocorrer um “streamer” terciário, derivado do “streamer” secundário e ainda mais rápido, que produz o “breakdown”, enquanto que nos “streamers” negativos ocorrem apenas dois estágios de propagação. Como foi visto na condução de dielétricos líquidos, o aparecimento e propagação de cada estrutura depende do início do campo aplicado.

Figura 8 - Desenvolvimento de “streamers” secundário
 (0,3 cm “gap”, agulha catodo 2×10^6 estruturas /s, pulso trapezoidal)
 (FORSTER, 1982)

Em resumo, o sistema de injeção de carga e os “streamers” primário, secundário e terciário, estão diretamente relacionados com o processo de “breakdown”.

A tabela 7 mostra os valores do crescimento do “streamer” na agulha positiva nos líquidos hidrocarbonos. Como o pulso é trapezoidal, o valor de V_{bd} tensão na qual ocorre o “breakdown”, pode ocorrer em tempos, quando a tensão está decaindo da tensão de pico para zero.

Pode-se observar, na tabela 7, que o valor de V_{bd} (tensão de “breakdown”) para o n-hexano em todos gaps, são menores do que o tolueno. Isto se deve ao fato de que os “streamers” no n-hexano se movimentou quase três vezes mais rápido do que no tolueno.

A viscosidade do Marcol 70, em gaps maiores de 1,27, parece influenciar o processo total de crescimento.

A adição de um composto de baixa ionização, tal como N, N-Dimetilanilina não altera a velocidade do “streamer” negativo, no entanto aumenta (em um fator de dois a três) a velocidade do “streamer” positivo em óleo Naftênico (Marcol 70) e em 2,2,4-Trimetil Pentano, conforme figura 9 (YAMASHITA, 1988)[15]. Nos dois casos, existe uma concentração (aproximadamente 0,05 mol/l) acima da qual não é observado nenhum aumento significativo da velocidade.

Tabela 7

Comparação do crescimento do “streamer” positivo e “breakdown” em vários líquidos hidrocarbonos (pulso trapezoidal, 25^o C). (FITZPATRICK, 1985)

Líquido	V _{crista} , kV ⁽¹⁾	V _{bd} kV ⁽²⁾	t _{CG} , μs ⁽³⁾	velocidade de crescimento em cm/s x 10 ⁺⁵
<u>“gap” com 2,54 cm</u>				
n-hexano	122	117,6 ± 2,6	3,0 ± 0,5	3,4 ± 0,2
tolueno	152	148,6 ± 3,5	3,1 ± 0,4	1,2 ± 0,1
Marcol 70	228	227,7 ± 1,1	5,1 ± 0,7	2,1 ± 0,3
<u>“gap” com “1,27 cm</u>				
n-hexano	72	69,9 ± 1,6	2,8 ± 0,7	3,0 ± 0,5
tolueno	96	92,7 ± 3,1	2,8 ± 0,9	1,1 ± 0,5
Marcol 70	96	96,4 ± 1,7	4,7 ± 0,3	1,8 ± 0,1
<u>“gap” com 0,64 cm</u>				
n-hexano	60	54,2 ± 5,9	1,2 ± 0,4	2,9 ± 0,3
tolueno	72	70,9 ± 1,5	3,1 ± 0,6	1,1 ± 0,1
Marcol 70	48	48,5 ± 0,8	3,3 ± 0,2	1,6 ± 0,1

(1) Tensão de crista nominal

(2) Tensão em ocorreu o “breakdown”, medidas de sete determinações consecutivas

(3) Tempo para cruzar o “gap”

Figura 9 – Efeito da concentração de DMA na velocidade do “streamer” negativo em Marcol 70 e 2,2,4 – Trimetil Pentano. (YAMASHITA, 1988)

A tabela 8 mostra o efeito da tensão aplicada sobre a proporção de crescimento do “streamer” primário. Esses dados sugerem que o crescimento dos “streamers” não está diretamente ligado à tensão aplicada ou à contaminação destes líquidos na agulha positiva.

A tensão “breakdown”, observada quando a agulha é positiva, é mais baixa do que aquela observada quando a agulha é negativa. Acredita-se assim que esse comportamento drasticamente diferente indica que um outro mecanismo esteja envolvido na proporção de crescimento e propagação do “streamer”.

A figura 10 ilustra uma comparação de “streamers” gerados em Marco 70 puro com e sem Dimetilamila. Sem impurezas, os “streamers” são formados e crescem aleatoriamente no líquido, diferentemente quando na presença de impureza, onde eles são mais finos e crescem de um modo radial e quase uniforme. Esse comportamento pode ser atribuído à alta afinidade elétron de Dimetilamila em comparação com n-hexano, com o Marco 70, e até mesmo com o tolueno.

A injeção de portadores de carga no cátodo plano nunca foi evidenciada, mas admite-se que este processo ocorra continuamente.

Pelo visto, a presença de impurezas provoca alterações no crescimento dos “streamers”, pois o que elas fazem é fornecer mais portadores de carga e consequentemente, mais canais são formados, assim aumenta os streamers.

Pode-se associar uma conclusão, com o conceito de que os elétrons são injetados no líquido, quando a agulha é negativa e eventualmente eles termalizam-se e adicionam-se ao líquido. Isto pode explicar o valor de “breakdown” mais alto, quando a agulha é cátodo.

Tabela 8

Efeito da aplicação de tensão e impurezas na velocidade de crescimento do streamer positivo. (agulha ânodo, "gap" com 2,54 cm, pulso trapezoidal) (HEBNER, 1985)

Velocidade de crescimento em cm/s x 10 ⁺⁵			
V _{crista}	n-hexano	Tolueno	Marcol 70
108	3,6 ± 0,4		
120	3,4 ± 0,2		
144		1 ± 0,1	
168		1,2 ± 0,1*	1,8 ± 0,2
192		1,3 ± 0,2	1,9 ± 0,1
216		1,1 ± 0,3	2,4 ± 0,3
0,1 M DMA			
122	2,5 ± 0,1		
148	3,1 ± 0,2*		
192		1,6 ± 0,3*	2 ± 0,1
216			2,6 ± 0,4
240			2,7 ± 0,4
264			2,7 ± 0,4
276			2,8 ± 0,2*
0,2 M DMA			
148	3,1 ± 0,2		
174	3,2 ± 0,1*		
192		1,9 ± 0,3*	
240			2,3 ± 0,2
264			2,4 ± 0,2*

* Primeira tensão em que se observou o breakdown.

Figura 10 - Comparação do crescimento do “streamer” primário em Marcol 70 puro e contaminado por DMA (agulha ânodo, 1,27 cm “gap”, 2×10^6 estruturas/s, pulso trapezoidal) (FORSTER, 1985)

Experimentos realizados por outros pesquisadores quanto a forma e velocidade dos “streamers”, sobre o efeito das impurezas e o efeito de variações de tensões, parecem exibir uma concordância entre si, mas o processo ainda é muito complexo. Com o desenvolvimento de novas teorias, tais como as descritas a seguir, para o caso de gaps maiores, os dados já obtidos podem ser melhor explicados.

3.3.3 - O EFEITO DA PRESSÃO EM LÍQUIDOS ISOLANTES

Os registros de que uma bolha, formada numa região de baixa densidade (que é um resultado de vaporização líquida perto do eletrodo) foi criada quando neste foi aplicado laser Nd:YAG, por ALTAFIM 1995[13], levantaram dúvidas quanto ao seu aparecimento e à sua velocidade de crescimento. Por isso, técnicas eletro-ópticas de alta velocidade foram utilizadas por FORSTER, McKENNY e FITZPATRICK, 1990 [21], para estudar o comportamento pré-“breakdown” em n-hexano (97 % puro) e tolueno puro 99 mol%, com estruturas moleculares muito diferentes uma da outra, em pressões entre 0,1 a 5 MPa. KELLY e HEBNER 1985[22] também estudaram o comportamento do n-hexano para pressões entre 0,1 a 10 MPa.

O objetivo era mostrar os efeitos da pressão sobre o início de ‘streamers’ e sua propagação em hidrocarbonos líquidos. A célula teste empregada por McKENNY, 1990 [21], apesar de ser idêntica às outras já utilizadas em ensaios, foi modificada apenas para suportar operações de pressões até 10 MPa. Utilizou-se uma escala com precisão de + 0,01 MPa, para medir a pressão da célula que foi pressurizada hidráulicamente. Sendo que o fluido, por ser utilizado da mesma forma como foram recebidos, circulava através de sistema de filtro após a remoção da pressão, para remover partículas maiores que 1 μm .

As regiões de baixa densidade denominadas “streamers” Foram inibidas sobre pressão, pois se a injeção de carga faz com que o líquido vaporize, então o aumento da pressão externa impede a ocorrência deste processo, aumentando assim a tensão na qual ocorre o “breakdown”.

O processo de crescimento de “streamers” é controlado pela carga injetada e por uma expansão da região termal, efeito este proporcional a estruturas moleculares, conforme visto anteriormente.

Essas evidências indicam que idéias anteriores sobre desenvolvimento de bolhas eram razoáveis, apesar dessas técnicas evidenciarem o crescimento de “streamers”, após a remoção da tensão aplicada.

Segundo os testes realizados, quando os “streamers” desapareciam, cortava-se a tensão, mas novos “streamers” tornavam a aparecer. Desse modo, pode-se concluir que as cargas permaneciam no líquido sob pressão e retornavam para o eletrodo, ocasionando o aparecimento de outros “streamers”. Esse segundo “streamer” se assemelha ao que foi registrado durante a formação do “streamer” positivo.

As regiões de vaporização são denominadas como “streamers” ou árvores, que conduzem ao “streamer” secundário, de crescimento rápido, que envolvem a ionização aumentada de campo de dielétrico.

O aparato óptico, que permitiu que os processos de pré-“breakdown” fossem registrados em tempos que variaram de 50 μ s a vários μ s, e a célula teste utilizada são mostrados na figura 11. O sistema eletrodo era constituído por uma agulha de aço afiada e um eletrodo hemisférico de aço inoxidável.

Neste tipo de aparelho ótico até doze estruturas puderam ser registradas para disparo da câmara, sendo que o tempo entre exposições variou de 10 a 500 ns.

O pulso produção dos sinais foi sobrepostos e exibidos em um osciloscópio com a forma de onda da tensão aplicada.

Foram utilizadas duas formas de pulso: um pulso produzido por um gerador do tipo Marx e o outro por combinação de rede transformador indutor, que tinha uma forma trapezoidal e atingia sua tensão de pico em aproximadamente 4 μ s. O pico durava aproximadamente 3 μ s e a tensão subsequente decaía para zero dentro de 4 μ s.

O tempo de elevação do pulso podia ser ajustado de 10 ns para 1 μ s e a forma da onda cortada em um momento pré-selecionado após atingir o seu pico. A tensão aplicada era portanto retangular.

Figura 11 - Equipamento de eletro-óptica e célula teste (FITZPATRICK,1989)

O registros dos traços no osciloscópio foram usados para estabelecer um relacionamento temporal entre a tensão aplicada e o pulso da estrutura da câmara, e, fazendo a comparação destes registros com as fotografias obtidas a partir da câmara de conversão de imagens, foi possível determinar o desenvolvimento dos “streamers” como função da tensão aplicada.

Estes estudos também foram dirigidos para compreender os efeitos da polaridade sobre o início de “streamer” sobre pressão.

3.3.3.1 – AGULHA CATODO

A velocidade de crescimento dos “streamers” e as tensões de “breakdown” são mostradas nas tabelas 9 e 10. Sendo que as tensões de “breakdown” são valores de pico e não necessariamente ligadas à tensão na qual ocorreu o “breakdown”. Pois o “breakdown” ocorreu no pico e na cauda do pulso trapezoidal.

Tabela 9

*Efeito da pressão em “breakdown” elétrico em líquidos hidrocarbonos,
“gap” $0,25 \pm 0,02$ cm, pulso trapezoidal ($4 \times 3 \times 4 \mu\text{s}$). (FITZPATRICK,1989)*

Agulha Catodo

Pressão MPa	Tensão de crista, kV 100% breakdown Hexano	Tensão de crista, kV 100% breakdown Tolueno	Velocidade média streamers km/s hexano	Velocidade média streamers km/s tolueno
0,1	65	69	$0,25 \pm 0,05$	$0,8 \pm 0,1$
0,5	65	81	$1,1 \pm 0,4$	$1,6 \pm 0,1$
1,0	71	95	$1,3 \pm 0,3$	$2,4 \pm 1,6$
2,0	95	123	$2,0 \pm 0,8$	$1,4 \pm 0,8$
5,0	156	194	$2,5 \pm 1,6$	$4,5 \pm 0,7$

Tabela 10

*Efeito da pressão em “breakdown” elétrico em n-hexano,
“gap” $0,25 \pm 0,02$ cm, pulso trapezoidal ($4 \times 3 \times 4 \mu\text{s}$). (KELLY,1985)*

Agulha Catodo

Pressão MPa	Tensão de crista, kV 100% breakdown hexano	Velocidade média streamers km/s hexano
0,1	65	$0,25 \pm 0,05$
0,6	65	$1,1 \pm 0,4$
1,25	78	$1,5 \pm 0,3$
2,5	104	$2,9 \pm 1,1$
5,0	156	$2,5 \pm 1,6$
10,0	219	> 7

Em ambos fluidos, observou-se os desenvolvimentos dos “streamers” em diferentes pressões, mostradas na figura 12 (n-hexano) e figura 13 (tolueno), onde superiores a 0,8 MPa, causaram uma mudança o desenvolvimento do “streamer”.

Pode-se observar que na figura 12a, o crescimento do “streamers” é mais regular no começo, e esta regularidade é chamada de “streamer” primário, no qual o “breakdown” pode não ocorrer. Em pressões maiores o crescimento do streamer foi rápido que não pode ser determinado confiavelmente com o equipamento disponível.

Tabela 11

Efeito da pressão em breakdown elétrico em líquidos hidrocarbonos, “gap” $0,25 \pm 0,02$ cm, pulso trapezoidal ($4 \times 3 \times 4 \mu s$). (FITZPATRICK,1989)

Agulha Ânodo

Pressão Mpa	Tensão de crista, kV Hexano	Tensão de crista, kV Tolueno	Velocidade média de streamers km/s hexano	Velocidade média de streamers kV tolueno
0,1	52	81	$10 \pm 3,0$	$3,8 \pm 2,3$
0,5	78	93	> 16	$10,5 \pm 7,2$
1,0	84	121	> 18	> 25
2,0	93	147	> 18	> 25
5,0	117	200	> 18	> 25

Tabela 12

*Efeito da pressão em “breakdown” elétrico em n-hexano,
“gap” $0,35 \pm 0,03$ cm, pulso trapezoidal ($4 \times 3 \times 4 \mu\text{s}$). (KELLY, 1985)*

Agulha Ânodo

Pressão Mpa	Tensão de crista, kV 100% breakdown hexano	Velocidade média streamers km/s hexano
0,1	52	105 ± 3
0,6	78	> 16
1,5	91	> 18
2,5	104	> 18
5,0	117	> 18
7,5	169	> 19
10,0	182	> 20

3.3.3.2 - Agulha Ânodo

Os mesmos testes foram feitos para o ânodo e os resultados obtidos estão resumidos nas tabelas 11 e 12. E os desenvolvimentos de “streamer” positivo em n-hexano sob pressão são ilustrados nas figuras 14 e 15. A diferença em relação à agulha catoda, foi que, em pressões maiores do que 0,5 MPa, o crescimento do streamer foi tão rápido que não pode ser determinada confiavelmente com o equipamento disponível.

Figura 12 - Efeito da pressão em *n*-hexano, agulha catodo.(KELLY, 1985)

Figura 13 - (a) Imagem convertida da câmara de três desenvolvimento em tolueno. "Gap" 0,24 cm, 500 ns entre figuras, pulso trapezoidal, tensão de crista de 65 kV, pressão 0,1 MPa. (b) Tensão de crista de 90 kV e pressão 0,8 MPa. (c) Tensão de crista de 90 kV e pressão 1,0 MPa. (d) Tensão de crista de 104 kV e pressão 1,5 MPa. (FITZPATRICK, 1989)

Pode-se observar, conforme as tabelas 9, 10, 11 e 12, que a tensão de crista para o tolueno é maior na agulha ânodo do que para a agulha catodo, o mesmo não acontece para o n-hexano.

Na agulha ânodo, o “streamer” considerado primário cresce de forma uniforme, com velocidades de 1 km/s, mas não possui uma estrutura densa em forma de galhos, como no “streamer” da agulha catodo ou “streamer” negativo. No “streamer” considerado secundário, a velocidade do crescimento é similar a ambas polaridades do eletrodo, e puderam ser observados “streamers” terciários, com velocidade superior a 100 km/s, segundo SIMPSON, 1998 [20]. Nos resultados obtidos, a tensão de “breakdown” com pressão está de acordo com resultados publicados anteriormente.

Figura 14

Imagem convertida da câmara em “breakdown” elétrico em n-hexano.

“Gap” de 0,22 cm, 50 ns entre setruturas, pulso trapezoidal, tensão de crista de 78 kV, pressão 0,625 MPa. (FITZPATRICK, 1989)

Figura 15 - - Efeito da pressão em *n*-hexano, agulha ânodo. (KELLY, 1985)

Uma observação interessante, feita por FITZPATRICK, 1989 [19] é o que ocorreu durante as operações em pressões elevadas e tensões abaixo do “breakdown”: no início da injeção de carga, desenvolveram-se os “streamers” que logo após desapareceriam em n-hexano; em alguns casos, outras estruturas de “streamers” iriam aparecer e conduzir o “breakdown”.

Pesquisas sobre a forma de pulso também foram realizadas, e, conseqüentemente, um pulso retangular de tensão foi utilizado em agulha catodo, sob condições atmosféricas.

FITZPATRICK, 1989 [19] observou que mesmo com o corte do pulso da tensão aplicada, o “streamer” continuou crescendo gradativamente em forma de árvore.

Os resultados encontrados acerca do aumento do valor da tensão de “breakdown”, estão de acordo com aqueles obtidos por pesquisas anteriores, como elaboradas por WONG, 1982 [23] o qual constatou que com o aumento da força hidrostática, a força de “breakdown” geralmente aumenta, como mostra a figura [16]. Contudo o efeito desta estrutura do “streamers” no catodo, sugere que o aumento desta esteja ligado ao processo de vaporização do líquido (região de baixa densidade)[13].

Outro aspecto relevante dos “streamers”, que aparecem após o decréscimo de tensão, em pressões elevadas, merece atenção e para obtenção de dados mais precisos, serão necessários equipamentos mais eficientes e rápidos, já que a única explicação para este fato, é que esta carga fica no líquido e retorna para sua posição inicial após a queda de tensão.

O pulso retangular de tensão não é critico para o desenvolvimento do “streamer”, pois ele continuou crescendo, mesmo depois que a tensão foi cortada. Isto pode ter sido causado pela energia termal, discutida no início deste capítulo.

Figura 16 –*Influência da pressão hidrostática na agulha catodo em ciclohexano. Tensão 28 kV, “gap” de 1 mm, raio de ponta 5 μm , tempo de intervalo de figura de 7 μs . (WONG , 1982)*

É evidente o fato de que, em pressões elevadas, o valor da tensão de “breakdown” aumenta, e este efeito poderia ser usado em equipamentos elétricos, aumentando a sua vida útil, pois descargas parciais causam deterioração prematura do meio dielétrico.

3.3.4 – APLICAÇÃO DE TENSÃO AC EM LÍQUIDOS ISOLANTES EM “GAPS” LONGOS

Em estudo sobre a propagação de “streamers” e a tensão “breakdown” pesquisadores mencionam apenas “gaps” com distâncias pequenas, sendo que, na prática, esses “gaps” são bem maiores. Aqui encontra-se apresentado um estudo da isolação do óleo mineral em “gaps” longos ($\leq 80\text{ cm}$), conforme realizado

por LESAINT, A SAKER, P. GOURNAY E R. TOBAZÉON, 1998 [24]; RAIN e BOISON[25] e MASSALA[26]

O sistema utilizado foi de eletrodos haste-plano e esfera-plano, com dois tipos de células teste, com o óleo em contato com partículas como celulose, carbono e cobre. Dados de que explosões compostas por “streamers” iniciadas a cada meio ciclo, em princípio no eletrodo positivo, levam a valores de tensões de “breakdown” mais baixos registrados sob ac.

A tensão média do “breakdown” em óleo mineral diminuía conforme a distância (d) do “gap” ($E_b = V_b/d$). Velocidades de propagação em “gaps” ≤ 35 cm e diferentes células testes registraram uma variação de 2 a mais do que 100 km/s.

No teste realizado com “gaps” esfera-plano, TOBAZÉON, 1998[24] utilizou duas configurações básicas: a primeira com uma distância de “gap” $d = 30$ cm, tensão $V = 325$ V, diâmetro da esfera de 14 cm e fator de aumento de campo de 3,7; a segunda com “gap” maior de $d = 60$ cm, $V = 625$ V, diâmetro da esfera de 28 cm e fator de aumento de campo de 3,3. Um fio fino de tungstênio foi ligado à esfera para iniciar “streamers” no nível desejado de tensão.

Para se obter um conteúdo de partículas estável e homogêneo, o óleo foi periodicamente filtrado, seco e desgaseificado e, para impedir a sedimentação de partículas, tais como celulose e carbono, um impulsor de movimento foi colocado na parte inferior das células. Não se utilizou o cobre, por possuir uma densidade maior, somente sendo retirado mediante filtragem do óleo.

3.3.4.1 – INÍCIO DO “STREAMER”

RAIN, 1991[25] e seus colaboradores caracterizaram o crescimento dos “streamers” positivo e negativo, em “gap” de 8 cm em geometria ponto plano no

qual alguns “streamers” negativos eram por vezes observados, mas sua propagação é mais limitada que a do positivo, conforme figura [16].

Figura 17 – Características de “streamers” positivo e negativo. Geometria ponta/plano. “gap” de 8 cm. Raio de ponta 40 μm . Diâmetro do plano 5 cm. (RAIN, 1991)

Dois modos principais de “breakdown” foram observados de acordo com a tensão o de explosões e o direto.

3.3.4.2 – MECANISMO ENVOLVIDOS EM EXPLOSÕES

O “breakdown” ocorrido em campos mais baixos, deve-se ao fato de vários “streamers” aparecerem a cada meio ciclo, causando as chamadas explosões. O aparecimento do primeiro “streamer” produz abertura do caminho para o segundo e assim sucessivamente até causar o “breakdown”. Este fenômeno é observado em óleo, onde as cargas nele depositadas, causam o aparecimento do primeiro “streamer” que pode persistir até o meio ciclo, acarretando uma sucessão sistemática de “streamers” durante as explosões.

O mecanismo de “breakdown” altera do tipo explosão para o tipo direto quando a extensão do fio l é decrescida, conforme mostra a figura 17, onde V_1 é o valor da tensão quando aparece o primeiro “streamer” em um minuto e V_b , a tensão na qual ocorre o “breakdown”.

Figura 18 -Tensão de “breakdown” V_b e V_1 pelo tamanho do fio l (LESAINT, 1998)
(14 cm esfera-plano, $d = 30$ cm, $a = 1$ mm, 10 kV/2min., condições fixas de óleo)

Uma outra possível explicação para este mecanismo, segundo SAKER, 1998[24], é que explosões em campos mais baixos originam-se em decorrência da duração, até próximo ao meio ciclo, da baixa densidade ou evaporação do líquido, ocasionando uma trilha preferencial, onde o próximo “streamer” poderá propagar-se [14].

Uma tendência similar é observada na figura 18 na geometria haste-plano, quando a condição do óleo é alterado aumentando-se a concentração de partículas e água, diminuindo a tensão V_1 .

Figura 19 - Tensão de breakdown V_b e V_1 pela freqüência na tensão de “breakdown” na geometria haste-plano ($r = 4\text{mm}$, $d = 35\text{mm}$, $10\text{kV}/2\text{min}$, várias condições do óleo). (SAKER, 1998)

Um dado interessante observado é que a tensão de “breakdown” obtida para $d = 60$ cm é aproximadamente 25 % menor do que aquela medida para $d = 30$ cm. Isto por que a degradação relativa do óleo aumenta conforme a distância do “gap” também aumenta.

Desses estudos, também foi possível deduzir campos elétricos de “breakdown”, medidos com uma frequência de 1000 “streamers”/minuto. Os valores encontrados foram 10,5 kV em $d = 30$ cm, 7,5 kV/cm em $d = 60$ cm e 7,2 kV em $d = 80$ cm. Isto revela que a influência do mecanismo “breakdown” de explosão aumenta significativamente com a distância.

3.3.4.3 – PROPAGAÇÃO DOS “STREAMERS” POSITIVOS DIRETOS

A figura 19 mostra uma fotografia típica de um “streamer” positivo direto, em uma geometria haste-plano, sendo todos os experimentos realizados com distâncias de $d \leq 80$ cm e tensão ≤ 900 V.

Em alguns casos, “streamers” positivos diretos foram vistos propagando-se até o plano sem induzir o “breakdown”.

Figura 20 - Imagem do “streamer” positivo (x : $20 \mu\text{s}/\text{cm}$, y : $8 \text{ cm}/\text{cm}$) e sinais correspondentes ($20 \mu\text{s}/\text{div}$, $V_i = 380 \text{ kV}$, geometria haste-plano, $r = 1 \text{ cm}$, $d = 60 \text{ cm}$).
(LESAINT, 1998)

Experimentos com partículas de celulose foram realizadas por LESAIN, 1998 [20], mas não foi encontrada nenhuma diferença significativa entre medidas realizadas em óleo limpo e com o óleo contaminado. Isso indica que a propagação dos “streamers” direto não é influenciada por tais impurezas.

Um outro estudo realizado por MASSALA, 1998[26] com superfície prensadas em “gaps” longos, não variou a tensão de “breakdown”, conforme figura [20]. Isto demonstra que a superfície não altera significativamente a propagação do mecanismo.

Figura 21 - Comparação de probabilidade de "breakdown" com superfície prensadas, $d = 10$ cm. (MASSALA, 1998)

3.3.4.4 – PROPAGAÇÃO DOS "STREAMERS" NEGATIVOS DIRETOS

Segundo TOBAZÉON, 1998 [24], de uma certa maneira "streamers" negativos diretos comportam-se de modo diferente em relação aos positivos.

Os "streamers" positivos comportaram-se de maneira similar aos "streamers" positivos diretos, onde nenhuma influência significativa foi obtida nos experimentos feitos com partículas (carbono, celulose e cobre).

Contudo, uma mudança de geometria do eletrodo é altamente afetada no "streamer" negativo, já no positivo, não. Tal fato vem reforçar a conclusão que o "breakdown" direto em "gaps" elevados é determinado por "streamers" positivos.

3.3.4.5 - “STREAMERS” POSITIVOS E NEGATIVOS COM EXPLOSÕES

A criação de um caminho preferencial por bolhas ou propagação de “streamer” em óleo, facilita o desenvolvimento do “streamer” sucessivo. Este processo caracteriza uma explosão

O último “streamer” dessa explosão, ao atingir o eletrodo receptor, causa o “breakdown”.

A trajetória do último “streamer” de uma explosão é nitidamente diferenciada do streamer direto (figura 19). Esta observação, permitiu aos pesquisadores [24][25][26] concluir que os “breakdown” causados pelos últimos “streamers” de uma explosão são aproximadamente cinco vezes mais velozes que os “breakdown” originados de “streamers” diretos.

Estudos sobre processos de “breakdown” sob tensões ac em grandes gaps não havia sido descrito anteriormente, e permitiu observar e caracterizar dois modos diferentes de “breakdown”, direto e o de explosão de “streamers”.

O “breakdown” direto para o “streamers” positivos não foi alterado na presença de partículas ou pela geometria do eletrodo, por comportar-se como uma extensão muito condutiva do eletrodo e ser comparável àquele descrito em distâncias mais baixas.

Já no “streamer” negativo direto, o formato do eletrodo alterou os tamanhos dos “streamers” e conseqüentemente o valor do “breakdown”. E estes fatos reforçam a conclusão de os “streamers” positivos determinam o “breakdown” em “gaps” grandes.

O mecanismo de explosão diminui a atuação do óleo sob tensões em gaps grandes, levando a campos muito baixos de “breakdown” ($\leq 10 \text{ kV/cm}$). Isto também explica o fato de “breakdown” em tensões ac em gaps haste-plano grandes ocorrem em tensões mais baixas do que aquelas medidas sob as mesmas condições com impulsos de transferência, resultantes da propagação de “streamers” diretos.

3.3.5 – COMENTÁRIOS GERAIS

O processo de “breakdown” em dielétricos líquidos é agora explicado como sendo causados por “streamers” propagantes, que nada mais são que canais de gás ou plasma, originados da evaporação do líquido. A observação mais importante feita por pesquisadores, os quais a princípio acreditavam que os “streamers” negativos eram os principais causadores do “breakdown”, foi a de que o efeito “bolha” nos “streamers” positivos era maior do que nos “streamers” negativos, mesmo em tensões mais elevadas das que proporcionaram as “bolhas”. Para as duas polaridades, quando a tensão é aumentada, resulta em uma aceleração dos “streamers” e em transições para um mecanismo mais rápido.

Figura 22 - Comprimento de propagação do “streamer” em função da tensão de impulso aplicada com 1 μm de ponta. (LINHJELL, 1998)

A figura 21, segundo LINHJELL, 1994 [27], para um “gap” ponto-plano, mostra que para uma determinada tensão, o “streamer” filamentar negativo não se propaga tanto quanto o positivo. Isto prova que o “streamer” positivo em “gaps” maiores é também o principal causador do “breakdown”.

Segundo BILL SIMPSON, 1998 [18], os “streamers” são assim classificados: “streamers” negativos em lentos e ramificados; e “streamers” positivos em rápidos e filamentosos. Os “streamers” positivos são aproximadamente 10 vezes mais rápidos que os negativos, podendo estes causarem “streamers” terciários. Já o “streamer” negativo apenas propaga-se em “streamers” primários e secundários. Embora uma exceção, no óleo do transformador, as velocidades de “streamers” positivos e negativos apresentam a mesma variação.

Um outro detalhe importante é que se o “streamer” for altamente condutivo, o potencial do eletrodo será movido para as pontas do mesmo, não importando a sua polaridade. Conforme analisado por TOBAZÉM, 1986 [24], o campo à frente de um “streamer” será reduzido gradualmente conforme ele se propaga, devido ao aumento da superfície do “streamer”, até atingir $1/2$ e $2/3$ do “gap” do eletrodo. Logo após, o campo irá aumentar novamente devido à proximidade da região do “streamer” com o eletrodo receptor. Imagina-se que o “streamer” tem uma densidade de carga maior na cabeça, o que ajudaria a aproximação do mesmo ao eletrodo receptor.

Outro parâmetro é que a estrutura molecular tem efeito significativo sobre a propagação dos “streamers”, devido à afinidade eletrônica das moléculas nos líquidos. Os “streamers” são também caracterizados por diferentes estruturas. Experimentos realizados, mostram quanto mais energético for o “streamer”, mais elevada será a velocidade do mesmo.

3.3.6 – CONCLUSÕES

De uma maneira geral, as características das estruturas dos “streamers” dependem de vários parâmetros, entre eles, a tensão aplicada, a temperatura do líquido, propriedades físicas, químicas e elétricas, estrutura molecular, impurezas aleatórias, formatos dos eletrodos, tipo e comprimento do material e pressão hidrostática entre outros.

As pesquisas devem ser orientadas no sentido de mostrar que a propagação dos “streamers” nos líquidos isolantes é governada por dois tipos de mecanismos: eletrônico e o gasoso. O mecanismo eletrônico tem origem na concentração de portadores eletrônicos ou aditivos com baixo potencial de ionização, e são formadores das estruturas dos “streamers” e de suas respectivas velocidades. O segundo é causado pela evaporação do líquido na superfície do eletrodo e pode ser minimizado pelo aumento da pressão hidrostática.

Contudo, todos estes resultados e conclusões ainda são primários e o assunto ainda deve continuar sendo estudado já que a real natureza de comportamento das cargas em meio a um líquido isolante, ainda esta por ser caracterizado.

4 – NORMAS E TESTES PADRONIZADOS

Danos causados em equipamentos de alto investimento, oriundos da falha do óleo isolante, fizeram surgir normalizações e padronizações específicas para analisar a isolação e a condução de líquidos isolantes.

Os estudos da condução elétrica nos líquidos isolantes é de suma importância para o desenvolvimento destas normas padronizadas. As características das estruturas dos “streamers”, que estão diretamente ligadas ao processo de condução nos líquidos, dependem de muitos parâmetros, tais como impurezas, tipo de material, temperatura, tensão aplicada, estrutura molecular, as quais podem ser modificadas com a própria impureza, entre outros.

As partículas, ou impurezas sólidas, líquidas ou gasosas, ficam imersas no líquido, e diminuem o valor da rigidez dielétrica causando a tensão de “breakdown”. A propagação dos “streamers” nos líquidos isolantes (visto no terceiro capítulo), está diretamente ligada ao processo de “breakdown”. Os aparatos utilizados para este teste, mostram que as impurezas estimulam o crescimento dos “streamers” primários e secundários, conduzindo ao processo de descargas elétricas.

Valores elevados dessas impurezas podem causar prejuízos às características isolantes do líquido, porém, ainda não existem valores definidos para serem tomados como limites. Testes para eliminar estas impurezas nos líquidos são utilizados há vários anos para controle de contaminação e envelhecimento em líquidos isolantes. Para equipamentos novos, os resultados destes ensaios são um dos indicativos do nível de contaminação do líquido por impurezas oriundas do processo de fabricação e/ou do meio externo. Neste caso uma quantidade total de partículas, em especial para transformadores que é à 1500/10ml no líquido, é considerado normal. Níveis mais elevados podem causar

decréscimo da rigidez dielétrica, devido à atuação dessas partículas no isolante líquido.

Para isolante líquido em uso, o resultado do ensaio é um indicativo do nível de degradação do líquido, mostrando a presença de borra insolúvel e/ou degradação do isolante celulósico.

Alguns autores citam que óleos de transformadores com níveis de partículas acima de 5000/10ml são considerados contaminados e podem causar um descarga (“breakdown”) entre dois condutores com potenciais elétricos diferentes.

Testes de rigidez dielétrica realizados com diversas tipos de eletrodos apresentam diferentes resultados. Estudos dos processos de “pré-breakdown” estão sendo decisivos para comprovar estes dados conflitantes, para diferentes formatos de eletrodos. Embora os formatos dos eletrodos continuem a ser usados aleatoriamente, a distância entre eletrodos já foi normalizada (2,5 mm). Desta forma, observa-se que a construção de células padrão para testes de líquidos isolantes, tanto em companhias de energia elétrica como nas pesquisas é importante para que não haja interferência nos resultados.

Os diferentes tipos de ondas impulsivas utilizadas nos estudos de “pré-breakdown” alteram também os resultados. Isto não constitui realmente de um problema, uma vez que os testes padronizados empregam normalmente um mesmo tipo de onda impulsiva.

Tomando os devidos cuidados, os testes padronizados, podem ser bastantes eficazes. Cuidado especial também deve ser tomado com a movimentação do líquido, que pode modificar drasticamente as tensões de “breakdown” obtidas. Como visto, os líquidos isolantes movimentados podem ter sua condução acrescidas de 30% do valor normal (figura 4).

Outra conclusão importante obtida dos estudos dos processos de “pré-breakdown” é que, devido à temperatura em que são efetuados os testes padronizados, os valores de mobilidade das cargas mudam e conseqüentemente o valor da viscosidade também. Sendo esta a característica de óleos isolantes para

dissipar calor, vale frisar que a variação da viscosidade não altera diretamente o valor da tensão de “breakdown”, mas provoca uma mobilidade irregular dos íons.

A análise do efeito da estrutura molecular para líquidos já conhecidos parece não ter grande importância, mas a presença de impurezas pode modificar estas estruturas e os dados dos testes padronizados. O ideal seria analisar as estruturas moleculares na presença das impurezas mais comuns.

Algumas células testes utilizam um tipo de hélice para movimentar o líquido para que este permaneça o mais homogêneo possível. Este efeito pode causar erros nos resultados, pois como foi visto a movimentação do líquido aumenta a mobilidade das cargas, alterando os dados e diminuindo o valor de tensão “breakdown”, o ideal seria movimentar o líquido periodicamente para que as impurezas contidas não se agrupassem. Uma sugestão seria fazer esta movimentação, e os testes serem realizados quando o líquido já estivesse em repouso novamente.

Todos estes dados são importantes para a boa operação dos equipamentos elétricos submetidos a uma isolação líquida, mas equipamentos também podem ser construídos sob medida para se adaptarem aos isolantes. Um exemplo desses equipamentos adaptados para operar sob pressão são os disjuntores de pequeno volume de óleo, pois como foi visto no item 3.3.2 o líquido isolante sob pressão apresenta um valor da rigidez dielétrica maior e, conseqüentemente, maior valor da tensão de “breakdown”.

O efeito de bolhas (vaporização do líquido) ou gases contidos no líquido, altera o resultado dos ensaios de rigidez dielétrica para eletrodos instalados verticalmente. Isto porque, as bolhas posicionam-se na superfície inferior do eletrodo, diminuindo o valor da rigidez dielétrica e conseqüentemente o valor do “breakdown”. As normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) não se manifesta sob a posição dos eletrodos para isolantes líquidos, o que pode ser um grave erro. Os experimentos mostrados neste trabalho, onde o líquido isolante é submetido a teste sob pressão com eletrodos verticais, só são

válidos porque o eletrodo superior, que poderia aprisionar as bolhas, tem a forma de ponta fina (agulha).

De qualquer forma, manter uma padronização rigorosa dos ensaios não é uma tarefa fácil, pois a própria célula teste, bem como todos os outros equipamentos estão sujeitos a contaminações (sólida, líquida ou gasosa). Uma solução mediadora é manter filtros para a purificação do líquido em ação permanente.

Observa-se que estas pesquisas, longe de estarem concluídas, continuam na tentativa de elucidarem qual a melhor forma de isolar dois condutores com potenciais diferentes.

Nos itens subseqüentes, será efetuada uma análise crítica das normas empregadas pelas companhias de energia elétrica, procurando associá-las com pesquisas sobre mobilidade e estudos de “pré-breakdown” e também justificar sua importância na determinação das reais condições de operação dos líquidos isolantes.

4.1) ENSAIOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ELÉTRICOS REALIZADOS COM LÍQUIDOS ISOLANTES POR COMPANHIAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Os usuários, distribuidores geradores de energia, fabricantes de transformadores e de outros equipamentos elétricos, comumente adotam um conjunto de especificações que satisfaçam suas necessidades quanto a isolamento líquida de um dado equipamento.

Para a verificação das características, são geralmente empregados os métodos preconizados por uma das seguintes entidades:

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT
- American Society for Testing Materials - ASTM
- International Electrotechnical Commission - IEC

- Grupo Coordenador de Operação Interligada - GCOI
- Métodos Brasileiros - MB (da ABNT)

Os ensaios físicos e químicos são interessantes para avaliar o comportamento de isolantes líquidos.

Os ensaios elétricos, como já foi mencionado, analisam o comportamento do isolante líquido na presença de várias impurezas e condições pre-estabelecidas, sendo que o ensaio da rigidez dielétrica está diretamente ligado ao processo de descarga ou “breakdown”.

Cada um destes testes tem um significado especial, conforme indicado a seguir:

4.1.1. PROPRIEDADES QUÍMICAS

a) Índice de Neutralização

Método: ASTM - D 664, D 974

Método: MB - 494, 101

O índice de neutralização de um líquido é uma medida dos constituintes ou contaminantes ácidos no líquido. Este valor aumenta como resultado da oxidação, e é utilizado como um guia geral para determinar quando um líquido deve ser substituído ou regenerado, desde que limites de rejeição convenientes tenham sido atingidos.

Segundo TÚLIO, MASSINHAN e GRANATO 1995, [28] , o índice de neutralização é expresso em mg KOH/g líquido, ou seja é a medida da quantidade necessária da base (KOH), para neutralizar os constituintes ácidos presentes em 1g de líquido.

Durante a utilização do líquido no equipamento, o mesmo sofre um processo de oxidação, formando ácidos como produtos finais da degradação .

Estes compostos, a partir de uma certa concentração, são indesejáveis por reagirem com materiais da composição do equipamento, principalmente papel, diminuindo a vida útil dos mesmos. Eles também podem, ainda, polimerizar-se e formar uma borra, que ao depositar-se na parte ativa ou nos trocadores de calor, dificulta a transferência de calor para o meio ambiente. Assim, para um isolante líquido em operação, também constitui-se em uma medida indireta de seu grau de oxidação.

b) Estabilidade à Oxidação

Método: IEC - 74

Método: ASTM - D 2112 ou D 2440

A formação de borra e acidez, em decorrência da oxidação durante a armazenagem, processamento, ou de um longo período de serviço, deverá ser mínima possível. Esta característica é essencial para reduzir as correntes de fuga, a corrosão metálica e a rigidez dielétrica, para maximizar a vida útil do sistema de isolamento e para garantir boa dissipação de calor.

A quantidade formada de borra é um bom indicador das características de oxidação de um óleo isolante. Ela pode ser apresentada em uma das três formas abaixo indicadas, devendo a amostra ser aquecida e oxidada em determinadas condições:

- Porcentagem de matéria insolúvel formado num determinado período de tempo;
- Tempo necessário para formação de matéria insolúvel ou de excesso de acidez;
- Tempo necessário para o óleo reagir com um determinado volume de oxigênio.

Os testes são aplicados tanto aos isolantes líquidos novos quanto aos recuperados, entretanto o método D-2112 (bomba rotativa) é especificamente destinado aos líquidos inibidos[4].

c) Enxofre Corrosivo

Método: ASTM - D 1275

MB - 899

A ausência de enxofre livre ou de compostos instáveis de enxofre evita a corrosão de metais quando em contato com isolante líquidos.

Os testes do enxofre corrosivo possibilitam a detecção de enxofre livre e de compostos corrosivos de enxofre no líquido. Este teste consiste em colocar o líquido isolante em contato direto com lâminas de cobre em condições predeterminadas[4].

d) Presença de Água ou Teor de Água

Método: ASTM - D 1533

O teor de água, expresso em ppm, é a medida direta da quantidade de água presente no isolante líquido mineral.

A umidade sempre está presente nos líquidos isolantes, em teores que variam com sua estrutura química e com as condições de manipulação. Os fluidos polares apresentam maior afinidade com a água (exemplo: silicone) que os apolares (exemplo: isolante líquido mineral).

A umidade, mesmo em pequenas concentrações, pode prejudicar as características isolantes dos líquidos, diminuindo sua rigidez dielétrica. Atua, ainda, como agente catalisador na decomposição da celulose, diminuindo, conseqüentemente, a vida útil do equipamento elétrico.

A água pode originar-se da atmosfera ou ser produzida pela deterioração de materiais isolantes. Podendo estar presente no isolante líquido na forma livre ou dissolvida. Ela pode ser detectada por inspeção visual na forma de gotículas ou pode estar emulsionada, podendo ou não ocasionar turvação do líquido. Podendo ou não, ainda afetar as propriedades elétricas, dependendo de sua quantidade.

Para líquido isolantes novos, teores elevados de água indicam que as condições de fabricação e/ou manipulação não foram adequadas.

Para líquidos isolantes em serviço, teores elevados podem ser indicativo de problemas de vedação nos equipamentos.

Devido ao prejuízo que o teor de água elevado causa ao isolamento sólido, este teor deve ser mantido o mais baixo possível[28].

e) Cloreto e Sulfatos Inorgânicos

Método: ASTM - D 878

MB - 901

Esse teste indica a presença de cloreto e sulfatos, pela precipitação de sais insolúveis, por meio de processos analíticos comuns. A presença de cloretos e sulfatos inorgânicos indica a corrosividade do líquido e a presença de contaminantes[4].

4.1.2. PROPRIEDADES FÍSICAS

a) Ponto de Anilina

Método: ASTM - D 611

MB-299

O ponto de anilina de um isolante líquido mineral indica sua capacidade de dissolver os materiais com os quais entra em contato. Essa característica pode estar relacionada com formação de gás no líquido[4].

b) Cor e Aparência

Método: ASTM - D 1500

MB - 351

Segundo a NBR 10576[5], a cor de um isolante líquido é determinada pela luz transmitida e é expressa por um valor numérico baseado em comparação com uma série de padrões de cor. Não é uma propriedade crítica, mas é útil para avaliação comparativa. Um rápido aumento ou um valor elevado da cor é uma indicação da deterioração contaminação do líquido. Além da cor, a aparência do líquido é significativa para detectar turvação ou sedimentos que podem indicar a presença de água livre, borra insolúvel, carbono, fibras, sujeira, etc.

c) Ponto de Fulgor

Método: ASTM - D 92

MB - 50

O ponto de fulgor, expresso em $^{\circ}\text{C}$, é uma medida indireta da quantidade de compostos leves presentes no líquido isolante. É a menor temperatura na qual os vapores formados na superfície do líquido se inflamam momentaneamente, quando em presença de uma pequena chama.

É importante conhecer a temperatura em que os gases inflamáveis são formados, afim de definir a temperatura máxima de operação dos equipamentos elétricos, principalmente quando estes são instalados onde o risco de incêndio e explosão devem ser minimizados. Neste caso o isolante líquido a ser utilizado

deve apresentar elevado ponto de fulgor, ou seja, devem ser utilizados os fluidos de segurança[28].

d) Tensão Interfacial

Método: ASTM - D 971

MB - 320

A tensão interfacial, expressa em dinas por centímetro (dina/cm), é a força necessária para que um anel de platina rompa a interface água-líquido, sendo uma medida indireta da concentração de compostos polares presentes no óleo.

Para isolantes líquidos ainda sem uso, valores baixos de tensão interfacial podem ser um indicativo de má qualidade do líquido ou contaminação provenientes de manuseio, armazenamento ou transporte indevido do produto.

Após contato com equipamento, um decréscimo bruto na tensão interfacial pode indicar incompatibilidade do isolante líquido mineral com alguns dos materiais de construção do equipamento, como: tintas, vernizes, resinas e borracha.

Durante a utilização do isolante líquido no equipamento, este sofre um processo de oxidação, formando compostos polares como álcoois, aldeídos, cetonas, ácidos, os quais apresentam grande interação com água (substância polar), diminuindo assim a tensão na interface água-líquido. O comportamento previsto para esta propriedade ao longo da operação dos transformadores, é uma queda um pouco mais acentuada nos primeiros anos, seguida de uma queda lenta e gradual nos anos subsequentes[4].

e) Ponto de Fluidez

Método: ASTM - D 97

MB - 102

O ponto de fluidez pode ser definido como a mais baixa temperatura no qual o isolante líquido ainda flui quando resfriado, segundo condições predeterminadas.

O ponto de fluidez não está diretamente relacionado com a contaminação ou deterioração de um isolante líquido. Sua importância maior diz respeito à utilização dos isolantes líquidos em climas frios[28].

f) Densidade

Método: ASTM - D 1298

MB - 104

A densidade de um isolante líquido é a relação dos pesos de iguais volumes do líquido e de água a uma mesma temperatura.

A densidade não é indicadora da qualidade de um isolante líquido, porém, serve para que se determine sua adequada aplicação. Em climas frios, poderá ocorrer a formação de gelo no equipamento exposto ao tempo, o qual ficará boiando na superfície de um isolante líquido de elevada densidade[4].

g) Viscosidade

Método: ASTM - D 445

MB - 293

A viscosidade cinemática, expressa em mm^2/s , mede a resistência ao escoamento de um isolante líquido, ou seja, é medida pelo tempo necessário para uma determinada quantidade de líquido fluir em condições controladas.

A viscosidade do fluido isolante deve ser tal, que permita a convecção do líquido dentro do equipamento elétrico, a fim de facilitar a troca de calor, gerado pelas perdas do equipamento, com o meio ambiente.

Seu valor numérico não é afetado significativamente pelos contaminantes do isolante líquido ou produtos de degradação, portanto não é um indicativo da qualidade do líquido, nem um parâmetro de medida de envelhecimento para isolante líquido em serviço, mas serve para identificar certos tipos de óleos isolantes usados.

Entretanto, se a viscosidade do líquido está muito alta, o líquido tende a reduzir sua circulação por convecção, afetando sua característica de resfriamento. A baixas temperaturas, uma viscosidade mais elevada influencia a velocidades das partes móveis existentes nos disjuntores, bombas e reguladores[28].

4.1.3. PROPRIEDADES ELÉTRICAS

a) Rigidez Dielétrica

Método: ASTM - D 877, D 1816

MB - 330

A rigidez dielétrica, expressa em kV/cm ou kV/m, mostra a capacidade de um isolante líquido resistir ao campo elétrico sem que ocorra a ruptura elétrica. É expressa pela máxima tensão que se pode aplicar, sem descargas de ruptura, entre eletrodos de dimensões e distância de separação especificadas, que se acham submersos no líquido.

O valor da rigidez dielétrica não é uma característica intrínseca do material, mas sim uma medida indireta das impurezas contidas no líquido (água, fibras celulósicas e partículas), e seu valor depende ainda do método de medida, isto é, forma e afastamento dos eletrodos, taxa de elevação, etc.

Para isolantes líquidos usuais novos, é um indicativo das condições de manuseio, transporte e armazenamento a que foi submetido o líquido. Pode, ainda avaliar o processo de secagem a que o líquido foi submetido.

Para isolantes líquidos em serviço, é um indicativo da presença de água e partículas sólidas, refletindo as condições de operação do equipamento. Sua verificação é muito importante para avaliar a função isolante do líquido[28].

b) Fator de Potência ou Perdas Dielétricas

Método: ASTM - D 924

As perdas dielétricas, expressas em porcentagens, são aquelas obtidas quando um líquido é submetido a um campo elétrico alternado.

O ensaio consiste em colocar em um capacitor de placas paralelas isolante líquido e aplicar uma tensão senoidal "U". Se o líquido fosse perfeito, resultaria numa corrente alternada senoidal "I" defasada de 90° da tensão "U". Porém como os isolantes líquidos não são ideais, ao aplicar no capacitor uma tensão alternada senoidal "U" resulta numa corrente alternada senoidal "I" defasada de um ângulo menor que 90° da tensão "U".

Diagrama Vetorial-Real

Onde: δ = ângulo de perdas

φ = ângulo entre o vetor “U” e o vetor “I_T”

Sob o ponto de vista elétrico, as perdas dielétricas são medidas através do $\cos \varphi$ ou da $\tan \delta$, ou seja, quanto maior esses valores, maiores serão as perdas. Do ponto de vista químico, a medida da corrente dissipada através do líquido, fornece indiretamente a porcentagem de produtos polares e polarizáveis e de partículas metálicas.

A medida das perdas dielétricas em um material isolante está relacionada com a quantidade de energia dissipada pelo material sob a forma de calor.

Para isolantes líquidos, este valor está relacionado com a qualidade do produto e, quanto mais baixo for este valor, mais ele se aproxima da condição de dielétrico ideal e, conseqüentemente, as perdas são menores.

Estando o equipamento preenchido com óleo isolante, uma elevação brusca das perdas dielétricas pode indicar problemas com materiais utilizados na construção do equipamento ou com o processo de fabricação (secagem, limpeza, etc.).

Para óleos em serviço, os valores obtidos para perdas dielétricas sofrem um acréscimo gradativo ao longo do tempo, acompanhando a deterioração do líquido e demais materiais. Valores elevados para equipamentos com muitos anos de operação, não significam, necessariamente, más condições de operação[4].

Uma interação destes testes com os processos que antecedem o “breakdown” faz-se necessário para o bom desempenho geral dos equipamentos elétricos.

Para se ter uma idéia de como são feitos os experimentos padronizados, alguns testes com óleo de mamona foram realizados e são mencionados no próximo capítulo.

5 – TESTES DE ENSAIOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ELÉTRICOS REALIZADOS COM O ÓLEO DE MAMONA

5.1 - INTRODUÇÃO

Objetivando mostrar como as pesquisas sobre novos isolantes devem ser conduzidas, escolheu-se o óleo de mamona para ilustrá-las. A escolha desse óleo tem sua lógica, porque é um óleo cuja tecnologia de obtenção é dominada no Brasil [29] e ainda possui características isolantes não especificadas.

Para uma análise mais completa também encontra-se mencionadas neste trabalho as características, a estrutura molecular e todo o processo de obtenção do óleo de mamona.

5.2 – CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO DE MAMONA

O óleo de mamona é uma das poucas fontes naturais que se aproxima de um composto puro. Contem cerca de 90% de ácido ricinoleico, um ácido de 18 carbonos, tendo uma ligação dupla entre os carbonos 9 e 10 e uma hidroxila no carbono 12. Sua composição média é mostrada na tabela 13.[29]

Tabela 13 - Composição média do óleo de mamona.

Componente	Porcentagem (%)
Ácido ricinoleico	89,5
Ácido palmítico	1,0
Ácido linoleico	4,2
Ácido linolênico	0,3
Ácido dihidroxiesteárico	0,7
Ácido esteárico	1,0
Ácido oleico	3,0
Ácido eicosanóico	0,3

A presença predominante de um ácido graxo de características pouco freqüentes nos óleos naturais, dá ao óleo de mamona o seu valor comercial em virtude das possibilidades que ele apresenta como material de partida para a obtenção de um grande número de derivados químicos de utilização extraordinariamente diversificada.

5.2.1) ESTRUTURA MOLECULAR

O óleo é um triglicéride do ácido ricinoleico e sua estrutura pode ser representada por:

A presença do ácido ricinoleico confere ao óleo propriedades únicas e versatilidade incomum, que surge devido aos grupos OH, a ligação dupla e a ligação éster - que são sítios distintos de reação para preparação de vários derivados industriais.

A longa cadeia de ácido graxo do óleo de mamona confere características não polares às poliuretanas, que se refletem em algumas propriedades do polímero, particularmente sua boa resistência a água e flexibilidade.[29]

5.2.2 - OBTENÇÃO DO ÓLEO DE MAMONA

O processo de obtenção do óleo de mamona é feito de diversos tipos através de prensagem de bagas de mamona submetidas à condicionamento prévio. Obtém-se o óleo bruto e torta residual, purificando-os por hidratação e clarificação para a remoção de gomas e substâncias corantes.

Modificações do óleo de mamona e do ácido ricinoleico, por meio de esterificação, resultam em produtos que tem considerável interesse, tais como:

- a) espumas - é a área de maior aplicação, existindo políois para preparar espumas rígidas, semi-rígidas e flexíveis.
- b) revestimentos e tintas - para aplicações onde se requer boa resistência à abrasão.
- c) elastômeros - área mais promissora, incluindo desde adesivos selantes, até tiras elásticas e composto encapsulantes (colocação em capsulas).
- d) polímeros interpenetrados - área em desenvolvimento, com PVC e hidrocarboneto gasoso usado para a fabricação da borracha sintética.

Há um grande número de compostos e o interesse comercial do óleo de mamona é facilmente entendido, pois dependendo do material de partida empregado, os produtos da reação podem ter propriedades altamente diferentes, embora quimicamente sejam bastante semelhantes.

Para que os resultados obtidos nos ensaios de laboratório representassem o real estado do líquido, foi de fundamental importância o estado da amostra do material analisado. Para que isto ocorresse, usou-se uma amostra de óleo de mamona comercial (componentes conforme Tabela 13) e uma amostra de óleo de rícino, que representa 89,5 % dos componentes do óleo de mamona, usado como medicamento. Sabendo porém que a obtenção de cada amostra do óleo de mamona, depende da região de produção, poderia obter-se diferentes resultados nos testes realizados, mas nada que possa alterar significativamente os dados obtidos.

Estão, aqui descritas, as técnicas que foram utilizadas nos experimentos de laboratório.

Assim, usou-se um laboratório idôneo de uma companhia de energia elétrica para se fazer os seguintes testes:

- Tensão Interfacial,
- Viscosidade,
- Rigidez Dielétrica (kV),
- Cor,
- Densidade (20⁰ C),
- Ponto de anilina, etc.

O ensaio é, em princípio, o mesmo para todas as classes de isolantes líquidos (novo, usado ou em serviço).

5.3 – TESTES REALIZADOS EM LABORATÓRIOS

a) Tensão Interfacial

A tensão interfacial (dina/cm), como já foi mencionado, é a força necessária para que um anel de platina rompa a interface água-óleo, sendo uma medida indireta da concentração de compostos polares presentes no óleo.

Nos testes com o óleo de mamona a idéia era a de conseguir identificar a existência de componentes polares em sua estrutura. Os ensaios realizados pelo equipamento de tensão interfacial (figuras 22 e 23), tiveram como resultado no óleo de mamona, um valor não apropriado para um dielétrico líquido, ou seja, seu valor em 23 dina/cm. Já para o óleo de rícino esse valor teve 20 dina/cm. Comparando os valores obtidos com os da Tabela 14 utilizado pela CESP - Companhia de Energia do Estado de São Paulo - (valores de referência para início de controle de óleos isolantes novos em equipamentos novos), conclui-se que a tensão interfacial do óleo de mamona está 50% abaixo do valor limite para um óleo novo. Tal resultado prova que o óleo de mamona é composto por materiais altamente polares, ao contrario do que se pensava acerca da sua estrutura.

Figura 23 - Tensão Interfacial (entre água e óleo) - equipamento eletrônico, ensaio utilizado para detectar contaminantes polares solúveis e produtos de oxidação.

Figura 24 - Tensão Interfacial (entre água e óleo) - equipamento manual, ensaio utilizado para detectar contaminantes polares solúveis e produtos de oxidação.

Viscosidade

A viscosidade cinemática, expressa em cSt (mm^2/s), como já foi dito, mede a resistência ao escoamento de um óleo.

Entretanto, se a viscosidade esta muito alta, o óleo tende a reduzir sua circulação por convecção, afetando sua característica de resfriamento. E conforme visto no capítulo III, é modificado com a variação da temperatura.

O óleo mineral possui viscosidade mais baixa que outros fluidos isolantes como o silicone, R-Temp e ascarel. E, embora sua condutividade térmica seja próxima destes líquidos, necessita de menor volume de óleo para refrigeração do equipamento, tornando este mais compacto.

Neste teste que é considerado um dos mais importantes para que possamos definir onde e como podemos utilizar este óleo (figura 24), obteve-se um resultado de $253 \text{ mm}^2/\text{s}$, (para o óleo de mamona) e $248 \text{ mm}^2/\text{s}$ (para o óleo de rícino) à 20^0 C , cerca de aproximadamente 20 (vinte) vezes maior que o óleo mineral, conforme as Tabela 15 e 16. Este resultado impossibilita a utilização deste óleo em meios onde é necessário sua a circulação para refrigeração, no caso um transformador. Um outro tipo poderia ser realizado em cima destes valores obtidos, a combinação deste óleo com outro componente que pode-se obter um resultado mais expressivo no que diz respeito a viscosidade.

Figura 25 - Viscosidade - equipamento para medir a resistência ao escoamento de um óleo.

Rigidez Dielétrica

A intensidade do campo elétrico num dielétrico não pode ser aumentada indefinidamente. Se um determinado valor for ultrapassado, ocorrerá centelhamento, o que caracteriza uma ruptura do dielétrico. A intensidade máxima de campo que um dielétrico pode suportar sem se romper é chamada **rigidez dielétrica**.

No projeto de capacitores é importante que se conheça a máxima diferença de potencial que pode ser aplicada antes de ocorrer a ruptura. Para um dado espaçamento entre placas, a ruptura é proporcional à rigidez dielétrica do meio entre elas. Um outro fator é o raio de curvatura da borda da placa do capacitor, visto que a curvatura determina principalmente a intensidade máxima de campo que ocorre numa dada diferença de potencial. A rigidez dielétrica do óleo mineral é de aproximadamente 15 MV/m, referente a um campo uniforme.

Os resultados obtidos em laboratório, para estudo da rigidez dielétrica, são expressos através de um parâmetro, “V”, produto de uma “constante” pelo campo elétrico máximo, onde ocorre a descarga elétrica. O fator, “constante”, é a distância entre os eletrodos.

No que diz respeito ao óleo mineral, este valor não pode ser inferior a 30 kV, para classes tensão de 88/66 kV. O resultado destes testes foi obtidos por meio de uma célula teste de vidro transparente (figura 25), onde os eletrodos utilizados eram de cobre polido, tipo calota e disco. O espaçamento entre os eletrodos é precisamente 2,5 mm, como especifica a norma da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), na qual também se descreve o tratamento do óleo a ser utilizado.

O teste consiste em aplicar aos eletrodos (envolvidos pelo óleo) uma tensão crescente de frequência de 60 Hz, sendo o aumento da tensão regular e automático, igual a 2 kV/m, partindo do zero até o valor que produz o “breakdown”.

Figura 26 - Rigidez Dielétrica - equipamento utilizado para determinar a tensão de ruptura dielétrica como uma medida da capacidade de um óleo suportar tensões elétricas sem falhar.

O “breakdown” é a tensão atingida durante o ensaio no momento em que ocorre o primeiro arco entre os eletrodos, tanto transitório como franco.

O ensaio foi efetuado por seis vezes, com o mesmo enchimento da célula, com intervalo de 5 minutos entre uma descarga e outra. Sendo a rigidez dielétrica a média aritmética dos seis resultados.

De acordo com as expectativas, constatou-se que o valor da rigidez dielétrica do óleo de mamona foi muito satisfatório, com média de 73,0 kV para o eletrodo tipo calota e 60,8 kV para o eletrodo disco; no óleo de rícino com 46,0/40,0 respectivamente. Estes valores poderiam ter sido alterados em alguns aspectos que foram considerados importantes, como a presença de uma bolha após a ocorrência do “breakdown”, a qual emergiu vagarosamente, devido à elevada densidade do óleo de mamona, se os testes fossem realizados com intervalos de um minuto, a bolha provavelmente alteraria estes valores obtidos.

Cor e Aparência

A cor, cujo valor numérico varia de 0 a 8, é obtida pela comparação de uma amostra de óleo em análise com uma escala padrão de cores, que vai do amarelo pálido ao castanho escuro.

Em óleos novos, é um indicativo do grau de refino do petróleo básico e, em óleos usados, pode caracterizar algum tipo de contaminação, carbonização ou estágio de oxidação do produto.

Este ensaio (figura 26), é apenas um indicativo, sendo necessário a realização de outros complementares, para uma avaliação mais segura do produto em análise.

Como esse processo não pode ser comparado com o óleo mineral, por possui cores diferentes entre eles, fica aqui como um dado para posteriormente

poder ser utilizado. O valor obtido foi de 1, considerado em termos, um bom resultado.

Figura 27 - Cor e Aparência - equipamento utilizado para expressar um valor numérico baseado em comparações com uma série de cores padrões.

Densidade

A densidade (figura 28) não é significativa na determinação da qualidade do óleo, mas pode ser útil para a identificação do tipo ou para indicar mudanças marcantes na composição. Como no processo, que se destacou no teste da rigidez dielétrica, de que a quantidade de bolhas, no interior do óleo de mamona, poderá afetar o comportamento do isolante. As densidades obtidas foram: 0,9605 para o óleo de mamona e 0,9599 para o óleo de rícino; valores estes superiores a óleos minerais, a exemplo do óleo naftênico, cuja densidade varia de 0,8610 a 0,9000 e para o óleo parafínico, com densidade variável de 0,7000 a 0,8600. Ficou constatado que as bolhas no interior do óleo mineral emergem em intervalos de tempo menores que no óleo de mamona.

Ponto de Anilina, Fator de Potência e Teor de Água.

Foi impossível a realização destes testes por motivos de contaminação dos equipamentos, tendo em vista que o óleo de mamona mostrou ser um óleo que fica impregnado nos recipientes.

Figura 28 - Densidade - equipamento utilizado para identificação de tipo do óleo ou para indicar mudanças marcantes na composição.

5.4 – COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

No procedimento de amostragem foram tomados os devidos cuidados quanto à limpeza e isenção de matérias estranhas nos recipientes da amostra, o que poderia conduzir à conclusões errôneas a respeito da qualidade do óleo, perda de tempo, de esforços e despesas envolvidas.

Como os resultados obtidos foram realizados em um laboratório com temperatura ambiente e equipamentos adequados, tem-se neste trabalho os dados que mais se aproximam da realidade da isolação elétrica do óleo de mamona.

Os líquidos isolantes utilizados em equipamentos elétricos têm como principais funções o isolamento e a refrigeração. Para que este líquido cumpra a função de isolamento, este deve atuar como um dielétrico ou extintor de arco entre partes de potencial elétrico diferentes. Para isto deve apresentar elevada rigidez dielétrica. Nos ensaios, o óleo de mamona demonstrou ser um excelente dielétrico líquido, no que diz a respeito de sua rigidez dielétrica obteve 73,0 kV (eletrodo calota) e 46 kV (eletrodo disco). Esta diferença da rigidez dielétrica entre o eletrodo calota e o disco, dá-se pelo paralelismo do eletrodo disco, que pode apresentar partes onde a distância entre os discos sejam menores do que 2,5mm. O mesmo não acontece com o eletrodo calota, pois a menor distância entre os dois eletrodos, é de exatamente 2,5 mm. Em compensação, para que este óleo de mamona possa cumprir a função de refrigeração, é necessário que ele possua viscosidade adequada, e ficou constatado, que o óleo de mamona deixa muito a desejar no que diz respeito à viscosidade, tendo seu valor em quase 20 (vinte) vezes superior ao óleo mineral. O fato dos óleos minerais serem utilizados a tanto tempo como isolantes, justifica-se pela eficácia e baixo custo que proporcionam. Diante dos resultados obtidos, torna-se interessante a pesquisa de um componente, o qual associado ao óleo de mamona, poderia ter sua viscosidade e tensão interfacial melhoradas, a ponto de atender as especificações.

Equipamentos como transformadores e capacitores necessitam que o óleo isolante refrigere e não absorva gases para seu melhor funcionamento. Para tal, o óleo de mamona é impróprio para uso, devido às suas características viscosas e à sua retenção de gases no seu interior; efeito este, provocado por sua alta densidade. Seria interessante a utilização do óleo de mamona em equipamentos como chaves, disjuntores e religadores, por possuir rigidez dielétrica elevada para a extinção de arco.

Um outro aspecto interessante é que o óleo de mamona comercial e o óleo de rícino (89,5 % do óleo de mamona usado como remédio para ingerir) tiveram valores aproximados na viscosidade e na densidade, consideradas altas. Contudo, no teste de rigidez dielétrica o óleo de mamona comercial apresentou um valor de 59 % (73,0 kV) acima do óleo de rícino (46,0 kV) em eletrodos tipo calota. Isto constata que os 10 % dos componentes restantes do óleo de mamona comercial, possui características isolantes (tabela 13), o que para o trabalho realizado coloca o óleo de mamona comercial como um líquido que se aproxima mais de um dielétrico líquido ideal.

Nos testes realizados ocorreram problemas tais como a impregnação do óleo de mamona nos equipamentos e recipientes, o que acarretou restrições na utilização do óleo de mamona nestes equipamentos.

Tabela 14

*Ensaio e métodos utilizados para valores limites de operação
(tabela utilizada pela CESP)*

ENSAIOS	MÉTODOS	VALOR LIMITE ÓLEO NOVO		VALOR LIMITE APÓS ENCHIM.				VALOR LIMITE PARA OPERAÇÃO.			
								3 45	138/230	88/66	66
Cor	ABNT MB 351	0,5		0,5				< 4,0	< 4,0	< 4,0	< 4,0
Acidez mgKOH/g óleo	ABNT MB 101	< 0,03		< 0,03				> 0,15	> 0,20	> 0,25	> 0,30
Rigidez Dielé- trica KV	NBR 6869	≥ 30		≥ 40				> 40	> 35	> 30	> 30
	IEC 101	≥ 42		≥ 60				> 60	> 55	> 50	> 50
Tensão Inter- facial dina/cm	NBR 6234	≥ 40		≥ 40				≥ 22	≥ 18	≥ 18	≥ 18
Fator de Po- tência %	ASTM D 924	20°C	≤ 0,05	≤ 0,05				< 0,5	< 0,7	< 0,7	< 1,0
		100°C	≤ 0,5	≤ 0,5				< 20	< 20	< 20	< 20
Conteudo de água ppm	NBR 3775	≤ 35		≥ 3 45	138/230	88/69	< 69	< 25	< 35	< 35	< 35
				< 15	< 20	< 25	< 25				
Limite para conteúdo de água de comutador			Ligação Centro Estrela Ligação Plena				menor que 40 menor que 30				

Tabela 15

Especificação para óleo isolante tipo "A" - Naftênico

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	VALORES (1) MIN MAX		MÉTODOS
APARÊNCIA		O OLEO DEVE SER CLARO, LIMPO E ISENTO DE MATERIAL		VISUAL
CLORETOS E SULFATOS	-	AUSENTE		NBR-5779
COR		1,0		ABNT MB-351
DENSIDADE A 20/4 °C		0,861	0,900	NBR-7148
ENXOFRE CORROSIVO		NÃO CORROSIVO		NBR-10505
ESTABILIDADE A OXIDAÇÃO - ÍNDICE DE NEUTRALIZAÇÃO (IAT) - BORRA - FATOR DE PERDAS DIELÉTRICAS A 90°C	mg KOH/g % massa %	- - -	0,40 0,10 20	NBR-10504
FATOR DE PERDAS DIELÉTRICAS A 25°C A 90°C A 100°C (2)	%	- - -	0,05 0,40 0,50	NBR-12133
ÍNDICE DE NEUTRALIZAÇÃO (IAT)	mg KOH/g	-	0,03	ABNT MB-101
PONTO DE ANILINA	°C	63	84	ABNT MB-299
PONTO DE FLUIDEZ (3)	°C	-	-39	NBR-11349
PONTO DE FULGOR	°C	140	-	NBR-11341
RIGIDEZ DIELÉTRICA - ELETRODO DE DISCO - ELETRODO VDE (4)	kV	30 42	- -	NBR-6869 NBR-10859
RIGIDEZ DIELÉTRICA A IMPULSO (ELETRODOS AGULHA/ESFERA) (5)	kV	145	-	ASTM D 3300
TENDÊNCIA A EVOLUÇÃO DE GASES	µl/min	NEGATIVO		ASTM D-2300 MÉTODO B
TENSÃO INTERFACIAL A 25°C	mN/m	40	-	NBR-6234
TEOR DE CARBONO AROMÁTICO	%	ANOTAR		ASTM D-2140
TEOR DE INIBIDOR DE OXIDAÇÃO (DBPC)	% massa	-	0,08	NBR-12134
TEOR DE PCB (6)	mg/kg	NÃO DETECTÁVEL		ASTM D-4059
VISCOSIDADE: A 20°C A 40°C A 100°C (7)	mm ² /s(cSt)	- - -	26,0 11,0 3,0	NBR-10441
TEOR DE ÁGUA (8)	mg/kg (ppm)	-	35	NBR-10710

Tabela 16

Especificação para óleo isolante tipo "B" - Parafínico

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	VALOR	
		MÍNIMO	MÁXIMO
APARÊNCIA		O OLEO DEVE SER CLARO, LIMPIDO, ISENTO DE MATERIAIS EM SUSPENSÃO OU SEDIMENTADOS	
DENSIDADE 20/4 C		-	0,860
VISCOSIDADE A 20°C	cSt	-	25,0
A 40°C		-	12,0
A 100°C (1)		-	3,0
PONTO DE FULGOR	°C	140	-
PONTO DE FLUIDEZ	°C	-	-12
ÍNDICE DE NEUTRALIZAÇÃO	mgKOH/g	-	0,03
TENSÃO INTERFACIAL A 25°C	mN/m	40	-
COR		-	1,0
TEOR DE ÁGUA	ppm	-	15
CLORETO E SULFATOS		AUSENTES	AUSENTES
ENXOFRE CORROSIVO		NÃO CORROSIVO	NÃO CORROSIVO
PONTO DE ANILINA	°C	85	91
ÍNDICE DE REFRAÇÃO A 20°C		1,4690	1,4780
RIGIDEZ DIELÉTRICA	kV	40	-
FATOR DE PERDAS DIELÉTRICAS	%	-	0,05
A 25°C			
A 90°C			
A 100 C* (2)		-	0,50
ESTABILIDADE A OXIDAÇÃO BORRA	% massa	-	0,10
ÍNDICE DE NEUTRALIZAÇÃO	mgKOH/g	-	0,40
FATOR DE PERDAS DIELÉTRICAS	%	-	20
A 90°C			
TEOR DE INIB. OXIDAÇÃO DBPC	% massa	NÃO DETECTAVEL	

6 - CONCLUSÃO

Poder-se-ia dizer que este trabalho tem um caráter introdutório ao tema dielétricos líquidos, colocando luzes no grande emaranhado de artigos, normas e padrões existentes, muitas vezes com características díspares. Ele também assume importância capital ao conseguir discernir e traçar um paralelo entre duas das grandes correntes de pesquisa na área: pesquisas sobre novos materiais isolantes e pesquisas dos fenômenos físicos. Produto extremamente relevante desta dissertação é a análise crítica das normas e dos fenômenos físicos, apontando nas primeiras os detalhes e os porquês de suas exigências. Neste contexto, dir-se-ia que principal contribuição deste trabalho foi a de mostrar aos inúmeros pesquisadores e usuários de normas técnicas a extrema importância que as pesquisas dos fenômenos físicos assumem em sua elaboração e análise crítica. Só com o conhecimento dos resultados dessas pesquisas é que torna-se realmente possível analisar, aprimorar e corrigir essas normas e padrões.

Importantes críticas e observações puderam ser obtidas, dentre elas citam-se:

- a) A temperatura ambiente influencia nos resultados das pesquisas, alterando a densidade do material utilizado;
- b) A viscosidade não altera o valor da tensão de “breakdown”, mas influencia no resfriamento do óleo isolante nos equipamentos;
- c) A relação entre estrutura molecular e a propagação dos “streamers” ocorre devido a afinidade eletrônica das moléculas;

- d) O movimento do líquido altera os dados das pesquisas e este depende da geometria da célula teste e o modo de injeção de cargas;
- e) Partículas solidas e gasosas, que podem ser liberadas através dos eletrodos e célula teste, estão diretamente ligados ao processo de “breakdown”;
- f) Os “streamers” são caracterizados por diferentes estruturas, de acordo com os experimentos, e dependem de vários parâmetros dentre os quais: a composição química do líquido, a tensão aplicada, a célula teste, o formato dos eletrodos e outros. Estes parâmetros deveriam ser padronizados para elucidar estes processos;
- g) A construção de uma célula teste padrão com eletrodos na posição horizontal, para evitar bolhas, é imprescindível para a coerência dos resultados;
- h) O efeito da estrutura molecular é evidente, o ideal seria analisar estas na presença de impurezas comuns;
- i) A movimentação do líquido isolante examinado deveria ser feita manualmente e analisados após seu repouso para evitar erros de homogeneidade. As células testes com movimentação constante deve ser extinguida.

Também visando mostrar como trabalhos de pesquisa de novos isolantes devem ser desenvolvidos foi idealizado estudos nos óleo de mamona e de rícino. Com isso se pôde não só identificar suas excelentes propriedades elétricas, mas também suas limitações atuais. Indicando que novos estudos ainda necessitam ser desenvolvidos junto com os químicos para melhorar algumas de suas propriedades.

ANEXO A:

MDTB é uma mistura de mono e dibenziltolueno, $C_{14}H_{14}$ e $C_{21}H_{20}$;

DTE é ditolil éter, $C_{14}H_{14}O_2$;

DINP é diisononil phthalate, $C_{26}H_{23}O_2$;

PXE é etano fenilxileno, $C_{16}H_{18}$

PFPE é Perfluoropoliether, $C_4F_8O_2$;

PPMS é Polifenilmetil-siloxano, $C_7H_8O_2Si$; a presença na ligação $Si-O$

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] MILASCH, Milan. (1983). *Manutenção de Transformadores em Líquidos Isolante*. Itajubá: Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- [2] PETROBRÁS, Distribuidora S.A.. (1964). *Óleos Isolantes*. Brasil. São Paulo: V.1..
- [3] MESSIAS, José Roberto. (1993). *Guia Prático de Ensaios Físico-Químicos na Manutenção de Transformadores em Óleo*. São Paulo . Ícove Editora.
- [4] TÚLIO, Luciane, LEVY, Noel Massinhau, Gravato, Romeu Caetano. (1995). *Manutenção de Transformadores Baseado em Ensaios Físico-Químicos e Cromatográficos no Sistema Isolante*. Paraná: Universidade Federal do Paraná.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1988). NBR 10576. *Guia para Acompanhamento de Óleo Mineral Isolante de Equipamentos Elétricos*. Rio de Janeiro.
- [6] GALLGHER, T.J. (1975). *Simple Dielectric Liquids Mobility, Conduc-*

tion and Breakdown. Oxford: University Press.

- [7] LAMP, P., EIBL, R., BUSCHORN, G.. *Measurement of Electric Field Strenght and in the Critical Region*. IEEE Transactions on Electrical Insulation. V.26, N.4, p. 574 – 577. August.1991.
- [8] CHADBAND, W.G.. *On Variations in the Propagation of Positive Discharge between transformer Oil and Silicone Fluids*. I.Phys. D: Appl. Phys., V.13, pp. 1299 – 1307. 1980.
- [9] FOSTER, E. O., Mazzetti, C., POMPILLI, M., CECERE, R. *The Effect of Molecular Structure on the Properties of Dielectric Fluids*. IEEE Transaction on Electrical Insulation. V. 26, n. 4, p. 749 - 753. August. 1991.
- [10] GRAY, E., LEWS, T.J. (1965). Br. I. Appl. Phys. p. 16 – 1049.
- [11] LUNDGAARD, Lars, LINHJELL, Dag; BERG, GUNNAR. *Propagation of Positive and Negative Streamers in Oil with and whithout Pressboard Interfaces*. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation. V. 5, n.3, p. 388 – 395. June.1998.
- [12] BRIERE, G. (1964). Br .I. Appl. Phys. p. 15-413.
- [13] STRICKLETT, K.L., ALTAFIM, R.A.C. *Electro hydrodynamic Instability end Electrical Discharge Initiation in Hexane*. National Institute of Standatds and Technology. Gaithersburg, Maryland, U.S.A. August. 1995.
- [14] HEBNER, R.E., KELLEY, E.F. *Observation of Prebreakdown and*

- breakdown Phenomena in Liquids Hydrocarbons II, Non-Uniform Field Conditions*. IEEE Transactions on Electrical Insulation. V. EI-20, n.2, p.281. April. 1985.
- [15] YAMASHITA, H., AMANO, H.. *Prebreakdown Phenomena in Hydrocarbon Liquids*. IEEE Transactions and Electrical Insulation. V.23, p. 739 – 750. 1988.
- [16] BEROVAL, A., TOBAZEÓN, R.. *Effects of Hydrostatic Pressure on the Prebreakdown Phenomena in Liquid Dielectric* C.R. Sciences, Paris. T. 303, n.12, p. 1081 – 1084. 1986.
- [17] FOSTER, E.O. *Electrical Breakdown in Liquids Hydrocarbons, I. Electrostatics* 12, p. 1-12 (1982).
- [18] VITZPATRICK, G.J.. *Effect of Electrical Impurities on Prebreakdown Events in Toluene*. IEEE 82CH1773, p.466 – 472. 1982.
- [19] HEBNER, R.E.. *Effects of Impurities on Positive Streamer Propagation in N-Hexane*. Annual Report CEIDP. IEEE 83CH1902-6, p. 26-34. 1982.
- [20] SIMPSON, Bill. *Propagation and Structure of Streamers in Liquid Dielectrics*. IEEE Electrical Insulation V. 14, n.2. April. 1998.
- [21] VITZPATRICK, G.J., McKENNY, P.J., FOSTER. *The Effect of Pressure on Streamer Inception and Propagation in Liquid Hydrocarbons*. IEEE Transaction on Electrical Insulation. V.25, n.4. August. 1990.

- [22] KELLEY, E.F., HEBNER. *The Effect of Pressure on Streamer Initiation in N-Hexane*. IEEE International Symposium on Electrical Insulation. WashingtonD.C.. June. 1985.
- [23] WONG, P.P., FOSTER. *The Dynamics of Electrical Breakdown in Liquid Hydrocarbons*. IEEE Transaction Electrical Insulation. V. 17, p.203 – 220. 1982.
- [24] LESAIN, O., SAKER A., GOURNAY P., TOBAZEÓN, R. *Streamers Propagation and breakdown under AC Voltage in Very Large Oil Gaps*. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, V.5, N.3, p. 351-359. June. 1998.
- [25] RAIN, R. BOISDON, C. LESAIN, O., TOBAZEÓN. *Behavior of Streamer under Divergent ac Fields in transformer Oils at Large Gaps*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, V.26, n.4, p. 715 – 725. 1991.
- [26] MASSALA, G., LEASANT, O. *Positive Streamer Propagation in Large Oil Gaps*. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, V.5, n.3, p.371 – 381. June. 1998.
- [27] LUNDGAARD, L., LINHJELL, D., BERG, G. *Propagation of Positive and Negative Streamers in Oil whit and without Pressboard Interfaces*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation . V.5, n.3, p. 388-395. June. 1998.
- [28] CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. *Óleos Minerais Isolantes*. São Paulo. 1985.

[29] CASTOR OIL AND ITS DERIVATES – SBP CONSULTANTS
SBP CHEMICAL ENGINEERING. Série n.2, Índia.