



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS
LAMAT - LABORATÓRIO DE MATERIAIS



MATERIAIS ELÉTRICOS: **COMPÊNDIO DE TRABALHOS**

ORGANIZAÇÃO:

**PROF^a NORA DÍAZ MORA
JULIANA FENNER R. LUCAS
MAYCON AURÉLIO MARAN**

FORMATÇÃO:

**EDUARDO FLECK CORREIA
JOÃO FELIPE MONTEMEZZO
LUAN FILIPE DOS SANTOS COLOMBARI
MIGUEL ÂNGELO MONTEIRO
PAULO HENRIQUE GONZAGA**

**FOZ DO IGUAÇU
2010**

MATERIAIS ELÉTRICOS: COMPÊNDIO DE TRABALHOS**VOLUME 1****SUMÁRIO**

ISOLADORES VÍTREOS - Maycon Aurélio Maran	3
ISOLADORES POLIMÉRICOS - Basílio Rodolfo Protzek.....	27
ISOLADORES CERÂMICOS - Álvaro Leonel Rodrigues da Rosa Junior	45
MATERIAIS ISOLANTES - Edson Andreoli	58
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS - Rodrigo Delfim Guarizi.....	95
FIBRAS ÓPTICAS - Diego Fernando Borges.....	114

ISOLADORES VÍTREOS

Maycon Aurélio Maran

1. INTRODUÇÃO

Num sistema de transmissão de energia elétrica, apesar de constituírem um custo relativamente baixo comparados com o custo total de uma linha de transmissão, os isoladores elétricos são de fundamentais para garantir a confiabilidade do sistema. Cerca de 60% dos desligamentos em linhas de transmissão com tensão maior que 230 kV devem-se às falhas com isoladores elétricos. (GARCIA, 2003a).

Isoladores vítreos, por sua vez, são amplamente utilizados em linhas de transmissão, especialmente em linhas de alta e extra alta tensão, onde constituem 70% dos isoladores utilizados devido à sua relativa confiabilidade e facilidades de manutenção. (GARCIA, 2003b),

Sendo assim, é relevante o conhecimento sobre esse tipo de isolador. Conhecer as suas principais características, modelos, suas vantagens e desvantagens podem contribuir para uma melhor compreensão dos constituintes de uma linha de transmissão, tendo em vista que, que esse é um tema de grande interesse da Engenharia Elétrica.

2. O VIDRO

Materiais sólidos não cristalinos são comuns em nossa sociedade. Desde fontes naturais, como o vidro obsidiano, utilizado em ferramentas simples no início da História da humanidade até fibras óticas para o transporte de dados. Mesmo hoje o vidro continua sendo uma área de desenvolvimento e descobertas, melhorando o conhecimento sobre sua estrutura atômica e conseqüentemente possibilitando moldá-lo às nossas necessidades (STRUCTURE OF OXIDE GLASSES, 2009).

Surpreendentemente, mesmo a mais comum das estruturas vítreas, a sílica, vem sendo longamente estudada e ainda não é totalmente compreendida além da sua estrutura básica (SiO_4) (STRUCTURE OF OXIDE GLASSES, 2009). Isso porque a rede de átomos formada na estrutura vítrea é amorfa, não possibilitando

compreender totalmente as relações que regem sua formação e seu comportamento sob a ação de estímulos externos (campos magnéticos, campos elétricos, agentes químicos, etc).

Essa separação dos demais materiais dá-se porque, em sua grande maioria, eles cristalizam-se à medida que esfriam, organizando seus átomos em um padrão altamente regular chamado rede cristalina. Embora o vidro busque se tornar um cristal, quando ele esfria seus átomos ficam amontoados em um arranjo praticamente aleatório, impedindo que ele forme uma estrutura regular (KINGERY, 1976).

Quando o vidro resfria seus átomos não conseguem se estruturar em uma rede ordenada, como acontece nos sólidos. Mas também não ficam totalmente soltos, como nos líquidos, formando uma estrutura amorfa, não organizada a grandes distâncias, como nos líquidos, e sólida, como nos materiais cristalinos.

Compreender porque isso acontece é uma questão complicada porque os átomos são pequenos demais para serem observados em tempo real. Há pouco mais de 50 anos, o físico Charles Frank sugeriu que esses átomos formavam icosaedros, sólidos com 20 faces, o que foi posteriormente comprovado. Essas estruturas são grandes demais para movimentarem-se livremente e acabam em um "engarrafamento atômico" (ROYALL et al, 2008).

A ASTM (American Society of Testing Materials) define vidro como: "produto inorgânico de fusão que foi resfriado até atingir condição de rigidez, sem sofrer cristalização." No entanto essa definição não é totalmente completa, pois exclui as substâncias poliméricas que também formam materiais amorfos.

A estrutura amorfa do vidro deve-se principalmente a seu resfriamento rápido, não permitindo que as moléculas organizem-se, vitrificando-as. A seguir é apresentado um gráfico que representa o comportamento do material vítreo em comparação a um material cristalino:

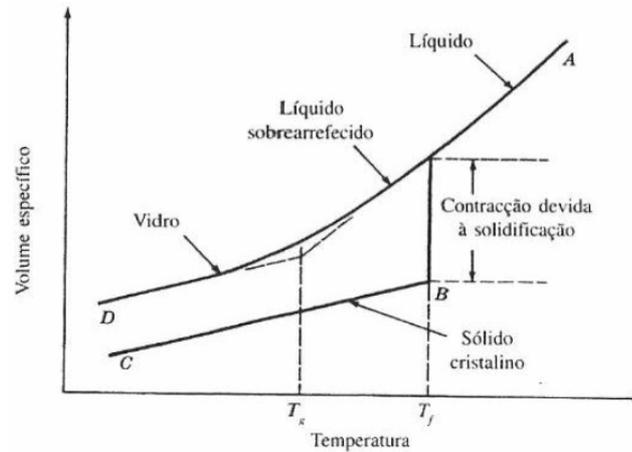


FIGURA 1 – Gráfico de transição vítrea

Nota-se que com a diminuição da temperatura, especificamente no ponto T_f (ponto de fusão), o material sólido cristalino sofre uma brusca contração devido à cristalização, o que não ocorre no material vítreo. O ponto T_g é chamado ponto de transição vítrea, é o ponto onde as duas retas características do aquecimento do material vítreo encontrar-se-iam. Nesse ponto o material passa de um material pastoso facilmente deformável para um material sólido rígido.

3.1 ESTUTURA VÍTREA

3.1.1 ÓXIDOS FORMADORES DE REDE

São os óxidos capazes de formar uma rede de ligações iônicas aleatórias. A maioria dos vidros comercialmente utilizados são fabricados a partir da Sílica (SiO_2), onde o íon silício toma o centro de um tetraedro, ligando-se à quatro oxigênios e cada um desses a um outro íon de silício, formando uma rede.

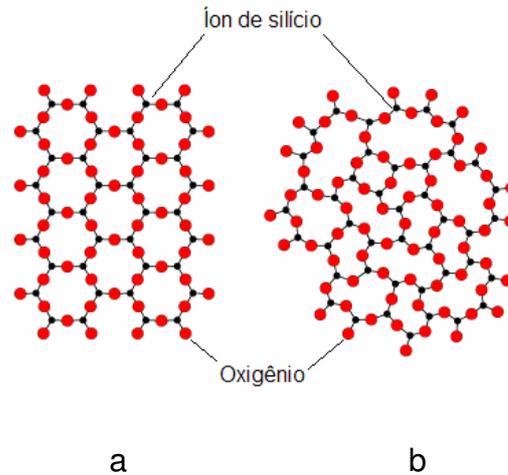


FIGURA 2 – Rede vítrea da sílica (SiO_4) – a) estrutura cristalina; b) rede vítrea

Entre esses óxidos estão ainda o dióxido de germânio (GeO_2) e óxido de boro (B_2O_3).

3.1.2 OXÍDOS MODIFICADORES

Esses óxidos têm a capacidade de destruir a rede vítrea. Os oxigênios a eles pertencentes tomam o lugar de um oxigênio da rede, causando uma descontinuidade, ou seja, uma quebra, na mesma. Eles permanecem nos interstícios da rede, na forma de íons.

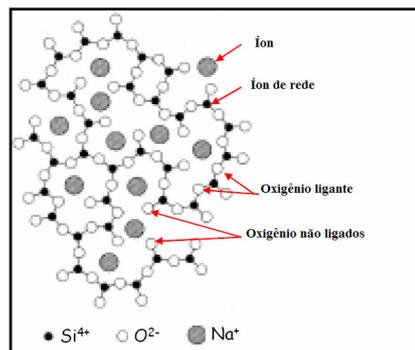


FIGURA 3 – Rede vítrea da sílica com óxidos modificadores.

Podem ser citados como exemplos a alumina (Al_2O_3), o óxido de cálcio (CaO) e o óxido de magnésio (MgO). Os óxidos modificadores são adicionados ao vidro para aumentar sua viscosidade e maleabilidade, além de diminuir o ponto de fusão.

3.1.3 ÓXIDOS INTERMEDIÁRIOS

São óxidos que se ligam à rede vítrea tomando o espaço de uma unidade SiO_4^{4+} , no entanto como não são tetravalentes, o cátion fica responsável por suprir outros elétrons necessários para a neutralidade elétrica. Esses vidros provêm características adicionais ao vidro, como resistência a altas temperaturas.

A tabela abaixo mostra os principais óxidos formadores, modificadores e intermediários:

TABELA 1 – Principais óxidos utilizados para fabricação de vidros

Formadores de rede	Intermediários	Modificadores
SiO_2	Al_2O_3	MgO
B_2O_3	TiO_2	K_2O
GeO_2	PbO	BaO
P_2O_5	BeO	CaO
As_2O_5	ZnO	Na_2O

FONTE: VIDROS (2009)

3.2 PROPRIEDADES DOS VIDROS

Os vidros, na sua grande maioria, possuem propriedades físicas semelhantes, tais como:

- Dilatação térmica muito baixa
- Viscosidade alta
- Alta durabilidade
- Baixa condutividade elétrica
- Ótima resistência à água, líquidos salgados, substâncias orgânicas, álcalis e ácidos, com exceção ao ácido fluorídrico e ao fosfórico

Também se pode apontar algumas características mecânicas importantes nos vidros: possuem elasticidade ideal, podendo suportar grandes pesos quando a sua superfície não possui falhas ou riscos; Suportam mais pressão do que tração e uma maior dureza pode ser obtida por um tratamento térmico, denominado têmpera.

TABELA 2 – Propriedades físicas de alguns materiais vítreos

Tipo	Condutividade térmica (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)
Soda	1,4	2500	750
Pirex	1,4	2225	835
Manta de fibra	0,046	16	
de vidro	0,038	28	
c/ papel	0,035	40	
Manta p/ dutos	0,038	32	835

FONTES: VIDROS (2009)

3.3 FABRICAÇÃO DO VIDRO

Existem comercialmente diversos tipos de vidros, o que implica também em uma grande quantidade de métodos de fabricação. No entanto, todos os processos, principalmente devido à viabilização econômica da fundição, apresentam pontos comuns, excetuando aqueles processos voltados para a fabricação de vidros especiais, nos quais os processos pós-fundição podem variar bastante para garantir propriedades diferentes aos vidros.

A fundição do vidro apresenta basicamente as seguintes etapas:

- Fundição grossa: os componentes da mistura reagem juntos (1000 a 1200 °C).
- Massa e concretização: composições gasosas evaporam. A mistura se concretiza e começa a criar-se os silicatos.
- Formação do vidro: a mistura de concretização começa a fundir (1300 à 1600 °C) e a ficar transparente.
- Fundição fina: a viscosidade aumenta e as infiltrações de ar se libertam mais facilmente. (1300 a 1600 °C)
- Homogeneização: remove as infiltrações de ar restantes.
- Descanso da fundição: período de descanso entre 900 e 1200 °C para baixar a viscosidade e melhorar a manipulação.

As temperaturas apresentadas podem variar dependendo da composição do vidro, mas usualmente são superiores a 1000 °C para fundição.

De acordo com REUTER (1994) as principais formas de fundição de vidro são:

- Fornos com potes refratários (Figura 4.a): São utilizados na fabricação de vidros de alta qualidade em fundições periódicas e artesanais. São responsáveis por 15 % da produção total mundial de vidro.
- Fornos com tanques refratários (Figura 4.b): São utilizados na fabricação de vidros automatizada e contínua. A produção varia de 100 a 2500 ton/dia de vidro. As dimensões variam de 10 a 100 m de compr. por 3 a 13 m de largura. O aquecimento é feito através de eletrodos de grafite.
- Float glass: É a técnica mais utilizada atualmente para a fabricação de vidros planos. Cerca de 90% das fábricas utilizam este método. O vidro é fundido e passa por dois cilindros de aço. Esta fita de vidro passa flutuando por um tanque de estanho líquido para deixá-la totalmente plana, até um cilindro de aço que o apanha e leva-o até o canal de resfriamento, reduzindo a sua temperatura e eliminando tensões internas.

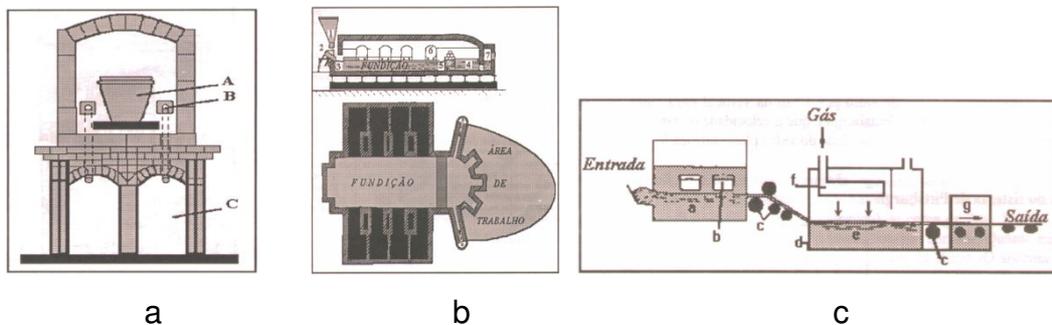


FIGURA 4 – a) Representação de forno de fusão com balde refratário. b) Representação de forno de fusão de tanque refratário. c) Float glass.

4. ISOLADORES

4.1 FABRICAÇÃO DE ISOLADORES

Isoladores de vidro são feitos em sua maioria de vidro soda-lime-silica, esses são vidros que possuem como reagentes básico a sílica (SiO_4), o óxido de

sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO). São os vidros mais comuns existentes e de mais barata fabricação. São utilizados em garrafas e vidros para janela. Possuem ponto de fusão de aproximadamente 1200°C e apresentam boa transparência e trabalhabilidade.

Existem diversas fábricas de isoladores elétricos no mundo, dentre as mais importantes pode-se citar: Saint-Gobain e Electrovidro. São fabricados isoladores de vidros para utilizações de média (1 kV a 69 kV), alta (69 kV a 500 kV) e extra alta tensão (maior e inclusive 500 kV), para linhas de corrente contínua e corrente alternada e em diversos modelos (consultar anexo A).

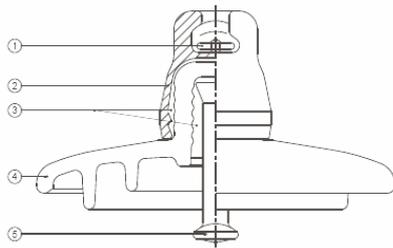
Com o intuito de aumentar a dureza do vidro, este passa por um processo de têmpera, que consiste basicamente em após a solidificação do vidro subti-lo à um choque térmico, fazendo-o resfriar rapidamente, causando a solidificação da parte externa muito rápida, deixando-a sob compressão e seu interior sob tração.

4.2 ISOLADORES DE SUSPENSÃO

Os isoladores de suspensão constituem-se em um dos modelos mais versáteis para utilização em linhas de transmissão e distribuição. Composto cadeias, eles podem ser utilizados em qualquer tensão, dependendo apenas do número de isoladores em série. Além das variedades de tipos e classes mecânicas disponíveis, também é possível a montagem de duas ou mais cadeias em paralelo, para esforços mecânicos especialmente altos, grandes vãos ou cabos muito pesados. Há também tipos especiais para locais sujeitos a poluição muito severa. Estes isoladores possuem uma alta durabilidade, mas podem ter sua vida útil reduzida pelas condições de trabalho. Esforços mecânicos e elétricos, mesmo de curta duração, em valores acima dos recomendados, podem causar danos permanentes (SANTANA, 2009).

4.2.1 PARTES DE UM ISOLADOR DE SUSPENSÃO

O isolador é composto basicamente por 3 partes: o pino de suporte, o dielétrico ou saia, e a pino de interligação. Pode ser visto na Figura 5 o perfil de um isolador tipo campânula, utilizado nas linhas de transmissão de ITAIPU.



- 1- Cupilha tipo R de latão ou aço inoxidável;
- 2- Campânula de ferro maleável ou aço inoxidável;
- 3- Cimento aluminoso;
- 4- Dielétrico de vidro temperado;
- 5- Pino de aço forjado zincado por imersão a quente.

FIGURA 5 – Perfil de um isolador tipo campânula

4.3 CARACTERÍSTICAS DOS ISOLADORES VÍTREOS

Devido ao seu baixo custo, simplicidade, rusticidade e relativa confiabilidade os isoladores de material cerâmico, vítreo e de porcelana, dominaram o mercado de isoladores por muitos anos. Atualmente, com o desenvolvimento de isoladores poliméricos, aqueles vêm perdendo espaço, principalmente para aplicações de média tensão.

No entanto os isoladores cerâmicos (de vidro e de porcelana) representam quase que a totalidade dos isoladores utilizados em alta e extra alta tensão. A Tabela 3 mostra uma comparação entre os tipos de isoladores utilizados, suas vantagens e desvantagens.

TABELA 3 – Comparação entre os tipos de isoladores

	Vantagens	Limitações
Porcelana	<p>Longo histórico de uso</p> <p>Performance conhecida</p> <p>Fácil intercambiabilidade</p> <p>Redução em as desapropriações com isoladores de pilares</p>	<p>Peso</p> <p>Defeitos ocultos</p> <p>Susceptível ao vandalismo</p> <p>Técnicas de detecção de falhas nas linhas ainda não são 100% confiáveis</p>
Vidro	<p>Longo histórico de uso</p> <p>Desempenho conhecido</p> <p>Fácil Intercambiabilidade</p> <p>Defeitos facilmente visualizáveis</p>	<p>Percepção negativa quanto à fragilidade</p> <p>Peso</p> <p>Atrativo para o vandalismo</p>
Polimérico	<p>Redução com as desapropriações com isoladores pilares</p> <p>Bom desempenho sob contaminação</p> <p>Leveza</p> <p>Facilidade de instalação</p>	<p>Fratura frágil do núcleo</p> <p>Efeito do tempo no processo de envelhecimento</p> <p>Menor intercambiabilidade</p> <p>Defeitos ocultos</p> <p>Técnicas de substituição em linha viva ainda não totalmente desenvolvidas</p>

FONTE: PANORAMA (2009)

4.4 PANORAMA DOS ISOLADORES VÍTREOS NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRO

O sistema de transmissão de eletricidade brasileiro pode ser dividido em dois grandes grupos conforme a Tabela 4:

TABELA 4 – Comprimento das linhas de transmissão no setor elétrico brasileiro

	Tensão (kV)	Comprimento (km)
< 230 kV (46,6%)	< 69	1918 (1,8%)
	69	4023 (13,1%)
	138	33296 (31,1%)
	188	680 (0,6%)
≥ 230 kV (53,4%)	230	25079 (23,4%)
	345	7818 (7,3%)
	440	4517 (4,2%)
	500	15846 (14,8%)
	600 (CC)	1612 (1,5%)
	750	2386 (2,2%)
	Total	107157

FONTE: GARCIA (2003a)

Nessas linhas de transmissão estima-se que estejam distribuídos em torno de 5,5 milhões de isoladores nas linhas de transmissão com tensão inferior a 230 kV e 11 milhões de isoladores nas linhas de transmissão com tensão igual ou superior a 230 kV. Mais especificamente divididos de acordo com a Tabela 5.

TABELA 5 – Distribuição percentual dos diferentes tipos de isoladores instalados.

Isolador		Carga Mecânica (kN)	Tensão (kV)	
Tipo	Material		< 230	≥ 230
Suspensão	Porcelana	80	24,3	15,4
		120	3,6	8,2
		160	0	1,7
	Vidro	80	50,3	24
		120	18,9	46
		160	0	3,6
	Polimérico	80	0,5	0,1
		120	2	0,8
		160	0	0,2
Line post	Porcelana	12,5	0,2	0
	Polimérico	110,7	0,2	0

FONTE: GARCIA (2003a)

Nota-se a evidência no domínio dos isoladores de vidro nas linhas de transmissão acima de 230 kV, mesmo com a defasagem dos dados apresentados. Essa predominância pode ser justificada pela facilidade de visualização dos defeitos ocorridos e pelo processo já desenvolvido de substituição com linha viva.

Portanto é relevante a importância dos isoladores vítreos para o sistema de transmissão de energia elétrica. Apesar de representarem um custo total relativamente baixo na construção de uma linha de transmissão, são os principais causadores de falhas e interrupções nesse sistema (ver Tabela 06).

TABELA 6 – Desligamentos por km de linha por ano

Componente	Desligamentos (%)	
	< 230 kV	≥ 230 kV
Isoladores	46,4	63,2
Cabos Condutores	19,6	9,7
Cabos pára-raios	3,6	7,4
Estruturas	16,3	10,1
Ferragens	0,8	1,8
Outras Causas	13,2	7,8

FONTE: GARCIA (2003b)

Garcia (2003b), ainda aponta que a maior número de defeitos ocorridos com isoladores de vidro refere-se à quebra de seu dielétrico, causados principalmente por vandalismo e descargas atmosféricas, sendo que defeitos de fabricação e corrosão são apontados somente como terceira e quarta colocadas respectivamente. Isso contrasta precisamente as desvantagens e a confiabilidade desses isolares.

Segundo CRUSSIUS et al. (1987), os isoladores cerâmicos instalados nas linhas de transmissão Foz – Ibiúna, apresentaram desempenho similares ao isoladores vítreos (consistentemente a maioria dos instalados). Esses autores ainda constataram que o nível de falha para isoladores instalados nas linhas de transmissão de Corrente Contínua ± 600 kV, foram sensivelmente maiores que dos instalados em corrente alternada, mas não apresentaram hipóteses para tal fato.

5. ISOLADORES EM REGIME DE TRABALHO

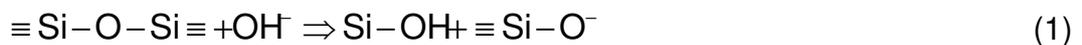
5.1 REATIVIDADE DOS VIDROS

Os vidros são utilizados amplamente pela indústria devido à sua grande durabilidade. Isso significa intrinsecamente que os vidros possuem uma baixa reatividade quando em contato com a maioria dos ácidos e bases conhecidas. Até mesmo o ácido sulfúrico tido como um agente altamente reativo é utilizado, por vezes, para promover uma maior resistência para o vidro.

Essa característica provém da própria sílica que é resistente à maioria dos ácidos e bases existentes, indissolúvel em água e em soluções neutras a não ser em altas temperaturas. A solubilidade da sílica aumenta com a alcalinidade da solução. Os íons alcalinos permanecem nos interstícios da rede, onde têm mobilidade e daí podem ser extraídos. Por sua vez os óxidos modificadores como CaO, MgO aumentam a resistência química do vidro (MAIA, 2003).

Não se pode falar em solubilidade do vidro, ele é uma solução meta-estável, sendo assim, há uma difusão e desintegração do vidro quando em meio ácido. Ocorre uma reação de substituição entre o íon H^+ e o íon alcalino ou alcalino terroso (Na^+ , Ca^{++} , K^+) da rede O-Si-R, onde R é o íon alcalino, formando um sal solúvel em água (Figura 6). Com o passar do tempo, forma-se uma camada de sílica-gel sobre a superfície, diminuindo a velocidade da reação (MAIA, 2003).

O ataque promovido por soluções alcalinas (OH^-) possuem uma dinâmica diferente, eles atacam a ligação Si-O-Si, destruindo-as, por isso é cerca de 5 vezes mais rápida que o ataque ácido, obedecendo à seguinte reação:



O ataque pelo ácido fluorídrico (HF) é ainda mais profundo, atacando diretamente o íon formador da rede. Ele age deslocando um íon de oxigênio, formado OH^- e tomando sua posição na rede vítrea, interrompendo-a. Com isso forma-se uma molécula de tetra-fluoreto de silício (SiF_4) e moléculas de água (H_2O) (Figura 6).

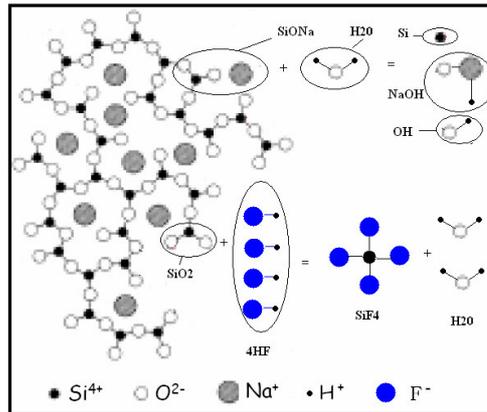


FIGURA 6 – Exemplos de ataque à rede vítrea

Existe ainda mais um tipo de ataque ao vidro, o ataque promovido por intemperismo, reagindo principalmente com o gás carbônico. Ele ataca o vidro da mesma forma que os ácidos, gerando manchas negras na superfície do isolador (MAIA, 2003).

5.2 CONDUÇÃO DE ELETRICIDADE EM SÓLIDOS

Para compreender melhor os problemas que ocorrem com os isoladores elétricos, deve-se estudar o sistema condução nos sólidos não cristalinos. Esses materiais quando submetidos a um campo elétrico apresentam uma polarização devido ao movimento dos seus íons.

Existem 3 tipos fundamentais de polarização:

- Polarização eletrônica e iônica – ocorre de um modo praticamente instantâneo sob a ação de um campo elétrico e sem dissipação de energia.
 - ❖ A polarização eletrônica - Diminui com o aumento da temperatura, devido à dilatação do dielétrico e conseqüente diminuição do número de partículas por unidade de volume.
 - ❖ A polarização iônica é intensificada com o aumento da temperatura, uma vez que se debilitam as forças elásticas inter-iônica quando aumentam as distâncias entre os íons devido à dilatação do corpo.
- Polarização dipolar - Difere da eletrônica e da iônica com relação ao movimento térmico das partículas. As moléculas dipolares, que se

encontra em movimento térmico caótico, se orientam parcialmente pela ação do campo, o qual é a causa da polarização.

- Polarização estrutural – aparece apenas em corpos amorfos e em sólidos não cristalinos polares como o caso do vidro, onde um corpo é parcialmente constituído de partículas de íons. Vem a ser a orientação de estruturas complexas de material, perante a ação de um campo externo, aparecendo devido ao deslocamento de íons e dipolos, na presença de aquecimento devido a perdas Joule. Quanto à dependência com a temperatura tem comportamento semelhante à polarização dipolar (TRAVESSA, 2009).

A polarização estrutural nos isoladores causa falhas devido a um fenômeno chamado de migração iônica. Os íons presentes nos interstícios da rede vítrea ganham energia suficiente para romperem uma barreira de energia e ocuparem outra posição intersticial. Esses íons, basicamente íons dos óxidos modificadores (Na_2O , CaO , MgO), formam um caminho e acumulam-se de acordo com sua carga em um dos pólos do isolador. Com o passar do tempo, a resistência do material vítreo diminui, fazendo fluir uma corrente cada vez maior, até que ocorra a falha no isolador. A migração iônica é comum, principalmente, em isoladores de corrente contínua, devido à polaridade fixa estabelecida pela rede.

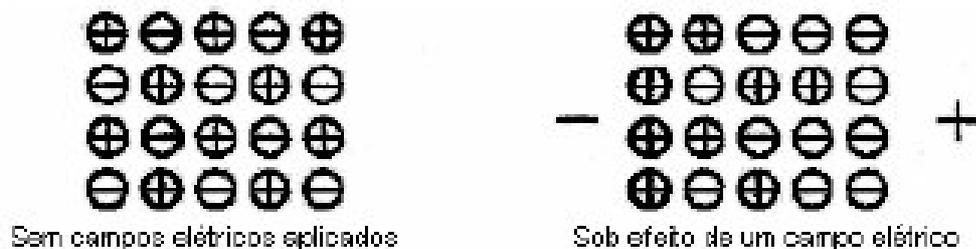


FIGURA 7 – Representação de polarização estrutural, onde os símbolos representam os íons da estrutura complexa

O dielétrico impede a passagem da corrente elétrica enquanto o campo elétrico nele estabelecido não ultrapassar certo valor que depende da natureza do dielétrico e das suas condições físicas, essa característica é chamada de resistência de isolamento.

A resistência de isolamento não é constante, isto é, os isolantes não obedecem de uma forma geral, a lei de Ohm. No caso dos dielétricos sólidos, a

curva de variação da corrente com a tensão já tem um aspecto diferente, como podemos ver no gráfico.

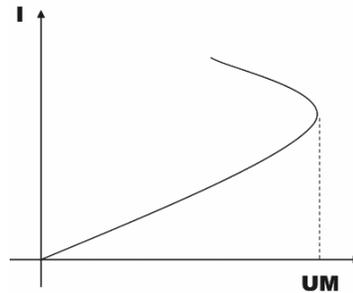


FIGURA 8 – Gráfico da resistência de isolamento de um material dielétrico.

A primeira parte da curva corresponde aproximadamente a uma proporcionalidade entre a intensidade de corrente e a tensão, a partir de um determinado valor de tensão, o crescimento de corrente acentua-se e ao atingir-se um valor U_M da tensão, a corrente cresce rapidamente mesmo que se faça descer o valor de tensão.

No caso dos isolantes sólidos de muito grande resistividade, a resistência através de sua massa é também levada, sendo muito pequena a corrente que os atravessa. Pela acumulação de poeira e umidade na superfície das peças isoladoras, se forma um novo caminho para passagem da corrente elétrica, o qual se diz ser resistência superficial.

Para poder exprimir numericamente a capacidade de um determinado material isolante suportar tensões elevadas, define-se uma grandeza a que se dá o nome de rigidez dielétrica e que é definida como sendo o máximo valor do campo elétrico para o qual se dá a ruptura do isolante (HALLIDAY, 2006). No caso de isolantes sólidos, pode acontecer que o arco disruptivo, em vez de atravessar a sua massa salte pela superfície.

Ao quociente da tensão pela distância entre os condutores é dado o nome de rigidez dielétrica superficial. Nos dielétricos sujeitos a uma tensão contínua verifica-se uma perda por efeito Joule tal como nos condutores. A corrente de perdas, se bem que muito limitada dá lugar a certo aquecimento. Estas perdas não têm importância a não ser quando dão lugar a um aquecimento permitindo, por consequência maior corrente e maiores perdas.

Esse efeito é umas das principais causas de falhas em isoladores elétricos em áreas com índices de poluição atmosférica alta. Ele também é chamado de efeito de avalanche térmica. Devido ao grande campo elétrico presente uma corrente começa a circular pelo entorno do isolador, aquecendo-o, o que diminui a resistividade e conseqüentemente aumenta a corrente, até o ponto em que ocorre a falha no dielétrico.

Foi verificado também que materiais iônicos, neste caso os vidros, possuem uma condutividade que depende fortemente da temperatura. A literatura (CAMPOS 2002; RODRIGUES et al., 2004; MÁRCIO, 2000; HEIKE, 2004) retrata que a condutividade é, para grande maioria dos materiais iônicos, uma função da temperatura que segue o comportamento de Arrhenius com as seguintes equações:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\left(\frac{-E_A}{k_B T}\right)} \quad (2)$$

σ – condutividade elétrica (S);

σ_0 – termo pré-exponencial (S);

E_A – energia de ativação (eV);

k_B – constante de Boltzmann (eV.T⁻¹);

T – temperatura (K).

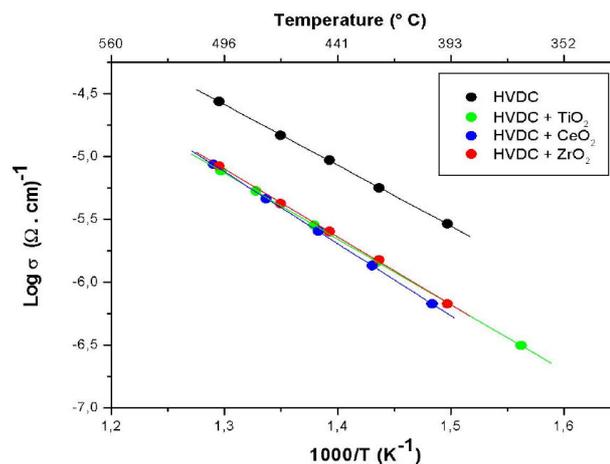


FIGURA 9 – Gráfico de condutividade elétrica versus temperatura

A análise da condutividade é feita por extrapolação dos valores medidos diretamente pelo condutímetro, uma vez que as medições são realizadas em uma faixa de temperatura de 350°C a 600°C. O espectro mostrado na figura 09 foi

realizado em vidro de isoladores de linha de transmissão de corrente contínua de FURNAS, linha Foz-Ibiúna, puro e dopado com óxidos bivalente.

Estudos realizados no Laboratório de Materiais (LaMat), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), procuram melhorar as características do vidro de isoladores elétrico adicionando dopantes, pois o processo de condução é altamente influenciado pela composição do vidro (KINGERY, 1976). Acredita-se que os óxidos bivalentes ocupam os interstícios da rede bloqueando a migração dos íons. Isso pode ser observado na diminuição sensível da condutividade desses vidros, conforme a Figura 9, onde houve uma diminuição de cerca de 4 vezes na condutividade do vidro.

5.3 DEVITRIFICAÇÃO EM VIDROS SODA-LIME-SÍLICA

A devitrificação é um processo pelo qual é fornecida energia térmica aos átomos da estrutura vítrea e conseguintemente mobilidade aos mesmo, de tal forma que eles sejam capazes de reorganizar-se em uma estrutura cristalina de menor nível de energia.

Por exemplo, a sílica pura (SiO_4^{4-}) pode devitrificar-se em vários cristais, como por exemplo a β -cristobalita (Figura 10). Essa possui estrutura cúbica de face centrada e o arranjo de seus átomos lembra o arranjo do diamante.

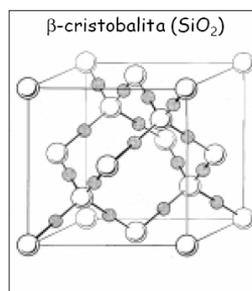


FIGURA 10 – Célula unitária da β -cristobalita

No entanto, no sistema soda-lime-sílica a cristalização é difícil. De acordo com ZANOTTO (1991) a cristalização em vidros do sistema soda-lime-sílica depende fortemente de imperfeições ou partículas estranhas na superfície do vidro.

Quando ocorre, a cristalização deve-se, em grande parte, à presença dos óxidos modificadores, que servem como sítios de nucleação para a organização da célula unitária (MACMILLAN, 1976).

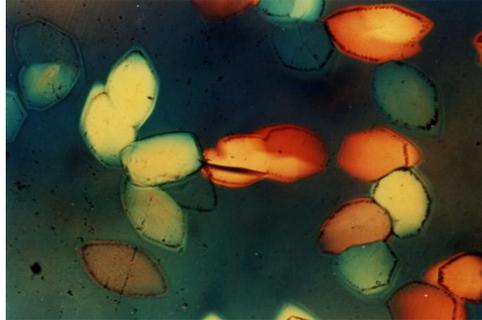


FIGURA 11 - Superfície parcialmente cristalizada de uma amostra de vidro de cordierita tratada por 1h30 a 950 °C aumento 220 x

Na maioria dos vidros a cristalização ocorre preferencialmente na superfície, ou seja, a nucleação é heterogênea. Foi comprovado por DÍAZ-MORA (1994) que impurezas da atmosfera ou aquelas depositadas propositalmente na superfície de vidros de cordierita, propiciavam a cristalização superficial. Essa constitui um problema para a indústria de vidros, principalmente quando se requer alta qualidade das peças (por exemplo: vidros óticos).

Entretanto, estudos preliminares indicam a viabilidade de se alcançar alto desempenho mecânico, eletrônico e durabilidade química de artigos de vidro com uma camada superficial uniforme de cristais. Esta via se apresenta como uma boa possibilidade de fabricar isoladores de vidro com alto desempenho mecânico (ARAUJO, 2005).

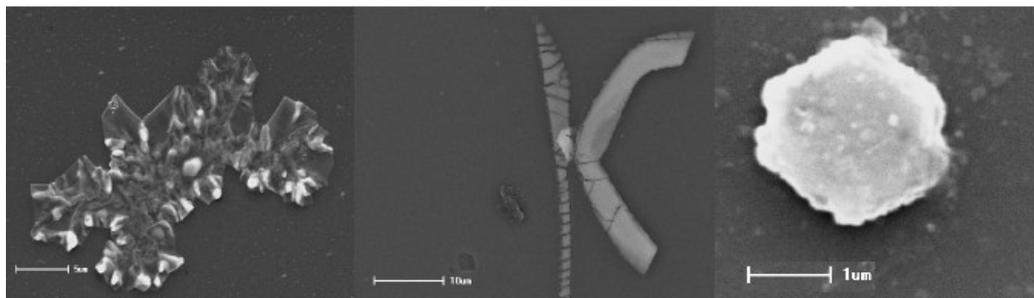


FIGURA 11 - Morfologias cristalinas observadas por MEV segundo o tipo de dopante: a) rosácea (amostra dopada com CeO_2); b) bastão (amostra dopada com TiO_2); c) hexágono (amostra dopada com ZrO_2).

6. ENSAIOS REALIZADOS EM ISOLADORES

Quanto à natureza dos ensaios, FERREIRA (2004) classifica:

Os **ensaios elétricos** - têm por finalidade verificar quais os níveis de tensão que o isolador suporta sob determinadas condições, em que o isolador pode funcionar, sem que se verifiquem descargas superficiais (chamadas também de contornamento) ou perfuração. No caso de existirem descargas superficiais avalia-se a resistência mecânica do isolador.

Em funcionamento normal, à tensão de serviço, podem surgir diferentes tensões de descargas superficiais consoantes às condições do ambiente tais como temperatura, humidade, depósitos salinos, etc. Importa conhecer, a princípio, qual o comportamento do isolador sob essas condições, uma vez que a capacidade de isolamento é afetada.

Além deste ensaio é importante também conhecer o desempenho do isolador em face de outro tipo de sobretensões, como as devidas ao fecho ou abertura de linhas e a descargas atmosféricas.

Os **ensaios mecânicos** - Verificam a resistência do isolador às solicitações mecânicas, normais ou excepcionais, a que vão estar sujeitos em funcionamento, como sejam as que resultam do peso dos condutores da ação do vento e do peso da camada de gelo que porventura se deposite sobre os condutores.

Com os **ensaios térmicos** - busca-se verificar a resistência do isolador às variações mais ou menos bruscas da temperatura. Estes ensaios são realizados mergulhando o isolador alternadamente em água quente e água fria. No final dos ensaios o isolador não deverá apresentar qualquer fissura ou fenda.

De acordo com a NBR 5032 os seguintes tipos de ensaio devem ser aplicados para os isoladores:

Ensaio tipo - destinados a conhecer as características elétricas do isolador, função da forma e dimensão. Estes ensaios são realizados apenas quando se cria ou altera um isolador e destinam-se a verificar se as características correspondem às projetadas.

Ensaio de rotina - individuais e efetuados ainda na fábrica sobre a totalidade dos isoladores apresentados ao comprador. Destinam-se a eliminar os isoladores defeituosos.

Ensaio de recepção - efetuados na presença do comprador sobre alguns dos isoladores adquiridos. Com a implementação das atuais normas de qualidade alguns destes ensaios tendem a desaparecer ou a ser realizados apenas em casos pontuais. Muitas das empresas tendem a serem empresas certificadas por institutos internacionais o que, confere relativa credibilidade aos produtos fabricados. No entanto, as empresas compradoras têm também mecanismos de controle sobre os produtos adquiridos. Mediante o fornecedor o controle de recepção pode ser mais ou menos rigoroso.

A Tabela 7 mostra os principais tipos de ensaios realizados com isoladores. Detalhes mais específicos sobre a execução dos ensaios podem ser obtidos na NBR 6936 e NBR 7107.

TABELA 7 – Principais tipos de ensaios em isoladores

Ensaio em isoladores		
Quanto às condições		
Tipo	Contornamento ao choque	
	Isolamento à frequência industrial	Seco Chuva
Rotina	Aspecto exterior	
	Mecânico (elementos da cadeia)	
	Acessórios metálicos	
	Térmicos	
	Isolamento a frequência industrial	
Recepção	Acessórios metálicos	
	Térmicos	
	Dimensões	
	Porosidade	
	Mecânico	Destrutivos
	Perfuração	

FONTE: FERREIRA (2009)

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os isoladores vítreos são os mais utilizados em linhas de transmissão de alta tensão no Brasil, vindo assim a constituir um importante objeto de estudo, principalmente devido à sua influência no sistema.

Sua sobrevivência, em longo prazo, no mercado de transmissão de energia elétrica vem sendo ameaçada pela rápida evolução dos isoladores poliméricos. No entanto sua confiabilidade, facilidade de manutenção e rusticidade, adido do fato das linhas de transmissão antigas não estarem preparadas para receber esses novos isoladores, provavelmente garantirão um longo histórico de utilização.

Melhorias nas características dos isoladores de vidro podem viabilizar sua utilização, diminuindo custo de produção e peso e aumentando sua eficácia como isolador elétrico.

8. REFERÊNCIAS

Structure of Oxide Glasses. Disponível em: <http://grandinetti.org/Research/Applications/GlassStudies/assets/GlassStructure.gif&imgrefurl=http://grandinetti.org/Research/Applications/GlassStudies/&usg=__cg9VF5JZUHaOuJa3lD8zHkgUuWY=&h=614&w=729&sz=53&hl=pt-BR&start=7&tbid=orMI0UNB TIREM:&tbnh=119&tbnw=141&prev=/images%3Fq%3Dglass%2Bstructure%26gbv%3D2%26hl%3Dpt-BR%26sa%3DG>. Acesso em: 27 fev. 2009.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction do Ceramics**, John Wiley & Sons. 2ª ed. Nova Iorque, 1976.

ROYALL, Patrick C.; WILLIAMS, Stephen R.; OHTSUKA, T.; TANAKA, H. **Direct observation of a local structural mechanism for dynamic arrest.** Nature Materials. vol. 7, p.556 - 561, 2008.

Vidros. Disponível em: <<http://www.enq.ufrgs.br/cursos/grad/MatCon/VidroFinal1.ppt>>. Acesso em: 27 fev. 2009.

GUEDES, S.; FREDERICCI, C.; YOSHIMURA, H. N. **Efeitos das variáveis de processo no desempenho mecânico e termomecânico do dielétrico de vidro temperado.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos. Vol. 3, pag.1-14, 2008.

REUTER, Jürgen. **Vidro: Técnicas em vidro**, [S. I.]: UFPB, 1994;

CERÂMICA Santa Teresinha. **Isoladores de vidro.** [S. I.]: Promo CD, [200?]. CD-ROM.

SANTA, Isoladores. **Isoladores de suspensão**. Disponível em: <<http://www.isoladores-santana.com.br/santana-nova/nav.asp>>. Acesso em 02 mar 2009.

Panorama do setor de isoladores. Disponível em : <http://www.abceram.org.br/asp/49cbc/pdf/49cbc_santana.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2009.

Crusius, R. L., Assunção, L. A. R., Nigri, A. I. **Desempenho de isoladores na linha de transmissão de corrente contínua 600KV**. In: IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belo Horizonte, 1987.

GARCIA, Ricardo. W. S.; SANTOS FILHO, Nilton. **Isoladores de linha de transmissão do sistema elétrico brasileiro parte 1: inventário**. Décimo Encuentro Regional Latino Americano de la Cigré. 2003a.

GARCIA, Ricardo. W. S.; SANTOS FILHO, Nilton. **Isoladores de linha de transmissão do sistema elétrico brasileiro parte 2: avaliação de desempenho**. Décimo Encuentro Regional Latino Americano de la Cigré. 2003b.

HALLIDAY, Walker Resnick, **Ótica e física moderna**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2006. v. 4.

TRAVESSA, Sheila S. **Isolantes**. Disponível em : <http://www.cefetsc.edu.br/~petry/Ensino/Repositorio/Docencia_UFSC/Materiais_EEL_7051/Materiais_Isolantes.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2009.

MAIA, Samuel B. **O vidro e sua fabricação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

CAMPOS, A.A.; RODRIGUES, A.C.M. Effect of crystallization on the electrical conductivity of lithium disilicate glasses. *Glass Science Technology*. v.75, p.115-120, 2002.

RODRIGUES, A. C. M.; NIITSU, G. T.; ZANOTTO, E. D.; PRADO, M. O.; FOKIN, V. M. Crystallization of $1\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{CaO}\cdot 3\text{SiO}_2$ -glass monitored by electrical conductivity measurements. *Proceedings of XX International Congress on Glass*. nJapan, 2004.

MÁRCIO, L. F. N. Condutividade Elétrica de Vidros de Boratos, Silicatos e Sílico-Sulfatos de Íons Alcalinos. Dissertação de mestrado. Instituto de Física -USP, 2000.

HEIKE, U. **Aging and Characterization of Semiconducting Glazes**. Tese de doutorado, Department of Electric Power Engineering – Chalmers University of Technology. Gothenburg, 2000.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. *Introduction do Ceramics*, John Wiley & Sons, Nova Iorque, 2a edição, 1976.

ZANOTTO, E. D. **Surface crystallization kinetics in soda-lime-silica glasses**. In: *Journal of Non-Crystalline Solids*. v. 129, p.183–190, 1991.

MACMILLAN, P. C. **Glass-Ceramics**. 2. ed. Academic Press. London, 1979.

DÍAZ MORA, N. *Cristalização Superficial em Vidros de Cordierita: Morfologia e Cinética*. Tese de Doutorado. São Carlos, 1994.

FERREIRA, José L. **Linhas de transmissão**. Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~mam/Linhas-01a.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2009.

ISOLADORES POLIMÉRICOS

Basílio Rodolfo Protzek

1.INTRODUÇÃO

Isoladores ou dielétricos são materiais com alta capacidade de resistir ao fluxo de corrente elétrica. Estes materiais têm os elétrons fortemente ligados aos núcleos dos seus átomos, sendo assim necessária uma grande energia para retirar e movimentar os elétrons em materiais isolantes.

Os isoladores em engenharia elétrica têm a finalidade de isolar eletricamente um corpo condutor de outros corpos condutores ou não. Os tipos mais usados de isoladores são os cerâmicos, vítreos e poliméricos.

Esses isoladores têm ligação direta com os índices de segurança nas redes de transmissão elétrica, podendo influenciar diretamente nestes índices: DEC (Duração da Interrupção Equivalente em Horas) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção), usados pelas companhias elétricas para medir o índice de qualidade. Na Figura abaixo vemos uma comparação entre os números de interrupções por ano. Esses números são utilizados para os cálculos dos índices citados a pouco.

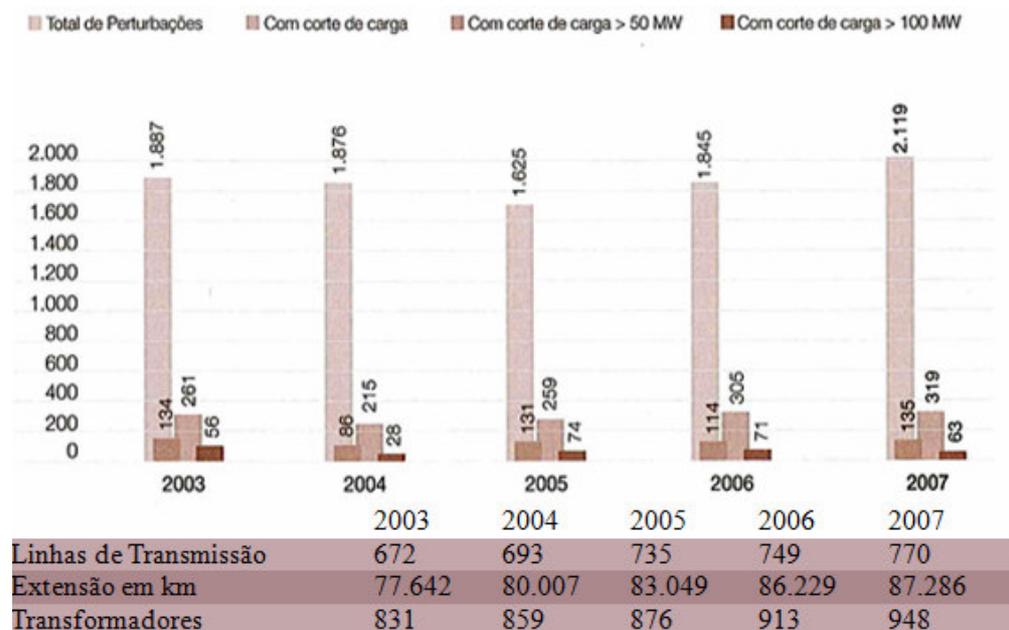


FIGURA 1 - Evolução do número de perturbações e do impacto sobre o atendimento às cargas do SIN

(FONTE: http://www.ons.org.br/indicadores_desempenho/qualidade_operacao.aspx)

Já na Figura 2 temos o mapa do SIN (Sistema Interligado Nacional) sendo cada cor uma linha de transmissão com diferentes valores de tensão.

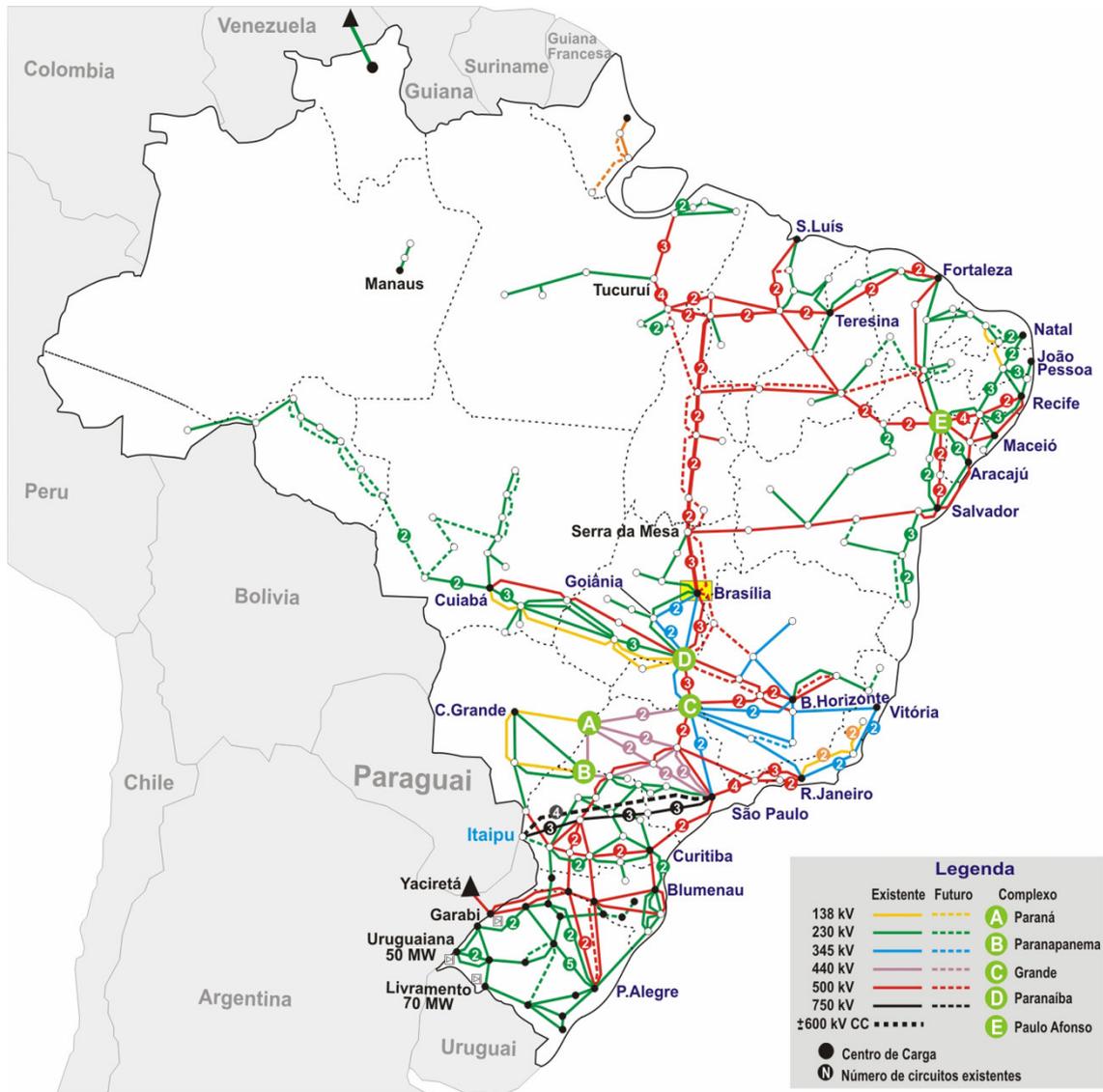


FIGURA 2 - Mapa do sistema interligado nacional (SIN)
(FONTE: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx#)

Alguns materiais tais como o vidro ou o Teflon são isoladores elétricos muito bons. Uma classe muito maior de materiais, por exemplo, borracha e a maioria dos plásticos é ainda boa suficiente para isolar a fiação e cabos elétricos mesmo que possam ter uma resistividade mais baixa que a maioria. Estes materiais podem servir como isoladores práticos e seguros para baixas e moderadas tensões (centenas, ou mesmo milhares, de Volts).

2.HISTÓRICO

As primeiras tentativas de isolar fios de uma rede elétrica foram feitos com estacas de madeira, porém estes isoladores não apresentaram bons resultados conforme cresciam as linhas de transmissão e as voltagens entre seus fios. Com a expansão dos telégrafos e conseqüentemente o crescimento das linhas para levarem estes sinais os isoladores ganharam uma grande importância e vários modelos.

Os primeiros isoladores a serem fabricados foram os cerâmicos, fabricados no Reino Unido a partir de 1840 por Stiff Doulton. Com a invenção de suspensão para isoladores logo foi possível a transmissão de energia em alta tensão, com o aumento ainda maior da utilização de isoladores e uma variedade cada vez mais crescente de materiais e formas para isoladores.

No Brasil, o grande precursor dos isoladores foi o barão de Capanema que instalou muitas linhas de telégrafos no país e contribuindo para a evolução dos isoladores ao inventar um isolador mais apropriado e resistente ao clima e a umidade brasileira.

3.TEORIA BÁSICA

Polímeros são compostos químicos de elevada massa molecular e de grandes cadeias. Os polímeros são então macromoléculas formadas por unidades básicas os monômeros, em si os polímeros são vários monômeros ligados formando uma longa cadeia que se repete.

Existem polímeros naturais (encontrados na natureza) e polímeros artificiais. Como exemplo de polímeros naturais encontramos o DNA e RNA (presentes na maioria das células do nosso corpo), temos também a borracha retirada das seringueiras.

Já os polímeros artificiais ou sintéticos são formados por reações de polimerização, que são reações onde as moléculas menores (monômeros) se combinam por valências principais para formar as moléculas mais longas, mais ou menos ramificadas, porém com as mesmas composições centesimais.

TABELA 1 - Ano de introdução de alguns polímeros no mercado

1930	Borracha estireno-butadieno	1943	Silicones
1936	Poli(cloreto de vinila) (<i>PVC</i>)	1944	Poli(etileno teraftalato)
1936	Policloropreno (<i>neopreno</i>)	1947	Epóxis
1936	Poli(metil metacrilato)	1948	Resinas ABS
1936	Poli(acetado de vinila)	1955	Polietileno linear
1937	Poliestireno	1956	Poli(oximetileno)
1939	Nylon 66	1957	Polipropileno
1941	Poli(tetrafluoroetileno) (<i>teflon</i>)	1957	Policarbonato
1942	Poliesteres insaturados	1964	Resinas ionoméricas
1943	Polietileno ramificado	1965	Poli(imidas)
1943	Borracha butilada	1970	Elastômeros termoplásticos
1943	Nylon 6	1974	Poliamidas aromáticas

Os polímeros também podem ser divididos em termoplásticos, elastômeros, e termorrígidos.

Termoplásticos são os mais comuns em nosso dia a dia sendo encontrados em vários objetos, estes formam a maioria dos plásticos conhecidos. Eles recebem esse nome, pois em altas temperaturas eles apresentam uma alta viscosidade podendo facilmente ser moldados. Através destas características estes polímeros podem ser facilmente recicláveis ao contrario dos termorrígidos.

Os termorrígidos são uns tipos de polímeros que apresentam uma alta estabilidade a variações de temperatura, no entanto se expostos a temperaturas muito elevadas será promovido a decomposição do material sendo assim muito difíceis de serem remodelados gerando uma grande dificuldade de reciclagem destes materiais.

Elastômeros são uma classe intermediária entre os tipos apresentados anteriormente eles não são fusíveis, mas apresentam uma alta elasticidade, em temperaturas ambiente podendo ser esticados a duas ou ate três vezes seu tamanho inicial retornando rapidamente ao seu tamanho inicial após retirada a tração. Estes são comumente conhecidos como as borrachas.

Materiais poliméricos são cada vez mais utilizados para as mais diversas tarefas, pois apresentam uma grande durabilidade. Os plásticos dominam o mercado mundial de mercadorias, por serem resistentes e especialmente muito mais leves

que outros materiais como metais e madeiras. Eles também são ótimos isoladores térmicos e elétricos. Um exemplo disto é que antigamente os fios elétricos eram revestidos com cerâmicas e hoje são revestidos com plásticos uma vez que os plásticos são mais flexíveis que as porcelanas e mantendo um mesmo nível de isolamento o que é imprescindível.



FIGURA 3 – (a) Polímeros naturais (molécula de “DNA”), (b) e (c) artificiais (nylon e garrafas PET (Politereftalato de etileno), respectivamente).

4.PRINCÍPAIS MATÉRIAS PRIMAS DE ISOLADORES POLIMÉRICOS

Isoladores para linhas de transmissão são basicamente constituídos de um núcleo de material condutor que é revestido por um material que causa sua isolação. As principais diferenças entre os isoladores são seus formatos os mais comuns são os tipo bastão, pino, e pilar.

Para moldar os materiais poliméricos nos isoladores o método mais utilizado e a vulcanização (ver Figura 4). Esse processo constitui em aquecer o polímero a altas temperaturas na presença de enxofre ou óxidos metálicos (no caso de alguns polímeros sintéticos demonstram melhores resultados com vulcanização com óxidos metálicos.)

A vulcanização consiste na formação de ligações cruzadas nas moléculas do polímero individual, responsáveis pelo desenvolvimento de uma estrutura tridimensional rígida com resistência proporcional à quantidade destas ligações.

A seguir alguns processos de produção dos tipos mais comuns de polímeros. A produção de um polímero começa com sua estrutura básica: o monômero. Um monômero é uma molécula que, reagindo sob o efeito de um

sistema catalítico, em determinada pressão e temperatura, cresce para formar uma longa cadeia de monômeros, chamada polímero, do grego “poly” (muitas) e “mero” (unidades). Polipropileno é um polímero de cadeia longa feita com o monômero propeno.

Pode-se produzir polipropileno adicionando-se à reação, além do propeno, outro monômero. Nesta hipótese, o material fabricado é o copolímero. Caso apenas o propeno seja adicionado à reação, o material é denominado homopolímero.

As características do polipropileno são dadas por meio do tipo de alinhamento das moléculas de propeno. O sistema catalítico assegura que as moléculas encontrem a forma regular de se unir à cadeia. Os catalisadores usados para a polimerização do propeno são geralmente uma mistura de compostos de titânio e alumínio. A flexibilidade no controle da estrutura molecular durante a polimerização permite a uma única unidade de polimerização produzir todos os tipos de polipropileno.

O polipropileno sai do reator na forma de pequenas partículas ou esferas, as quais são direcionadas para um equipamento especial chamado extrusora, no qual aditivos são alimentados. Existe uma ampla variedade de aditivos, sendo utilizados em função da aplicação final do produto. Na extrusora ocorre uma fusão do polímero e sua íntima mistura com os aditivos. Por fim, o polipropileno é granulado. A forma granulada é como o polipropileno é entregue aos clientes, que o transformarão em produtos finais a serem vendidos no mercado.

Já os compostos de polipropileno são obtidos a partir da adição de cargas minerais, modificadores de impacto, aditivos e pigmentos ao polipropileno. Eles ampliam a gama de aplicações do polipropileno, atendendo a funções específicas que exigem propriedades diferenciadas em relação às propriedades do polipropileno tradicional.

5.PETROFLEX – O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE SBR

As matérias-primas estireno e butadieno são enviadas ao sistema de reação, composto por reatores em série nos quais, com a adição de outros produtos auxiliares, ocorre o processo de produção da borracha. O efluente do sistema de reação é enviado para o sistema de recuperação das matérias-primas, em que o estireno e o butadieno não reagidos são separados do produto e retornados para o processo, para reaproveitamento. O produto já livre das matérias-primas não

reagidas segue para a área de acabamento final (coagulação e secagem), onde ao final a borracha seca é prensada em fardos de 35 quilos e embalada para expedição para os clientes.

6.RIO POLÍMEROS

O projeto da Rio Polímeros beneficia-se da utilização de moderna tecnologia para produção de resinas termoplásticas em escala mundial. Em fase final de montagem, ele compreende a implementação de um complexo industrial totalmente integrado, composto por duas unidades industriais, que funcionarão a partir de derivados do gás natural a serem fornecidos pela Petrobras.

Após ser extraído na Bacia de Campos, o gás natural será transferido para as UPGNs para separação em duas frações, uma gasosa e outra líquida, sendo esta denominada líquido de gás natural (LGN). Esse líquido, por sua vez, será fracionado de modo a obter-se uma mistura de etano e propano, dentre outros gases. Esses gases seguirão por dutos até a refinaria da Petrobras em Duque de Caxias, onde serão separados, sendo posteriormente redirecionados para a Unidade de Pirólise da Rio Polímeros. Nessa unidade, o etano e o propano serão transformados - através de processos químicos - em eteno e propeno, e em outros co-produtos, como hidrogênio e gasolina de pirólise.

Finda a etapa de primeira geração, o eteno será encaminhado para a Unidade de Polimerização, que é integrada à Unidade de Pirólise. O propeno, por sua vez, será vendido à Polibrasil, e o hidrogênio e a gasolina de pirólise serão vendidos à Petrobras. Na Unidade de Polimerização, o eteno passará por reatores químicos para ser transformado em polietileno, concluindo a etapa de segunda geração.

A Unidade de Pirólise da Rio Polímeros possui capacidade produção de anual de 520,0 mil toneladas de eteno e 75,0 mil toneladas de propeno. Além disso, essa unidade possui uma capacidade de produção anual de 5,0 mil toneladas de hidrogênio e 33,0 mil toneladas de gasolina de pirólise. Já a Unidade de Polimerização possui duas linhas de produção independentes com capacidade anual de 270,0 mil toneladas de polietilenos cada uma, perfazendo uma capacidade total anual de 540,0 mil toneladas de polietileno. Essa unidade é do tipo *swing*, capaz de produzir PEBDL e PEAD. Essa flexibilidade permite adaptar o mix de produtos às necessidades do mercado. As unidades da Rio Polímeros deverão parar para

manutenção a cada 5 anos, um investimento estimado no equivalente a US\$15 milhões a cada parada.

Com o início de suas atividades industriais, a Rio Polímeros aumentará em aproximadamente 20,0% a capacidade total instalada de produção de polietilenos do País, ocupando lugar de destaque nos cenários petroquímico nacional e internacional e situando-se entre os mais importantes produtores de eteno e polietileno do mundo.

7.POLITENO

A fábrica da POLITENO opera em processo contínuo (24 horas/dia), no sistema de três turnos de oito horas cada. A empresa opera duas plantas, a de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), e a de Polietileno Linear (PEL), cujos processos de produção estão descritos abaixo:

7.1 PLANTAS DE POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE – PEBD

Utiliza a tecnologia da SUMITOMO CHEMICAL COMPANY LIMITED que, além de apresentar condições de preços mais vantajosas, se constitui no maior produtor de PEBD do Japão, utilizando tecnologia própria para o processo de fabricação com reatores tipo autoclave. Este processo permite maior flexibilidade para produção de vários tipos de PEBD, atendendo perfeitamente ao estágio de desenvolvimento do mercado nacional.

O processo produtivo se divide em duas unidades, a Unidade de Gás e a Unidade de Sólidos, conforme descrito a seguir:

Na unidade de gás, parte do eteno produzido na Central de matérias-primas (COPENE) é enviada para a planta de PEBD, onde o eteno é elevado a uma grande pressão, se tornando então em sua pressão de polimerização (1.100 a 2.400 kg/cm²). Na seção de compressão o eteno pressurizado é enviado para os reatores de polimerização, onde a carga é continuamente agitada. No interior dos reatores ocorre a polimerização, na presença de catalisadores (iniciadores de reação tipo radical livre). Tais catalisadores (peróxidos orgânicos) são consumidos pelo processo, fazendo-se necessária a sua alimentação constante, de modo a manter as reações de polimerização. Na última seção desta unidade, a de separação e peletização, a carga de efluentes dos reatores, uma mistura de polietileno e eteno que não reagiu, passa por um resfriador, daí indo para o vaso separador de alta

pressão. O polímero quente deixa o separador de baixa pressão sob controle de nível, indo daí para o extrusor onde são injetados aditivos, de modo a que a resina produzida alcance as especificações desejadas. Na extremidade do extrusor encontra-se o peletizador onde o polímero em estado pastoso é resfriado e cortado sob um banho de água. Os pellets formados são transferidos em meio aquoso para uma peneira rotativa, para secagem, indo logo após para uma peneira vibratória, a fim de serem classificados.

Na unidade de sólidos, os pellets de polietileno são enviados por transporte pneumático aos silos intermediários de produto, onde aguardam o resultado das análises das amostras coletadas e sofrem a purga com ar do eteno restante que os envolve. Após a identificação das propriedades do polímero, os pellets de polietileno são transferidos para o silo misturador.

7.2 PLANTA DE POLIETILENO LINEAR - PEL

A unidade de Polietileno Linear (PEL) emprega o processo Du Pont (Nova Chemicals). Este processo utiliza reação de polimerização em solução, de grande flexibilidade na produção dos diversos grades de polietileno, indo desde a baixa até a alta densidade, o que permite atender a uma ampla faixa do mercado.

O primeiro passo do processo é a purificação dos solvente e comonômeros, onde é feita a eliminação da água, a mistura de solvente e comonômeros junta-se com a corrente de eteno, dissolvendo-o. A nova mistura é enviada para a área de reação. Nesta área o eteno e o comonômero, devidamente purificados, são pressurizados pela bomba de carga. A solução catalítica é injetada no sistema de reação para propiciar a polimerização do eteno e do comonômero presente. A solução polimérica produzida no reator é então despressurizada, de modo a separar a fase rica em polímero da fase formada pelo solvente e monômeros não reagidos. A fase rica em polímero é transferida para o separador de baixa pressão, onde o solvente e os monômeros remanescentes são removidos na sua quase totalidade. Do fundo do separador o polímero flui por gravidade para uma extrusora/peletizadora, que utiliza água para o resfriamento dos pellets formados. Neste processo, os aditivos são adicionados ao polímero no estágio fundido, antes de serem peletizados. A corrente de água e os pellets são enviadas para o topo da retificadora, onde o solvente é removido. Após isto, os pellets vão para a área de silos e ensacamento.

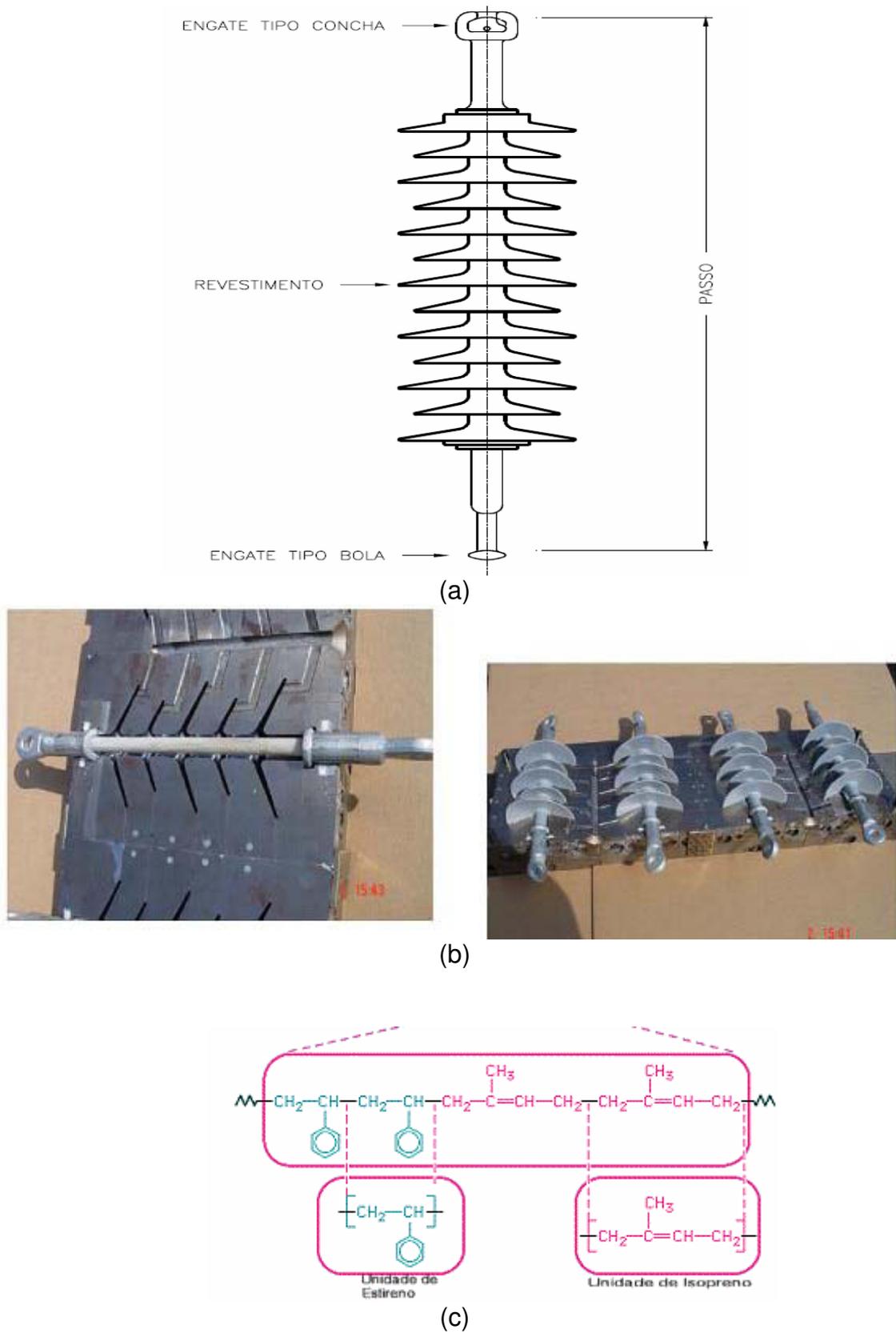


FIGURA 4 – (a) Modelo de isolador, (b) método de produção de polímeros por vulcanização, (c) modelo estrutural polimérico

Os isoladores poliméricos são recobertos por uma camada de materiais poliméricos, dentre os mais utilizados em linhas de transmissão estão o silicone, etileno-propileno-dieno (EPDM).

O estudo do tempo de vida dos materiais poliméricos é feito utilizando envelhecimento térmico acelerado; as taxas de degradação são determinadas a elevadas temperaturas e esses dados são usados para extrapolar a performance do material em condições a temperatura ambiente .

Esta abordagem é baseada no pressuposto de que a degradação envolve um processo químico ativado cuja razão é proporcional a $\exp(E / RT)$, onde, uma vez que E seja um valor obtido empiricamente a partir da aceleração em resultados experimentais a altas temperaturas, é usado para fazer extrapolação para temperaturas mais baixas com o pressuposto que se mantém constante ao longo da extrapolação em uma faixa de temperatura .

A Figura 5 apresenta o comportamento de corpos de prova submetidos ao ensaio mecânico (tração) após envelhecimento a diferentes temperaturas (25, 85, 120 e 140°C). A amostra envelhecida a 25°C apresenta deformação na ruptura com valores mais elevados que as mantas envelhecidas nas demais temperaturas. Normalmente considera-se que o final do tempo de vida de um material ocorre quando 50% de seu valor inicial é atingido, pois abaixo deste valor o material começa a apresentar perdas funcionais significativas.

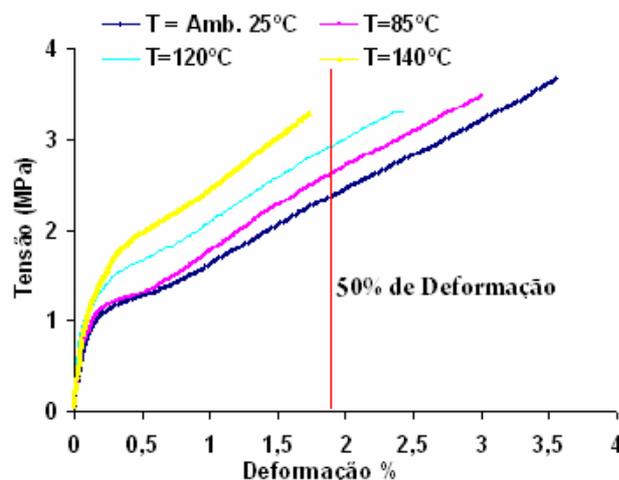


FIGURA 5- Comportamento de ensaios de polímeros submetidos a tração.

O silicone é um material altamente inerte e muito resistente à decomposição por calor água e agentes químicos, são ótimos isoladores elétricos e podem ser sintetizados de inúmeras formas.

Na Tabela abaixo vemos os índices de degradação de mantas de silicone envelhecidas por degradação térmica.

Gerando assim uma variada gama de aplicações. O silicone é fabricado a partir da sílica e do cloreto de metila podendo ou não serem derivados do petróleo. O tipo principal constitui de cadeias lineares de átomos de silício e oxigênio alternados (siloxanas) com radicais metila ligados aos átomos de silício.

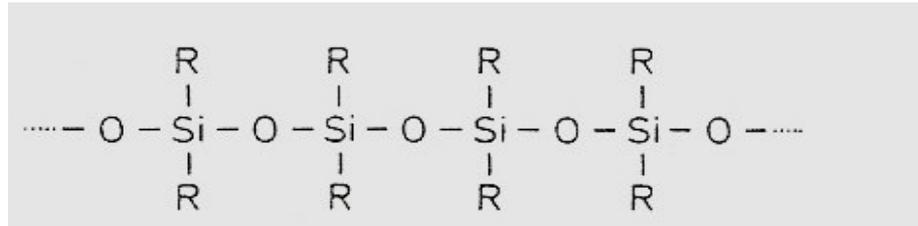


FIGURA 5 – Exemplo de molécula de borracha de silicone.

O EPDM (etileno-propileno-dieno) é uma borracha sintética feita de etileno propileno e dieno, variando as concentrações dos produtos é possível se obter materiais com uma arquitetura molecular de alta confiabilidade e precisão.

Ele esta cada vez mais presente nos isoladores, pois possui muitas propriedade úteis como: resistência ao ozônio e à intempérie; muito boa resistência ao calor e à oxidação; boa resistência a alguns agentes químicos; boa flexibilidade a baixas temperaturas (dependendo do teor em etileno); muito boas propriedades de isolamento elétrico; muito fácil processamento (misturação, extrusão ou injeção),

Isto torna o EPDM uma ótima opção para ser utilizado na fabricação de isoladores pois constitui muitas características que permitem estes isoladores terem uma longa vida útil.

Veja na Figura abaixo a cadeia típica do EPDM.

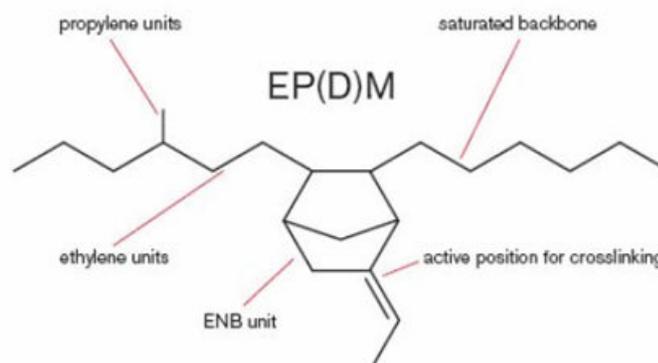


FIGURA 6 - Molécula de EPDM.

Ensaio: dentre os ensaios em que os são submetidos os isoladores poliméricos temos os ensaios de tração, rigidez, dureza, compressão, impacto, e fadiga. O método mais comuns para a realização destes ensaios são o método de Young.

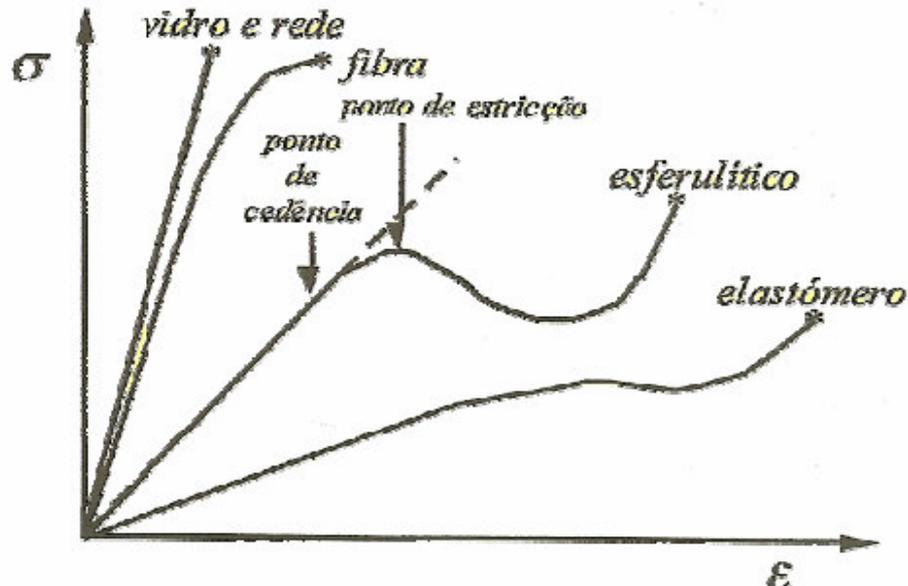


Figura 7 - Comportamento típico de polímeros aos ensaios de tração.

TABELA 3- A (ensaios de tração para isoladores poliméricos tipo bastão de 138kV fabricados por galvanização) **B** (ensaio de tensão elétrica para isoladores poliméricos tipo bastão de 138kV fabricados por galvanização).

(Os valores são mínimos)	Classe 80	Classe 120
Carga mecânica nominal(CMN)	80kN	120kN
Carga mecânica de rotina(CMR)	40kN	60kN

		Suspensão	Ancoragem
Tensão disruptiva à frequência industrial	a seco	485 kV	620 kV
	sob chuva	335 kV	440 kV
Tensão crítica de impulso atmosférico 1,2x50 μS	polaridade positiva	775 kV	995 kV
	polaridade negativa	760 kV	995 kV

(B)

Os isoladores poliméricos são empregados em sua maioria para isolação de linhas de transmissão de altas ou baixas tensões, mas podem ter inúmeras aplicações em engenharia elétrica. (ver tópico de problemas ambientais e avanços tecnológicos).

Na Tabela abaixo temos uma comparação entre a rigidez elétrica de alguns materiais incluindo polímeros e outros tipos de materiais.

TABELA 4- Rigidez elétrica de alguns materiais.

Dielétrico	Kv/mm
ar seco	3
poliestireno	20
baquelite	14
estealite	8 a 14
lucite	16
teflon	20
ebonite	30
óleo mineral	15 a 280
vidro	80
porcelana	100
parafina	140 a 280
papel impregnado	20
mica	60

TABELA 5- Rigidez elétrica ao impulso elétrico.

PVC	50
EPR	53
borracha butílica	60
polietileno reticulado	65

8.DESVANTAGENS ENTRE OS TIPOS DE ISOLADORES

Isoladores poliméricos exibem inúmeras vantagens sobre outros tipos de isoladores e sem dúvida a maior delas é o peso. Materiais poliméricos apresentam uma massa muito pequena em comparação com cerâmicas e vidros, os quais são mais comuns isoladores, essa aparente “leveza” dos isoladores poliméricos possibilita uma redução significativa no peso das grandes torres das linhas de transmissão. Gerando assim uma economia, pois estas torres têm um grande crescimento de custo conforme aumenta seu tamanho.

No entanto, a grande desvantagem destes isoladores são as dificuldades de se observar os defeitos nos mesmos. Em isoladores cerâmicos e vítreos se observa claramente onde estão as rachaduras e as áreas que sofreram corrosão. Para poder detectar e prever os defeitos em isoladores poliméricos são usadas técnicas como a tomografia digital, radiografia digital e raios x.

Se por defeitos de produção ou desgaste com o tempo dentro do isolador se formam bolhas ou vazios, estas podem gerar descargas internas por conta dos intensos campos magnéticos e elétricos em que são submetidos os isoladores nas linhas de alta tensão. Estas descargas se constantes formam caminhos condutores no polímero conhecidos como “arborescência elétrica” o que leva o material ao

rompimento e até uma falha na transmissão de energia. Afetando diretamente os índices de qualidade de distribuição de energia (comentados na introdução deste trabalho “PIRKARZ H. A.; Determinação do volume de vazios em isoladores poliméricos por tomografia digital de raios X”).

Utilizando os processos de obtenção de imagens citados anteriormente e a identificação de padrões dentre os isoladores possibilita a obtenção de imagens que após serem tratadas geram formas nítidas em que é possível verificar onde que se encontram as bolhas ou vazios inseridos nos isoladores.

Estes processos evitam a comercialização de isoladores que contenham defeitos internos e possibilita prever os desgastes internos e prever a vida útil de vários tipos de isoladores poliméricos.

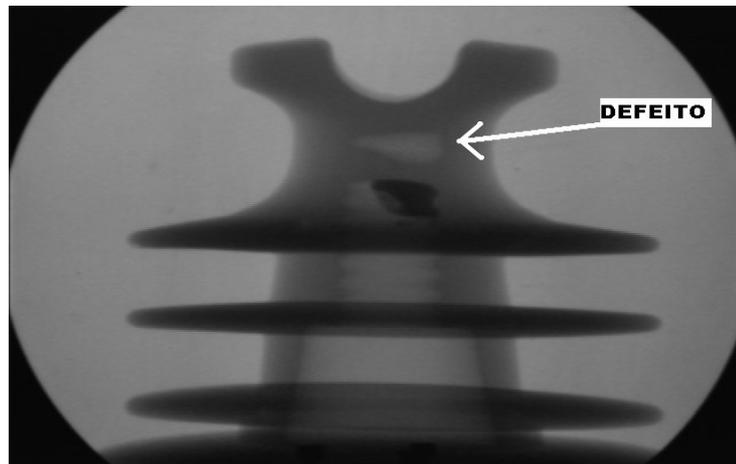


FIGURA 7 - Imagem de radiografia digital para identificação de vazios.

TABELA 3 – Vantagens e desvantagens entre os isoladores.

	Vantagens	Limitações
Porcelana	<ul style="list-style-type: none"> • Longo histórico de uso • Performance conhecida • Fácil intercambiabilidade • Redução com as desapropiações com os isoladores pilares. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso • Defeitos ocultos • Susceptível ao vandalismo • Técnicas de detecção de falhas em linhas ainda não 100% confiáveis.
Vidro	<ul style="list-style-type: none"> • Longo histórico de uso • Performance conhecida • Fácil intercambiabilidade • Defeitos facilmente visualizáveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Percepção negativa quanto a fragilidade • Peso • Atrativo para o vandalismo
Poliméricos	<ul style="list-style-type: none"> • Redução com as desapropiações com os isoladores pilares. • Boa performance sob contaminação • São leves • Percepção de que são mais difíceis de serem danificados por vandalismo ou manuseio. • Facilidade de instalação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fratura frágil do núcleo ainda é um ponto questionado • Efeito do tempo no processo de envelhecimento • Menor intercambiabilidade • Pode ter defeitos ocultos • Técnicas de manutenção em linha viva não totalmente desenvolvidas

9. PROBLEMAS AMBIENTAIS E EVOLUÇÃO DE ISOLADORES POLIMÉRICOS

Os isoladores polimérico não apresentam um sério risco para a natureza mas também não contribuem para a reciclagem completa dos materiais poliméricos.

Lembrando que os polímeros são em sua maioria inertes e como as camadas de polímeros nos isoladores são em sua maioria de silício e de polímeros do tipo elastômeros estes são materiais não totalmente recicláveis pois apresentam características de rompimento antes da fusão. Isso se torna um problema pois técnicas mais avançadas tem que ser aplicadas para a recuperação das estruturas que compõem os polímeros para a reutilização destes materiais.

Se deixados na natureza eles demoram centenas de anos para se decompor pois são altamente inertes o que levaria um acúmulo de material não biodegradável na natureza.

Isoladores já são um avanço entre seus rivais pois apresentam grandes vantagens como o peso e maior resistência a tração, no entanto os pesquisadores apostam em uma grande evolução nos tipos de silicone para apresentarem uma melhor resistência ao tempo e um material que seria uma borracha auto limpante para evitar o acúmulo de materiais que podem danificar os polímeros como a poluição.

Estes são os avanços no campo de isoladores, mas em diversas áreas os polímeros se destacam cada vez mais, existem pesquisas para a produção de polímeros emissores de luz para fabricação de monitores, como músculos artificiais de polímeros, e também polímeros para células de combustível.

10. CONCLUSÃO

Os isoladores poliméricos com alto grau de confiabilidade e vantagens estão se sobressaindo em relação aos modelos vítreos e cerâmicos. Sendo estes uma evolução no quadro geral de isoladores, possibilitando uma melhora nos índices de qualidade de transmissão de energia elétrica, possibilitando também uma redução de gastos em linhas de transmissão e em subestações de transformações de energia elétrica.

Mesmo com as desvantagens apresentadas a evolução de técnicas como a tomografia digital possibilita uma confiabilidade maior na produção e prevenção de falhas em isoladores.

Ainda assim, os materiais poliméricos atuam em vários setores de ciência e inovações tecnológicas viabilizando para o futuro uma aplicação muito maior destes materiais.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER JR., W. D. **Materials science and engineering**: an introduction. 4. ed. New York: J. Wiley & Sons, 1997.

VAN VLACK, L. H. **Elements of materials science and engineering**. 4. ed. Addison-Wesley, 1980.

IONE P. C.; PIAZZA F.; TOMOIOKA J. **Caracterização de isoladores poliméricos envelhecidos artificialmente**. Disponível em: <www.lactec.org.br/OInstituto/biblio.asp>. Acesso em: 8 mar. 2009.

ANGELINI, J. M. G.; ARAGÃO B. J. G. **Estudo da degradação térmica de materiais poliméricos utilizados na construção de pára-raios.** Disponível em: www.cbecimat.com.br/Trab_Completos/402-007.doc . Acesso em: 6 mar. 2009

PIRKARZ H. A.; **Determinação do volume de vazios em isoladores poliméricos por tomografia digital de raios X.** Disponível em: <http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/handle/1884/8059>. Acesso em: 5 mar. 2009

GODOI W. C.; SWINKA F. V.; SILVA R. R. **Detecção de defeitos em isoladores poliméricos por radiografia digital.** Disponível em: <http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/1884/2145/1/diss.pdf>. Acesso em: 8 mar. 2009

ISOLADORES CERÂMICOS

Álvaro Leonel Rodrigues da Rosa Junior

1. INTRODUÇÃO

Uma definição básica sobre isoladores é dizer que ele isola algo de alguma coisa, contudo essa é uma definição muito generalizada, o trabalho em si consiste em isoladores elétricos, e ainda, trata especificamente de um único tipo, os isoladores cerâmicos.

Um isolador elétrico tem a principal finalidade de isolar um corpo condutor de outro corpo qualquer, possuindo um grande valor de resistência elétrica e poucos elétrons livres em sua estrutura (à temperatura ambiente), não permitindo a livre circulação de cargas elétricas, portanto, atua inversamente ao condutor elétrico. Simplificando, é totalmente o contrário de um corpo condutor que possui muitos elétrons livres em sua estrutura (à temperatura ambiente).

Existem muitos tipos de materiais isoladores, os principais são os vidros, cerâmicos e poliméricos. Tratando especificamente sobre isoladores cerâmicos eles se destacam por terem alta resistência mecânica, não serem porosos e possuírem alta capacidade de isolação. Um bom exemplo de material cerâmico que é comumente utilizado é a porcelana. Por mais que os diferentes materiais possuam características e aplicações diferentes entre si, todos eles devem possuir a confiabilidade dos sistemas elétricos.

2. HISTÓRICO

Os primeiros isoladores apareceram nos sistemas elétricos de linhas de telégrafos. No caso dos isoladores cerâmicos, uma das primeiras empresas que os produziram estava no Reino Unido com Stiff Doulton, mais tarde, perto do ano de 1840, Joseph Bourn e em 1868 por Bullers. Louis A. Cauvet em 1865 obteve a patente por produzir isoladores com o orifício rosqueado. Mais tarde, com a invenção de suspensão para isoladores tornou-se possível a transmissão de alta tensão.

No Brasil, em 11 de maio de 1852, Guilherme Schuch, nascido na mesma época que o segundo imperador brasileiro, formado em engenharia na escola

politécnica de Viena, fundou uma repartição chamada Telégrafo Nacional, portanto, instalando os primeiros fios telegráficos no país. Mais tarde, devido ao clima úmido e quente nos trópicos os isoladores foram rapidamente se deteriorando, com isso, o barão de Capanema, assim chamado Guilherme Schuch, inventou um novo tipo de isolador para linhas telegráficas terrestres. Esse isolador era basicamente feito todo de vidro, porcelana, ebonite entre outros materiais, contudo, o seu diferencial é que não havia nenhuma peça metálica. Capanema recebeu em seu nome a patente e o invento foi divulgado por toda a Europa. Capanema foi um dos maiores engenheiros, da época, no Brasil.

As cerâmicas são comumente divididas em dois grandes grupos:

Cerâmica Tradicional - Inclui cerâmica de revestimentos, como ladrilhos, azulejos e também potes, vasos, tijolos e outros objetos que não tem requisitos tão elevados se comparados ao grupo seguinte.

Cerâmica Avançada, ou de engenharia - Geralmente são materiais com solicitações maiores e obtidos a partir de matéria prima mais pura. Alguns exemplos são substratos para chips de microprocessadores, cordierita como suporte para catalisador automotivo, ferramentas de corte para usinagem, tijolos refratários para fornos.

Os materiais cerâmicos também podem ser classificados de outras maneiras, como:

- Composição química: Óxidos, Carbeto, Nitreto e Oxinitreto.
- Origem Mineralógica: Quartzo, bauxita, mullita, apatita, zircônia, entre outros.
- Método de moldagem: Compressão isostática, colagem por barbotina (slip casting), extrusão e moldagem por injeção, calandragem entre outros.

As peças de cerâmica mais antigas são conhecidas por arqueólogos foram encontradas na Tchecoslováquia, datando de 24,500 a.C. Outras importantes peças cerâmicas foram encontradas no Japão, na área ocupada pela cultura Jomon há cerca de oito mil anos, talvez mais. Peças assim também foram encontradas no Brasil na região da Floresta Amazônica com a mesma idade. A capacidade da argila de ser moldada quando misturada em proporção correta de água, e de endurecer após a queima, permitiu que ela fosse destinada ao armazenamento de grãos ou líquidos, que evoluíram posteriormente para artigos mais elaborados, com bocais e alças, imagens em relevo, ou com pinturas vivas que possivelmente passaram a ser considerados objetos de decoração. Em outros lugares como na China e no Egito, a

cerâmica tem cerca de 5000 anos. Com o tempo, a cerâmica foi evoluindo e ganhando os nossos dias, mas não sem contar com os esforços dos gregos, romanos, chineses, ingleses, italianos, franceses, alemães e norte-americanos.

A esmaltação industrial teve início por volta de 1830, na Europa Central. Após a segunda Guerra Mundial, houve um grande aumento da produção de revestimento cerâmico, por consequência do desenvolvimento de novas técnicas de produção. Isso fez com que os preços começassem a baixar, possibilitando a uma faixa maior de classes sociais a condição de adquirir o produto cerâmico.

Atualmente, o uso da cerâmica não se restringe apenas aos tijolos refratários, mas também em aplicações aeroespaciais e de tecnologia de ponta, como na blindagem térmica de ônibus espaciais, na produção de nanofilmes, sensores para detectar gases tóxicos, varistores de redes elétricas entre outros.

3. TEORIA BÁSICA

Normalmente os materiais cerâmicos são ótimos isoladores elétricos e na maioria desses materiais sua resistividade (ρ) é maior que $10^{14} \Omega \cdot m$. Alguns exemplos de matérias primas cerâmicas são :

- Óxido de Alumínio (Al_2O_3)
- Mulita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)
- Óxido de Berílio (BeO)
- Nitreto de Alumínio (AlN)
- Silicato de Magnésio ($2MgO \cdot SiO_2$)

Em um isolante elétrico a lacuna de energia entre a parte inferior da banda de condução e a parte superior da banda de valência tem que ser grande, assim caracterizando um isolante. Chamamos essa lacuna de gap.

Vendo a Figura 1, observamos o diagrama de energia de bandas para o MgO .

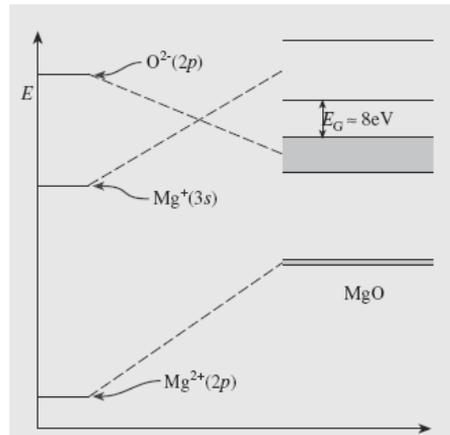


FIGURA 1 – Diagrama de energia de bandas do MgO.

Apenas ressaltando, que os materiais cerâmicos também são bons isoladores de calor, esse grupo tem o nome de refratários e permite a construção de fornos siderúrgicos.

Os materiais cerâmicos podem apresentar várias propriedades da composição química, dependendo da aplicação do material ela pode ter resistência à corrosão devido à umidade, resistência mecânica, resistência elétrica, resistência térmica. Ainda possuem algumas propriedades que são muito úteis dependendo do lugar onde serão aplicados, tais como:

- Fácil modelagem em várias formas
- Baixa perda dielétrica
- Baixo coeficiente de dilatação térmica
- Ótima resistência a choques térmicos
- Alta flexibilidade

Portanto a utilização de materiais cerâmicos possui um campo vasto, algumas das áreas de aplicação podem ser, as indústrias petrolíferas, na área de telecomunicações, agricultura, redes elétricas entre outras.

Entre cerâmicas existem algumas subdivisões, elas podem ser caracterizadas segundo suas matérias primas, as aplicações e até ao seu local de aplicação. A Tabela 1 mostrará alguns exemplos.

TABELA 1 – Classificação dos materiais cerâmicos.

	Cerâmica Vermelha	Placas Cerâmicas	Cerâmica Branca	Materiais Refratários
Característica	Compreende os materiais avermelhados utilizados na construção civil e para adornos.	Compreende os materiais em forma de placas utilizados para revestimento de paredes, pisos e piscinas.	São materiais utilizados mais para estética, por terem a cor branca.	Essa divisão consiste na resistência a altas temperaturas, mudanças bruscas de temperatura, esforços mecânicos, ataques químicos etc.
Exemplos	Tijolo, telha, argila.	Azulejo, piso,	Sanitários, pratos, isoladores	Sílica, mulita, grafita, zirconita

Para uma melhor explicação sobre a estrutura química dos materiais cerâmicos uma seqüência de tópicos será exposta:

- Compostas por pelo menos dois elementos
- Compostos AX , A_mX_p com m e/ou $p \geq 1$, $A_mB_nX_p$
- Estruturas mais complexas que metais
- Ligações puramente iônicas até totalmente covalente
- Ligação predominante iônica: estruturas composta por íons (cátions – positivos e ânions – negativos)
- Número de Coordenação (número de ânions vizinhos mais próximos para um cátion) está relacionado com a razão: r_C/r_A

Exemplo:

Estrutura do cloreto de sódio (AX)

- Número de coordenação é 6 para ambos tipos de íons (cátions – e ânions +), r_C/r_a está entre 0,414 – 0,732
- ConFiguração dos ânions tipo CFC com um cátion no centro do cubo e outro localizado no centro de cada uma das arestas do cubo
- Outra equivalente seria com os cátions centrados nas faces, assim a estrutura é composta por duas redes cristalina CFC que se interpenetram, uma composta por cátions e outra por ânions.

- Mesma estrutura: MgO, MnS, LiF, FeO.

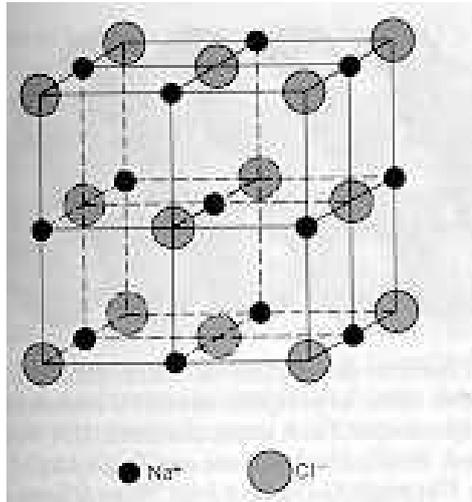


Figura representando a estrutura (Na⁺Cl⁻)

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC), um levantamento foi feito, em 2003, do número de indústrias de isoladores cerâmicos, brasileiras, com suas respectivas produções e seus faturamentos. Segue Tabela 2, para a visualização dos dados.

TABELA 2 – Indústrias de Isoladores

ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA	
<i>Fonte: Dados levantados pela ABC referente a 2003</i>	
Número de Empresas	6
Número de Fábricas	9
Capacidade Instalada (t/ano)	44.000
Produção (t/ano)	28.000
Faturamento (US\$ milhões)	39
Exportação (US\$ milhões)	13
Importação (US\$ milhões)	1,2
Empregos Diretos	1.700

Fonte: http://www.abceram.org.br/asp/abc_285.asp

A cerâmica ainda é muito utilizada, contudo, no ramo de isoladores ela vem perdendo espaço para materiais como polímeros que, mesmo sendo menos duradouros, tomam esse espaço devido a serem mais leves, mais fáceis de obter matéria prima, mais resistente à corrosão, entre outras propriedades que são facilmente notadas.

4. MATÉRIA PRIMA E PROCESSAMENTO

4.1 Matéria Prima

Dentro da área da matéria prima existem duas divisões, as matérias primas naturais e as sintéticas. As naturais, como o próprio nome diz, são extraídas da natureza, no máximo passaram por algum processo para a retirada de impurezas, mais tudo isso sem ocorrer modificação na sua composição química.

As sintéticas são aquelas que individualmente ou misturadas, passaram por algum processo térmico ou químico. Dentre os processos possíveis estão, a calcinação, a sinterização e a fusão. Segue a Tabela 3 com alguns exemplos de matérias primas.

TABELA 3 – Matérias Primas

Naturais	Sintéticas
Algamatolito, Andalusita, Argila, Bauxito, Calcita, Cianita, Cromita, Dolomita, Feldspato, Grafita, Magnesita, Pirofilita, Quartzo, Silimanita, Talco Zirconita.	Alumina, Alumina calcinada para cerâmica, Alumina tabular, Carbetto de silício, Magnésia, Mulita sintética, Óxido de zinco, Sílica ativa.

Para isoladores cerâmicos, as principais matérias primas utilizadas no processo são, o quartzo, feldspato, argila, caulim e alumina.

5. Processamento – Isoladores Santana

1. As matérias primas, citadas anteriormente, são selecionadas e armazenadas em silos (Quartzo, feldspato, argila, caulim e alumina).
2. Ocorre moagem, dosagem e mistura das matérias primas para a formação da massa de porcelana. Como nessa etapa a massa é líquida, o conteúdo é armazenado em tanques. Nesse processo são adquiridos dois tipos de porcelana, a de quartzo (médias resistências) e a de alumina (altas resistências).
3. Retira-se a água da massa para que se possa modela conforme a necessidade.
4. Agora a massa sem água passa por um processo de moldagem a vácuo que tem como objetivo homogeneizar a massa e retirar o ar para que se obtenha uma maior qualidade.

5. Agora a massa resultante pode passar por dois processos diferentes, a extrusão/torneação ou extrusão/calibração. Em qualquer um dos casos a massa atingirá o formato do isolador.
6. Seguindo, o isolador passa por um processo de secagem e posteriormente por esmaltação. O esmalte é necessário para facilitar a limpeza pela chuva.
7. As peças são sinterizadas à 1300°C para que se obtenha a porcelana com todas as características desejadas. (Não porosidade, resistências mecânica e dielétrica).
8. São feitos todos os ensaios necessários para a verificação de algum possível defeito em algum isolador.



FIGURA 2 – Isolador Cerâmico

Terminado todos os ensaios necessários, os isoladores terão que obedecer à seguinte Tabela.

TABELA 4 – Valores Médios nos ensaios

Propriedades	Valores médios (Porcelana Elétrica)
Massa Específica	2,3 a 2,5 (g/cm ³)
Resistência à tração	600 a 1000 (kgf/cm ²)
Resistência à compressão	6000 a 8600 (kgf/cm ²)
Módulo de elasticidade	67 a 102 (kgf/cm ²)
Condutividade Térmica	2,2 a 2,5 (kcal . h ⁻¹ . M ⁻¹ . °C ⁻¹)
Coefficiente de expansão térmica (+20 a +100 graus Celsius)	(3,5 a 9,1) . 10 ⁻⁶ / °C
Permissividade Relativa (50hz – 60hz) 20° C	5,9 a 6,7
Fator de Dissipação	(20 a 56) . 10 ⁻³
Rigidez Dielétrica	36 a 45 (kV/mm)
Resistividade Volumétrica (20° C)	10 ¹² a 10 ¹⁴ (Ω.cm)

Fonte : <http://www.abceram.org.com.br>

Seguindo todos os processos termina-se um isolador, mais, existem vários tipos de isoladores, cada um com uma função e aplicação diferente do outro. Eles podem variar em composição, a qual pode modificar em alguma parte os processos anteriores, pois, este foi descrito para um isolador de porcelana que é o mais utilizado, também pode modificar em tamanho dependendo do local da aplicação.

Para a função de distribuição os isoladores podem ser do tipo roldana, pino, disco, chaves, bastão e pilar. Para transmissão podem ser disco, bastão e pilar. Para subestações podemos utilizar os tipos pedestal, suporte multicorpo e suporte núcleo sólido.

A seguir Figuras de alguns tipos de resistores.

**FIGURA 3 – Isolador tipo disco.****FIGURA 4 – Isolador tipo pino.**



FIGURA 5 – Isolador tipo pedestal

A seguir uma Tabela sobre uma estimativa da porcentagem de isoladores cerâmicos em alguns países.

TABELA 5 – Isoladores cerâmicos no Mundo

Países	%
Estados Unidos	10,2
China	7,9
Alemanha	5,5
Índia	5,5
Japão	4,1
Itália	1,9
Brasil	1,9
França	1,7
Coréia	1,4
Áustria	1,4

Fonte : <http://www.abceram.org.com.br>

6. APLICAÇÕES, VANTAGENS E DESVANTAGENS

As aplicações para isoladores do tipo cerâmico são muito variadas. No sistema elétrico eles podem ser usados na transmissão de alta tensão, resistores podem ser feitos de porcelana. Eles também podem ser usados fora da elétrica, como em fornos siderúrgicos, telhas, tijolos, dissipadores de calor em placas de computador, entre outras e muitas aplicações.

Para os fabricantes de isoladores cerâmicos há algumas complicações como:

- Obter matérias primas adequadas para os processos de fabricação.
- Adequar os processos para isoladores de grandes dimensões e em demandas cíclicas.
- Reduzir o tempo de fabricação.
- Baixar os custos e manter o mercado, já que surgem cada vez mais novos materiais.

TABELA 6 – Vantagens e Desvantagens.

	Vantagens	Desvantagens
Porcelana	Duradouro Desempenho conhecido Fácil intercambialidade ¹	Peso Defeitos Ocultos Suscetível ao vandalismo Ainda não se consegue detectar falhas com 100%
Vidros	Duradouro Desempenho Conhecido Fácil intercambialidade Fácil visualização de erros	Frágil Peso Suscetível ao vandalismo
Poliméricos	Bom desempenho contra contaminação. Leves Fácil instalação Mais resistentes ao vandalismo.	Não dura tanto quanto os outros. Menor intercambialidade. Defeitos Ocultos. Difícil Manutenção.

Fonte : <http://www.isoladores-santana.com.br>

7. PROBLEMAS AMBIENTAIS E AVANÇOS

O problema ambiental mais encontrado com esses tipos de isoladores é a deteriorização dos isoladores em áreas muito úmidas e com muito calor, o tempo de degradação da porcelana, cerâmica mais utilizada em isoladores, é alto.

Também há o problema de resíduos em cerâmica vermelha nos fornos siderúrgicos, pois, essa cerâmica absorve com muita facilidade os resíduos industriais poluentes.

O avanço dos materiais cerâmicos é denominado “Cerâmica Avançada”, hoje em dia é muito utilizada em aparelhos eletrônicos, e em outras tecnologias, pois, para o ramo de isoladores aos poucos estão sendo substituídos por novos materiais. Como exemplos de matérias primas dessa nova cerâmica citam-se:

- Alumina
- Esteatita
- Nitreto de Silício
- Zircônia
- ZTA

¹ Intercambialidade : Troca de um produto por outro (Engenharia).

Uma das últimas inovações envolvendo cerâmicas foi a “cerâmica nanoestruturada” que, segundo a cientista norte-americana Izabela Szlufarska, está no topo da escala de materiais com alta dureza. Essa cerâmica é tão dura quanto diamante e tão maleável quanto metal.

Sem dúvida alguma é um avanço gigantesco, contudo, alguns problemas como a dificuldade da obtenção de matéria prima, processo de fabricação lento e pesado, ainda não foram resolvidos, espera-se que, mesmo ainda tendo esses problemas, essa nova cerâmica se sobressaia em relação aos outros materiais, devido às suas características únicas.

8. CONCLUSÃO

O mercado se diversifica cada vez mais e com isso novas tecnologias são incorporadas ao nosso dia-a-dia. Com o crescente aumento dessas tecnologias os materiais, obrigatoriamente, passam por um processo de evolução e reciclagem, podendo assim, permanecer no mercado.

Com o material cerâmico não foi diferente, e as novas cerâmicas estão incorporadas ao nosso estilo de vida, assim como, os outros tipos de materiais. Isoladores do tipo cerâmico ainda são muito utilizados por causa da suas resistências mecânica, dielétrica e também pelo fato de durar bastante tempo, mais isso não deixa seus fabricantes tranquilos, visto que, a velocidade com que surgem novos materiais é bastante grande, assim, não permitindo descanso aos engenheiros da área.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER JR., W. D. **Materials science and engineering**. 4. ed. New York: J. Wiley & Sons, 1997.

CARTER, C. Barry; NORTON, M. Grant. **Ceramic materials science and engineering**. Springer, 2007.

Certec Advanced Ceramics. 2006. Nova Cerâmica. Disponível em :<<http://www.ceramicacertec.com.br/>>. Acesso em : 05/03/2009.

Isoladores Santana S/A. 1944. Produção. Disponível em : <<http://www.isoladores-santana.com.br/santana-nova/nav.asp>>. Acesso em : 07/03/2009.

Wikipédia, a enciclopédia livre. Isolantes Elétricos. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Isolante_el%C3%A9trico>. Acesso em 08/03/2009.

Unicamp, Universidade de Campinas. História dos Isoladores. Disponível em: <<http://www.inova.unicamp.br/inventabrasil/capanem.htm>>. Acesso em: 08/03/2009.

Inovação tecnológica. Nova cerâmica tem dureza de diamante e maleabilidade de um metal. Disponível em : <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010160050808>> Acesso em: 09/03/2009.

MATERIAIS ISOLANTES

Edson Andreoli

1. INTRODUÇÃO

A idéia da realização deste trabalho surgiu da curiosidade de saber princípios básicos a respeito de quais e como são empregados os materiais isolantes no dia-a-dia. Os isolantes, também conhecidos como dielétricos, são materiais utilizados no confinamento de energia elétrica, seja para fins de segurança (isolação) como no armazenamento de energia. Ao contrário dos materiais condutores e semicondutores, nos materiais isolantes a presença de campo elétrico (aplicação de tensão), provoca o deslocamento das cargas sem liberá-las dos átomos ou moléculas. A consequência é a formação de dipólos elétricos. Portanto, quando um isolante é submetido a um campo elétrico ele sofre polarização. Procuraram-se condensar conceitos, pertinentes ao assunto “isolantes” (dielétricos) para a orientação do leitor durante análise deste trabalho. Espera-se dessa maneira facilitar o aprendizado dos leitores quanto a utilização e aplicação de isolantes.

2. DIELÉTRICOS EM MEIO MATERIAL

Quando se trata de campos eletrostáticos, o meio no qual os mesmos existem deverá ter resistividade muito alta, ou seja, deverá opor-se tanto quanto possível, à passagem de corrente elétrica de condução, motivo pelo qual recebe o nome de dielétrico. O material que o constitui é designado por isolante.

O papel dos dielétricos na eletrotécnica é muito importante e tem dois aspectos:

- Realizam o isolamento entre os condutores, entre estes e a massa ou a terra, ou, ainda, entre eles e qualquer outra massa metálica existente na sua vizinhança;
- Modificam, em proporções importantes, o valor do campo elétrico existente em determinado local.

O processo principal, característico para qualquer dielétrico, que se produz quando sobre ele atua uma tensão elétrica, é a polarização, ou seja, o deslocamento limitado de cargas ou a orientação das moléculas dipolares.

Os fenômenos devidos a polarização de um dielétrico podem ser julgados através o valor da constante dielétrica e pelos ângulos de perdas dielétricas, se a polarização vem acompanhada de dissipação de energia que provoca o aquecimento do dielétrico. Neste aquecimento tomam parte as poucas cargas livres que existem no material, as quais determinam o aparecimento de uma corrente de fuga, que passa através do dielétrico e sua superfície. A maioria dos dielétricos se caracteriza por um deslocamento elétrico das cargas como uma função linear do campo elétrico que se cria no dielétrico.

Todo dielétrico inserido em um circuito elétrico pode ser considerado como um capacitor de capacidade determinada onde C é a capacitância do capacitor e U a tensão aplicada. A quantidade de carga Q , para um dado valor da tensão aplicada, é a soma de duas componentes: Q_0 , que é a carga que existiria se os eletrodos estivessem separados pelo vácuo, e Q , que é devida a polarização do dielétrico que na verdade separa os tais eletrodos.

Uma das características mais importantes de um dielétrico é sua permissividade relativa ou constante dielétrica esta magnitude é razão entre a carga Q , obtida com uma determinada tensão no capacitor que contém um dado dielétrico e a carga Q_0 , que poderia obter-se com um capacitor das mesmas dimensões, com a mesma tensão, se entre os eletrodos existisse vácuo.

A permissividade relativa de qualquer substância dielétrica é maior que a unidade. A constante dielétrica e também pode ser determinada pela razão entre a capacitância de um capacitor com o dado dielétrico e a capacitância de outro capacitor com as mesmas dimensões cujo dielétrico seja o vácuo.

Voltando ao estudo do fenômeno da polarização, devem-se distinguir os tipos fundamentais de polarização:

Ao primeiro tipo de polarização pertencem as polarizações eletrônica e iônica que ocorre de um modo praticamente instantâneo sob a ação de um campo elétrico e sem dissipação de energia, se caracterizando por um deslocamento elástico de íons ou elétrons ligados ao núcleo de um átomo. A polarização eletrônica diminui com o aumento da temperatura, devido a dilatação do dielétrico e conseqüente diminuição do número de partículas por unidade de volume. Já a polarização iônica

é intensificada com o aumento da temperatura, uma vez que se debilitam as forças elásticas interiônicas quando aumentam as distâncias entre os íons quando o corpo se dilata;

A polarização dipolar difere da eletrônica e da iônica com relação ao movimento térmico das partículas. As moléculas dipolares, que se encontram em movimento térmico caótico, se orientam parcialmente pela ação do campo, o qual é a causa da polarização. A polarização dipolar é possível se as forças moleculares não impedirem os dipolos de se orientarem de acordo com o campo. Ao aumentar a temperatura se enfraquecem as forças moleculares e diminui a viscosidade da substância, de forma que se intensifica a polarização dipolar. No entanto, ao mesmo tempo aumenta a energia dos movimentos térmicos das moléculas, o que faz que diminua a influência orientadora do campo. De acordo com isto, a polarização dipolar aumenta a princípio com o aumento da temperatura, enquanto que o enfraquecimento das forças moleculares influencia mais que a intensificação do movimento térmico caótico. Depois, quando esta última se intensifica, a polarização dipolar cai à medida que aumenta a temperatura;

A polarização estrutural aparece apenas em corpos amorfos e em sólidos cristalinos polares como no caso do vidro, onde um corpo amorfo é parcialmente constituído de partículas de íons. A polarização estrutural vem a ser a orientação de estruturas complexas de material, perante a ação de um campo externo, aparecendo devido a um deslocamento de íons e dipolos, na presença de aquecimento devido a perdas Joule. Quanto a sua dependência com a temperatura têm comportamento semelhante à polarização dipolar. As particularidades da polarização permitem dividir todos os dielétricos em vários grupos.

Ao primeiro grupo podem pertencer os dielétricos que possuem somente a polarização eletrônica, por exemplo, as substâncias sólidas não polares ou debilmente polares em estado cristalino ou amorfo (parafina, enxofre, poliestireno), assim como os líquidos e gases não polares ou debilmente polares (benzeno, hidrogênio e outros).

Ao segundo grupo pertencem os dielétricos que possuem ao mesmo tempo polarização eletrônica e dipolar. São estas as substâncias polares (dipolares) orgânicas, semilíquidas e sólidas (algumas resinas, celulose, alguns hidrocarbonetos cloretados, etc).

Ao terceiro grupo pertencem os dielétricos inorgânicos sólidos com polarização eletrônica, iônica e íon-eletrônica dipolar. Este grupo pode ser dividido no subgrupo 1) com polarização eletrônica e iônica ao qual pertencem principalmente as substâncias cristalinas com empacotamento denso de íons (quartzo, mica, sal e óxido de alumínio) e o subgrupo 2) com polarização eletrônica, iônica de dipolar ao qual pertencem os materiais que contem fase vítrea (porcelana) e os dielétricos cristalinos com empacotamento não denso.

A um quarto grupo pertencem os componentes ferroelétricos, que se caracterizam por ter polarização espontânea (nos campos elétricos alternados, os materiais com polarização espontânea se caracterizam por uma considerável dissipação de energia), eletrônica e iônica combinadas. Seriam estes materiais o sal de Seignette e o de Rochelle, titanato de Bário e outros.

Esta classificação dos dielétricos permite que suas propriedades elétricas sejam até certo ponto pré-determinadas.

3. COMPORTAMENTO DOS DIELÉTRICOS EM SERVIÇO

Uma vez que certa porção de isolamento apresenta uma dada resistência, podemos falar em resistividade do material, se bem que esta seja influenciada por uma diversidade de fatores. Por exemplo, a temperatura afeta sensivelmente o valor da resistividade e, de uma maneira geral, o aumento da temperatura provoca uma diminuição da resistividade dos materiais isolantes.

4. RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

O dielétrico impede a passagem da corrente elétrica enquanto o campo elétrico nele estabelecido não ultrapassar um determinado valor que depende da natureza do dielétrico e das suas condições físicas.

Este impedimento, porém, não é total, pois, se uma determinada porção do isolante estiver submetida a uma tensão U , ela será atravessada por uma corrente I , sendo o quociente entre U e I designado por resistência de isolamento.

A resistência de isolamento não é constante, isto é, os isolantes não obedecem de uma forma geral, à lei de Ohm. No caso do comportamento dos gases, já vimos que só para valores baixos de tensão estes obedecem àquela lei.

No caso dos dielétricos sólidos, a curva de variação da corrente com a tensão já tem um aspecto diferente, sendo de uma forma geral do tipo da apresentada na Fig. 2.

A primeira parte da curva corresponde aproximadamente a uma proporcionalidade entre a intensidade de corrente e a tensão, a partir de um determinado valor de tensão, o crescimento de corrente acentua-se e ao atingir-se um valor U_M da tensão, a corrente cresce rapidamente mesmo que se faça descer o valor de tensão.

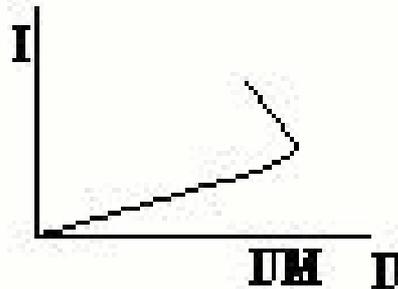


FIGURA 1 - Lei de variação da corrente com a tensão nos dielétricos sólidos

Esta última parte da curva corresponde à perfuração do isolamento ou, pelo menos, antecede-a de um pequeno intervalo de tempo, pois a libertação de calor engrandecida pelo aumento da corrente vai rapidamente provocar a perfuração.

5. RESISTÊNCIA SUPERFICIAL

No caso dos isolantes sólidos de muito grande resistividade, a resistência através da sua massa é também elevada, sendo muito pequena a corrente que os atravessa. Ora acontece que, pela acumulação de poeira e umidade na superfície das peças isoladoras, se forma um novo caminho para a passagem da corrente elétrica, o qual se diz ser superficial.

Isto acontece especialmente nas peças isoladoras expostas ao tempo, como por exemplo, os isoladores de linhas de transmissão aéreas. À resistência do novo circuito é dado o nome de resistência superficial e, neste caso, a resistência de isolamento é dos dois circuitos em paralelo, superficial e de massa.

O aumento da temperatura faz atenuar a importância da resistência superficial, pois a de massa decresce em relação àquela.

6. RIGIDEZ DIELÉTRICA

Para poder exprimir numericamente a capacidade de um determinado material isolante suportar tensões elevadas, define-se uma grandeza a que se dá o nome de rigidez dielétrica e que é definida como sendo o valor do campo elétrico para o qual se dá a ruptura do isolante.

Esta grandeza está longe de ser constante para cada material, pois depende de muitos fatores, tais como a espessura do isolante, as dimensões e forma dos eletrodos utilizados para a aplicação da tensão, a frequência da tensão aplicada, o número de aplicações de tensão na unidade do tempo (fadiga do material), a temperatura, grau de umidade, etc.

Como é difícil conhecer o valor do campo no momento da ruptura, visto ele não ser normalmente uniforme, é costume definir-se a rigidez dielétrica (RD) simplesmente pelo quociente da tensão aplicada no momento da ruptura pela espessura do isolamento e como a R.D.varia com a espessura do isolante é costume indicar esta ao referir aquela. Por exemplo para a mica a RD varia de 600 a 750 kV/cm, medida para espessura de 1mm.

7. RIGIDEZ DIELÉTRICA SUPERFICIAL

No caso dos isolantes sólidos, pode acontecer que o arco disruptivo, em vez de atravessar a sua massa, salte pela sua superfície. Ao quociente da tensão pela distância entre os condutores é dado o nome de rigidez dielétrica superficial. Esta depende, evidentemente, da forma do isolante e do estado da sua superfície.

8. PERDAS NOS DIELÉTRICOS

Nos dielétricos sujeitos a uma tensão contínua verifica-se uma perda por efeito Joule tal como nos condutores. A corrente de perdas, se bem que muito limitada, dá lugar a certo aquecimento. Estas perdas não têm importância a não ser quando dão lugar a um aquecimento permitindo, por conseqüência, maior corrente e maiores perdas. Nos dielétricos sujeitos a uma tensão alternada dá-se, da mesma forma, a perda por efeito Joule, mas surge outro fenômeno que origina perdas e que tem o nome de histerese dielétrica. A energia perdida é também transformada em calor. O nome deste fenômeno é dado pela analogia existente com a histerese

magnética. A explicação física das perdas por histerese dielétrica é dada por consideração da falta de homogeneidade do dielétrico.

8.1 ÂNGULO E FATOR DE PERDAS

Quando um dielétrico está sujeito a um campo elétrico alternado, a corrente que o atravessa deveria estar avançada de $p/2$ em relação à tensão, mas pelo fato de existir uma queda ôhmica através da massa do isolante, haverá uma componente da corrente que fica em fase com a tensão e o ângulo de diferença de fase será $(p/2 - d)$, sendo d chamado ângulo de perdas. Este valor pode ir de poucos minutos, se o dielétrico for bom, até a alguns graus, se for de má qualidade.

À $\text{tg}d$, que pode tomar igual ao ângulo expresso em radianos (por se tratar de ângulos muito pequenos) é dado o nome de fator de perdas. A potência perdida no dielétrico será dada por:

$$P = U.I.\cos\left(\frac{p}{2} - d\right) = U.I.\text{sen}(d)$$

Cada material é caracterizado por certo fator de perdas, o qual, contudo, depende das condições físicas a que o mesmo se encontra submetido, principalmente a temperatura.

8.2 RUPTURAS DOS DIELETRICOS

Quando o campo elétrico a que um dado dielétrico está sujeito ultrapassa um determinado valor se dá a ruptura do dielétrico. A maneira como esta se produz e as suas conseqüências são porém, diferentes conforme o tipo de dielétrico.

Assim, é compreensível que, se a ruptura se produzir num dielétrico fluido, a matéria atingida pela descarga é logo substituída por outra e, se o fenômeno não repetir, a sua única conseqüência é o aparecimento de partículas carbonizadas no seio do fluido. No caso dos dielétricos sólidos já assim não acontece, pois a descarga implica a sua destruição no ponto em que a ruptura se verifica.

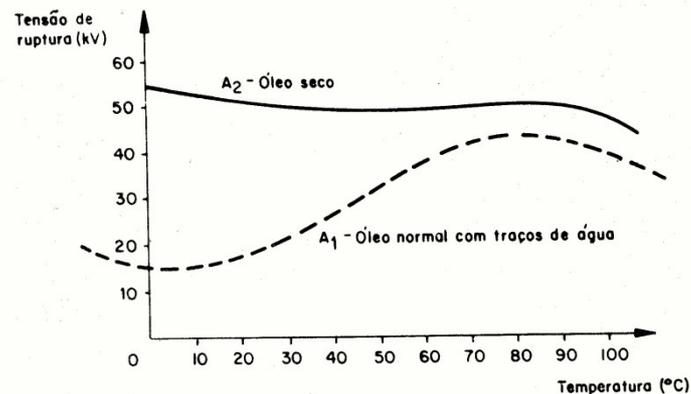


FIGURA 2 – Gráfico tensão temperatura

9. EFEITO CORONA

Se, entre dois condutores, existir uma grande diferença de potencial, junto às suas superfícies poderá surgir um campo elétrico de valor tal que o gás ou o ar, no meio do qual se encontram seja ionizado. Se isto acontecer, o efeito obtido é equivalente ao aumento das dimensões dos condutores, visto o gás ou o ar ionizado se tornar condutor também. Nessas condições, dá-se como que uma aproximação dos condutores e um aumento da sua superfície. Estes dois fatores que se verificam tendem a modificar o campo nos dois sentidos, prevalecendo um ou outro conforme as circunstâncias.

De uma maneira geral, podemos dizer que, se os condutores forem de pequena seção e estiverem bastante afastados, o efeito da ionização traduz-se por uma diminuição do campo na zona circunvizinha. Desta forma, ionizada a primeira camada que envolve os condutores, a ionização não prossegue nas camadas seguintes e o fenômeno não progride.

A ionização limita-se como que a uma bainha à volta dos condutores, visível sob o aspecto de uma luz azulada e sensível pelo cheiro a ozônio. Esta situação é aquilo a que chamamos de efeito coroa ou corona. Se a forma e a distância dos condutores forem outras, pode dar-se o contrário, isto é, o campo ir mantendo nas camadas sucessivas valores suficientemente altos para provocarem a ionização até o ponto de se estabelecer um caminho de gás ou ar ionizado entre os condutores. As cargas elétricas deixam de encontrar resistência e passam em grande quantidade de um condutor para o outro, sob a forma de um arco. É a descarga elétrica.

10. MATERIAIS ISOLANTES

Conforme a aplicação, alguns isolantes apresentam, em certos casos, nítida superioridade sobre outros, sendo inteiramente inadequados em casos diferentes. O exemplo da porcelana é típico: sendo material excelente para isolamento de linhas aéreas, pelas suas propriedades dielétricas, químicas e mecânicas, é inteiramente inadequada aos cabos isolados, pela falta de flexibilidade.

A borracha apresenta excelentes qualidades químicas, mecânicas e elétricas, de modo que é geralmente utilizada nos fios e cabos, mas não é completamente a prova de água, não resiste a temperaturas elevadas, é atacável pelos óleos e pelo ozônio.

O fato de um material apresentar propriedades elétricas muito superiores a outros (alta rigidez dielétrica, alta resistividade, baixas perdas) não é suficiente para determinar o seu emprego se as qualidades mencionadas não forem acompanhadas de propriedades químicas e mecânicas adequadas. Assim, às boas propriedades elétricas pode corresponder uma redução de espessura do isolante a empregar nos condutores das máquinas elétricas; é, porém necessário que o material seja suficientemente forte para resistir aos esforços mecânicos durante a construção e o funcionamento.

Muitas das substâncias industrialmente empregadas como isolantes não são inteiramente homogêneas - especialmente as de origem orgânica como o algodão, seda, madeira, óleos, etc - sendo, além disto, em geral deterioráveis.

Uma primeira classificação dos isolantes pode ser feita de acordo com o seu estado:

I – Gases: Ar, anidrido carbônico, azoto, hidrogênio, gases raros, hexafluoreto de enxofre.

II - Líquidos:

A - Óleos minerais: óleos para transformadores, interruptores e cabos.

B - Dielétricos líquidos à prova de fogo: Askarel.

C - Óleos vegetais: Tung, linhaça.

D - Solventes: (empregados nos vernizes e compostos isolantes) Álcool, tolueno, benzeno, benzina, terebentina, petróleo, nafta, acetatos amílicos e butílicos, tetracloreto de carbono, acetona.

III - Sólidos aplicados em estado líquido ou pastoso:

A - Resinas e plásticos naturais: resinas fósseis e vegetais, materiais asfálticos, goma laca.

B - Ceras: cera de abelhas de minerais, parafina.

C - Vernizes e lacas: preparados de resinas e óleos naturais, produtos sintéticos, esmaltes para fios, vernizes solventes, lacas.

D - Resinas sintéticas: (plásticos moldados e laminados) resinas fenólicas, caseína, borracha sintética, silicones.

E - Compostos de celulose: (termoplásticos) acetato de celulose, nitrocelulose.

F - Plásticos moldados a frio: cimento portland empregado com resinas ou asfaltos.

IV - Sólidos:

A - Minerais: quartzo, pedra sabão, mica, mármore, ardósia, asbesto.

B - Cerâmicos: porcelana, vidro, micalex.

C - Materiais da classe da borracha: borracha natural, guta-percha, neoprene, buna.

D - Materiais fibrosos (tratados e não tratados): algodão, seda, linha, papel, vidro, asbesto, madeira, celofane, rayon, nylon.

Além desta classificação cujo critério é a natureza dos materiais isolantes, estes podem ser classificados visando a sua aplicação, especialmente na construção de máquinas e aparelhos elétricos, cuja temperatura é limitada não pelos materiais condutores ou magnéticos (que são metálicos) e sim pelos isolantes. A durabilidade destes depende de fatores diversos, entre os quais predomina a temperatura, como mostrado na Tabela a seguir. A duração dos materiais utilizados para isolamento de máquinas e aparelhos elétricos depende de vários fatores, tais como a temperatura, os esforços elétricos e mecânicos, as vibrações, a exposição a produtos químicos, umidade e a sujeira de qualquer espécie.

TABELA 1 - Classificação dos materiais isolantes em relação à sua estabilidade térmica em serviço (NBR 7034).

Classe	Temperatura máxima admissível em serviço
Y (O)	90C (algodão, seda e papel sem impregnação)
OA	105C (idem impregnados)
OE	120C (alguns vernizes, esmaltes e fibras)
OB	130C (mica, asbesto com aglutinante, EPR)
OF	155C (mica, fibra de vidro com aglutinante)
OH	180C (elastômeros de silicato)
OC	> 180C (porcelana, vidro, quartzo, cerâmicas)

Reconhece-se que os materiais isolantes poderão não suportar as temperaturas a eles atribuídas na classificação se estas forem mantidas durante tempo ilimitado. Essas temperaturas, todavia são tais que permitirão uma duração adequada do material se forem mantidas durante longos períodos de tempo com temperatura mais baixa. As normas de equipamento elétrico especificam geralmente a elevação de temperatura permissível acima do ar ambiente ou de outro meio refrigerante.

11. ISOLANTES GASOSOS

O isolante gasoso de maior uso é sem dúvida o ar, excetuando-se algumas aplicações de gases especiais, notadamente o SF₆, hexafluoreto de enxofre. O ar, como isolante, é amplamente usado entre todos os condutores sem isolamento sólido ou líquido, como, por exemplo, nas redes elétricas de transmissão e eventualmente de distribuição, onde os condutores são fixados a certa altura através de cruzetas, ou de braços, os quais, fixos a postes ou torres, são equipados com isoladores (de porcelana, vidro ou resina com borracha). Entre esses condutores nus, o isolamento é somente o ar, de tal modo que o afastamento entre os fios ou cabos é, entre outros fatores, conseqüência da rigidez dielétrica do ar. Esse valor varia acentuadamente com as condições de umidade, impurezas e temperatura. Seu valor a seco e limpo, a 20 C, é de 45kV/mm; decresce, entretanto, rapidamente, a 3kV/mm, sob o ação da umidade, de contaminações provenientes de poluição, da pressão atmosférica e da temperatura, fatores normais no ambiente externo e, conseqüentemente, esse valor precisa ser considerado nos projetos.

O afastamento entre condutores não é, porém, apenas função das características elétricas, mas também das mecânicas e de agentes, tais como ventos e outros, que vão determinar, em conjunto, a menor distância entre dois cabos.

Outro gás de uso bastante recente é o já mencionado hexafluoreto de enxofre, cujas características são apresentadas a seguir:

Peso molecular: 146,05

Condutividade térmica à pressão atmosférica: 1,4W/cmK a 40Co

Viscosidade (em CP) à pressão atmosférica: 0,015 a 25Co

Capacidade de ruptura: 100A à 1 atm. de pressão

Fator de perdas: $\text{tg}\delta < 10 \text{ a } -50 \text{ C } -30$

$\text{tg}\delta < 2 \times 10 \text{ a } 25\text{C } -70$

Tensão de ruptura: 125kV a 2 atmosferas de pressão com afastamento de 10mm.

12. ISOLANTES LÍQUIDOS

Os isolantes líquidos atuam geralmente em duas áreas, ou seja, a refrigeração e a isolação. Seu efeito refrigerante é o de retirar o calor gerado internamente ao elemento condutor, transferindo-o aos radiadores de calor, mantendo, assim, dentro de níveis admissíveis o aquecimento do equipamento.

No uso diário destacam-se os isolantes líquidos enunciados a seguir.

Óleo mineral, Obtenção: obtém-se o óleo mineral a partir do petróleo e, eventualmente, também de outros produtos sedimentares, sendo constituídos basicamente de misturas de hidrocarbonatos, gorduras e outras deposições. Seu cheiro é desagradável, de coloração preto-azulada ou marrom, com uma composição dependente do local em que é encontrado. Fundamentalmente se compõe de:

- metana, ou óleos parafinados do qual se extrai 3 a 8% de parafina sólida;
- nafta;
- mistura de dois anteriores.

12.1 CARACTERÍSTICAS

- Ponto de chama: aquecendo-se o óleo gradativamente até temperaturas mais elevadas, começam a aparecer vapores. Por ponto de chama se caracteriza certa temperatura, à qual os vapores formam uma chama, se desses vapores aproximarmos uma chama de ignição. A chama formada nos vapores porém, se extingue imediatamente após o afastamento da chama de ignição.

- Ponto de queima: esse é um ponto térmico superior ao anterior, no qual a chama já não se extingue mais, após afastada a chama de ignição. Seu valor costuma ser 30 a 50 C superior ao o ponto de chama.

- Ponto de ignição: é o valor de temperatura, no qual os vapores se incandescem por si mesmos.

- Ponto de solidificação: é o valor de temperatura, em que o óleo deixa de escorrer sob a ação do seu peso próprio, tornando-se denso. O ponto de solidificação é um valor característico a baixas temperaturas.

- Viscosidade: entende-se por viscosidade a resistência existente entre duas camadas adjacentes de um líquido. O uso dos óleos para determinadas aplicações técnicas depende acentuadamente do seu valor de viscosidade. Assim, devem ser pouco viscosos, os óleos destinados a máquinas leves e de alta velocidade, bem como os óleos para transformadores e dispositivos de comando (disjuntores, interruptores). Já em equipamentos que trabalham com pressões elevadas, é necessário o uso de óleos pesados (ou de maior viscosidade). Óleos para máquinas de refrigeração e óleos isolantes, usados em equipamentos ao ar livre, precisam ainda ter adequada viscosidade quando da queda da temperatura ambiente.

- Coeficiente de acidez e de neutralização: É a medida para ácidos orgânicos livres, existentes no óleo, indicando a quantidade de KOH por miligrama (mg) que é necessária para neutralizar a acidez de 1 g de óleo.

- Coeficiente de saponificação: Indica a quantidade de KOH (em mg) necessária para eliminar ácidos e ésteres livres ligados a ácidos, para cada grama de óleo (1 g óleo). O número de saponificação é uma referência para determinar o envelhecimento ocorrido no óleo, ou senão, pode servir para constatar a existência de óleos gordurosos no óleo mineral.

- Coeficiente de oxidação: É outro valor indicativo do envelhecimento. Seu valor não deve ultrapassar 0,1%. O coeficiente de oxidação depende do regime térmico em que o óleo vai trabalhar da ação de metais sobre as características do óleo e de outros agentes.

Os óleos minerais isolantes são processados através de uma rigorosa purificação. Seu uso está concentrado nos transformadores, cabos, capacitores e chaves a óleo. Estes óleos devem ser altamente estáveis, ter baixa viscosidade (serem bastante líquidos), pois, além de sua função dielétrica de impregnação, devem também transmitir o calor. Este é um dos problemas típicos de transformadores, onde o óleo transfere para as paredes do tanque, o calor gerado nos enrolamentos. Óleos mais densos não podem atender a essas condições. No caso dos dispositivos de comando, o óleo deve fluir rapidamente entre os contatos entreabertos, para extinguir rapidamente o arco voltaico. Em cabos e capacitores, o óleo deve também fluir com facilidade, para impregnar totalmente o papel isolante

empregado, deslocando e eliminando assim a presença de água e de bolsas de ar em produtos fibrosos, como é o caso dos papéis. Para esse problema, a tensão superficial do líquido também deve ser suficientemente baixa, tensão essa cujo valor depende do grau de purificação. Quanto maior o grau de purificação, maior a tensão superficial. A viscosidade recomendada em cada aplicação consta de normas técnicas, devidamente relacionada com a temperatura, sobretudo a temperatura máxima admissível. Assim, o ponto de chama varia de 130 a 145 C.

No caso de óleo para cabos, distinguem-se os papéis impregnados com óleo (óleos grossos) e os cabos em óleo fluido (O.F.) (óleos finos). A Tab. (2) apresenta alguns valores característicos desses óleos. O fator de perdas de bons óleos isolantes, a 20 C, é de aproximadamente 0,001, dependendo porém acentuadamente da temperatura. Para os cabos, o tgd deve ser baixo, para não provocar aquecimento excessivo da isolação do cabo. O mesmo vale para capacitores.

Ao lado do fator de perdas (tgd), também a rigidez dielétrica ou a tensão de ruptura obtida em um equipamento de ensaio padronizado, são fatores importantes. Esse valor é de aproximadamente 200 kV/cm para óleos para óleos secos e novos na faixa de temperatura de -40 C a $+50$ C, destinados a transformadores, e destinados a transformadores, e de 120 kV/cm para óleo de disjuntores. Esses valores, porém devem ser usados com cuidado, face às influências dos campos elétricos entre os eletrodos de ensaio, devido à possível variação de seus formatos (planos, esféricos, etc.) e que, devido às diferentes configurações do campo elétrico, levam a campo heterogêneos com número variável de linhas por centímetro quadrado, e conseqüentemente, darão diferentes valores de ruptura, para mesmo afastamento (ou seja, diferentes valores de rigidez dielétrica).

A tensão de ruptura dielétrica mínima varia também com a classe de tensão em que o óleo é usado, bem como do equipamento onde é empregado. Valores médios nesse sentido se situam entre 80 kV/cm até 140 kV/cm (na faixa de classes de tensão de 34,5 a 220 kV) para transformadores para redes e para instrumentos, e com valores de 40 kV/cm a 80 kV/cm (para classes de tensão de 34,5 a 69 kV) para dispositivos de comando.

No uso de equipamentos possuidores de óleo mineral, uma das providências de rotina é uma sistemática verificação da tensão de ruptura ou da rigidez dielétrica, face à constatação de um envelhecimento relativamente rápido e inexeqüível para

diversas dessas aplicações. Como resultado, os próprios sistemas de manutenção prevêm a retirada periódica de amostras de óleo, e a verificação de suas características isolantes. Nota-se perfeitamente após um período por vezes relativamente curto (2 a 3 anos) que o óleo perdeu sensivelmente suas propriedades isolantes, reduzindo, por exemplo, em algumas vezes sua rigidez dielétrica. Dependendo do valor obtido, é necessário aplicar processos de purificação ou filtragem ou, em caso extremo, fazer a substituição do óleo envelhecido por outro novo.

A oxidação do óleo é um dos fatores que sempre estão presentes, e que se fazem sentir devido à presença do oxigênio do ar e da elevação de temperatura. Em grau menor, a luz do dia pode atuar no mesmo sentido, razão pela qual o óleo deve ficar protegido de seus raios de luz. O tipo de cadeia de carbono que está presente também tem sua influência: certas ligações de cadeias de carbono se oxidam com maior facilidade. Como resultado aparece diversos ácidos orgânicos, além de água e materiais voláteis. Sob a ação do campo elétrico ou perante descargas internas, poderão acontecer decomposições moleculares, de modo que os produtos ácidos da oxidação se transformam em matérias com cadeia molecular extensa, devido à polimerização ou policondensação progressiva.

O início do envelhecimento do óleo é sempre caracterizado pelo aumento do coeficiente de acidez, apesar de que o grau de envelhecimento não pode ser avaliado com segurança pelo valor numérico desse coeficiente pois, os produtos ácidos que se formam, sofrem novas transformações, deixando de apresentar, assim, um comportamento ácido.

Além da própria contaminação do óleo e da perda parcial de suas propriedades, é importante analisar também as conseqüências da acidez do óleo sobre os demais materiais usados no equipamento. A celulose do papel, por exemplo, tem a tendência de absorver certos tipos de moléculas remanentes nas impurezas do óleo, deslocando este de sua impregnação no papel, ou senão de ser atacado por certas formações moleculares específicas.

Aliás, esse mesmo problema ocorre ao incidir água sobre um papel impregnado com óleo: água desloca o óleo e, sendo o primeiro um mau isolante, cria locais de isolamento deficiente. Além da rigidez dielétrica, outro fator que pode caracterizar o envelhecimento é a variação do fator de perdas ($\text{tg } d$) perante diferentes freqüências.

Os produtos de oxidação que se formam em uso, geralmente influem menos sobre o valor da rigidez dielétrica do que a presença de certos gases ou água no óleo. A umidade presente no óleo provém geralmente do ar; mesmo porque, no processo de fabricação do equipamento, todos os cuidados são tomados para eliminar a umidade, a qual penetra no equipamento em uso, devido à variação das pressões internas: um equipamento ligado se aquece, dilata-se o óleo e o ar interno é expulso do tanque; quando o equipamento é desligado, ocorre um esfriamento de todas as partes, conseqüentes contração, e um vácuo relativo na parte onde o ar foi expulso.

Daí, pela diferença entre pressões, a maior pressão externa forçará a entrada do ar externo. Possuidor de certo grau de umidade, que vai se condensar internamente ao tanque, após o que escorre pelas paredes e entra em contato com o óleo. Conforme já vimos anteriormente, os produtos de oxidação reduzem a tensão superficial do óleo, aumentando a capacidade de associação entre água e óleo, que assim fica em estado de emulsão dentro do óleo. Essa água, mesmo em pequenas quantidades (o óleo a 60 C absorve 2% de água) irá influir de modo acentuado sobre a rigidez dielétrica do óleo. Problema semelhante ocorre se o óleo absorve gases, os quais também apresentam características isolantes inferiores às dos óleos, podendo levar assim a problema de baixa isolação.

Observa-se, em resumo, que a deterioração do óleo mineral pode ocorrer por diversas razões, externas e internas, devidas ao próprio processo de obtenção do óleo, ao contato com outros componentes (particularmente metálicos) e com elementos resultantes do ambiente em que o óleo vai operar. De todos estes, resultam produtos líquidos, sólidos e, eventualmente, gasosos, que influem negativamente sobre o óleo, e que assim, precisam ser eliminados. Surgem daí diversos processos de purificação como a eliminação de impurezas sólidas através de filtro-prensa ou centrifugação e eliminação da água em câmara a vácuo aquecida. Outro problema apresentado pelos óleos minerais é a sua inflamabilidade, motivado não pelo contato direto com uma chama, mas sim devido à combustão espontânea quando sobre aquecido, colocando em risco o pessoal e os equipamentos próximos.

Por essa razão, equipamentos que usam óleos minerais dispõe de controladores temperatura (termômetros com contatos), que numa primeira etapa, ligam um alarme comunicando que o óleo atingiu seu valor máximo admissível; se nenhuma providência for tomada para reduzir a temperatura (redução de carga,

aumento da velocidade de retirada de calor por refrigeração intensa, etc.), então, numa segunda etapa, é acionado o disjuntor de entrada, que assim desliga o equipamento.

13. O ASKAREL

No desenvolvimento de líquidos que possam ser substitutos do óleo mineral, encontramos o askarel, quimicamente se compõe de um pentaclorodifenil (C HCl C H Cl) 623623 que se destaca sobretudo pelo fato de não ser inflamável, apresentando porém uma série de outros problemas e cuidados, que fazem com que hoje já se esteja a substituí-lo, provavelmente por um óleo à base de silicone. O askarel também não pode ser usado em aplicações onde se apresentam arcos voltaicos expostos, pois, nessas condições de temperatura, haverá rompimento da cadeia de HCl e desprendimento do cloro. Seu emprego, entretanto, já é mais recomendado em cabos e capacitores com isolamento em papel ($\epsilon = 5$ a 6) pois o askarel ($\epsilon = 5$), ao impregnar o papel confere-lhe uma característica mais homogênea e, conseqüentemente, uma distribuição de campo elétrico mais uniforme, do que se o impregnante fosse o óleo mineral ($\epsilon = 2$). Com isto, a capacitância dos capacitores pode ser elevada em até 40%.

Os askaréis se caracterizam ainda pela ausência de envelhecimento e da formação de subprodutos durante o seu uso. Com isso, varia pouco o valor da rigidez dielétrica de askaréis novos e em uso, não havendo necessidade de sistemas de purificação. Além disso, esse valor de rigidez dielétrica costuma ser mais elevado que o dos óleos isolantes. Sua temperatura de serviço é um pouco superior à do óleo, se localizando a 110°C.

Os askaréis se distinguem ainda dos óleos minerais, no seu manuseio. Enquanto os óleos são neutros, pouco ou nada reagindo com os materiais elétricos convencionais, os askaréis, devido à presença do cloro, são quimicamente ativos, atacando o sistema respiratório e visual dos que o manuseiam, ataque que se estende a alguns produtos dos componentes. Dessa forma, além de certas medidas de prevenção contra intoxicação orgânica, o uso dos askaréis exige uma verificação de seu comportamento com os materiais com os quais ficará em contato.

Alguns nomes comerciais do askarel são Clophen, Inerteen, Aroclor. O preço do askarel é geralmente dez vezes superior ao do óleo mineral, o que também limita seu uso.

14. ÓLEOS DE SILICONE

Os óleos de silicone (cadeias Si - O - Si associado a grupos metílicos e fenólicos) são líquidos incolores e transparentes com uma gama bastante ampla de viscosidades e pontos de ebulição, caracterizando-se por um ponto de chama bastante elevado (300 C e acima) e baixo o ponto de solidificação (- 100C); como conseqüência, sua faixa de emprego se situa entre 200C ,e - 60C, faixa essa que ainda pode ser ampliada, sob certas condições. Mesmo variando a temperatura, a viscosidade não se modifica na mesma proporção, dentro de valores bem menores que os óleos minerais. São recomendados como lubrificantes em máquinas que trabalham a temperaturas muito altas ou baixas.

Utilizando-se das características básicas do silício, os silicones permanecem neutros perante a grande maioria dos elementos, o que lhes confere uma elevada estabilidade química e conseqüente ausência de envelhecimento. Ainda, se apresentam repelentes à água, evitando assim perda de características isolantes, e serviço. Consulte os valores numéricos das características elétricas, térmicas e químicas na Tab. 4.

Em áreas paralelas, graxas e óleos de silicone são preferidos como elemento de separação entre a massa de um molde e o molde propriamente dito, nas aplicações de injeção em plástico.

Silicones líquidos encontram ainda extensa aplicação em numerosos processos e produtos industriais tais como acréscimos de tintas e vernizes, lubrificantes e outros. São solúveis em benzol, toluol, éter e álcoois de grau superior, sendo insolúveis em óleos minerais e álcoois de grau inferior. O preço do óleo de silicone é comparativamente muito alto em relação ao óleo mineral.

15. ISOLANTES PASTOSOS E CERAS

As pastas ou ceras utilizadas eletricamente se caracterizam por um baixo ponto de fusão, podendo ter estrutura cristalina, baixa resistência mecânica e baixa higroscopia.

15.1 PARAFINA

É o material pastoso não-polar mais usado e mais barato. É obtido de uma das fases de decomposição do petróleo, com elevado teor de metano, através de uma destilação adequada.

Após o esfriamento desse destilado, a pasta de parafina se separa do volume restante de material; a parafina assim obtida passa por processo de purificação subsequente, para eliminar restos de óleo e de materiais residuais de fácil oxidação. Uma parafina de boa qualidade se apresenta com os valores numéricos da Tab.(4) com aparência branca, livre de ácidos, de bolhas impurezas. A constante dielétrica (ϵ) se reduz com elevação de temperatura, mudando bruscamente seu valor quando passa do estado sólido ao líquido. É altamente anti-higroscópico ou repelente à água, o que mantém elevada sua rigidez dielétrica e a resistividade superficial e transversal, e o recomenda como material de recobrimento de outros isolantes.

A baixa estabilidade térmica - veja seu ponto de fusão na Tabela - representa vantagem e desvantagem. Se um lado, esse valor demonstra a desnecessidade de calor elevadas para liquefazer a parafina durante um processo de impregnação ou recobrimento, facilitando assim o seu emprego, essa mesma propriedade limita seu uso para os casos em que o nível de aquecimento do componente se mantém baixo. Esse último caso praticamente só ocorre na área das baixas perdas Joule às baixas correntes circulantes, situação encontrada particularmente nos componentes eletrônicos. Assim, a importante característica de repelência à água, muito procurada para componentes eletrotécnicos usados ao ar livre, não pode ser satisfatoriamente resolvida com a parafina.

15.2 PASTA DE SILICONE

Com uma estrutura molecular semelhante à dos óleos de silicone, e guardando também basicamente as mesmas propriedades, as pastas de silicone são usadas mais com finalidades lubrificantes do que elétricas, quando freqüentemente recebem o acréscimo de pó de grafita para melhorar suas características antifricção. São usadas, eletricamente, para proteção de partes onde se deve reduzir a oxidação, tal como peças de contato, em articulações condutoras e outras, e também são usadas como pastas de recobrimento de partes isolantes expostas que devem

manter elevada resistividade superficial. Neste último caso, prevalece a característica da pasta de silicone de ser repelente à água.

15.3 RESINAS

Um verniz é aplicado na forma líquida, e solidifica durante a sua aplicação, passando ao estado sólido em sua fase final. Assim, o verniz não é propriamente um isolante líquido, apesar de ser adquirido nesse estado físico. Um verniz é constituído de um solvente e uma matéria-prima capaz de formar uma película, um filme geralmente representado por uma resina.

Define-se resina como uma família bastante grande, freqüentemente ampliada, de matérias-primas que, apesar de origens e características diferentes possuem composição química ou propriedades físicas semelhantes. São misturas estruturalmente complexas, de elevado número molecular e elevado grau de polimerização, Perante baixas temperaturas, as resinas são massas vitrificadas, amorfas. A maioria das resinas se apresenta quebradiça à temperatura ambiente, dependendo da maior espessura da camada em que se encontram. Em camadas finas se tornam flexíveis. Quando aquecidas, podem amolecer dentro de certos intervalos de temperatura, se tornam plásticas e podem chegar ao estado líquido. Geralmente as resinas não se caracterizam por um certo ponto de fusão.

As resinas podem ser classificadas em naturais e sintéticas. Resinas naturais são de origem animal (como a goma-laca) ou vegetal (Kopal). São obtidas na forma final, bastando-lhes aplicar um processo relativamente simples de purificação.

Já as resinas sintéticas, em número maior e sempre crescente, são obtidas por complexos processos químicos, reunindo diversas matérias-primas. Dentro desse grupo se destacam geralmente, as resinas polimerizadas, as condensadas e as à base de celulose.

As resinas podem ainda ser classificadas em termofixas (termoestáveis) ou termoplásticas. Essa classificação se baseia na produção fundamental de plásticos, onde a resina, ao lado de outras matérias-primas, é aquecida até sua plastificação, estado em que é colocada em moldes que lhe conferem a forma final de uso, sendo posteriormente esfriada até a temperatura ambiente, na qual se apresenta sólida. Ambos os tipos, os termofixos e termoplásticos, têm, até esse ponto, comportamento geral parecido.

Se agora, após a solidificação, aplicarmos novamente a temperatura de plastificação a ambas as resinas, vamos notar que a resina termoplástica novamente amolece, enquanto a termofixa se mantém sólida. Continuando o aquecimento da termofixa, atingiremos uma mudança do seu estado apenas a temperaturas bem mais elevadas, nas quais se carboniza sem amolecer.

Em relação às famílias de resinas antes mencionadas, vamos notar que uma grande parte das resinas polimerizadas pertence aos termoplásticos, enquanto que as condensadas podem tanto ser termofixas quanto termoplásticas. As que têm origem na celulose são termoplásticas.

15.4 VERNIZES

Os vernizes são produtos resultantes de resinas com um solvente, este último eliminado na fase final do processo. Usando resinas, como as analisadas no capítulo anterior, os vernizes mantêm na forma final as propriedades das resinas, classificando-se em três grupos, a saber:

- a) vernizes de impregnação,
- b) vernizes de colagem,
- c) vernizes de recobrimento.

Vernizes de impregnação

É o tipo geralmente encontrado em associação com papéis, tecidos, cerâmicas porosas e materiais semelhantes. Sua função é preencher o espaço deixado internamente a um material, com um isolante de qualidade e características adequadas, evitando a fixação de umidade, que seria prejudicial às características elétricas.

O seu processo de aplicação é o seguinte: o material isolante fibroso ou poroso é colocado numa estufa, para dele se retirar toda ou quase toda a umidade, que ocupou os interstícios do material devido à sua presença no ar circundante. Esta eliminação é feita em estufa, regulada para o material que se deseja secar, para evitar que a temperatura presente venha a prejudicar as características do material. Uma vez eliminada a umidade, o material é colocado em contato direto com o verniz de impregnação, seja através da imersão em recipientes contendo o verniz seja na forma de injeção do verniz sobre o material, sob pressão. Com o fechamento de poros e vazios dentro do material, eleva-se acentuadamente a condutividade térmica

e a rigidez dielétrica e reduz-se higroscopia, o que beneficia ainda mais as características do isolante impregnado.

Uma vez impregnado, o verniz é seco em estufa, eliminado-se o solvente. Essa eliminação pode eventualmente ser feita ao ar livre, sem estufa; observa-se, entretanto, que vernizes que secam ao ar livre apresentam geralmente elevado grau de envelhecimento.

Além da melhoria das propriedades elétricas e térmicas, observa-se também uma melhoria das propriedades mecânicas, uma vez que, com a complementação do volume por um material sólido, a transferência de tensões mecânicas se faz em toda a seção aplicada, o que reduz a concentração de esforços e eleva os valores que podem ser aplicados.

15.5 VERNIZES DE RECOBRIMENTO

Destinam-se a formar sobre o material sólido de base, uma camada de elevada resistência mecânica, lisa, e à prova de umidade e com aparência brilhante. Sua aplicação, assim é especialmente necessária em corpos isolantes porosos e fibrosos, bem como na cobertura de metais (fios esmaltados). No caso particular de seu uso com isolantes porosos e fibrosos a sua ação se faz sentir por uma elevação da resistência superficial de descarga e conseqüente tensão de descarga externa.

Eleva-se a resistência à penetração de umidade, apesar de que, para proteger neste sentido, o isolamento também deveria ser impregnado, pois qualquer fissura ou remoção da camada de verniz de cobertura pode colocar o isolamento em perigo. Sendo a superfície lisa, torna-se mais difícil a deposição de poeiras e outros detritos, além de facilitar a limpeza.

15.6 VERNIZES DE COLAGEM

Diversos isolantes quando purificados, perdem consistência devido à eliminação de materiais de colagem entre suas diversas porções. Em outros casos, o próprio isolamento, em geral sintético, não apresenta a necessária consistência ou coeficiente de atrito, para permitir seu uso em eletricidade. Como exemplo do primeiro caso, podemos citar a mica, que ao ser purificada, se desmancha grande número de pequenas lâminas, sem possibilidade de se formar um sólido de dimensões definidas e fixas. Outro caso, como exemplo da segunda hipótese, é o da

fibra de vidro. As fibras em si são lisas, não se estabelecendo entre elas, mesmo formando um tecido, a necessária consistência para que o tecido de fibra de vidro possa ser usado tecnicamente na área elétrica.

Note-se que, em ambos os casos, não se trata da necessidade de um verniz que se impregne no sólido, pois os sólidos em si são bastante compactos; por outro lado, também não é o caso de um recobrimento. Portanto, nessas condições, o necessário é um verniz que cole entre si as diversas partes do isolamento: é o verniz de colagem. Uma outra aplicação desse tipo de verniz é também a colagem de isolantes sobre metais. Distinguem-se tais vernizes por baixa higroscopia e boas características isolantes.

Na prática, um verniz não apresenta unicamente uma dessas propriedades. Todos eles possuem uma certa predominância de alguma das três propriedades indicadas, vindo porém acompanhadas de mais ou duas outras propriedades.

16. ISOLANTES SÓLIDOS

16.1 ISOLANTES FIBROSOS

Fibras isolantes podem ser orgânicas e inorgânicas. As orgânicas mais encontradas são a celulose, o papel, o algodão, a seda e outras fibras sintéticas ou naturais. Já as inorgânicas são representadas sobretudo pelo amianto e fibra de vidro.

16.2 O PAPEL

A matéria-prima básica do papel é a celulose. Uma celulose praticamente pura é obtida a partir do algodão, sobretudo usando aquelas fibras que não são usadas para finalidades têxteis.

Entretanto, a maior parte da celulose provém de árvores, de mais diferentes tipos. É muito freqüente até os dias atuais o uso de papel para finalidades elétricas, sobretudo devido à grande flexibilidade, capacidade de obtenção em espessuras pequenas, preço geralmente razoável e estabilidade térmica em torno de 100°C, o que é também razoável. O maior problema do papel está em sua elevada higroscopia, o que condiciona seu uso na eletrotécnica e uma impregnação adequada com óleos ou resinas.

Essa elevada higroscopia é conseqüência da disposição irregular e cruzada das fibras, deixando grande número de aberturas ou interstícios no seu interior, que na impregnação, são ocupados por isolante adequado. Geralmente apenas 40% do volume do papel é de fibras, o restante são espaços livres.

Além das favoráveis propriedades elétricas do papel, ele se destaca por uma elevada resistência mecânica, tanto ao longo da fibra quando transversalmente. Esse comportamento é importante, por exemplo, no uso do papel como isolante de cabos, onde, tanto na fabricação quanto no uso, os papéis ficam sujeitos a acentuados esforços de tração e de compressão, quando o cabo é tracionado e dobrado. A tração é mais acentuada durante a própria aplicação do papel como camada isolante sobre o material condutor. Nesse processo, aplica-se uma acentuada força de tração, para se evitar ao máximo a existência de bolhas de ar entre o condutor e o papel e entre as camadas de papel entre si.

O papel também permite um dobramento acentuado sem “quebrar” suas fibras, característica importante quando o diâmetro da peça a ser isolada é pequeno ou quando existem ângulos de pequeno valor. O comportamento térmico do papel é outro aspecto. Nesse sentido, a propriedade de suportar ou não certos níveis de temperatura depende acentuadamente da natureza da fibra.

Celulose sulfitada não pode ser solicitada, por exemplo, a 100 C por um tempo razoavelmente o longo, ao contrário de celulose sulfatada, que não apresenta maior modificação de propriedades quando exposta a 100C, durante uma semana. O envelhecimento da fibra desse papel de celulose ainda é mínimo a 120 C se forem aplicados durante 48 horas, ou 135C durante algumas horas.

Acima desses valores, procede-se uma modificação molecular da celulose devido à ação do vapor de água e de outros gases prejudiciais. Pelas razões expostas, um papel ao ser utilizado eletricamente, deve ser seco a vácuo, quando então fica livre da umidade que penetra no material durante o seu próprio manuseio na fabricação das camadas isolantes.

Papéis são utilizados ainda hoje em grande número de casos, apesar de ser um produto em uso desde longa data e dos problemas e cuidados que devem ser tomados. Observa-se, porém, que a tendência é substituí-lo por materiais fibrosos sintéticos, que permanentemente estão sendo desenvolvidos e produzidos. O papel na forma mais simples isola espiras de fios, caso em que vem impregnado com óleo

ou vernizes. Este é basicamente o caso de capacitores, onde o papel isola entre si as placas condutoras.

Em outra forma, o papel que é flexível por natureza, é impregnado com verniz que ao secar, se torna rígido; é o caso de placas usadas como base de suporte de outros componentes ou mesmo como separadores dielétricos, no caso de barramentos ou de base de suporte de núcleos de transformadores ou dos enrolamentos de motor, dentro da ranhura.

16.3 FIBRAS SINTÉTICAS

Grande parte dos produtos fibrosos naturais, como o algodão e a seda natural, estão sendo sistematicamente substituídos por fibras sintéticas, de variedade cada vez maior, sempre que o preço e suas propriedades justificarem essa substituição. Em uma primeira fase, a seda artificial encontrou aplicação; hoje porém, já substituída por fibra de vidro ou fibras de poliamida ou outros sintéticos. Esses materiais, em geral, melhoraram as características elétricas, mecânicas e químicas (envelhecimento) dos produtos em que são usados, sempre que uma produção em grande escala se justificar, para poder economicamente competir com as fibras existentes.

Diversos poderiam ser os produtos aqui mencionados. Vamos, porém, nos limitar aos dois exemplos dados a seguir.

16.3.1 FIBRAS DE POLIAMIDA

São fibras usadas freqüentemente como reforços mecânicos de cabos de utilização especial, sempre que as condições de uso exigem um material resistente à ação do fogo, elevada flexibilidade e capaz de suportar elevados esforços de tração.

Sendo fibras sintéticas, por natureza de massa compacta e não porosa como as fibras de celulose e, além disso, tendo em geral uma superfície externa lisa, com baixo coeficiente de atrito, torna-se imprescindível a aplicação de um verniz de colagem, capaz de conferir ao tecido assim fabricado, a necessária consistência mecânica, o que, por sua vez, garante manter a continuidade de uma camada elétrica isolante.

Essas fibras são manufaturadas e consumidas em forma de fitas isolantes, que suportam até 2000 kgf/cm, com espessura em torno de 0,5 a 1,5 mm.

16.3.2 FIBRAS DE VIDRO

Derivada do vidro isolante, a fibra de vidro é obtida com espessura de 5 a 10µm(micrometros). A matéria-prima deve ser vidro livre de álcalis, para evitar o aparecimento de fissuras capilares tendentes a reter a umidade, prejudicando assim a propriedade de resistência superficial. Logo após sua fabricação, recomenda-se envolver a fibra de vidro com uma camada protetora contra ação do ambiente.

A fibra de vidro se caracteriza por uma estabilidade térmica sensivelmente mais elevada do que a de outras fibras. Por essa razão, fibras de vidro adequadamente associadas a resinas da família dos epoxes, são freqüentemente encontradas quando se trata de utilizar um material isolante capaz de suportar temperaturas de 200-300C ou mais. Casos típicos são as câmaras de extinção do arco voltaico, sobretudo em disjuntores de média e alta-tensão com reduzido volume de óleo. A exemplo dos comentários anteriormente feitos para a fibra de poliamida, a fibra de vidro também necessita um tratamento com verniz de colagem, para fornecer produtos elétrica e mecanicamente adequados.

17. MATERIAIS CERÂMICOS

Reúne-se sob a designação de cerâmicas um grupo de materiais de elevado ponto de fusão, que em geral, são manufaturados a frio na forma plástica e que sofrem processos de queima até temperaturas de 2000C. Apenas após a queima, o material adquire as características que permitem seu uso técnico. Cerâmicas são matérias-primas de uso bastante antigo, inicialmente apenas como utensílio doméstico, mas até hoje com utilização elétrica bastante importante.

As matérias primas mais importantes são o quartzo, o feldspato, o caolim e a argila, havendo ainda uma série de aditivos em menor porcentagem mas de influência sensível no produto resultante. O caolim é formado de microcristais do tipo folheado, resultante da composição de granito e feldspato, devido à ação da água, ácido carbônico e outros gases ácidos.

Materiais cerâmicos se caracterizam geralmente pelo preço baixo, por um processo de fabricação relativamente simples, e devido às características elétricas, térmicas e físicas vantajosas que podem apresentar, quando o processo de fabricação é bem cuidado.

Os componentes básicos mencionados têm, cada um, sua influência predominante no aspecto térmico, mecânico ou dielétrico. Assim, fazendo-se a análise em termos gerais, tem-se:

a) aspecto térmico - o componente que influi termicamente é o quartzo; portanto, quanto maior sua porcentagem, maior é a temperatura suportada por essa porcelana;

b) aspecto dielétrico - é o feldspato o componente que define o comportamento isolante, ou seja, os valores de rigidez dielétrica, o fator de perdas, etc;

c) aspecto mecânico - a exemplo da grande maioria dos demais materiais isolantes, os esforços melhor suportados pelos mesmos, são os de compressão, apresentando perante essas solicitações, valores dez vezes superiores aos de tração. Esses valores são consequência da porcentagem de argila e caolim presentes na massa cerâmica.

Os três grupos mencionados compõem basicamente uma porcelana, sem prejuízo de acréscimos outros bastante importantes mas de porcentagem menor. Portanto, para o preparo da massa a ser trabalhada, deve-se estabelecer primeiramente a aplicação que a porcelana terá, para então, em função das condições elétricas ou dielétricas, mecânicas e térmicas que o material deve suportar, estabelecer a porcentagem de cada um. Essa composição é representada graficamente no triângulo de composição, indicado na Fig. (5).

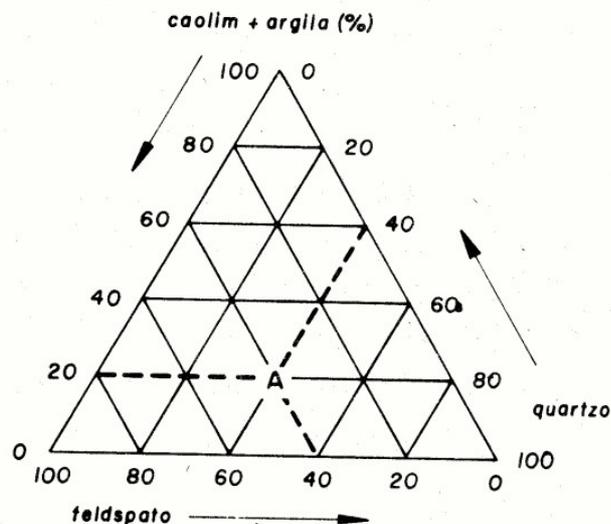


FIGURA 3 - Triângulo de composição da porcelana

A porcelana, até aqui referida, é apenas um exemplo de produto cerâmico, apesar de que, em tese, o processo de fabricação dos demais é semelhante, variando apenas a composição. Condensado na Tab. (3), podemos destacar os produtos relacionados a seguir:

1. Porcelana de isoladores Destinada a fabricação de isoladores de baixa, média e alta-tensão, para redes elétricas, dispositivos de comando, transformadores, etc. Deve apresentar comportamentos elétrico e mecânico adequado.

2. Cerâmica de capacitores. Distingue-se pela elevada constante dielétrica, aplicando-se em capacitores de baixa e alta-tensão. Não são solicitados por esforços mecânicos elevados.

3. Cerâmica porosa. Próprios para receber fios resistivos destinados à fabricação de resistores de fornos elétricos e de câmaras de extinção.

18 VIDRO

O vidro é a solução mais moderna para diversos problemas anteriormente só resolvidos com porcelana, e que hoje já encontram também soluções mediante o uso de resinas (epoxe) e aglomerados de resina com borracha. O vidro é encontrado em duas formas: a normal e a temperada.

Seguindo a classificação do material segundo seu estado físico, o vidro é incluído tanto no estado sólido quanto no líquido, uma vez que sua forma estrutura e as leis da deformação que obedece são as próprias do estado líquido, enquanto que a sua forma estável o classifica como sólido. O estado vítreo é particular de uma longa série de produtos orgânicos e inorgânicos, incluindo-se nesta última o produto que tecnicamente conhecemos por vidro. O vidro é basicamente composto de óxido de silício e de boro, nas formas Si_2O_2 e BO_3 ; acrescentam-se a esses dois uma grande série de aditivos, tais como os óxidos alcalinos K_2O e NaO_2 , que influem sobretudo no valor da temperatura de fusão do material Vidros técnicos normais, dependendo das porcentagens x, y, e z de cada um. apresentam-se, assim, como composição do tipo $x\text{NaO}-y\text{CaO}.z\text{SiO}$ (vidro de sódio) ou $x\text{K O CaO}.z\text{SiO}$. Outros aditivos,-y geralmente ainda na forma de óxidos, são o magnésio, o zinco, o antimônio, o chumbo e outros.

Assim os vidros são classificados em um dos grupos dados a seguir:

1. Vidros sódio-cálcicos, com a fórmula básica $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$ com pequenos acréscimos de Al_2O_3 , BaO , MgO e outros. São empregados em vidraças, garrafas e outros casos não elétricos. Apresentam baixo ponto de fusão;

2. Vidros cálcio-cálcicos com fórmula $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$, apresentando alto ponto de fusão e boa resistência química.

3. Vidros de cálcio-chumbo, com fórmula $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{PbO} \cdot 6\text{SiO}_2$ e acréscimos do tipo CaO e BaO . Tem baixo ponto de fusão, apresentam elevado índice de refração perante a luz. Seu uso é encontrado em vidro óptico e cristal de chumbo.

4. Vidro de silicato de boro e alumínio, com acréscimos de sódio (NaO), bário (BaO), cálcio (CaO) e outros. Apresentam bom comportamento químico e térmico. São apropriados para termômetros e finalidades químicas diversas.

5. Espécies, como por exemplo, vidro de quartzo que deixa passar as radiações ultravioletas e é insensível a variações de temperatura. Sendo um produto resultante de composição porcentual variável, diversos componentes, variam suas características em função dessa composição. Também tratamentos térmicos posteriores (têmpera) influem acentuadamente em particular no que se refere a suas características mecânicas, podendo-se, porém caracterizar o vidro sob os aspectos vistos a seguir.

1. Suportar temperaturas elevadas - a temperatura de serviço normal se localiza em torno de $200\text{-}250^\circ\text{C}$, ocupando assim posição dentro do grupo dos isolantes de elevada estabilidade térmica.

2. Peso específico relativamente baixo, apresentando, em geral, valor em torno de $2,5\text{g/cm}^3$, dependendo, porém, da composição.

3. Permite um tratamento térmico que eleva em muito as suas propriedades mecânicas. A têmpera do vidro adquire importância particular nas áreas dos isolantes, tipo disco e pedestal, devido à presença de esforços mecânicos acentuados.

4. Possui elevada estabilidade térmica. Entende-se por estabilidade térmica, o comportamento do material em suportar bruscas variações de temperatura. Esse comportamento é função do coeficiente linear de dilatação, da condutividade térmica e da resistência mecânica.

5. Geralmente possui acentuada estabilidade perante a umidade, dependendo porém de sua composição. Sendo freqüentemente um silicato, e tendo o silício a propriedade de ser repelente à água, justifica-se esta propriedade. Quando se eleva

a porcentagem de materiais alcalinos, observa-se uma redução dessa propriedade. Atinge-se uma situação em que, no caso de vidros compostos apenas de Na O ou K, e perante elevação de pressão e temperatura, o vidro se torna totalmente solúvel em água.

Apresenta elevadas perdas dielétricas, de modo geral, que ainda se elevam com elevação de temperatura. Essa propriedade torna pouco recomendável o uso do vidro perante frequência elevadas, pois poderá ocorrer destruição térmica. O valor das perdas depende de sua composição, notando-se uma redução das mesmas na presença de óxido de metais pesados ou óxido de cálcio.

19 MINERAIS

19.1 MICA

A mica é um mineral cristalino, que se apresenta em forma de pequenas lamelas ou lâminas, devido à baixa força de coesão entre os diversos planos cristalinos. Em termos de composição química, a mica é um silicato de alumínio. Dos diversos tipos de mica existentes, dois têm aplicação elétrica mais freqüente, a muscovita que tem a composição $KO.3AlO.6SiO.2HO$, e a flogopita com a fórmula $KO.3AlO.12MgO.12SiO.2HO$.

Caracteriza-se pelas propriedades enunciadas a seguir.

1. É encontrado com relativa facilidade, o que faz desse isolante um dos mais antigos em uso. Na forma natural, se mantém em camadas facilmente divisíveis, permitindo obter lâminas ou lamelas de pequena espessura. No estado natural ainda, é encontrado associado a óxidos metálicos, que precisam ser eliminados antes da utilização elétrica, por meio de purificação.

2. Na purificação com eliminação conseqüente das impurezas, elimina-se também material de ligação entre as lâminas de mica, ficando o material sem meio aderente. Esse meio é restituído à mica em sua aplicação, através de um verniz de colagem. Por vezes, além do verniz, a mica recebe um esforço mecânico através de uma base de papel ou de tecido. Resulta, assim um produto conhecido comercialmente por micanite, onde a porcentagem de verniz de colagem atinge até 25% do volume; em geral, porém esse valor se situa em torno dos 5% do volume.

3. O produto da mica com verniz pode ser rígido ou flexível, dependendo das características do verniz usado. Vernizes rígidos dão como resultado produtos rígidos.

4. A mica é um dos produtos de mais elevada estabilidade térmica e maior temperatura de serviço, atingindo valores de até 1000C. Como tal, é usado em numerosos casos de aquecimento elétrico. Sendo o produto de mica uma mistura de mica com verniz, a temperatura máxima admissível vai depender também do limite de temperatura do verniz, e que ainda se encontra em valores mais baixos. Assim, apesar de permitir uma temperatura muito alta, os produtos de mica têm sua temperatura limitada pelo valor máximo admissível tolerado pela resina do verniz.

5. Bom comportamento mecânico: a mica apresenta valores de resistência à tração e à compressão bastante alta: é, entretanto, sensível perante a flexão, o que faz da mica um material quebradiço no seu estado puro e em plaquetas grandes.

6. Apresenta ótimas características elétricas, variando esses valores com a espessura e a temperatura.

7. A mica é usada na forma de grandes lâminas, lamelas e pó, sempre reforçada por material de base e impregnado com vernizes, se assim se fizer necessário, para o seu uso correto.

8. A mica é relativamente higroscópica, devido à sua estrutura lamelar.

9. A cor da mica informa sobre sua qualidade. Essa coloração é sobretudo devido à presença de impurezas de difícil eliminação, de modo que, quanto mais incolor a mica, melhor é a sua qualidade. As cores geralmente encontradas são o amarelo, o esverdeado e o avermelhado.

Partindo da mica no estado puro, têm-se os produtos enunciados a seguir.

1. Placas de mica. São camadas com espessura superior a 0,05 mm, usados em equipamentos e componentes elétricos estáticos, como, por exemplo, em alguns tipos de capacitores, atualmente pouco freqüentes. Essas placas de mica são também usadas para aparelhos térmicos, tais como, aquecedores e ferros elétricos, onde um fio de aquecimento é envolto por placas de mica.

2. Lamelas ou lâminas de mica. Nesses casos, que são os mais comuns, a mica não apresenta forma própria, necessitando de aglomerante, e, eventualmente, também de um material de base. As lamelas de mica são coladas entre si, formando fitas, chapas, tubos, etc., de acordo com a necessidade. Incluem-se nesse caso,

canaletas de papel, mica e verniz de colagem, usados para isolar ranhuras de máquinas, ou a isolação entre as lâminas de um coletor.

3. Pó de mica, obtido por moagem de lamelas. Esse pó de mica pode ser usado como aditivo a outras massas e pós, ou, senão, na forma combinada com verniz de colagem, ser prensado em moldes, dando origem a peças de micanite.

Em todos os casos mencionados, seja devido à relativa higroscopia, seja por causa da necessidade de certas propriedades mecânicas no seu uso, a mica é geralmente associada a vernizes, e outros isolantes.

Assim, as características da mica pura não têm o mesmo significado como as de sua forma combinada. Assim, a rigidez dielétrica normalmente encontrada varia de 15 a 20kV/mm, havendo, porém casos em que atinge 40kV/mm.

Não resta dúvida de que, nas aplicações elétricas, a forma composta de mica, conhecida por micanite, é a mais importante, devido à grande variedade de produtos daí resultantes. A micanite é encontrada em fitas e em placas, na forma flexível e rígida, em diversos tamanhos. E existência, em número cada vez maior, de resinas e, conseqüentemente, de vernizes, confere à micanite papel de destaque entre os isolantes elétricos. Enquanto a micanite é basicamente formada de lamelas, o produto usando pó de mica, por vezes conhecido por micalex, também tem ampla faixa de uso. O micalex é rígido, composto de pó de mica e vidro de baixo ponto de fusão.

19.3 AMIANTO

É um material mineral fibroso, com brilho de seda, flexível, resultante da transformação de silicato de magnésio. A estrutura física é explicada pela forma cristalina que apresenta. Conforme se sabe, silicatos se apresentam numa estrutura tetraédrica de íons de SiO. Nos cantos dos tetraedros se encontra o átomo de oxigênio; no centro, o átomo de silício. Comparando com a mica, cuja estrutura tetraédrica é o tipo plano, no amianto essa estrutura é de tubos. Essas cadeias são em seguida ligadas entre si por íons de magnésio, formando os cristais de amianto.

Dessas ligações, as de Si-O-Si são particularmente fortes, sendo as de Mg-O-Mg menos resistentes. Por essa razão, os cristais de amianto permitem uma divisão em filetes ou tubos. O amianto é encontrado na natureza dentro de pedras, em filetes, com espessura variável desde fiação de milímetros até alguns centímetros.

Quanto maior o seu comprimento, maior é o valor do produto. O amianto se destaca pela estabilidade térmica e alta temperatura de serviço, mantendo sua resistência mecânica e flexibilidade praticamente inalteradas perante temperaturas em que fibras orgânicas já estão sendo destruídas.

Na sua estrutura, que é $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; na forma mais comum, a água é libertada apenas perante 300 a 400C, a partir da qual perde acentuadamente as suas propriedades mecânicas. A sua temperatura de fusão é cerca de 3 a 4 vezes mais elevada. Suporta elevados esforços mecânicos, que se localizam numa taxa de torção de 350kgf/cm, em média. Apresenta higroscopia relativamente elevada, o que faz com que seja usado eletricamente com a devida impregnação com resinas, óleos ou massas isolantes. Dessa propriedade e da respectiva impregnação vão depender as características finais.

O amianto costuma vir acompanhado de impurezas, particularmente ferrosas, sendo, e especial, acentuada a influência negativa do FeO. Essas impurezas são eliminadas por meio de ácidos.

O amianto é usado nas formas enunciadas a seguir.

I. Pó. O pó de amianto é, em geral, o resultado da decomposição de fios muito curtos, que, aliás, são os mais freqüentes. Esse pó é usado de diversas maneiras, como por exemplo.

a) recebendo como aditivo um verniz e aplicando a massa sobre papel isolante; o produto assim obtido é repelente à água, de elevada estabilidade térmica e resistente a ácidos, álcalis e solventes orgânicos (com exceção do benzol e seus derivados);

b) preenchimento de fusíveis do tipo encapsulado, atuando como elemento extintor, em substituição à areia (que também é um silicato).

TABELA 2 - Características de Materiais Isolantes

<i>Material</i>	<i>Fg</i> × 10 ⁻⁴ a 60Hz e 20°C	<i>Rigidez</i> <i>diel. E_d</i> (kV/mm)	<i>Temperat.</i> <i>limite</i> (°C)	<i>Resistiv.</i> <i>transversal</i> (Ω × cm) ^{dir}	<i>Constante</i> <i>dielétrica</i> <i>ε</i>	<i>Densidade</i> g/cm ³
Óleo mineral	10	10 a 14	95	25 × 10 ¹²	2	0,8 – 0,9
Askarel	10 a 20	13 a 16	135	10 ¹³ a 10 ¹⁴	5	1,3 .. 1,7
Óleo silicone	2 a 10	10 a 30	- 60 a 200	7,9 × 10 ¹⁴	2,1 a 2,8	0,5 a 1,0
Parafina	1 a 2	20 a 25	70	> 10 ¹⁶	1,9 a 2,2	0,8 a 0,9
Goma-laca	100	20 a 30	70	10 ¹⁵ a 10 ¹⁶	3,5	1,3 a 1,5
PVC	10 a 10 ⁻²	40 a 50	75	10 ¹³ a 10 ¹⁶	3 a 4	1,2 a 1,4
Polietileno	2 a 5	30	85	10 ¹⁶ a 10 ¹⁷	2,3 a 2,4	0,9
Polistírol	3 a 50	25 a 50	50 a 80	10 ¹⁴ a 10 ¹⁸	2,5	1,05
Baquelite	100 a 400	20	150	10 ¹² a 10 ¹⁴	4 a 4,5	4 a 7
Betume	170	50 a 100	60	10 ¹⁰	2,7	0,9 – 1,1
Papel para capacitores	20 a 30	35	100	10 ¹⁸	3,7	1,5
Papel para cabos	100 a 200	8 a 10	100	10 ¹⁶	3 a 3,5	0,8 a 0,9
Vidro e fibra de vidro	até 100	35 a 50	200 a 250	10 ¹¹ a 10 ¹⁷	5 a 8	2 a 6
Amianto	–	2 a 30	200 a 250	10 ¹¹ a 10 ¹⁷	5 a 8	2 a 6
Mica muscovita	0,5 a 3	5 a 40	500 a 600	10 ¹⁵ a 10 ¹⁶	6 a 7	3
Flogopita	0,5 a 5	4 a 40	800 a 1000	10 ¹³ a 10 ¹⁴	5 a 6	3

II. Fibras e respectivos tecidos. Nesta forma, obtêm-se fitas, simples e combinadas com papéis, devidamente aglutinadas por meio de um verniz de colagem. Comparativamente com fitas orgânicas, as de amianto são duras, grossas e mal-acabadas. Por vezes, opta-se por uma mistura de fibras de amianto com fibras orgânicas, para se obter um tecido mais flexível e que mesmo assim ainda se destaque por um bom comportamento térmico. Mais recentemente, tem-se usado também a fibra de amianto misturada com a fibra de vidro. Para algumas aplicações elétricas especiais, usa-se o cimento de amianto, que substitui com vantagem mármore e produtos semelhantes. Nesse caso, fibras de amianto são misturadas com cimento e água, prensando-se a massa nas dimensões desejadas. Devido a elevada higroscopia, é necessário aplicar verniz. O cimento endurece e se liga rigidamente às fibras. Esse cimento, assim obtido, suporta bem o calor e elevadas solicitações mecânicas, o que leva a seu uso como base de chaves de manobra, câmaras de extinção do arco voltaico e paredes de separação de fase.

20. MATERIAIS DA CLASSE DA BORRACHA

Fundamentalmente podemos diferenciar entre borrachas naturais e artificiais ou sintéticas. A borracha natural é obtida a partir do látex, que é o líquido retirado de certas plantas, e que, para seu uso industrial, sofre um tratamento com enxofre e

outros aditivos, dando origem à vulcanização da borracha. Entretanto, com o desenvolvimento de borrachas sintéticas, a borracha natural perdeu sua importância, sendo que, para as aplicações elétricas, são válidas, hoje, praticamente apenas as borrachas sintéticas.

A borracha sintética se desenvolveu sobretudo no sentido de resolver alguns críticos da borracha natural, enumerados a seguir. Rápido envelhecimento - a borracha natural se torna dura e quebradiça.

É extremamente sensível à gasolina e ao óleo, inchando acentuadamente.

É atacado pelo cobre e pelo manganês. Particularmente, quanto ao enxofre presente na borracha, este desencadeia uma reação inadmissível para finalidades elétricas. Lembrando o grande número de condutores em que se usa o cobre, já salta de imediato a importância dessa observação. A solução prática que se tem usado nesse caso é a estanhagem do condutor de cobre. Não permite temperaturas de serviço acima de 75°C. Acima desse valor, a borracha perde sua elasticidade.

É também sensível à ação dos raios solares e da ozona.

A borracha sintética tem como elemento básico o isopreno, que foi substituído posteriormente pelo butadieno (bu), usando-se como catalisador o sódio (Na). Daí o fato de uma das primeiras borrachas sintéticas receber o nome de buna. Esse processo já sofreu uma série de modificações, adequando-se às novas observações e descobertas feitas. Por meio de métodos adequados, essa mistura é plastificada, através de oxidantes e da elevação de temperatura.

As propriedades dos produtos prontos dependem acentuadamente do processo de preparo, aditivos plastificantes e outros materiais presentes. Com isso, podem ser adaptados às exigências que são feitas, inclusive preparando uma camada ou um tubo de borracha sintética com materiais diferentes na parte interna e na externa.

Observa-se, como regra geral, as borrachas sintéticas são inferiores às naturais, no que se refere aos reforços admissíveis de tração; entretanto, são sensivelmente melhores quanto ao envelhecimento, estabilidade térmica, resistência perante agentes químicos e perante ozona, e mais resistentes à abrasão.

Entre as borrachas artificiais, que pertencem ao grupo termofixos, destacam-se as conhecidas por EPR (borracha de etileno-propileno), o neoprene e a borracha butílica.

O neoprene é obtido por polimerização do clorobutadieno, que apresenta elevada velocidade de reação devido à presença do cloro. Resultam, assim cadeias de átomos intensamente interligados, de difícil manuseio. Esse produto, mediante o acréscimo de certos produtos, se transforma no que se chama de neoprene, que recebe também estabilizadores de reação, para evitar sua modificação perante a temperatura ambiente. Nesse estado, o neoprene se apresenta como uma massa dura, mal-cheirosa e escura, que não é inflamável. Aquecido a 60C, perante uma compressão, a massa amolece e permite facilmente sua aplicação.

Apresenta a vantagem de não precisar de enxofre para sua polimerização, bastando aquecê-la a 130-170C. O enxofre, porém apresenta problemas de ordem química com o cobre; melhora no entanto as propriedades físicas da borracha e evita endurecimentos futuros do produto acabado. O neoprene suporta 120C e mais, apresentando, assim, uma estabilidade térmica e temperatura de serviço superior à da borracha natural. Suporta também a gasolina e o óleo. A resistência à tração é um pouco inferior à da borracha natural, sendo também inferior em elasticidade.

As propriedades elétricas também não são as melhores, devido aos átomos de cloro, que são grupos polares. Por essa razão, o neoprene tem importante aplicação como capa externa de cabos, mas não como isolamento dos mesmos.

A borracha butílica, que substitui com vantagens a borracha natural, também sob ponto de vista elétrico, se apresenta com grande flexibilidade, boa resistência contra agentes químicos e, assim, baixo envelhecimento. A presença de enxofre, que dá ao material uma maior estabilidade, cria porém um problema em contato com o cobre, com o qual reage. Por essa razão, os condutores isolados eletricamente com borracha butílica, devem ser estanhados. Sua temperatura limite de serviço é menor que a do neoprene, não devendo ultrapassar 80C (max. 85C).

A borracha de etileno-propileno (abreviamente EPR, ethylene propylene rubber), é atualmente a borracha mais moderna e de melhores características. Esse material termofixo apresenta uma rigidez dielétrica levemente superior à borracha butílica, inferior porém ao polietileno reticulado, que é um plástico também termofixo, com características bem semelhantes ao EPR. Apresenta baixo fator de perdas e valor de constante dielétrica intermediária. Suporta temperaturas até 90 C em regime permanente. Quimicamente, o EPR é excelente perante a ação da ozona, e aos agentes químicos presentes no ar.

21. CONCLUSÃO

A resistência elétrica dos condutores das bobinas dos transformadores, quando da passagem da corrente, causa seu aquecimento. O calor assim gerado, irá causar a degradação térmica do material isolante e, portanto, é fácil observar que quanto mais eficientemente for removido maior será a vida útil do sistema.

Assim vemos que a principal função dos isolantes é a refrigeração das espiras do material condutor. Além disso, é fácil observar que quanto melhores as características dos materiais isolantes utilizado, mais econômico poderá ser o projeto do sistema pela redução da quantidade do material isolante (optanto entre os diversos tipos existentes) e, pela diminuição da distância entre as espiras, entre bobinas e núcleo e entre estes e as partes aterradas.

22. REFERÊNCIAS

Obtido em " <http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/ensaios/fncoleo1.pdf>", ACESSADO 22/06/2008 às 00h 13min

Obtido em "www.pakari.com.br/descricao.php?id=17" às 00h 45min 08/07/2008

Obtido em www.dupont.com/nomex às 21h 02 min/ 08/07/2008

Callister Jr., William D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, Ed, LTC, 2002.

IEEE Transactions On Power Delivery. Vol. 9. Nº 4, Outubro,1994, pp.1926

CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Rodrigo Delfim Guarizi

1. INTRODUÇÃO

Devido ao consumo crescente, pela sociedade moderna, de energia efetivamente baseada no petróleo, que é um combustível esgotável, tornou-se necessária a procura de fontes alternativas, de preferência renováveis, que possam vir a substituí-lo. Entre as formas não-convencionais, está a chamada Célula Fotovoltaica.

Diferente dos sistemas solares para aquecimento de água, os sistemas fotovoltaicos (FV) não utilizam calor para produzir eletricidade. Interpretando a palavra; "photo" significa "produzido pela luz," e o sufixo "voltáico" refere-se a "eletricidade produzida por uma reação química".

A Energia Solar Fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico). O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz, o que pode ser usado para gerar eletricidade. Esta energia é confiável e silenciosa, pois não existe movimento mecânico. O movimento dos elétrons forma eletricidade de corrente direta.

2. ESTRUTURA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A célula fotovoltaica tem uma estrutura bastante simples com materiais ainda difíceis de serem encontrados: ela é formada basicamente por uma cobertura transparente que a protege dos efeitos erosivos, uma camada de cobertura anti-reflexiva para evitar que hajam raios refletidos e perda de raios solares, um contato em malha para arrecadar os elétrons que irão passar um semicondutor com uma carga grande de nêutrons, um semicondutor com uma carga grande de prótons, uma junção entre os dois formada pelos mesmos semicondutores e um contato ôhmico. Um exemplo de célula fotovoltaica é demonstrado a seguir:

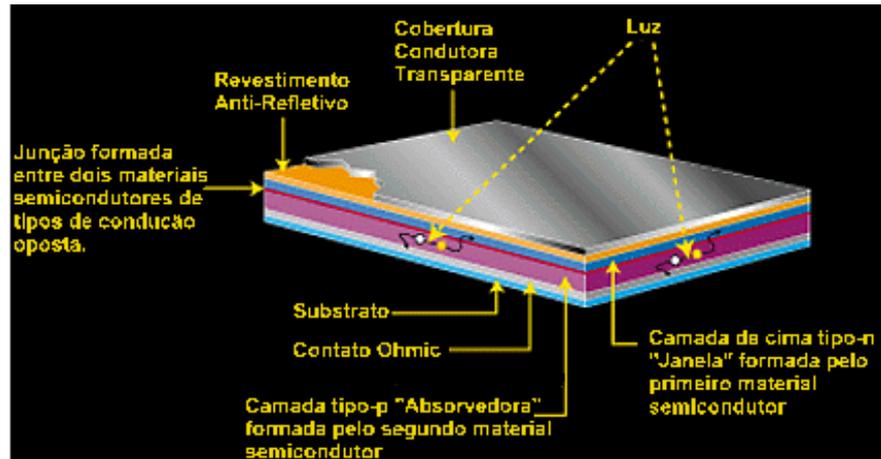


FIGURA 1. Estrutura de uma célula fotovoltaica

Várias células são conectadas para produzir um painel fotovoltaico e muitos painéis conectados formam um "array" ou módulo fotovoltaico. Um sistema fotovoltaico completo consiste de um painel ou um módulo conectado a um inversor que converte a eletricidade de corrente direta em corrente alternada que é compatível com o sistema da rede elétrica. Baterias poderão ser incluídas no sistema para prover um sistema totalmente independente da rede elétrica "off grid" ou de "emergência" em caso a rede elétrica interrompa o serviço de energia elétrica por motivos diversos.

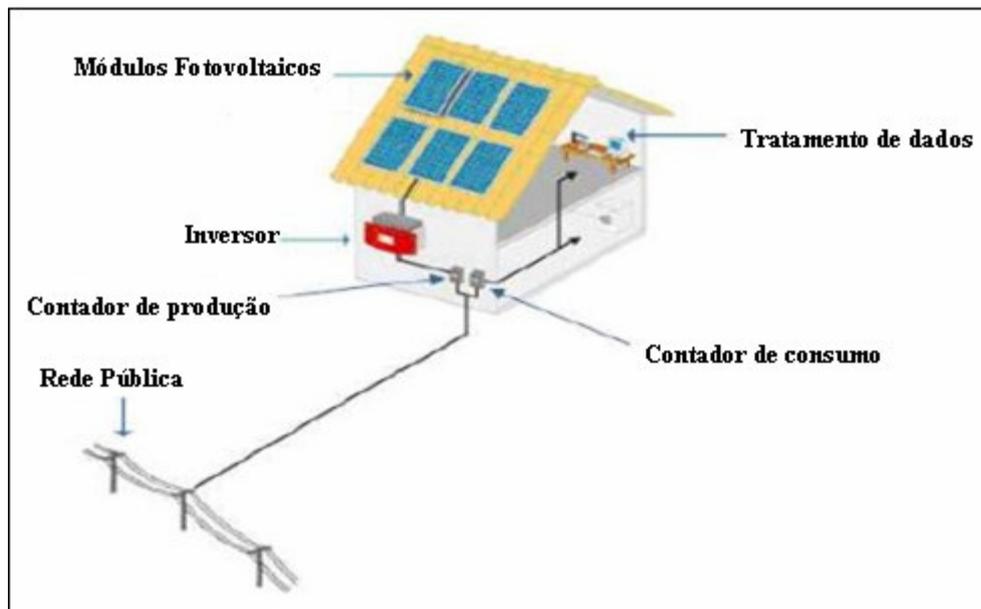


FIGURA 2. Modelo de um sistema fotovoltaico

Estas células fotovoltaicas são feitas de material especial (semicondutores), cujo comportamento elétrico está entre o de condutores metálicos e o de bons isolantes.

As células fotovoltaicas podem ser fabricadas através de diversos processos ou tecnologias e entre elas destacam-se as seguintes:

- Silício monocristalino
- Silício policristalino
- Silício amorfo
- Cádmium Telluride
- Copper Indium Gallium
- Diselenide

Porém, os semicondutores feitos de silício são os mais usados na construção de células fotovoltaicas e sua eficiência em converter luz solar (que é branca) em eletricidade chega a 10%.

3. TIPOS DE INVERSORES

Os tipos básicos de inversores são:

a) Inversor de onda senoidal utilizado em sistemas ligados a rede elétrica "utility intertie". A maior parte das residências utilizam corrente alternada de 60Hz e 120 Volts. O inversor senoidal transforma a corrente direta do sistema FV (variando geralmente entre 12Vcd – 360Vcd) em 120Vca, 60 Hz e sincroniza com a rede elétrica.

b) O Inversor de onda senoidal modificada é semelhante ao anterior, porém não produz energia com a mesma qualidade e desta maneira não é aceito pela rede elétrica e seu uso fica restrito para os sistemas independentes e de custo inferior.

Os sistemas fotovoltaicos produzem energia intermitente porque trabalham somente quando o sol está brilhando. O pico de produção da energia elétrica é alcançado num dia claro de intensidade solar máxima com ângulo direto, perpendicular ao módulo.

Dias nublados reduzem a energia produzida e não há produção elétrica durante a noite. Em localidades equatoriais o sistema fotovoltaico produzirá em média a mesma quantidade de energia durante todo o ano, porém na medida em que se eleva a latitude do local, a maior produção da energia elétrica se efetua no verão, quando o sol está mais alto e os dias são mais prolongados. Geralmente esta disparidade é compensada em sistemas de bombeamento de água (necessita-se de mais água no verão) ou na utilização de energia elétrica para refrigeração.

4. CLASSIFICAÇÃO DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Os principais tipos de células fotovoltaicas estão classificados na Figura seguinte, contendo também a quantidade de energia que absorve:

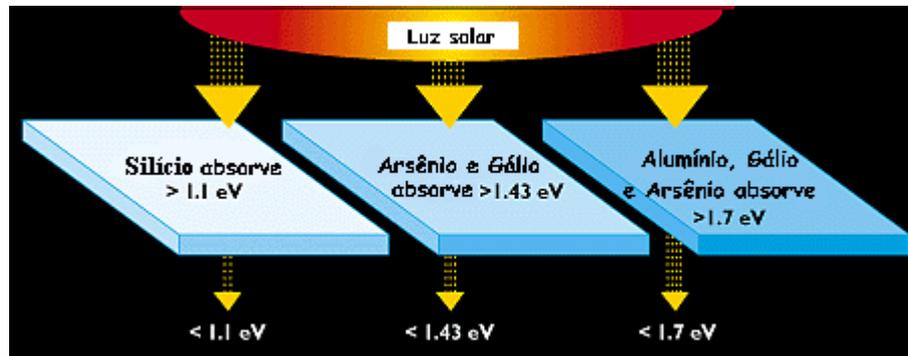


FIGURA 3. Classificação das células fotovoltaicas

Os elementos químicos usados nas células fotovoltaicas são, geralmente, metais, semi-metais e não metais, localizados na Tabela periódica entre 1B e 7A. O sistema poderia ser composto também por elementos da série de lantanídeos e actinídeos, mas nunca foram usados por motivos de segurança, pois contêm alto índice de radiação. Já existem no mercado uma grande diversidade de células fotovoltaicas, tais como orgânicas (plásticas) que podem ser manuseadas sem perigo de causar danos e com elementos que imitam cores de telhados de casas ou até mesmo muros de tijolos. Um outro tipo de célula também muito usada utiliza Telúrio, Zinco e Cádmio (TeZnCd).

5. FUNCIONAMENTO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Sabe-se que existem materiais que "produzem" eletricidade quando aquecidos ou resfriados, outros quando imerso em campo magnético e alguns fazem com que fluam elétrons em seus terminais quando neles incidem luz.

As células fotovoltaicas são muito usadas em pequenas calculadoras, relógios de pulso, aparelhos que precisam de pouca energia. Também se usa células fotovoltaicas onde a geração de energia se torna difícil por um meio mecânico, é o caso dos satélites. Lá nos satélites encontra-se dificuldade na geração de energia pelo método convencional. A energia é fundamental para o funcionamento dos satélites, já que seus circuitos elétricos precisam de corrente elétrica para funcionar. Os satélites possuem grandes painéis solares: um painel solar é construído de

inúmeras células fotovoltaicas, todas ligadas em série (a tensão de uma se soma com a tensão da outra), sendo assim, é possível obter a energia necessária para o satélite funcionar.

Todo material possui partículas carregadas negativamente e positivamente, chamadas respectivamente elétrons e prótons. Como já foi dito, a célula fotovoltaica é constituída por silício, um material semicondutor, que é capaz de conduzir energia em determinadas situações, por exemplo, em temperaturas elevadas. Mas se o silício for dopado com prótons e elétrons, torna-se respectivamente tipo N e tipo P. Com esse material agora com excesso ou falta de elétrons, é possível fazer uma junção denominada de junção PN. Também tem-se junção PNP, NPN.

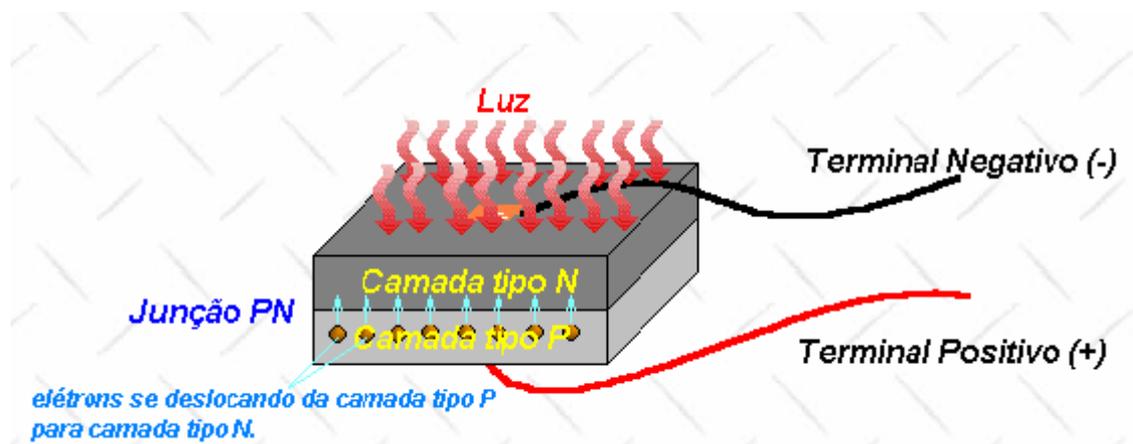


FIGURA 4. Célula fotovoltaica dopada com prótons e elétrons

Agora de um lado dessa junção tem-se muitos elétrons e do outro lado muitos prótons. Se essa junção for iluminada com luz comum, tem-se uma transferência de elétrons da junção P (onde tem muitos), para a junção N, provocando um deslocamento de elétrons (corrente elétrica), produzindo nos terminais de ligação da junção uma d.d.p. (diferença de potencial elétrico); a qual pode-se aproveitar para o funcionamento de um relógio digital, que precisa de pouca energia para seu funcionamento, por exemplo.

Um experimento prático e simples de uma célula fotovoltaica usada no dia-a-dia pode ser melhor explicado da seguinte forma: para este experimento escolheu-se um transistor de potência tipo 2N3055 pois dentro dele existe uma placa de silício com junção NPN. O primeiro passo foi retirar a capa metálica protetora do transistor com muito cuidado para não estragar a junção.



FIGURA 5. Esquema de um transistor

Ligou-se um fio na carcaça metálica do transistor e outro em um de seus terminais, assim usou-se uma camada tipo P e uma camada tipo N. Observe que um terminal ficou livre e este foi ligado a outra camada tipo N.

Iluminando a pastilha de silício (junção) obteve-se nos terminais elétricos fios negativo e positivo, uma tensão de aproximadamente 0,4 Volts e uma corrente elétrica da ordem de 300 micro-Ampère. Foram colocados vários transistores em série (o terminal negativo de um ligado no terminal positivo do outro), e teve-se um painel solar.

6. RENDIMENTO DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Nas células solares tradicionais, cada fóton de luz que entra na célula produz um elétron livre. A soma de todos os elétrons liberados representa a quantidade de energia que a célula consegue gerar. Atualmente cientistas comprovaram o chamado "efeito avalanche", também conhecido como "fenômeno da multiplicação das cargas" em células solares fotovoltaicas, por meio do qual nanocristais incorporados na célula liberam dois ou três elétrons a partir de um único fóton.

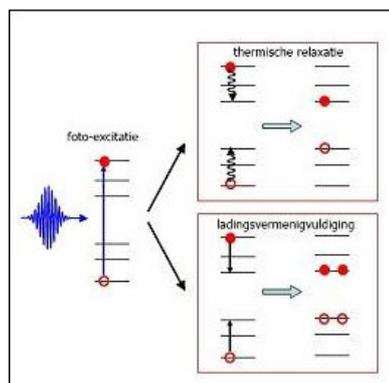


FIGURA 6. Demonstração do efeito avalanche das células fotovoltaicas

Esse efeito avalanche pode elevar a eficiência das células solares a um máximo teórico de 44%, quase três vezes superior ao rendimento das melhores células solares atuais. E, ao invés de serem mais complicadas, as células solares de nanocristais são mais simples de se fabricar, sendo, portanto, mais baratas.

Esses pesquisadores demonstraram ainda que o efeito da multiplicação das cargas elétricas ocorre em nanocristais semicondutores - cristais que medem apenas alguns nanômetros de diâmetro - de seleneto de chumbo (PbSe).

A produção de múltiplos elétrons a partir de cada nanocristal foi aferida por uma técnica que utiliza raios laser ultra-rápidos. Contudo, a medição revelou que a produção é inferior a 44% (nível proposto pela teoria), fazendo com que os cientistas continuem pesquisando em busca de nanocristais cada vez mais eficientes.

7. SILÍCIO - MATÉRIA-PRIMA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

O silício é matéria-prima usada para a fabricação dos painéis solares, que usam células fotovoltaicas, para transformar a energia solar em energia elétrica. No momento, o silício é importado e o grande desafio agora é produzir esse silício de grau solar.



FIGURA 7. Ilustração de lingotes de silício de grau solar

A expressão “grau solar” refere-se ao nível de pureza que o silício deve alcançar para que as células solares sejam eficientes. O grau menos puro do silício, utilizado para fabricação de aço, é chamado grau metalúrgico. A fabricação de chips de computador exige a mais alta pureza, chamada grau eletrônico.

Para isso tem sido realizada uma pesquisa para a obtenção de silício de alta pureza, que por sua vez servirá à indústria de energia solar e eletrônica. Hoje o

Brasil fabrica as células fotovoltaicas, mas não produz o silício de grau solar. O objetivo dessa pesquisa é permitir que o país complete a cadeia produtiva, pois esta precisa ser fechada.

O crescimento, processamento e dopagem de lâminas de Silício, bem como a microeletrônica atingiram alto grau de desenvolvimento. Devido a isto, na pesquisa e desenvolvimento de dispositivos optoeletrônicos a partir de outros materiais, a possibilidade de integração com o silício é sempre considerada e perseguida. O silício se cristaliza, como o diamante, em uma estrutura cúbica de face centrada, ilustrada pela Figura abaixo (8.2). A constante de rede (a_0) e o coeficiente de dilatação térmica do silício apresentam, entretanto, elevada discrepância com relação aos correspondentes parâmetros dos compostos IV-VI, como mostrado na Tabela 1.

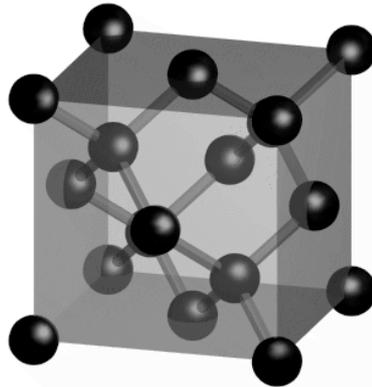


FIGURA 8. Estrutura tridimensional do silício.

TABELA 1. Constantes físicas à 300K de alguns calcogenetos e de outros semicondutores de interesse tecnológico onde a_0 é o parâmetro de rede e a letra grega BETA (β) representam o coeficiente de dilatação térmica linear.

	Composto	a_0 (Å)	β_{lin} ($10^{-6} \cdot K^{-1}$)
I	PbTe	6,462	19,8
II	PbSe	6,124	19,4
III	PbS	5,936	20,3
IV	SnTe	6,300	21,0
V	$Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$	6,432	20
VI	HgTe	6,463	4
VII	CdTe	6,482	5,5
VIII	$Hg_{0,8}Cd_{0,2}Te$	6,4645	4,3
IX	Si	5,431	2,6
X	SiC (fcc)	4,35	4 – 5

8. Silício como Semicondutor

Semicondutor é um corpo sólido, cuja resistividade se encontra entre os valores de 10^{-4} e $10^{-10} \Omega \cdot \text{cm}$, que apresenta, pelo menos em certo trecho um coeficiente de temperatura da resistividade com valor negativo e cujo valor pode ser reduzido sensivelmente pela presença de impurezas ou de defeitos na estrutura da matéria.

Semicondutores são materiais para os quais a zero Kelvin, a banda de valência está totalmente preenchida e a de condução totalmente vazia, funcionando nessa condição como isolante. Porém, como o intervalo de energia proibido “gap” é estreito, da ordem de 1,1 eV para o Silício e 0,72 eV para o Germânio, á temperatura ambiente alguns elétrons podem ser excitados termicamente para a banda de condução deixando na banda de valência estados vacantes (lacunas), que se comportam como partículas positivas. Deste modo, cada excitação térmica que promove um elétron para a banda de condução forma dois portadores de carga: o elétron e a lacuna.

Além de energia térmica para provocar esta excitação outros meios podem ser utilizados para bombardear-se o material – radiação: luz, raios γ , elétrons etc.

A condutividade dos semicondutores não é mais alta daquela dos condutores, (metais), entretanto, eles têm algumas características elétricas que os tornam especiais. As propriedades elétricas desses materiais são extremamente sensíveis à presença de impurezas, mesmo em muito pequenas concentrações. Os semicondutores intrínsecos são aqueles nos quais o comportamento elétrico está baseado na estrutura eletrônica inerente do material puro. Quando as características elétricas são determinadas por átomos de impurezas, o semicondutor é extrínseco.

Sob a ótica da magnitude de suas discontinuidades de energia (bandas de energia), num semicondutor a discontinuidade de energia é tal que certo número de elétrons estão aptos a saltar da banda de valência totalmente preenchida para a banda de condução. Aqueles elétrons energizados podem agora transportar uma carga no sentido do eletrodo positivo; e, além disso, os buracos eletrônicos resultantes na banda de valência tornam-se capacitados para condução porque os elétrons mais profundos (mais internos) da banda podem mover-se para aqueles níveis vagos.

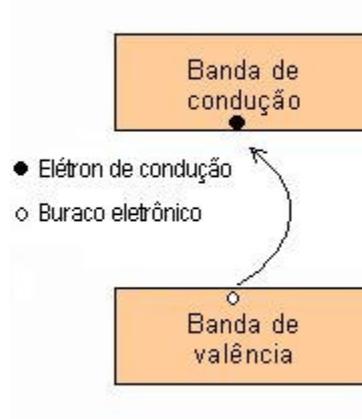


FIGURA 9. Salto da descontinuidade de energia por um elétron na banda de energia.

8.1 Silício extrínseco tipo n

Considere por exemplo, uma amostra de Silício contendo um átomo de Fósforo. O Fósforo tem cinco elétrons de valência enquanto que o Silício tem quatro. Na Figura 8.4 (a), o elétron extra está presente independentemente dos pares de elétrons que servem como ligação entre átomos vizinhos. Este elétron pode transportar uma carga no sentido do eletrodo positivo (b). Alternativamente na Figura 8.4 (c) o elétron extra – o qual não pode residir na banda de valência anteriormente preenchida – fica localizado proximo ao topo da descontinuidade de energia. Desta posição – denominada nível *doador* E_d – o elétron extra pode ser ativado facilmente a fim de alcançar a banda de condução. Independentemente do modelo usado, Figura 8.4 (b) ou 8.4 (c), podemos ver que átomos do Grupo V (N, P, As e Sb) da classificação periódica, podem fornecer transportadores de carga negativos, ou tipo $-n$, a semicondutores.

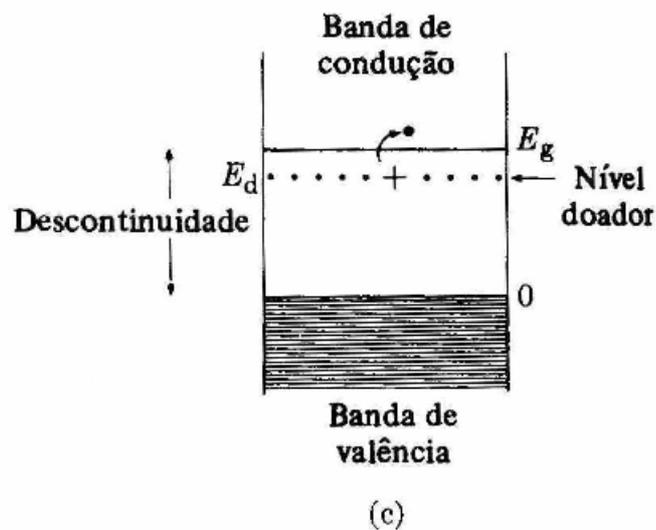
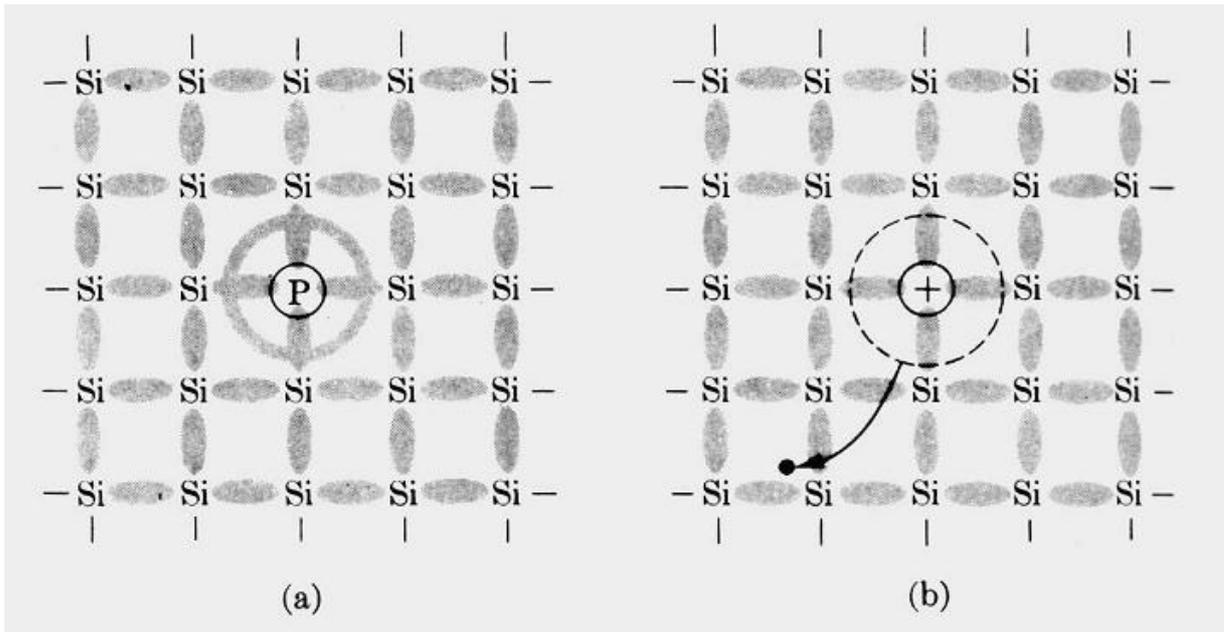


FIGURA 10. silício extrínseco tipo n

8.1.2 Silício extrínseco tipo p

Os elementos do Grupo III (B, Al, Ga e In) têm somente três elétrons de valência. Quando tais elementos são adicionados ao Silício como impurezas, resultam buracos eletrônicos. Como mostrado nas Figuras 8 (a) e (b), cada átomo de Alumínio pode receber um elétron. No processo, uma carga positiva se move no sentido do eletrodo negativo. Usando um modelo de banda [Figura 8 (c)], notamos que a diferença de energia para os elétrons se moverem da banda de valência ao *nível receptor*, E_r , é muito menor que a descontinuidade de energia total. Portanto, os elétrons são mais efetivamente ativados no âmbito das posições receptoras do

que no âmbito da banda de condução. Os buracos eletrônicos que permanecem na banda de valência são aproveitáveis como transportadores positivos para condução tipo-p.

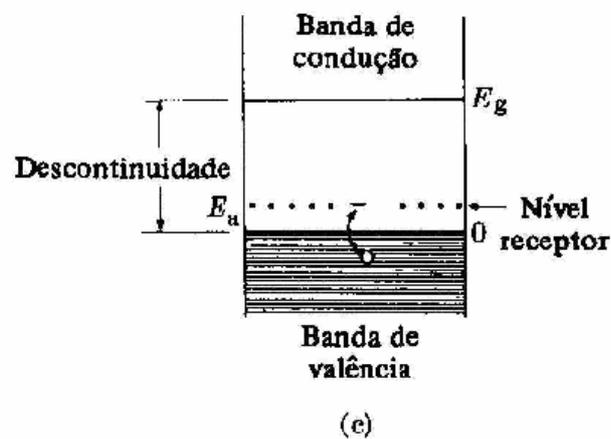
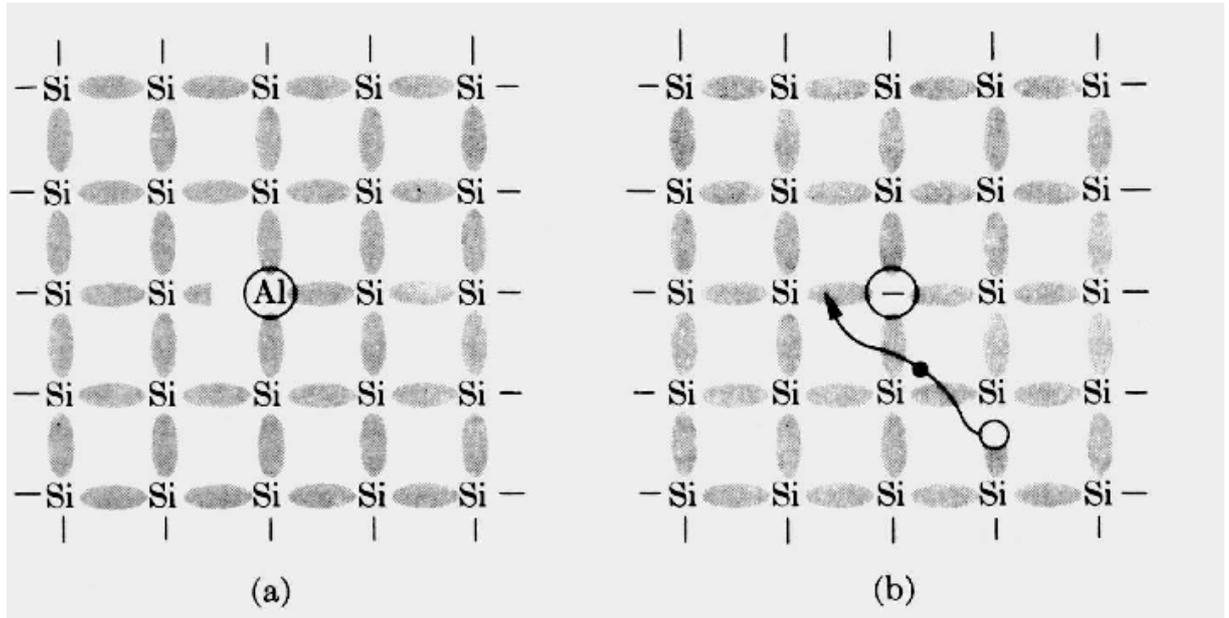


FIGURA 11. Silício extrínseco tipo p

8.2 Silício Mono e Policristalino (s-Si):

É a tecnologia mais empregada atualmente, com uma participação de 95% do mercado de células fotoelétricas. Apresenta um rendimento de 15 a 21% em suas células; painéis solares feitos de células de silício cristalino têm rendimento de 13 a 17%. As células solares fotovoltaicas tradicionais e as mais eficientes disponíveis no

mercado são feitas de silício monocristalino. Seu processo produtivo exige salas limpas e tecnologia de última geração, o que as torna caras.

Pesquisadores conseguiram aumentar a eficiência das células fotovoltaicas policristalinas, muito mais simples de se fabricar e, portanto, muito mais baratas. Só que, até agora, elas não eram tão eficientes. O ganho de 27% coloca a eficiência das células solares policristalinas no mesmo nível das monocristalinas, ambas passando a ser capazes de converter cerca de 19,5% da luz solar em eletricidade.

Se os átomos ou íons de um sólido se arranjamem num padrão que se repete segundo as três dimensões, forma-se um sólido que se diz ter estrutura cristalina e se designa por sólido cristalino ou material monocristalino. Se este arranjo não for repetitivo forma-se um sólido policristalino.

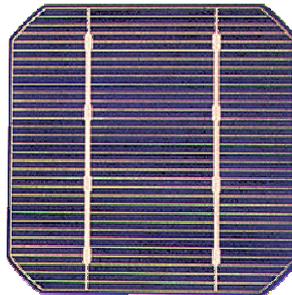


FIGURA 12- Célula de silício cristalino ou monocristalino

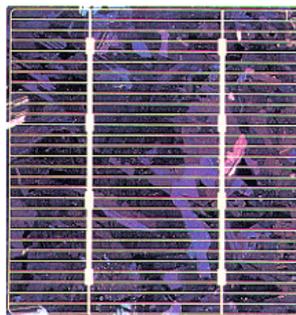


FIGURA 13- Célula de silício policristalino

Foram três inovações básicas incorporadas às células policristalinas:

A primeira consiste em uma técnica para se depositar uma textura sobre a superfície das células solares que faz com que o silício absorva mais luz.

A textura rugosa inclina os raios de luz quando eles entram na célula solar. Assim, em vez de bater no fundo da célula e se refletirem de volta, os raios de luz fazem um caminho muito mais irregular, "rebatendo" várias vezes antes de escapar e gerando mais energia.

A segunda inovação inclui a utilização de nanofios de prata para capturar a energia elétrica gerada pelo silício. Ainda que a prata seja um metal muito caro, os nanofios têm apenas um quinto das dimensões dos fios hoje utilizados, além de apresentarem ganhos significativos de condutividade.

Com fios de prata muito mais finos, o custo de fabricação como um todo é reduzido. Como benefício adicional, a menor espessura dos fios significa que uma menor quantidade de luz será bloqueada por eles, deixando que mais fótons cheguem ao silício para gerar energia.

A terceira e última inovação também está relacionada à condução da energia gerada, afetando aqueles condutores achatados que coletam a eletricidade de cada célula solar individual. Na nova célula, elas são ligadas diretamente aos nanofios de prata. Essas barras ocupam grandes áreas nas células, impedindo a chegada dos fótons ao silício. A solução foi fabricar esses condutores planos de forma que sua superfície seja espelhada. O efeito é similar ao alcançado pela textura rugosa.

Embora as três inovações incorporem novos elementos de custos, os ganhos resultantes são tão grandes que o resultado final é uma célula solar mais barata e mais eficiente.

As células mono-cristalinas representam a primeira geração. O seu rendimento elétrico é relativamente elevado (aproximadamente 16%, podendo subir até cerca de 23% em laboratório), mas as técnicas utilizadas na sua produção são complexas e caras. Por outro lado, é necessária uma grande quantidade de energia no seu fabrico, devido à exigência de utilizar materiais em estado muito puro e com uma estrutura de cristal perfeita. Em detrimento da estrutura cristalina organizada, planos cristalográficos paralelos, simetria em todos os sentidos da rede tridimensional, dá-se a maior contribuição para maior eficiência na conversão da luz branca em energia elétrica.

As células poli-cristalinas têm um custo de produção inferior por necessitarem de menos energia no seu fabrico, mas apresentam um rendimento elétrico inferior (entre 11% e 13%, obtendo-se até 18% em laboratório). Esta redução de rendimento é causada pela imperfeição do cristal, ou seja, em detrimento de planos cristalográficos desordenados, assimetria tridimensional das direções cristalográficas e devido ao sistema de fabrico.

8.3 Silício Amorfo (a-Si):

Participação de cerca de 4% do mercado de células fotoelétricas e tem rendimento de aproximadamente 7%. As principais vantagens do silício amorfo são: um processo de fabricação relativamente simples e barato, uma possibilidade de fabricação de células com grandes áreas e o baixo consumo de energia na produção.

As células de silício amorfo são as que apresentam o custo mais reduzido, mas em contrapartida o seu rendimento elétrico é também o mais reduzido (aproximadamente 8% a 10%, ou 13% em laboratório). As células de silício amorfo são películas muito finas, o que permite serem utilizadas como material de construção, tirando ainda o proveito energético.



FIGURA 14. Imagem de uma placa de silício amorfo

8.4 Fotocondução no Silício

Há apenas uma pequena probabilidade de que um elétron da banda de valência do Silício possa atravessar a descontinuidade de energia (Banda Proibida), por ativação térmica, atingindo a banda de condução.

Em contraste com isso, um fóton de luz vermelha (comprimento de onda = 660 nm) tem 1,9 eV de energia, o que é mais que suficiente para permitir que um elétron salte a descontinuidade de energia de 1,1 eV no Silício (Figura 8.4.1 abaixo). Assim sendo, a condutividade deste elemento aumenta marcadamente por fotoativação, quando exposto à luz.

Um fóton (i.e. energia luminosa) eleva o elétron através da descontinuidade de energia, produzindo um par “elétron de condução + buraco de valência”, formando transportadores de carga. A recombinação ocorre (Figura 8.7 a seguir) quando o elétron retorna à banda de valência.

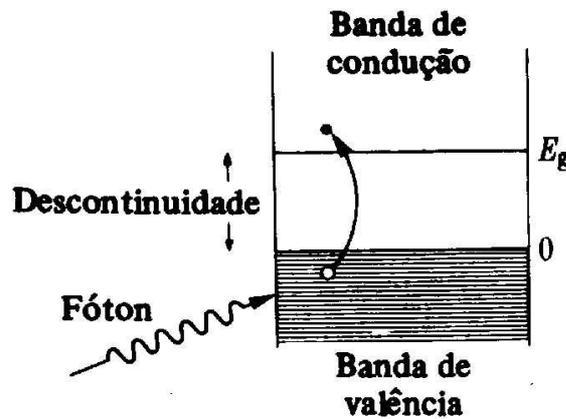


FIGURA 15- Fotocondutção

8.4.1 Efeito Fotovoltaico na Junção pn

Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formado o que se chama *junção pn*.

O que ocorre nesta junção é que elétrons livres do lado n passam ao lado p onde encontram os buracos que os capturam; isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado p, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado n, que o torna eletricamente positivo.

Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p; este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado n. Esquemáticamente temos a Figura 8.8 a seguir.

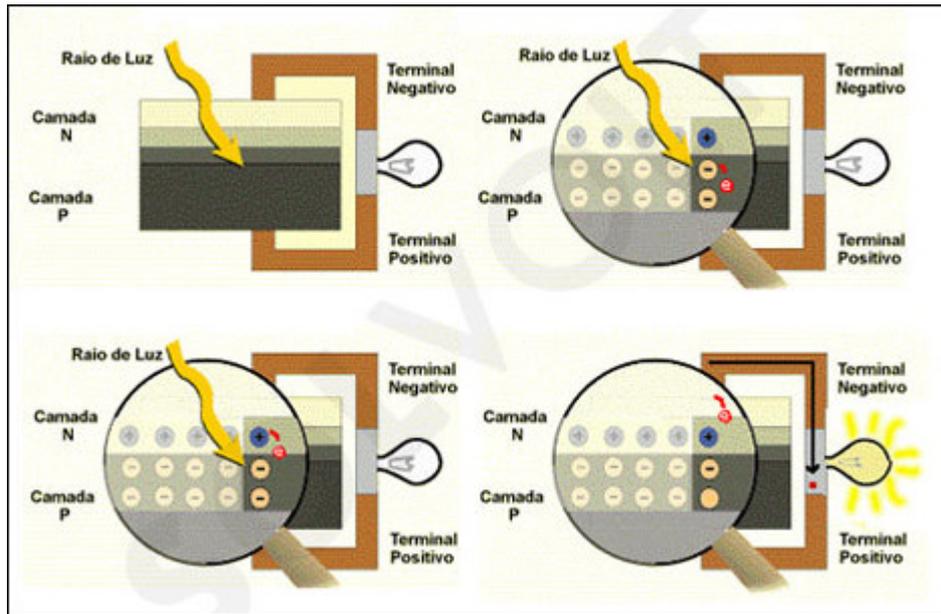


FIGURA 16 - Efeito Fotovoltaico na Junção pn

Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que o gap, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção; este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual chamamos de Efeito Fotovoltaico.

Se as duas extremidades do "pedaço" de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas

9 CUSTOS E LUCROS DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Hoje as células solares fotovoltaicas tradicionais custam ao redor de US\$2,10 por watt gerado. Quando fabricadas em escala industrial, as primeiras gerações destas novas células policristalinas deverão custar US\$1,65 por watt gerado.

Melhoramentos adicionais já planejados e ganhos de escala poderão fazer esse custo cair para US\$1,30/watt a curto prazo. Para efeito de comparação, o custo do watt gerado pelo carvão é de US\$1,00.

Pesquisador afirma que novos revestimentos antirreflexivos deverão fazer com que as células solares policristalinas batam o custo do carvão por volta de 2012.

Há alguns anos, certos países da Europa empenharam-se em políticas visando acelerar o acesso à rentabilidade dos sistemas fotovoltaicos. Em Freiburg, na Alemanha, já possui cerca de 10 mil telhados com painéis solares. Não são painéis de aquecimento, e sim fotovoltaicos. O governo alemão está programando chegar a 100 mil telhados, pois quer que cada um funcione como uma usina elétrica.

Por estar produzindo energia, pode oferecer financiamento com juros baixos. Os credores têm quatro anos para pagar suas células fotovoltaicas, cuja garantia é de 25 anos. Depois dos quatro anos, só há lucro; não há mais nada a pagar.

Exemplificando: Uma casa de dois quartos, com um telhado médio, gera mensalmente 400 marcos de energia solar. O gasto mensal da residência é de 100. Os 300 marcos que sobram são vendidos para a rede. É essa renda extra que vem convencendo cada vez mais pessoas a transformar seu telhado numa usina solar.

Isso é possível porque o governo alemão acaba de obrigar as companhias de energia a comprarem, por lei, durante os próximos 20 anos, toda a energia solar produzida, pagando um preço três vezes maior do que aquele que cobra dos seus clientes. As pessoas estão mais do que felizes, pois seu telhado está rendendo dinheiro. Se deu certo na Alemanha, por que não daria certo no Brasil, país do Sol?

A energia fotovoltaica geralmente é mais cara do que a energia convencional suprida pela companhia elétrica. Embora processos de fabricação tenham sido aperfeiçoados para a redução do custo do painel fotovoltaico desde os meados de 1970, a eletricidade fotovoltaica tem um custo médio de U\$0.25/KWh.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Callister, W. D. Jr. Materials Sc. Engineering an Introduction. J. Wiley & Sons, Inc. 1997.

Smith, W. F. Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. McGraw-Hill. 3ªed. 1996.

Disponível em: < <http://www.inovacaotecnologica.com.br>> acesso em 02/07/08.

Disponível em: < <http://www.aondevamos.eng.br/textos/texto02.htm>> acesso em 03/07/08.

Disponível em: < <http://www.algosobre.com.br/fisica/celula-fotovoltaica.html>> acesso em 03/07/08.

Disponível em: <http://intra.vila.com.br/sites_2002a/urbana/manuel/celulas%20total.htm> acesso em 05/07/08.

Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/index.html&conteudo=./energia/artigos/sol.html>> acesso em 03/07/08.

Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br>> acesso em 02/07/08.

FIBRAS ÓPTICAS

Diego Fernando Borges

1. INTRODUÇÃO

As fibras ópticas são constituídas basicamente de materiais dielétricos (isolantes) que permitem total imunidade a interferências eletromagnética que poderiam causar ruídos e até interferência na hora de transferir dados.

As fibras ópticas fizeram uma dos mais importantes avanços das telecomunicações. Sua aplicação e funcionamento somente são possíveis porque a luz sofre reflexões sucessivas dentro da fibra, assim pode transportar informações. As múltiplas vantagens em relação às transmissões com cabos convencionais permitiram evoluções em diversos aspectos, como largura de banda, qualidade, custos, etc.

Estima-se que, num futuro próximo, cabos de fibras ópticas estarão chegando às residências. Com isso, um único meio de transmissão atenderá todas as necessidades (TV, rádio, telefone, Internet, etc), com quantidade, qualidade, recursos e velocidade sensivelmente superiores aos dos sistemas atuais. Tecnologia para isso já existe. A questão deve ser apenas de custos.

2. HISTÓRIA DAS FIBRAS ÓPTICAS

O homem, desde os primórdios da vida na terra, teve necessidade de se comunicar, tanto com gestos, fala ou escrita. O início da comunicação óptica, gestos e sinais visuais, teve início há cerca de 5 milhões de anos, e desde então, alguns métodos se desenvolveram e outros novos foram criados até que chegamos ao que temos hoje, a fibra óptica. Dentre estas fases, destacam-se as seguintes:

- Século II a.C: *Polibio* propôs um sistema de transmissão do alfabeto grego por meio de sinais de fogo (dois dígitos e cinco níveis (52=25 códigos).
- 100 A.C: Vidros de qualidade óptica somente apareceram após o surgimento dos famosos cristais venezianos, na Renascença. Os princípios da fibra óptica são conhecidos desde a Antigüidade e foram utilizados em prismas e fontes iluminadas.
- 200 D.C: *Heron* da Alexandria estudou a reflexão.
- 1621: *Willebrod Snell* descobriu que quando a luz atravessa dois meios, sua direção muda (refração).

- 1678: *Christian Huygens* modela a luz como onda.
- 1792: *Claude Chappe* inventou um sistema de transmissão mecânica para longas distâncias ($B < 1$ bps).
- 1800: *Sr. William Herschel* descobriu a parte infravermelha do espectro.
- 1801: *Ritter* descobre a parte ultravioleta do espectro.
- 1830: Telégrafo com código *Morse* (digital) com repetidores chegava a 1000 km ($B = 10$ bps).
- 1866: Primeira transmissão transatlântica de telégrafo.
- 1876: Invenção do telefone analógico por *Graham Bell* que existe até hoje.
- Século XX: O mundo se enreda de redes telefônicas analógicas.
- 1926: *John Logie Baird* patenteia uma TV a cores primitiva que utilizava bastões de vidro para transportar luz.
- 1930-40: Alguns guias de luz foram desenvolvidos com *Perspex* para iluminar cirurgias.
- 1940: 1º cabo coaxial transporta até 300 ligações telefônicas ou um canal de TV com uma portadora de 3 MHz.
- 1950: Pesquisadores começam a sugerir o uso de uma casca em volta da fibra para guiar a luz. Os primeiros "fibrescopes" foram desenvolvidos, mas o custo ainda é proibitivo.
- 1952: O físico indiano *Narinder Singh Kanpany* inventa a fibra óptica.
- 1968: As fibras da época tinham uma perda de 1000 dB/km. *The Post Office* patrocina projetos para obter vidros de menor perda.
- 1970: *Corning Glass* produziu alguns metros de fibra óptica com perdas de 20 db/km.
- 1973: Um link telefônico de fibras ópticas foi instalado no EEUU.
- 1976: *Bell Laboratories* instalou um link telefônico em Atlanta de 1 km e provou ser possível a fibra óptica para telefonia, misturando com técnicas convencionais de transmissão. O primeiro link de TV a cabo com fibras ópticas foi instalado em *Hastings* (UK). *Rank Optics em Leeds* (UK) fabrica fibras de 110 mm para iluminação e decoração.
- 1978: Começa, em vários pontos do mundo, a fabricação de fibras ópticas com perdas menores do que 1,5 dB/km, para as mais diversas aplicações.

- 1988: Primeiro cabo submarino de fibras ópticas mergulhou no oceano e deu início à superestrada de informação.
- 2001: A fibra óptica movimentava cerca de 30 bilhões de dólares anuais.

3. PROPRIEDADES DA LUZ

3.1 NATUREZA DA LUZ

A luz pode, em alguns casos, apresentar características de partículas (corpos dotados de massa) e, em outros, de ondas (energia) ou ainda, em alguns casos, aparecer como fótons, que parece um raio ou partículas eletromagnéticas que se movem em alta velocidade. Esta velocidade é tão extraordinariamente alta que apresentam sua massa nula, nos fazendo classificá-los como não existentes. Por isso, é melhor tratá-los como pacotes de energia, para poderem ser observados e medidos.

Pela teoria da luz como partícula, podemos descrever o que ocorre com a partícula quando ela é transmitida - o efeito fotoelétrico: que descreve que quando a luz atinge a superfície de determinados sólidos causa a emissão de elétrons. Mas não conseguiríamos, apenas com esta teoria, explicar o comportamento da luz durante a emissão e a absorção, nem descrever vários outros fenômenos relacionados à luz. A teoria das ondas explica melhor a propagação ou transmissão da luz. Explica muito bem, por exemplo, por que os feixes de luz passam uns entre os outros sem causar distúrbios entre si.

É importante, então, notar que é um erro generalizar a luz como partículas ou como ondas.

3.2 VELOCIDADE DA LUZ

Em 1675, o astrônomo Roemer, através de suas observações astronômicas sobre o período de revolução de uma das luas de Júpiter, obteve a primeira verdadeira indicação de grandeza para a velocidade da luz. Em 1849, o físico francês Fizeau fez a primeira medição não astronômica da velocidade da luz, depois aperfeiçoada pelo também físico Foucault em 1850 e, entre 1880 e 1930, pelo físico Michelson.

Mas muito antes destes outros físicos, Galileu fez a primeira tentativa de medir a velocidade de propagação da luz. O experimento funcionou da seguinte maneira: Galileu e seu assistente foram até o topo de duas colinas, com uma

distância de aproximadamente uma milha, cada um munido com uma lanterna e um anteparo para cobri-la. A intenção de Galileu era medir o tempo necessário para a luz percorrer o dobro da distância entre os observadores. Ele então pensou: o observador A descobriria sua lanterna e o observador B, quando visse a luz da lanterna do observador A, descobriria a sua. O tempo inicial de A e sua visão da luz de B seria o tempo necessário para a luz ir e vir entre os dois observadores. Mas Galileu não conseguiu, com isto, obter nenhum valor para a velocidade da luz, porque a velocidade dela é tão grande que o intervalo de tempo para ser medido é muito menor que as flutuações do tempo de resposta dos observadores.

A teoria eletromagnética de Maxwell, em que ele trata a luz como uma onda eletromagnética, não envolve diretamente a luz. Ele descreve que a velocidade de uma onda eletromagnética no vácuo está relacionada a uma constante elétrica, que pode ser determinada por uma medida da capacitância de um capacitor de placas planas e paralelas, e uma constante magnética, que está relacionada com a unidade Si de corrente elétrica. Precisamente, esta velocidade é de 299 792 500 m/s. Para a maioria das aplicações práticas, esse número é aproximado para 300 000 000 m/s.

3.3 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

As ondas eletromagnéticas, que são geradas pela aceleração de cargas elétricas, incluem a luz visível, as ondas de rádio e as de radar, os raios gama, microondas e outras, que envolvem a propagação de ondas de campos elétricos e magnéticos através do espaço, com velocidade de 300 000 000 m/s no vácuo. A diferença entre as radiações em diferentes partes do espectro deste tipo citadas é uma quantidade que pode ser medida em vários caminhos, como o comprimento de onda, a energia de um fóton ou a oscilação da frequência em um campo eletromagnético.

Queremos observar do espectro de frequência apenas uma pequena região denominada de região óptica, em que as fibras ópticas trabalham. Esta região inclui uma luz visível para os olhos humanos com o comprimento de onda que varia entre 400 e 700 nm, perto da região do infravermelho e do ultravioleta, que possuem propriedades similares.

3.4 LEI DE REFRAÇÃO E REFLEXÃO DE SNELL DESCARTES

Toma-se o Índice Refrativo (n) com a mais importante medida óptica para os materiais transparentes, que é descrito como sendo uma razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio. O índice refrativo será sempre menor que 1, quando medimos a velocidade da luz no material que é sempre menor que a velocidade da luz no vácuo.

A transmissão de um raio de luz diretamente em linhas de materiais ópticos surgem determinadas situações em seu interior. Existe uma distorção da luz quando esta passa do ar para o vidro. Esta distorção depende fundamentalmente do índice de refração, em que surge um ângulo no qual a luz alcança a outra superfície. Os ângulos de incidência e refração são medidos não do plano da superfície, mas da linha normal, isto é, perpendicular à face. A relação é conhecida como Lei de Snell $n_2 \sin I = n_1 \sin R$ onde n_1 e n_2 são os índices de refração do meio incidente e do meio refrativo, I e R são os ângulos de incidência e de refração.

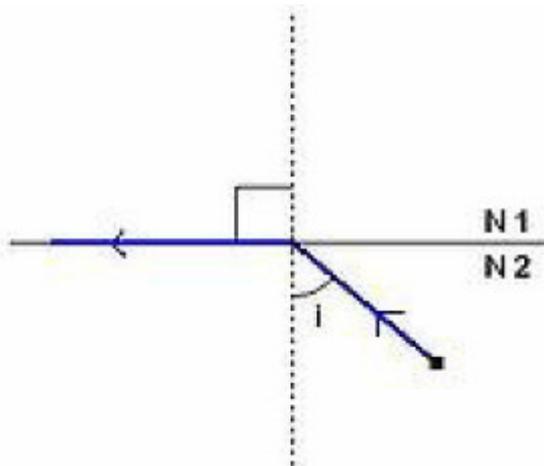


FIGURA 1 - $N_2 > N_1$.

Se aumentarmos o ângulo de incidência, o feixe refratado se afastará mais da normal. Aumentando mais o ângulo de incidência, chegará uma situação em que o feixe refratado será quase paralelo à superfície. Aumentando um pouco mais o ângulo de incidência, o feixe refratado desaparece e toda a luz passa a ser refletida. Esse fenômeno chama-se reflexão total.

Para que a reflexão total ocorra, são necessárias as seguintes condições: A luz deve provir do meio mais refringente (mais denso) para o meio menos refringente (menos denso).

O ângulo de incidência deve ser maior que um determinado valor, chamado ângulo-limite de refração. Esse ângulo depende do par de meios considerados, no caso da água e ar, é aproximadamente 49° .

4. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

A luz se propaga no interior de uma fibra óptica fundamentada na reflexão total da luz. Quando um raio de luz se propaga em um meio cujo índice de refração é n_1 (núcleo) e atinge a superfície de um outro meio com índice de refração n_2 (casca), onde $n_1 > n_2$, e desde que o ângulo de incidência (em relação à normal) seja maior ou igual ao ângulo crítico, ocorrerá o que é denominado de reflexão total, do que resulta o retorno de raio de luz ao meio com índice de refração n_1 .

A diferença do índice de refração do núcleo com relação à casca é representada pelo perfil de índices da fibra óptica. Essa diferença pode ser conseguida usando-se materiais dielétricos distintos (por exemplo, sílica-plástico, diferentes plásticos, etc.) ou através de dopagens convenientes de materiais semicondutores (por exemplo, GeO, P O, B O, F etc.) na sílica (SiO). A variação de índices de refração pode ser feita de modo gradual ou descontínuo, originando diferentes formatos de perfil de índices. As alternativas quanto ao tipo de material e ao perfil de índices de refração implicam a existência de diferentes tipos de fibras ópticas com características de transmissão, e, portanto, aplicações, distintas.

A luz é injetada na fibra por uma de suas extremidades sob um cone de aceitação, em que este determina o ângulo por que o feixe de luz deverá ser injetado, para que ele possa de propagar ao longo da fibra óptica. Seria de esperar que, quando a informação em forma de luz passasse por um cabo de fibra óptica, a luz atravessaria as paredes do cabo. No entanto, o ângulo em que ela é injetada no cabo é fundamental, assim como o projeto do cabo.

O vidro ou o plástico do cabo pode ter espessura de 0,8 micrometros, o equivalente a 0,1 do diâmetro de um fio de cabelo. O núcleo é envolvido por uma camada externa chamada de *revestimento*, também feito de plástico ou vidro, mas que tem um índice de refração diferente para garantir que a luz do núcleo que atingir a camada externa seja refletida para ele. Uma capa protetora é então acrescentada para proteger as camadas internas de possíveis agentes externos.

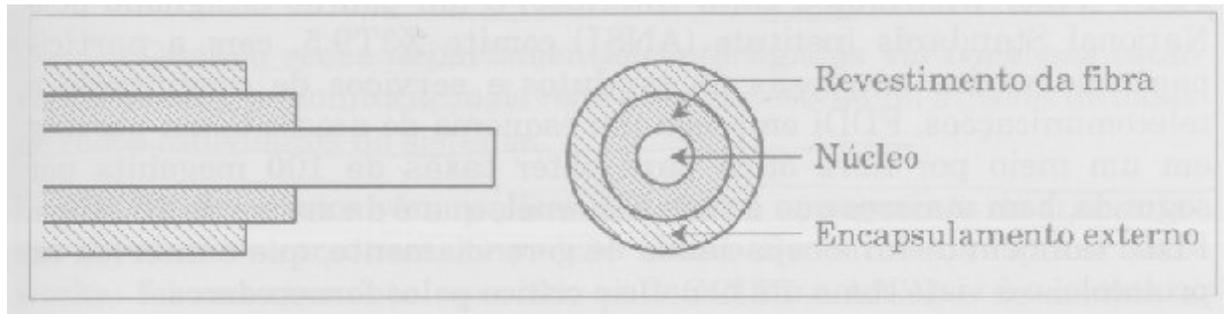


FIGURA 2 – Revestimento do núcleo plástico ou vidro.

5. TIPOS DE FIBRAS ÓTICAS

As fibras ópticas são classificadas de acordo com o seu tipo de fabricação e forma de propagação dos raios de luz, além de sua capacidade de transmissão (Largura de Banda) e sua facilidade de acoplamento aos equipamentos ativos e conexões. São construídas em 2 tipos básicos:

- Fibra Óptica Multi Modo;
- Fibra Óptica Mono Modo.

5.1 FIBRA ÓPTICA MULTÍMODO

São tipos de fibras ópticas com dimensões de núcleo relativamente grandes, permitem a incidência de raios de luz em vários ângulos. São relativamente fáceis de fabricar. As dimensões de uma fibra óptica Multi Modo são:

- Núcleo: de 50 até 200 μm , comercialmente adota-se o núcleo de 62,5 μm .
- Casca: de 125 até 240 μm , comercialmente adota-se à casca de 125 μm .

Com a relação ao Núcleo, existem 2 tipos básicos de perfis de núcleo:

- Índice Degrau - apresentam apenas um nível de reflexão entre o núcleo e a casca, este tipo perfil, por suas dimensões relativamente grandes, permitem uma maior simplicidade de fabricação e operação, além de permitirem uma grande capacidade de captação da luz. Sua capacidade de transmissão é relativamente baixa.

- Índice Gradual - apresentam vários níveis de reflexão entre o núcleo e a casca, este tipo de perfil mantém ainda uma simplicidade de fabricação e operação, porém exibe uma maior capacidade de transmissão. Suas dimensões são maiores que as do tipo Degrau.

Com relação à Casca, existem os seguintes tipos básicos:

- Casca Simples - apresentam apenas um envoltório sobre o núcleo.

- Casca Dupla - apresentam mais de um envoltório sobre o núcleo.

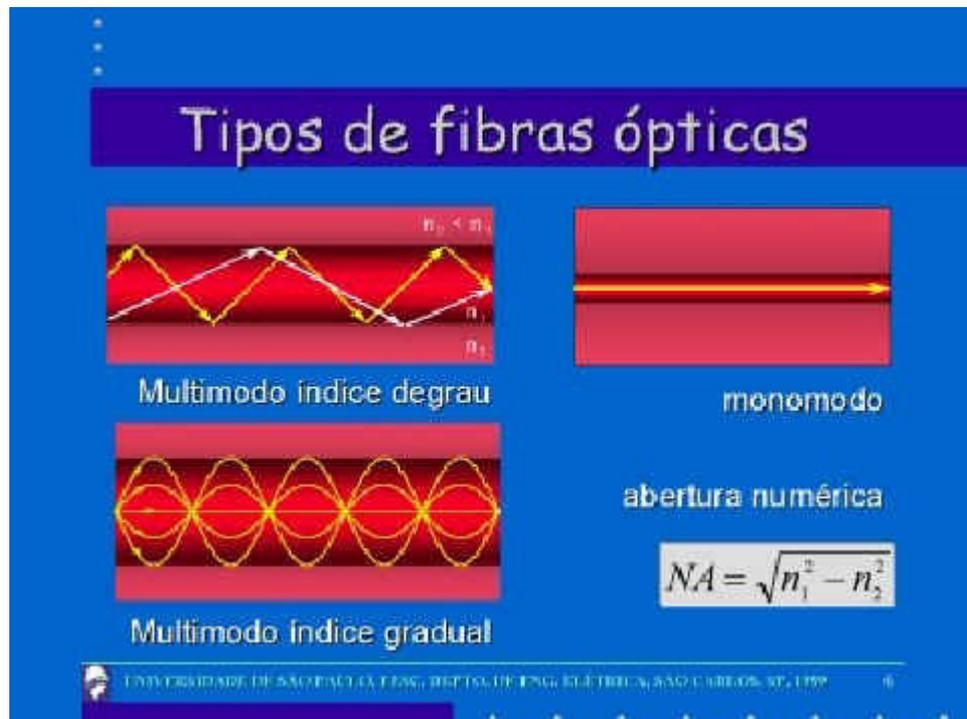


FIGURA 3 – Tipos de fibra óptica.

5.2 FIBRA ÓPTICA MONO MODO

São tipos de fibras ópticas com dimensões de núcleo muito pequenas, permitem a incidência de raios de luz em um único ângulo. Sua fabricação requer equipamentos muito complexos. As dimensões de uma fibra óptica Mono Modo são:

- Núcleo: típico de 08 ± 1 comercialmente adota-se o núcleo de $08\mu\text{m}$.
- Casca: de 125 até $240\mu\text{m}$, comercialmente adota-se à casca de $125\mu\text{m}$.

Com a relação ao Núcleo, existem 2 tipos básicos de perfis de núcleo:

- Índice Degrado - apresentam apenas um nível de reflexão entre o núcleo e a casca.
- Índice Gradual - apresentam vários níveis de reflexão entre o núcleo e a casca.

Com relação à Casca, existem os seguintes tipos básicos:

- Casca Simples - apresentam apenas um envoltório sobre o núcleo.

- Casca Dupla - apresentam mais de um envoltório sobre o núcleo.

6. FABRICAÇÃO DE FIBRAS ÓTICAS

Para aperfeiçoar a características, mecânicas, geométricas e ópticas de uma fibra óptica sua fabricação se efetua, habitualmente, em processos de varias etapas. Além do mais, esta forma de fabricação permite uma produção em grandes quantidades, rápida e rentável, atualmente são premissas fundamentais para as telecomunicações ópticas.

Os materiais básicos usados na fabricação de fibras ópticas são sílicas puras ou dopada, vidro composto e plástico. As fibras ópticas fabricadas de sílica pura ou dopadas são as que apresentam as melhores características de transmissão e são as usadas em sistemas de telecomunicações. Todos os processos de fabricação são complexos e caros. A fibra óptica fabricadas de vidro composto e plástico não tem boas características de transmissão (possuem alta atenuação e baixa faixa de banda passante) e são empregadas em sistemas de telecomunicações de baixa capacidade e pequenas distâncias e sistemas de iluminação. Os processos de fabricação dessas fibras são simples e baratos se comparada com as fibras de sílica pura ou dopada.

Na foto aparecem os métodos de fabricação da Fibra Óptica.

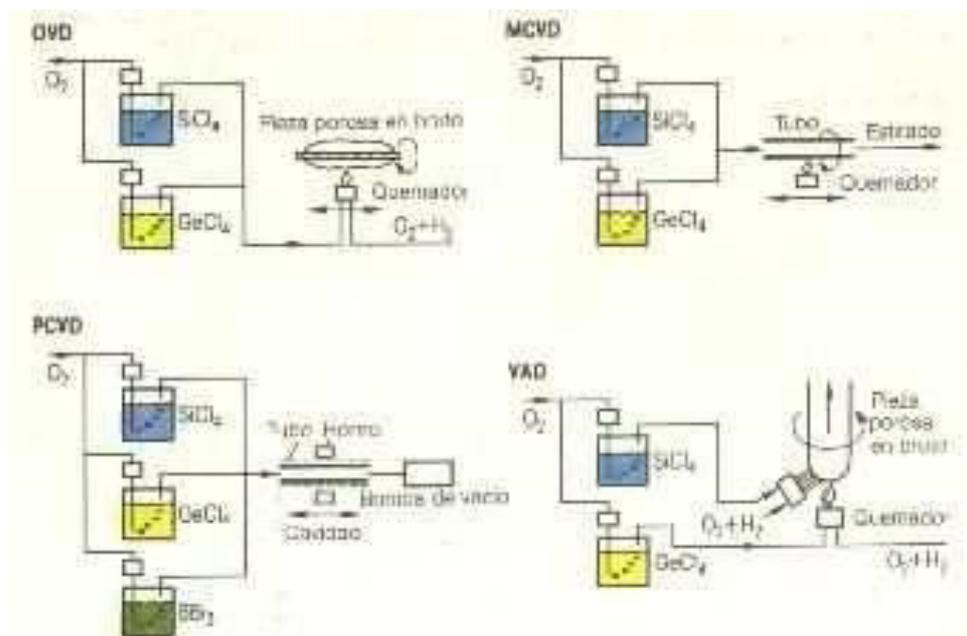


FIGURA 4 – Fabricação de fibras ópticas.

6.1 FABRICAÇÃO DA PRÉ-FORMA DE VIDRO

Temos diversos métodos para fabricação da preforma de Vidro. O método “direct-melting” resulta na aplicação de processos tradicionais de fabricação de vidros, nos quais a fibra é fabricada a partir do vidro, altamente puro, no seu estado de fusão. O mais usual destes métodos é designado “ **Double-Crucible Method**”.

6.2 DOUBLE CRUCIBLE METHOD (Duplo Cadinho)

Neste processo os vidros vêm na forma de bastão, os quais são introduzidos no forno do puxamento, que contém dois cadinhos. Neste processo, a geometria dos vidros alimentadores não é tão importante, pois consegue a variação do índice de refração através da migração de íons alcalinos que mesclam a concentração dos vidros internos e externos. No Método Vapour-Phase Deposition existem 4 tipos de processos de fabricação deste tipo de fibra e a diferença entre eles está na etapa de fabricação da preforma (bastão que contém todas as características da fibra óptica, mas possui dimensões macroscópicas). A segunda etapa de fabricação da fibra, o puxamento, é comum a todos os processos.

6.3 MVCD (MODIFIED CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION)

Método de Deposição de Vapores Químicos. Na figura abaixo mostramos um esquema onde o oxigênio é bombeado juntamente com soluções químicas de Silício e Germânio, entre outras. A mistura correta dos componentes químicos é que vai caracterizar a pré-forma produzida (índice de refração, coeficiente de expansão etc).

Um tubo especial de sílica ou quartzo (que será a casca da fibra) é preenchido com a mistura de substâncias químicas (que será o núcleo da fibra). Para este processo é utilizada uma espécie de torno que gira constantemente sob o calor de uma chama que percorre o tubo no sentido longitudinal elevando a temperatura no interior do tubo para 1500°C aproximadamente. Quando a mistura de substâncias é aquecida, o Germânio e o Silício reagem com o oxigênio formando o Dióxido de Silício (SiO_2) e o Dióxido de Germânio (GeO_2), que se fundem dentro do tubo formando o vidro do núcleo.

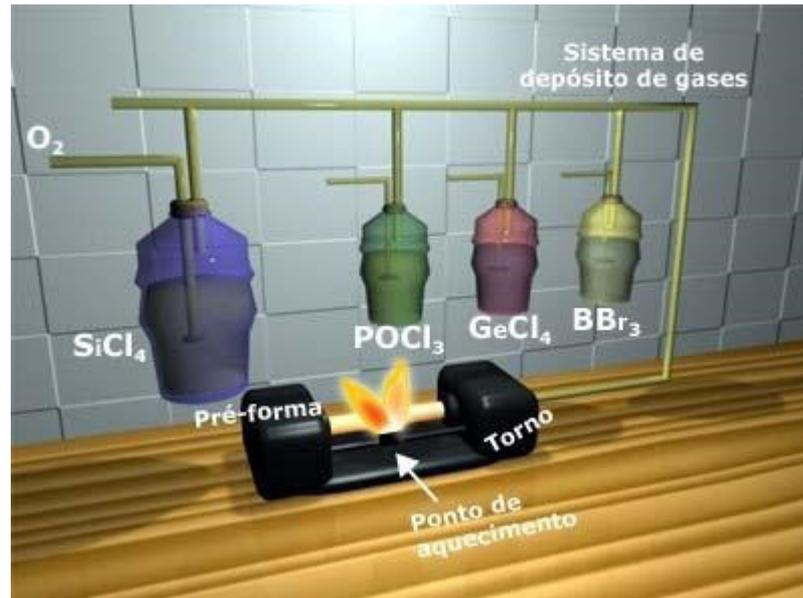


FIGURA 5 – Fabricação de fibras ópticas por MVCD.

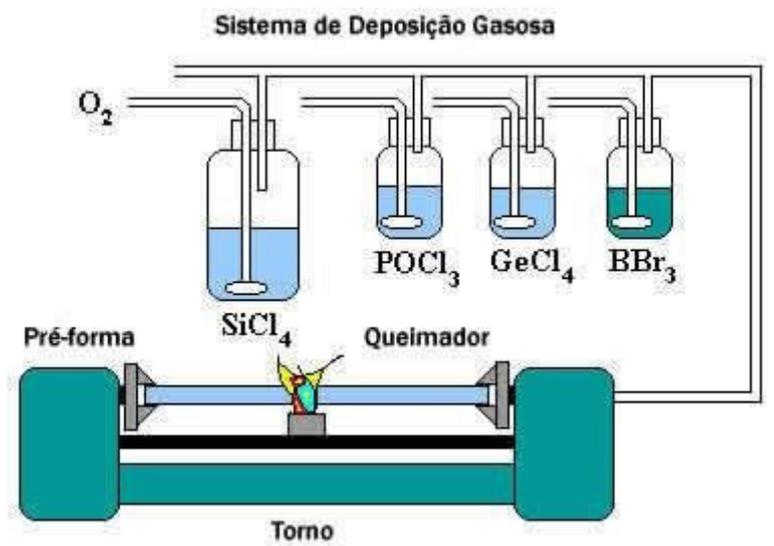


FIGURA 6 – Esquema do MVCD.

O torno gira continuamente para fazer um bastão consistente e de revestimento uniforme. Após a deposição do número correto de camadas é efetuado o colapsamento do tubo (estrangulamento) para torná-lo um bastão sólido e maciço denominado pré-forma. Isso é feito elevando-se a temperatura do queimador a 1800-2000°C, e o tubo fecha-se por tensões superficiais.

Por esse processo, obtêm-se fibras de boa qualidade porque a reação que ocorre no interior do tubo não tem contato com o meio externo, dessa maneira evita-se a deposição de impurezas, especialmente a hidroxila (OH⁻). Com esse processo,

podem-se fabricar fibras do tipo multimodo degrau e gradual e monomodo. A pureza do vidro é mantida pelo uso de plástico resistente à corrosão no sistema de fornecimento de gás (blocos de válvulas, tubos, vedações) e pelo controle preciso do fluxo e composição da mistura. O processo de fazer o bastão de pré-forma é altamente automatizado e leva várias horas. Depois que o bastão de pré-forma se resfria, é testado para controle de qualidade, garantindo a pureza dos vidros fabricados.



FIGURA 7 - Foto cedida pela Fibercore Ltd. Torno usado na preparação do bastão de pré-forma.

6.4 PVCD (PLASMA CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION)

A diferença básica deste método, ilustrado abaixo, em relação ao MCVD é que ao invés de usar um maçarico de oxigênio e hidrogênio, usa-se um plasma não isotérmico formado por uma cavidade ressonante de microondas para a estimulação dos gases no interior do tubo de sílica. Neste processo, não é necessária a rotação do tubo em torno de seu eixo, pois a deposição uniforme é obtida devido à simetria circular da cavidade ressoante. A temperatura para deposição é em torno de 1100°C. As propriedades das fibras fabricadas por este método são idênticas ao MCVD.

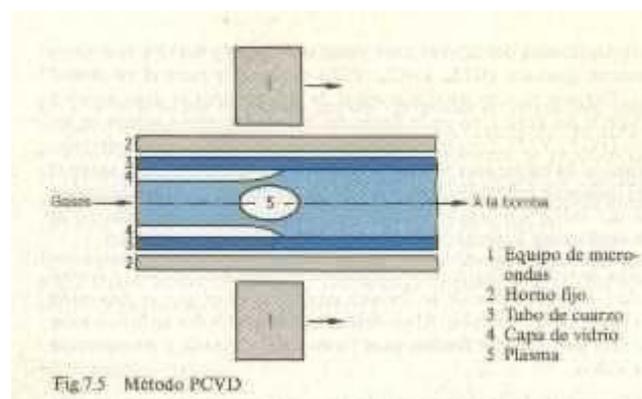


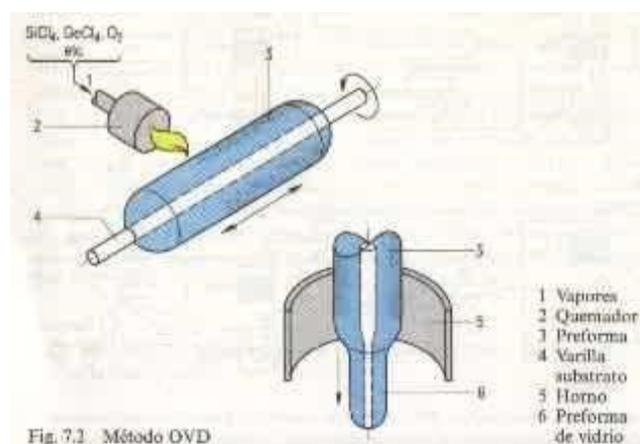
FIGURA 8 - Método PVCD.**6.5 OVD (OUTSIDE VAPOUR DEPOSITION)**

Este processo baseia-se no crescimento da preforma a partir de uma semente, que é feita de cerâmica ou grafite, também chamada de mandril. Este mandril é colocado num torno e permanece girando durante o processo de deposição que ocorre sobre o mandril.

Os reagentes são lançados pelo próprio maçarico e os cristais de vidro são depositados no mandril através de camadas sucessivas. Nesse processo ocorre a deposição do núcleo e também da casca, e obtém-se preforma de diâmetro relativamente grande, o que proporcionam fibras de grande comprimento (40 km ou mais). Após essas etapas teremos uma preforma porosa (opaca) e com o mandril em seu centro.

Para a retirada do mandril coloca-se a preforma num forno aquecido a 1500°C que provoca a dilatação dos materiais. Através da diferença de coeficiente de dilatação térmica consegue-se soltar o mandril da preforma e a sua retirada. O próprio forno faz também o colapsamento da preforma para torná-la cristalina e maciça.

Esse processo serve para a fabricação de fibras do tipo multimodo e monomodo de boa qualidade de transmissão.

**FIGURA 9 - Método OVD.****6.6 VAD (VAPOUR AXIAL DEPOSITION)**

Neste processo, a casca e o núcleo são depositados, mas no sentido do eixo da fibra (sentido axial). Neste processo utilizam-se dois queimadores que criam a distribuição de temperatura desejada e também injetam os gases (reagentes). Obtém-se assim uma preforma porosa que é cristalizada num forno elétrico à temperatura de 1500 °C. Este processo obtém preforma com grande diâmetro e grande comprimento, tornando-o extremamente produtivo.

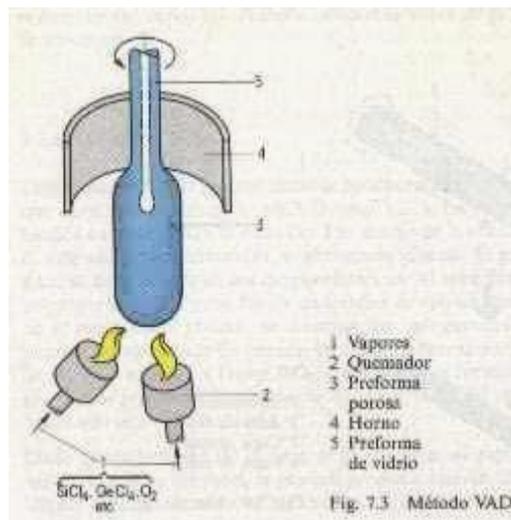


FIGURA 10 - Método VAD.

6.7 MÉTODO ROD-IN-TUBE

Este método consiste na inserção de vidros na forma de bastão e tubo simultaneamente no forno de puxamento, o qual efetua o escoamento dos materiais ao mesmo tempo. Assim, obtém-se fibras degrau do tipo sílica-sílica (casca e núcleo de vidro) e variações como fibras de sílica-silicone (esticando-se apenas o bastão, que forma o núcleo e aplicando-se o silicone, que forma a casca) e fibras bundle (esticando-se apenas o bastão, que forma o núcleo, com a casca formada pelo próprio ar), as quais são utilizadas em iluminação.

6.8 TORRE DE PUXAMENTO

Depois do teste da pré-forma, ela é colocada em uma torre de puxamento conforme a imagem abaixo:



FIGURA 11 - Torre de puxamento.

Coloca-se a pré-forma em um forno de grafite (com temperaturas de 1.900 a 2.200 Celsius). O vidro da pré-forma derrete e cai por ação da gravidade. Conforme cai, forma um fio que é direcionado, pelo operador da torre, a um micrômetro a laser e para recipientes onde receberá camadas de sílica protetora. Um sistema de tração vagarosamente puxa a fibra da pré-forma. Como todo o processo é controlado por computador, o micrômetro a laser controla permanentemente o diâmetro da fibra fazendo com que o sistema de tração puxe mais lentamente ou mais rapidamente a fibra da pré-forma. Geralmente as fibras são puxadas a velocidades entre 10 e 20 m/s. O produto final, ou seja, a fibra óptica é enrolada em carretéis.

7. FABRICAÇÃO DE FIBRAS DE PLÁSTICO

A fabricação de fibras de plástico é feita por extração. As fibras ópticas obtidas com este método têm características ópticas bem inferiores às de sílica, mas possuem resistências mecânicas (esforços mecânicos) bem maiores que as fibras

de sílica. Têm grandes aplicações em iluminação e transmissão de informações a curtas distâncias e situações que oferecem grandes esforços mecânicos às fibras.

7.1 TESTES DAS FIBRAS PUXADAS

Os testes mais comuns que os fabricantes de fibras realizam são: tensão mecânica, índice de refração, geometria, atenuação (perdas), largura de banda, dispersão cromática, temperatura de operação, perdas dependentes da temperatura de operação, habilidade de condução de luz sob a água.

Depois que os carretéis de fibras passam pelos testes de qualidade e são aprovados eles serão vendidos a empresas que fabricam cabos.

8. ATENUAÇÃO

A Atenuação ou Perda de Transmissão pode ser definida como a diminuição da intensidade de energia de um sinal ao propagar-se através de um meio de transmissão. A fórmula usual para esse cálculo é $10 \cdot \log(P_{saída}/P_{entrada})$.

A atenuação experimentada pelos sinais luminosos propagados através de uma fibra óptica é uma característica cujo papel é fundamental na determinação da distância máxima entre um transmissor e um receptor óptico. A atenuação (ou as perdas de transmissão) de uma fibra óptica costuma ser definida em termos da relação de potência luminosa na entrada da fibra de comprimento L e a potência luminosa na sua saída. Os mecanismos básicos responsáveis pela atenuação em fibras ópticas são os seguintes:

- absorção
- espalhamento
- curvaturas
- projeto do guia de onda

É importante que no dimensionamento de um sistema de transmissão, além das perdas introduzidas pela atenuação da fibra óptica, devem ser consideradas também as perdas causadas nas emendas e conexões entre segmentos de fibras e no acoplamento das fibras com as fontes e detectores luminosos.

Em fibras de vidro feitas com sílica de alta pureza e baixo espalhamento, a absorção e o espalhamento ficam bastante diminuídos para comprimentos de onda próximos do infravermelho. Esses comprimentos de onda são ligeiramente maiores do que os comprimentos de onda do espectro visível (380 nm à 700 nm). Para

transmissão, o comprimento de onda mais comumente usado é 1300 nm (aproximadamente 2×10^{14} Hz).

Em fibras de sílica, mais de 95% da luz são transmitidos através de uma distância de 1 Km. Esse alto índice de transparência permite a transmissão da luz através de distâncias de 20 a 200 km, com intensidade suficiente para ser detectada pelo fotodetector no receptor. Os sistemas operam a taxas de 2,5 Gbps, correspondendo a 35000 canais telefônicos sendo transmitidos por uma fibra.

Existem três comprimentos de onda tipicamente utilizados para transmissão em fibras ópticas:

- 850 nm com atenuação típica de 3 dB/km
- 1300 nm com atenuação típica de 0,8 dB/km
- 1550 nm com atenuação típica de 0,2 dB/km

9. PRINCIPAIS VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS FIBRAS ÓPTICAS

As características especiais das fibras ópticas implicam consideráveis vantagens em relação aos suportes físicos de transmissão convencionais, tais como o par metálico e o cabo coaxial. Mesmo considerando-se o suporte de rádio-frequência em microondas, a transmissão por fibras ópticas oferece condições bastante vantajosas. As poucas desvantagens no uso das fibras óptica podem, em geral, ser considerada transitórias, pois resultam principalmente da relativa imaturidade da tecnologia associada.

9.1 VANTAGENS

a) Banda passante potencialmente enorme: A transmissão em fibras ópticas é realizada em frequências ópticas portadoras na faixa espectral de 10^6 a 10^15 Hz (10^6 a 10^{15} THz). Isto significa uma capacidade de transmissão potencial, no mínimo 10.000 vezes superior, por exemplo, à capacidade dos atuais sistemas de microondas que operam com uma banda passante útil de 700 MHz. Além de suportar um aumento significativo do número de canais de voz e/ou de vídeo num mesmo circuito telefônico, essa enorme banda permite novas aplicações impossíveis de serem concebidos anteriormente. Atualmente, já estão disponíveis fibras ópticas comerciais com produtos banda passante versus distâncias superiores a 200 GHz.Km. Isso contrasta significativamente com os

suportes convencionais onde, por exemplo, um cabo coaxial apresenta uma banda passante útil máxima em torno de 400 MHz.

b) Perdas de transmissão muito baixas: As fibras ópticas apresentam atualmente perdas de transmissão extremamente baixas, desde atenuações típicas da ordem de 3 a 5 dB/Km para operação na região de 1,55 μ m. Pesquisas com novos materiais, em comprimentos de ondas superiores, prometem fibras ópticas com atenuações ainda menores, da ordem de centésimos e, até mesmo, milésimos de decibéis por quilômetro. Desse modo, com fibras ópticas, é possível implantar sistemas de transmissão de longa distância com um espaçamento muito grande entre repetidores, o que reduz significativamente a complexidade e custos do sistema. Enquanto, por exemplo, um sistema de microondas convencional exige repetidores a distância da ordem de 50 quilômetros, sistemas com fibras ópticas permitem alcançar, atualmente, distâncias sem repetidores superiores a 200 quilômetros. Com relação aos suportes físicos metálicos, é feita uma comparação de perdas de transmissão, levando-se em conta um sistema de transmissão por fibras ópticas de 1^o geração (820nm).

c) Imunidade a interferência e ao ruído: As fibras ópticas, por serem compostas de material dielétrico, ao contrário dos suportes de transmissão metálicos, não sofrem interferências eletromagnéticas. Isto permite uma operação satisfatória dos sistemas de transmissão por fibras ópticas mesmo em ambientes eletricamente ruidosos. Interferências causadas por cargas elétricas atmosféricas, pela ignição de motores, pelo chaveamento de relés e por diversas outras fontes de ruído elétrico esbarram na blindagem natural provida pelas fibras ópticas. Por outro lado existe um excelente confinamento, do sinal luminoso propagado pelas fibras ópticas. Desse modo não irradiando externamente, as fibras ópticas agrupadas em cabos ópticos não interferem opticamente umas nas outras, resultando num nível de ruído de diafonia (crosstalk) desprezível. Os cabos de fibra óptica, por não necessitarem de blindagem metálica, transmissão de energia elétrica. A imunidade a pulsos eletromagnéticos (EMP) é outra característica importante das fibras ópticas.

d) Isolação elétrica: O material dielétrico (vidro ou plástico) que compõe a fibra óptica oferece uma excelente isolação elétrica entre os transceptores ou estações interligadas. Ao contrário dos suportes metálicos, as fibras ópticas não tem problemas com o aterramento e interfaces dos transceptores. Além disso, quando um cabo de fibra óptica é danificado não existem faíscas de curto-circuito. Esta

qualidade das fibras ópticas é particularmente interessante para sistemas de comunicação em áreas com gases voláteis (usinas petroquímicas, minas de carvão etc.), onde o risco de fogo ou explosão é muito grande. A não possibilidade de choques elétricos em cabos com fibras ópticas permite a sua reparação no campo, mesmo com os equipamentos de extremidades ligados.

e) Pequeno tamanho e peso: As fibras ópticas tem dimensões comparáveis com as de um fio de cabelo humano. Mesmo considerando-se os encapsulamentos de proteção, o diâmetro e o peso dos cabos ópticos são bastante inferiores aos dos equivalentes cabos metálicos. Por exemplo, um cabo óptico de 6,3mm de diâmetro, com uma única fibra de diâmetro 125mm e encapsulamento plástico, substitui, em termos de capacidade, um cabo de 7,6cm de diâmetro com 900 pares metálicos. Quanto ao peso, um cabo metálico de cobre de 94 quilos pode ser substituído por apenas 3,6 quilos de fibra óptica. A enorme redução do tamanho dos cabos, provida pelas fibras ópticas, permite aliviar o problema de espaço e de congestionamento de dutos nos subsolos das grandes cidades e em grandes edifícios comerciais. O efeito combinado do tamanho e peso reduzidos faz das fibras ópticas o meio de transmissão ideal em aviões, navios, satélites etc. Além disso, os cabos ópticos oferecem vantagens quanto ao armazenamento, transporte, manuseio e instalação em relação aos cabos metálicos de resistência e durabilidade equivalentes.

f) Segurança da informação e do sistema: As fibras ópticas não irradiam significativamente a luz propagada, implicando um alto grau

de segurança para a informação transportada. Qualquer tentativa captação de mensagens ao longo de uma fibra óptica é facilmente detectada, pois exige o desvio de uma porção considerável de potência luminosa transmitida. Esta qualidade das fibras ópticas é importante em sistemas de comunicações exigentes quanto à privacidade, tais como nas aplicações militares, bancárias etc. Uma outra característica especial de fibras ópticas, de particular interesse das aplicações militares, é que, ao contrário dos cabos metálicos, as fibras não são localizáveis através de equipamentos medidores de fluxo eletromagnéticos ou detectores de metal.

g) Flexibilidade na expansão da capacidade dos sistemas: Os sistemas de transmissão por fibras ópticas podem ter sua capacidade de transmissão aumentada gradualmente, em função, por exemplo, do tráfego, sem que seja necessária a instalação de um novo cabo óptico. Basta para isso melhorar o desempenho dos

transceptores, seja, por exemplo, substituindo-se LED'S por diodos laser ou utilizando-se técnicas de modulação superiores.

h) Custos potencialmente baixos: O vidro com que as fibras ópticas são fabricadas é feito principalmente a partir do quartzo, um material que, ao contrário do cobre, é abundante na crosta terrestre. Embora a obtenção de vidro ultrapuro envolva um processo sofisticado, ainda relativamente caro, a produção de fibras ópticas em larga escala tende gradualmente a superar esse inconveniente. Com relação aos cabos coaxiais, as fibras ópticas já são atualmente competitivas, especialmente em sistemas de transmissão a longa distância, onde a maior capacidade de transmissão e o maior espaçamento entre repetidores permitidos repercutem significativamente nos custos do sistema. Em distâncias curtas e/ou sistemas multipontos, os componentes ópticos e os transceptores ópticos ainda podem impactar desfavoravelmente o custo dos sistemas. No entanto, a tendência é de reversão desta situação num futuro não muito distante, em razão do crescente avanço tecnológico e, principalmente, da proliferação das aplicações locais.

i) Alta resistência a agentes químicos e variações de temperaturas: As fibras ópticas, por serem compostas basicamente de vidro ou plástico, tem uma boa tolerância a temperaturas, favorecendo sua utilização em diversas aplicações. Além disso, as fibras ópticas são menos vulneráveis à ação de líquidos e gases corrosivos, contribuindo assim para uma maior confiabilidade e vida útil dos sistemas.

9.2 DESVANTAGENS

a) Fragilidade das fibras ópticas sem encapsulamentos: O manuseio de uma fibra óptica "nua" é bem mais delicado que no caso dos suportes metálicos.

b) Dificuldade de conexão das fibras ópticas: As pequenas dimensões das fibras ópticas exigem procedimentos e dispositivos de alta precisão na realização das conexões e junções.

c) Acopladores tipo T com perdas muito altas: É muito difícil se obter acopladores de derivação tipo T para fibras ópticas com baixo nível de perdas. Isso repercute desfavoravelmente, por exemplo, na utilização de fibras ópticas em sistemas multiponto.

d) Impossibilidade de alimentação remota de repetidores: Os sistemas com fibras ópticas requerem alimentação elétrica independente para cada repetidor, não sendo possível a alimentação remota através do próprio meio de transmissão.

e) Falta de padronização dos componentes ópticos: A relativa imaturidade e o contínuo avanço tecnológico não tem facilitado o estabelecimento de padrões para os componentes de sistemas de transmissão por fibras ópticas.

10. Conclusão

O desenvolvimento das fibras ópticas tem se dado também devido à abundância do material utilizado como matéria prima, que é a sílica, o que a torna as fibras ópticas bem mais econômicas do que cabos metálicos. Além disto, cabos ópticos usados em transmissões telefônicas são impossíveis de serem grampeados por curiosos ou por profissionais.

A moderna tecnologia encontrou na fibra ótica um meio de transmissão de informações que apresenta notáveis vantagens sobre os tradicionais, com vasta aplicações nas telecomunicações, na medicina e na engenharia. Enquanto os fios de cobre transportam elétrons, os cabos de fibra óptica (cabos de fibra de vidro) transportam luz. Dentre as vantagens dos cabos de fibra óptica estão a imunidade total contra a diafonia e contra interferências eletromagnéticas e de radiofrequência.

A falta de ruídos internos e externos significa que os sinais tem um alcance maior e se movem mais rápido, o que proporciona uma velocidade e uma distância maiores do que as obtidas com cabos de cobre. Como não transporta eletricidade, a fibra é o meio mais adequado para conectar prédios com diferentes aterramentos elétricos, além disso, os cabos de fibra não atraem raios como cabos de cobre.

Vale lembrar, no entanto, que a fibra é uma tecnologia nova, que requer conhecimentos de que a maioria dos engenheiros não dispõe. Como a transmissão é basicamente unidirecional, a comunicação bidirecional exige duas fibras e duas bandas de frequência em uma fibra. Finalmente, as interfaces de fibra são mais caras do que as interfaces elétricas. No entanto, todos sabemos que o futuro das comunicações de dados em distâncias significativas pertence à fibra.

11. REFERÊNCIAS

Fibras Óticas, disponível em < http://penta2.ufrgs.br/Eunice/f_otica.html > acesso 19 de março.

Como funciona um cabo de fibra ótica? ,disponível em<
http://informatica.hsw.uol.com.br/cabo_fibra-otica.htm >, acesso 19 de março .

Fibras Óticas, disponível em <
http://pt.wikipedia.org/wiki/Fibra_%C3%B3ptica>, acesso 20 de março.

Descoberta fibra ótica biológica, disponível em<
<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010115031107> >,
 acesso 20 de março .

Fabricação de Fibra Óptica, disponível em < [#>](http://knol.google.com/k/daniel-imamura_fernandes/fabricao-de-fibra-ptica/19xfv0ylaiq1j/23) ,acesso 21 de março .

Fibra Óptica, disponível em < http://br.geocities.com/alex_iafullo/fibra.htm >,
 acesso 21 de março.

Fibra Óptica, disponível em <<http://www.colegiosaofrancisco.com.br/alfa/fibra-optica/fibra-opticaresumo.php>>, acesso 22 de março.

Vídeo explicativo sobre a fabricação e funcionamento das fibras ópticas:
<http://www.youtube.com/watch?v=EK9bbIRKayA>