

MATERIAIS ELÉTRICOS: COMPÊNDIO DE TRABALHOS**VOLUME 2****SUMÁRIO**

APLICAÇÃO DO SILÍCIO NA CONSTRUÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS - Christian Kütter Dobke	115
UTILIZAÇÃO DE ÓLEOS BIODEGRADÁVEIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA - David Valdir Gris	132
ÓLEO VEGETAL COMO FLUIDO ISOLANTE PARA TRANSFORMADORES - Lincon Pieter Bavaresco	153
DISPOSITIVOS BIMETÁLICOS - Felipe Aguiar Dias.....	170
TERMOPAR - Renato Ferreira Simão.....	181
DETECTORES INFRAVERMELHO - Eduardo Augusto Koehler.....	189
LASER - Mauro Disner Girardi	216
HEXAFLUORETO DE ENXOFRE (SF ₆) - Evandro Junior Rodrigues.....	233

APLICAÇÃO DO SILÍCIO NA CONSTRUÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Christian Kütter Dobke

1. INTRODUÇÃO

Ainda que as bases teóricas do efeito fotovoltaico já fossem conhecidas desde o início do século XX, foi somente em 1954 que a Bell Telephone, em New Jersey, EUA, conseguiu produzir uma célula que aproveitasse este efeito com um rendimento razoável. Desde então, o processo de purificação de monocristais de silício tem se desenvolvido bastante, impulsionado principalmente pela indústria eletrônica.

O efeito fotovoltaico acontece devido a uma diferença de potencial criada entre as duas faces da célula fotovoltaica, quando ocorre a incidência da radiação solar sobre a mesma, dentro de uma faixa geralmente entre 350 e 1100 nanômetros de comprimento de onda. A incidência dos fótons sobre a célula provoca o deslocamento de elétrons de uma face para outra, fluxo este que é recolhido por uma malha metálica fixada sobre uma das faces de cada célula. Se a incidência dos fótons se interrompe, o fluxo de elétrons também cessa espontaneamente.

Para que este efeito ocorra, o material construtivo da célula deve ser próprio a possibilitar este efeito, sendo os materiais semicondutores bastante apropriados para esta aplicação. Destes, o silício é o mais utilizado por fatores como sua abundância na crosta terrestre e o desenvolvimento expressivo de seu uso, proporcionado pela indústria de componentes de computadores. Existem, porém, células construídas com outros materiais, principalmente o gálio, o cádmio, o cobre e o índio. Alguns até apresentam rendimentos um pouco maiores do que o silício, nesta aplicação. Porém, por motivos econômicos, o uso do silício tem se mostrado imbatível.

A célula é o menor elemento do sistema fotovoltaico, produzindo tipicamente potências elétricas da ordem de 1,5 Watt-pico (correspondentes a uma tensão de 0,5 V e uma corrente de 3 A). Para obter potências maiores, as células são ligadas em série e/ou em paralelo, formando módulos (tipicamente com potências da ordem de 50 a 100 Wp) e painéis fotovoltaicos (com potências superiores).

Hoje em dia, os sistemas fotovoltaicos são usados num conjunto vasto de aplicações, de que se destacam:

- Aplicações de média potência (dezenas ou centenas de quilowatt):
 - Eletrificação rural: abastecimento de cargas domésticas em locais remotos sem rede, bombeamento de água e irrigação, complemento de abastecimento de locais remotos com ou sem rede;
 - Produção descentralizada ligada à rede.
- Aplicações de pequena potência (décimas ou unidades de quilowatt):
 - Relógios e calculadoras;
 - Acessórios de veículos automóveis, por exemplo, alimentação de ventoinhas para refrigeração de automóveis estacionados, ou carregamento de baterias em veículos de campismo;
 - Sinais rodoviários (móveis e estáticos) e parquímetros;
 - Telefones de emergência, transmissores de TV e de telefonia móvel;
 - Frigoríficos médicos em locais remotos.

Em muitas destas aplicações, os sistemas fotovoltaicos substituem com vantagem outros meios de produção alternativos, designadamente nas aplicações de pequena potência, onde a sua difusão é muito significativa. Por outro lado, foi por intermédio da indústria espacial, onde a vantagem competitiva dos sistemas fotovoltaicos é significativa, que estes iniciaram o seu desenvolvimento.

1.1. APLICAÇÕES DE BAIXA POTÊNCIA

Os painéis solares têm uma pequena parte da produção mundial elétrica, o que atualmente se deve ao custo por watt maior que o dos combustíveis fósseis, aproximadamente dez vezes maior, dependendo das circunstâncias. Tornaram-se rotina em algumas aplicações, tais como as baterias de suporte, alimentação de bóias, antenas, dispositivos em estradas ou desertos, crescentemente em parquímetros e semáforos, e de forma experimental são usados para alimentar automóveis em corridas como a *World Solar Challenge* através de Austrália.

1.2. APLICAÇÕES DE MÉDIA POTÊNCIA

As aplicações de média potência (entre as dezenas e as centenas de quilowatt-pico) são aquelas que naturalmente mais interessam aos engenheiros elétricos.

Os sistemas fotovoltaicos, sozinhos ou em associação com outras renováveis, são já competitivos para alimentação de certos locais remotos onde as soluções alternativas convencionais (gerador diesel ou rede elétrica) são claramente inferiores do ponto de vista econômico e apresentam inconvenientes ambientais não negligenciáveis.

Já no modo de funcionamento em produção descentralizada ligada à rede de energia elétrica, a situação é completamente diferente: os sistemas fotovoltaicos estão ainda longe de ser competitivos, quer com as fontes de produção convencionais, quer principalmente com outras energias renováveis. O elevado investimento e a baixa utilização anual da potência instalada são as principais razões para a fraca penetração que se verifica nos sistemas ligados à rede.

Em aplicações de média potência, os painéis fotovoltaicos podem ser operados principalmente de três formas:

- Ligados à rede de energia elétrica, à qual entregam toda a energia que a radiação solar lhes permite produzir; para este efeito é necessário um inversor que serve de elemento de interface entre o painel e a rede, de modo a adequar as formas de onda das grandezas elétricas DC do painel às formas de onda AC exigidas pela rede.

- Em sistema isolado, alimentando diretamente cargas: neste modo de funcionamento, o critério de dimensionamento é a radiação disponível no mês com menos sol, uma vez que é necessário assegurar o abastecimento durante todo o ano. Em associação com os coletores fotovoltaicos é ainda necessário dispor de:

- Baterias, de modo a assegurar o abastecimento nos períodos em que o recurso é insuficiente ou não está disponível; as baterias são carregadas quando o recurso disponível permite obter uma potência superior à potência de carga.

- Regulador de carga, que efetua a gestão da carga por forma a obter perfis compatíveis com a radiação disponível e com a capacidade das baterias.

- Inversor, requerido se houver cargas alimentadas em AC.

- Em sistema híbrido, alimentando diretamente cargas isoladas, em conjunto com outros conversores de energias renováveis, por exemplo, o eólico; neste modo de operação os dispositivos requeridos são os mencionados para o funcionamento

em sistema isolado, podendo existir também um meio de produção convencional, geralmente o gerador diesel, para apoio e reserva.

2. CÉLULA FOTOVOLTAICA

2.1. ESTRUTURA MICROSCÓPICA

Um átomo de silício é formado por quatorze prótons e quatorze elétrons. Na camada mais exterior, conhecida como banda de valência, existem quatro elétrons.

Quando se constitui um cristal de silício, os átomos alinham-se segundo uma estrutura em teia (chamada teia de diamante), formando quatro ligações covalentes com quatro átomos vizinhos, como se mostra na Figura 1.

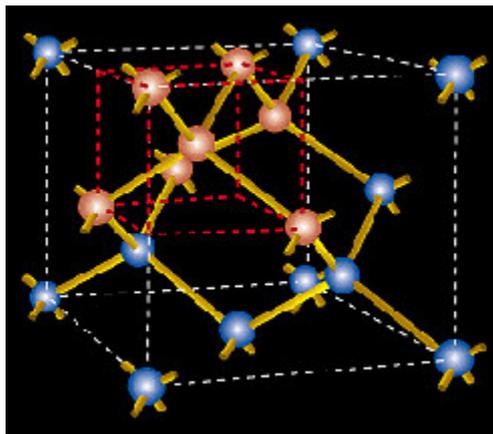


FIGURA 1 – Estrutura em teia de diamante de um cristal de silício

Em cada ligação covalente, um átomo partilha um dos seus elétrons de valência com um dos elétrons de valência do átomo vizinho. Como resultado desta partilha de elétrons, a banda de valência, que pode conter até oito elétrons, fica cheia: os elétrons ficam presos na banda de valência e o átomo está num estado estável.

Para que os elétrons se possam deslocar têm de adquirir energia suficiente para passarem da banda de valência para a banda de condução. Esta energia é designada por gap e no caso do cristal de silício vale 1,12 eV. Quando um fóton da radiação solar contendo energia suficiente atinge um elétron da banda de valência, este move-se para a banda de condução, deixando uma lacuna no seu lugar, a qual

se comporta como uma carga positiva. Neste caso, diz-se que o fóton criou um par elétron-lacuna.

Uma célula fotovoltaica constituída por cristais de silício puro não produziria energia elétrica. Os elétrons passariam para a banda de condução, mas acabariam por se recombinar com as lacunas, não dando origem a qualquer corrente elétrica.

Para haver corrente elétrica é necessário que exista um campo elétrico, isto é, uma diferença de potencial entre duas zonas da célula. Através do processo conhecido como dopagem do silício, que consiste na introdução de elementos estranhos com o objetivo de alterar as suas propriedades elétricas, é possível criar duas camadas na célula: a camada tipo p e a camada tipo n, que possuem, respectivamente, um excesso de cargas positivas e um excesso de cargas negativas, relativamente ao silício puro.

O boro é o dopante normalmente usado para criar a região tipo p. Um átomo de boro forma quatro ligações covalentes com quatro átomos vizinhos de silício, mas como só possui três elétrons na banda de valência, existe uma ligação apenas com um elétron, enquanto as restantes três ligações possuem dois elétrons. A ausência deste elétron é considerada uma lacuna, a qual se comporta como uma carga positiva que viaja através do material, pois de cada vez que um elétron vizinho a preenche, outra lacuna se cria. A razão entre átomos de boro e átomos de silício é normalmente da ordem de 1 para 10 milhões.

O fósforo é o material usado para criar a região n. Um átomo de fósforo tem cinco elétrons na sua banda de valência, pelo que cria quatro ligações covalentes com os átomos de silício e deixa um elétron livre, que viaja através do material. A razão entre átomos de fósforo e de silício é próxima de 1 para 1000.

Na região onde os dois materiais se encontram, designada junção p-n, cria-se, portanto, um campo elétrico que separa os portadores de carga que a atingem: os elétrons, excitados pelos fótons com energia suficiente para excitar elétrons da banda de valência para a banda de condução, são acelerados para um terminal negativo, ao passo que as lacunas são enviadas para um terminal positivo. Nestas condições, ligando os terminais a um circuito que se fecha exteriormente através de uma carga, circulará corrente elétrica.

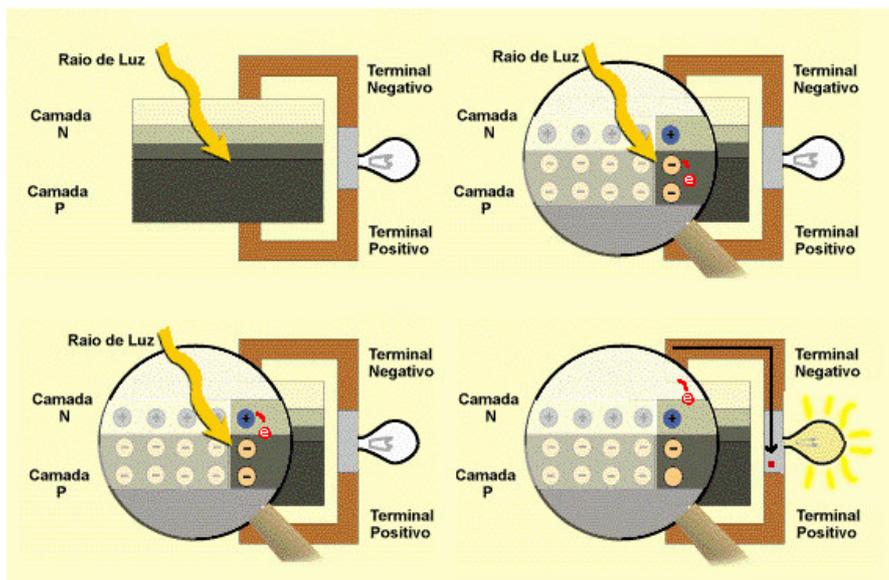


FIGURA 2 - Efeito fotovoltaico na junção pn

2.2. ESTRUTURA MACROSCÓPICA

A Figura 3 mostra a superfície ativa de uma célula fotovoltaica típica de silício cristalino. Tem a forma de um quadrado com cerca de 10 cm de lado e pesa aproximadamente 10 gramas.



FIGURA 3 – Superfície ativa de uma célula fotovoltaica típica.

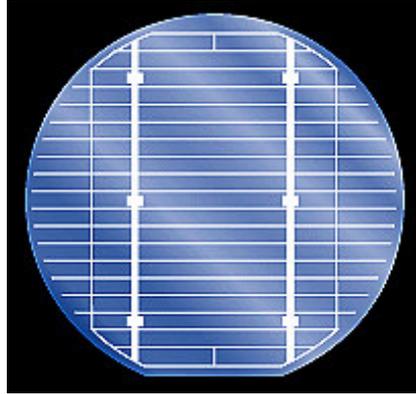


FIGURA 4 – Pormenor da grelha coletora metálica na superfície.

A Figura 5 ilustra a constituição interna de uma célula fotovoltaica típica. Os principais componentes de uma célula fotovoltaica são os seguintes:

- Grelha e contatos frontais (“grid”, “front contacts”): os contatos frontais, em cobre, constituem os terminais negativos.
- Película anti-reflexo (“anti-reflection coating”): esta película reduz a reflexão da radiação incidente para valores abaixo de 5%. Em conjunto com textura especiais usadas em células de alto rendimento a reflexão pode ser reduzida para valores da ordem de 2%. Sem este revestimento a célula refletiria cerca de um terço da radiação.
- Camada tipo n (“ n -type silicon”): silício dopado com fósforo, constituindo a região negativa da célula; a espessura desta camada é cerca de 300 nm.
- Camada tipo p (“ p -type silicon”): silício dopado com boro, constituindo a região positiva da célula; a espessura desta camada é cerca de 250.000 nm.
- Contato traseiro (“back contact”): contato metálico localizado na parte posterior da célula, que constitui o terminal positivo.

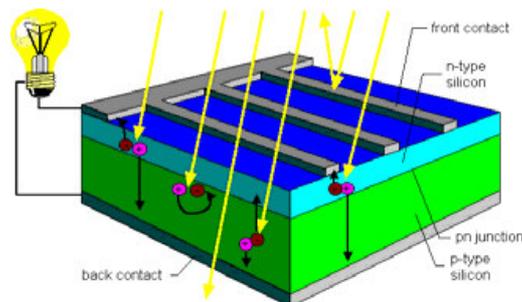


FIGURA 5 – Constituição interna de uma célula fotovoltaica típica

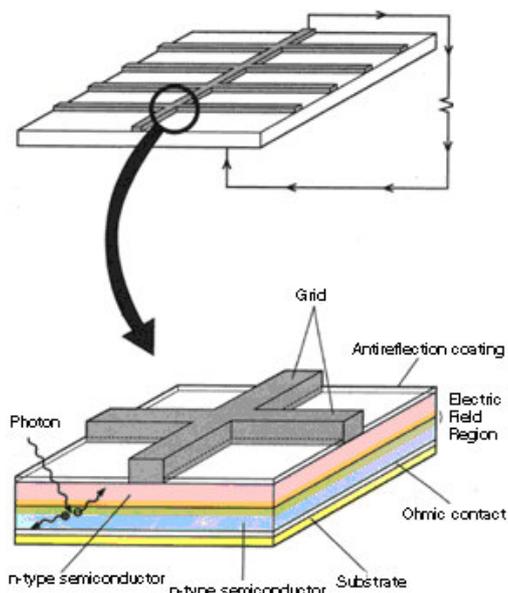


FIGURA 6 – Pormenor da constituição da grelha metálica

2.3. MODELO MATEMÁTICO

2.3.1. Estabelecimento do modelo simplificado

Em termos de modelo matemático simplificado, uma célula pode ser descrita através do circuito elétrico equivalente que se mostra na Figura 7.

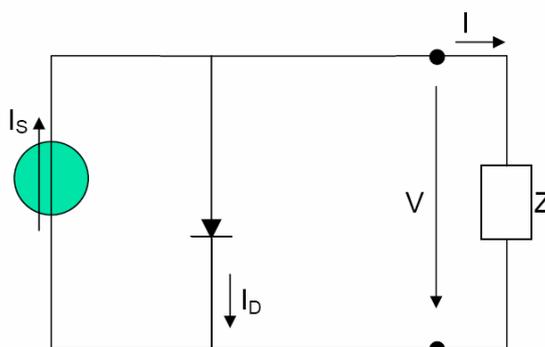


FIGURA 7 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z.

A fonte de corrente I_S representa a corrente elétrica gerada pelo feixe de radiação luminosa, constituído por fótons, ao atingir a superfície ativa da célula

(efeito fotovoltaico). Esta corrente unidirecional é constante para uma dada radiação incidente. A junção p-n funciona como um diodo que é atravessado por uma corrente interna unidirecional I_D , que depende da tensão V aos terminais da célula.

A corrente I_D que se fecha através do diodo é:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right)$$

Onde:

- I_0 – corrente inversa máxima de saturação do diodo.
- V – tensão aos terminais da célula
- m – fator de idealidade do diodo (diodo ideal: $m = 1$; diodo real: $m > 1$)
- V_T – designado por potencial térmico

$$V_T = \frac{KT}{q}$$

- K : constante de Boltzmann ($K = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
- T : temperatura absoluta da célula em K
- q : carga elétrica do elétron

A corrente I que se fecha pela carga é, portanto (ver Figura 8):

$$I = I_s - I_D = I_s - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right)$$

2.3.2. Introdução ao modelo detalhado

O modelo simplificado não é, como o próprio nome indica, uma representação rigorosa da célula fotovoltaica. Nas células “reais” observa-se uma queda de tensão no circuito até aos contatos exteriores, a qual pode ser representada por uma resistência série R_s . Do mesmo modo, também existem correntes de fuga, que podem ser descritas por uma resistência paralelo, R_p . O circuito elétrico equivalente é o que se representa na Figura 8.

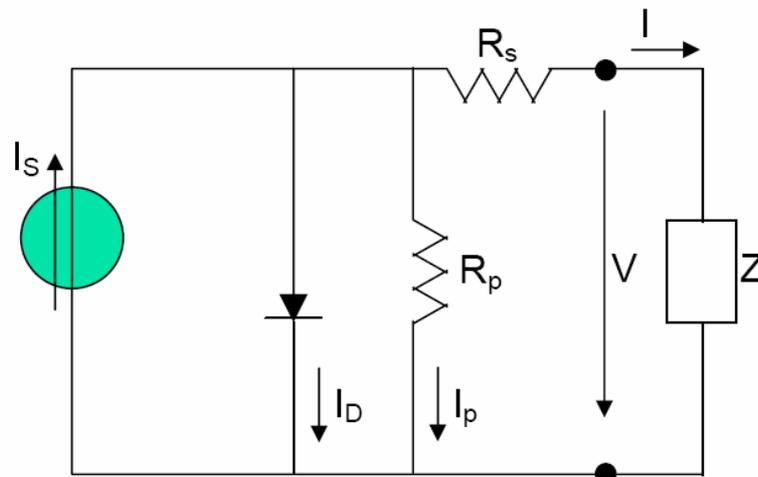


FIGURA 8 - Circuito elétrico equivalente detalhado de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z.

A corrente I que circula pela carga é:

$$I = I_s - I_D - I_p = I_s - I_0 \left(e^{\frac{V + R_s I}{mV_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p}$$

2.4. TIPOS DE CÉLULAS

2.4.1 Células de silício Monocristalino

O silício monocristalino é o material mais usado na composição das células fotovoltaicas, atingindo cerca de 60% do mercado. A uniformidade da estrutura molecular resultante da utilização de um cristal único é ideal para potenciar o efeito fotovoltaico. O rendimento máximo atingido em laboratório ronda os 24%, o qual em utilização prática se reduz para cerca de 15%. A produção de silício cristalino é cara.

A fabricação da célula de silício começa com a extração do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza em 98 e 99% o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e custo. Este silício para funcionar como

células fotovoltaicas necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar na faixa de 99,9999%.

Possuem aparência externa uniforme em termos de coloração e são feitas de fatias de lingotes cilíndricos de silício. Os lingotes de silício são formados em fornos especiais por um processo chamado de Czochralski, em alta temperatura e ambiente controlado geralmente em atmosfera de argônio.

O silício é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, normalmente o boro que é do tipo p. Com um fragmento do cristal devidamente orientada e sob rígido controle de temperatura, vai-se extraindo do material fundido um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado.

Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente 300 μ m. Trata-se de um processo dispendioso e de alta tecnologia. Após o corte e limpeza de impurezas das fatias, deve-se introduzir impurezas do tipo N de forma a obter a junção. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1000 $^{\circ}$ C.



FIGURA 9 – Célula de silício monocristalino.

2.4.2 Células de silício policristalino

O silício policristalino, constituído por um número muito elevado de pequenos cristais, dispõe de uma quota de mercado de cerca de 30%. As discontinuidades da

estrutura molecular dificultam o movimento de elétrons e encorajam a recombinação com as lacunas, o que reduz a potência de saída.

Por este motivo os rendimentos em laboratório e em utilização prática não excedem os 18% e 12%, respectivamente. Em contrapartida, o processo de fabricação é mais barato do que o do silício cristalino.

Feitas por um processo menos rigoroso, as células policristalinas têm uma aparência característica, onde pode-se ver claramente os vários cristais de sua formação distribuídos de forma heterogênea. Têm a vantagem de poderem ser feitas nos formatos desejados, aproveitando praticamente toda a área útil da placa. São historicamente menos eficientes do que as células monocristalinas, mas devido ao seu menor custo de fabricação e a desenvolvimentos mais recentes, seu rendimento já começa a ficar bem próximo dos monocristais.

O processo de pureza do silício utilizada na produção das células de silício policristalino é similar ao processo do Si monocristalino, o que permite obtenção de níveis de eficiência compatíveis. Basicamente, as técnicas de fabricação de células policristalinas são as mesmas na fabricação das células monocristalinas, porém com menores rigores de controle. Podem ser preparadas pelo corte de um lingote, de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. Nestes dois últimos casos só o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características específicas, incluindo tamanho, morfologia e concentração de impurezas.



FIGURA 10 – Célula de silício policristalino.

2.4.3 Células de silício amorfo

A célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos. No entanto, se ao silício amorfo for adicionada uma pequena quantidade de hidrogênio, por um processo chamado hidrogenização, os átomos de hidrogênio combinam-se quimicamente de forma a minimizar os efeitos negativos dos defeitos estruturais. O silício amorfo absorve a radiação solar de uma maneira muito mais eficiente do que o silício cristalino, pelo que é possível depositar uma fina película de silício amorfo sobre um substrato (metal, vidro, plástico). Este processo de fabricação é ainda mais barato do que o do silício policristalino.

A utilização de silício amorfo para uso em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação. Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil.

Os equipamentos solares domésticos (calculadoras, relógios) são habitualmente feitos com células de silício amorfo, representando cerca de 4% do mercado. Em laboratório é possível obter rendimentos da ordem de 13%, mas as propriedades conversoras do material deterioram-se em utilização prática, pelo que os rendimentos descem para cerca de 6%.

Por outro lado, o silício amorfo apresenta vantagens que compensam as deficiências acima citados, são elas:

- processo de fabricação relativamente simples e barato;
- possibilidade de fabricação de células com grandes áreas;
- possibilidade de fabricação de células em forma de filmes ou semitransparentes
- baixo consumo de energia na produção.



FIGURA 11 – Painel fotovoltaico constituído por células de silício amorfo.

3. MÓDULOS E PAINÉIS

A potência máxima de uma única célula fotovoltaica não excede 2 W, o que é manifestamente insuficiente para a maioria das aplicações. Por este motivo, as células são agrupadas em série e em paralelo formando *módulos*.

Um módulo consiste num conjunto de NPM ramos ligados em paralelo, cada um deles constituído por NSM células ligadas em série, como se mostra na Figura 12.

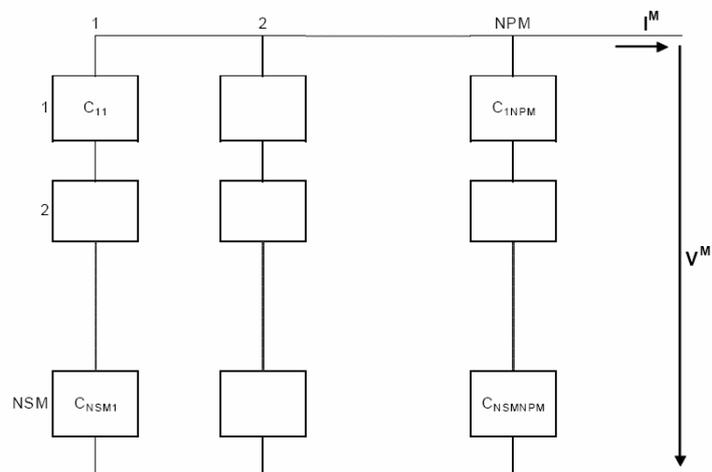


FIGURA 12 – Esquema de ligação de painéis em série e paralelo.

O número de células num módulo é determinado pelas necessidades de tensão e corrente da carga a alimentar. Tipicamente um módulo pode ser constituído por cerca de 33 a 36 células ligadas em série, porque é comum haver necessidade de carregar uma bateria de 12 V.



FIGURA 13 – Um módulo fotovoltaico de 100 W, para alimentação de um candeeiro público usando baterias de 12 V.

Os módulos podem também ser associados em série e paralelo para obter mais potência, formando painéis.



FIGURA 14 – Painéis fotovoltaicos da companhia elétrica de Sacramento, EUA

4. MATERIAIS ALTERNATIVOS AO SILÍCIO

4.1. CÉLULA FOTOVOLTAICA DSC

A empresa japonesa Peccell Technologies apresentou em 2004 uma nova célula fotoeletroquímica sensibilizada por corante, capaz de transformar energia

solar em eletricidade, como as células fotovoltaicas, capaz de gerar mais de 4 volts de energia. As células atuais não geram mais do que 0,5 volt, sendo necessárias várias delas montadas em um painel para se atingir tensões e potências úteis.

Trata-se de uma DSC ("Dye-sensitized Solar Cell"), com eletrodos feitos de uma pasta especial de óxido de titânio. O principal desenvolvimento consistiu no controle em nano-escala das dimensões das partículas que formam esta pasta. Cada partícula mede entre 10 e 500 nanômetros.

A diminuição do tamanho das partículas aumenta exponencialmente a área do material, permitindo que uma quantidade maior de corante seja absorvido pela partícula. A maior área recoberta de corante sensível à luz significa uma quantidade muito maior de fótons capturados, o que permitiu o incrível aumento na tensão gerada pela célula.



FIGURA 15 – Célula solar DSC

Na célula DSC, um fluxo de elétrons excitados, resultantes da absorção da luz do sol pelo corante, é levado aos eletrodos feitos de partículas semicondutoras, inclusive de óxido de titânio, causando uma força eletromotora.

A DSC é um dos tipos de células fotovoltaicas de mais baixo custo atualmente, sendo a mais forte candidata para substituir as células tradicionais de silício.

Além disso, as novas células são totalmente flexíveis, gerando painéis leves e mesmo permitindo sua montagem em outras estruturas. Sendo um filme plástico, os painéis solares poderão ser produzidos em qualquer formato e cor, podendo ser integrados facilmente a projetos arquitetônicos ou aparelhos eletrônicos portáteis.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Nova célula fotovoltaica DSC gera até 4 volts. Disponível em :
<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010115040916>.
Acesso em 22 jun. 2008.

Energia Solar – Princípios e aplicações. Disponível em:
<http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em 20 jun. 2008.

Efeito Fotovoltaico. Disponível em:
http://paginas.fe.up.pt/~ee97234/efeito_fotovoltaico1.htm. Acesso em 15 jun. 2008.

Sistema de alimentação a energia solar. Disponível em:
<http://paginas.fe.up.pt/~ee97234/PSTFC.htm>. Acesso em 23 jun. 2008.

Efeito Fotoelétrico. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Fotoeletrico>. Acesso em: 01 jun. 2008.

UTILIZAÇÃO DE ÓLEOS BIODEGRADÁVEIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

David Valdir Gris

1. INTRODUÇÃO

Os transformadores são máquinas elétricas estáticas com diversas aplicações na energia, desde a produção, transporte e distribuição da mesma. Estes são de extrema importância em toda a extensão da rede elétrica; se impondo a eles grande confiabilidade bem como cuidados para com o ambiente e proteção de pessoas.

A investigação nesta área tem em consideração tais preocupações, no sentido de melhorar progressivamente esta máquina, de forma a torná-la mais eficiente, reduzindo os níveis de perdas, e utilizando em suas matérias primas cada vez mais materiais recicláveis, dado que o desmantelamento da máquina é uma preocupação em relação ao período de vida útil da mesma.

Nos transformadores imersos, o dielétrico líquido é o material que desempenha funções essenciais a nível de isolamento e arrefecimento e constitui cerca de 20 a 25% da totalidade das matérias primas usadas, tornando-se essencial para o bom desempenho das suas funções.

O óleo mineral é sem dúvida o dielétrico líquido de maior utilização nos transformadores de distribuição. As suas boas características físicas e químicas, o bom resultado da associação com os isolantes de papel e seu preço, elegeram-no desde sempre como o dielétrico por excelência. No entanto, é um material extremamente poluente para o ambiente quando derramado, além de possuir riscos de explosão eminentes em temperaturas médias.

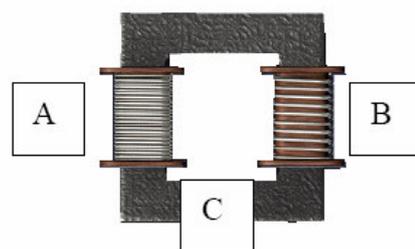
A questão ambiental tem vindo a preocupar a comunidade internacional de forma crescente. Assim as novas tendências apontam para a utilização de dielétricos líquidos de base vegetal da classe dos ésteres. São óleos com uma elevada resistência ao fogo, *flash point* da ordem dos 330 °C, contra 140° C dos óleos minerais, e cujas propriedades ambientais, químicas, elétricas e de segurança contra incêndio lhe conferem o estatuto de “óleo do futuro”.

O presente trabalho vem explanar parcialmente sobre o assunto, e apontar as vantagens desse tipo de isolamento em relação aos óleos minerais, fazendo primeiramente uma abordagem da teoria de transformadores e isolantes, e posteriormente fazendo uma co-relação entre eles, de modo a resultar no óleo dielétrico biodegradável.

2. TRANSFORMADORES

2.1 FUNCIONAMENTO

O transformador é um aparelho utilizado largamente na Engenharia Elétrica. Sua função básica é transformar um nível de tensão elétrica em outro que se deseje. O transformador funciona baseado no princípio da indução mútua de campos magnéticos.



- A: bobina (primário)
- B: bobina (secundário)
- C: núcleo do transformador

FIGURA 1 – *Esquema Básico de um Transformador.*

Uma tensão é aplicada numa das bobinas, de forma a se obter outra tensão na outra bobina. O funcionamento é simples: na bobina A, aplica-se uma tensão V_a e uma corrente I_a . Dessa maneira, um campo magnético será induzido no núcleo, o que automaticamente faz surgir na bobina B uma tensão V_b e uma corrente I_b , que podem ser maiores ou menores que as do primário, conforme a finalidade do transformador.

O controle das tensões é relacionado com o número de enrolamentos das bobinas. Se a finalidade for aumentar a tensão no secundário, usa-se na bobina B um número de espiras maior que na bobina A, e vice-versa. No caso da Figura 1, a bobina A tem mais espiras do que a B, logo $V_a > V_b$ (transformador rebaixador).

2.2 TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Transformadores de Potência são equipamentos importantes e de alto custo no contexto de sistemas elétricos de potência. De acordo com o que descrevemos no tópico anterior, sua função de maneira geral é reduzir as perdas em transmissão por redução da corrente requerida para transmitir uma determinada potência elétrica. Esta transferência de energia é acompanhada de perdas que dependem, normalmente, da construção do transformador, do seu regime de funcionamento e de sua manutenção.

A fim de se formar um circuito magnético fechado, o núcleo de um grande transformador é constituído, na maioria das vezes, de lâminas de aço-silício cortadas e arrumadas acomodando as bobinas. O óleo isolante entra justamente entre as partes ativas, de forma a mantê-las isoladas e refrigeradas.

A principal parte de um transformador é o seu sistema de isolamento, que é constituído basicamente por um líquido, um óleo isolante, e uma isolação sólida, o papel isolante elétrico. Na Figura 2 é mostrada um esquema de um núcleo de um transformador, ilustrando o uso do papel.

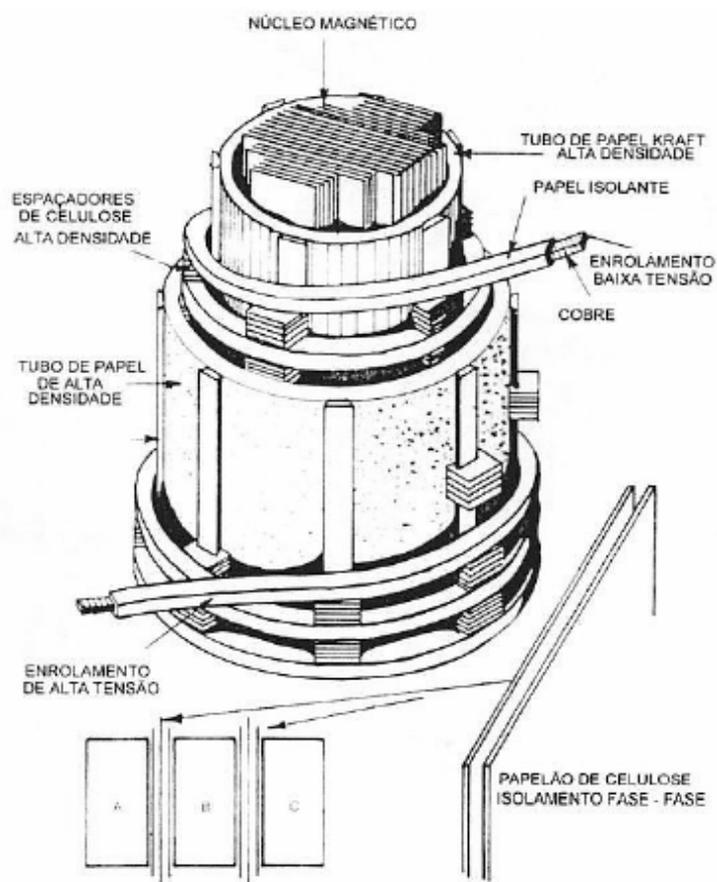
Também fazem parte do núcleo do transformador resinas e fibras, que são empregadas com a finalidade de fixar os componentes isolantes e magnéticos. Materiais elastoméricos e tintas compatíveis com óleo isolante são utilizados com a finalidade de promover a vedação e a proteção do equipamento.

Durante o funcionamento dos transformadores de potência vários processos de desgaste e de envelhecimento ocorrem no sistema de isolamento.

Os efeitos de fadiga térmica, química, elétrica e mecânica, tais como, pontos quentes, sobre-aquecimentos, sobre-tensões e vibração são responsáveis por alterações do sistema isolante e devem ser monitorados para garantir a eficiência do equipamento, permitindo intervenções de manutenção preventiva, a fim de evitar paradas de máquina, e conseqüentemente aumento de custos.

Dessa forma, a diminuição da vida útil dos transformadores está relacionada com a qualidade dos materiais dielétricos utilizados durante o processo de fabricação. O estabelecimento de um programa de supervisão e manutenção preventiva, pelo conhecimento dos materiais dielétricos envolvidos, proporcionará um aumento na vida útil do equipamento em serviço.

A Figura 3 mostra o aspecto de um grande transformador de potência.



FONTE: MYERS, S. D.; KELLY, J. J.; PARRISH, R. H. *A guide to transformer maintenance*. Ohio: Akron, 1981. 830p.

FIGURA 2 – *Detalhes do núcleo de um Transformador de Potência.*



FIGURA 3 – *Aspecto de um Grande Transformador de Potência.*

2.3 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Desde a sua geração até a utilização final pelo consumidor, a energia elétrica normalmente passa por sucessivas transformações de tensão. Logo após a tensão alternada ser produzida, ela é elevada na subestação próxima a usina. A nova tensão é transportada por longas distância até chegar a uma outra subestação próxima ao consumidor. Ali o valor é reduzido e já será útil às indústrias, mas ainda deve ser diminuído um pouco mais para o uso doméstico. Desta forma, próximo às residências, existem transformadores que irão reduzir a tensão para 110V ou 220 V. A Figura 4 abaixo ilustra um esquema de distribuição de energia elétrica.

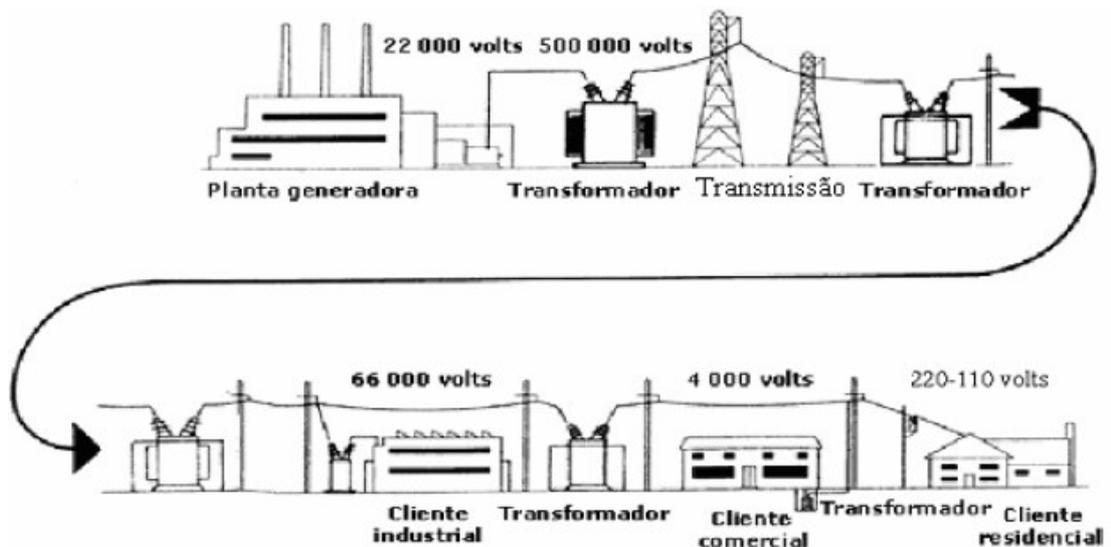


FIGURA 4 – Esquema de distribuição de Energia Elétrica.

3. MATERIAIS ISOLANTES

Os materiais isolantes podem ser classificados sob diferentes critérios, sendo que os mais utilizados são:

- pela sua natureza (ou estado físico): sólido, líquido e gasoso;
- por sua origem: natural, sintético;
- por sua composição: orgânicos, inorgânicos;
- por sua temperatura máxima de trabalho: classe Y, A, E, B, F, H, C.

3.1 ESTADOS FÍSICOS DOS MATERIAIS ISOLANTES

Assim quanto ao seu estado físico os materiais isolantes mais utilizados podem ser:

a) Isolantes gasosos: Ar, Nitrogênio, gases raros, hexafluoreto de enxofre (SF₆).

b) Isolantes líquidos:

- a) Óleos minerais: para transformadores, disjuntores, cabos, etc.
- b) Dielétricos líquidos à prova de fogo: Piranol, Inerteen, Dikanol A, Traffold, Fluido de Silicone, etc.
- c) Óleos vegetais: Tung, Estéres, Envirotemp FR3, Biotemp, etc.

c) Isolantes sólidos:

- a) Aplicados em estado líquido ou pastoso:
 - Resinas e plásticos naturais: resinas fósseis e vegetais, materiais asfálticos, goma laca.
 - Ceras: minerais, parafina.
 - Vernizes e lacas: preparados de resinas e óleos naturais, produtos sintéticos, esmalte para fios, vernizes e lacas.
 - Resinas sintéticas: plásticos moldados e laminados, resinas fenólicas, borracha sintética, silicones, etc.
 - Compostos de celulose: termoplásticos, papel, papelão, pasta mecânica.
 - Plásticos moldados a frio: cimento Portland empregado com resinas ou asfaltos.

- b) Sólidos aplicados em estado sólido:
 - Minerais: quartzo, pedra sabão, mica, ardósia, mármore, asbesto, etc.
 - Cerâmicos: porcelana, vidro.
 - Materiais da classe da borracha: borracha natural, borracha sintética, etc.

- Materiais fibrosos: algodão, seda, linho, papel, fibra de vidro, madeira, celofane, rayon, nylon.

Filtrando o assunto ao que nos interessa, discutiremos neste trabalho principalmente a característica líquida dos isolantes utilizados em transformadores, e parcialmente sobre a característica sólida, bem como citações a respeito de suas origens, composições e condições de trabalho.

4. TRANSFORMADORES x ISOLANTES

4.1 CRONOLOGIA

Os transformadores começaram a ser construídos nos finais do sec. XIX, seguindo a seguinte cronologia:

1880 – Patente do conceito de isolamento e refrigeração a óleo

1899 – 1º protótipo construído pela General Electric

Refinaria fabrica primeiro óleo exclusivo para transformadores

1930 – Introdução do Askarel, genericamente designados por “PCB’s”

- Não-Inflamável (ponto de combustão próximo aos 1500°C)

1970 – Promulgadas Restrições ao PCB

- Restrições ambientais e de saúde
- Introdução aos Fluídos alternativos

1978 – Óleo R-Temp (hidrocarbonetos)

- Elevado *Flash and Fire point*
- Mais de 120 000 instalações sem nenhuma ocorrência de incêndio

Silicones (sintético)

1984 – Éster sintético (Envirotemp 200)

- Excelente Performance
- Elevado custo - Aplicações Especiais

1996 – Éster Natural

4.2 SISTEMAS ISOLANTES EM TRANSFORMADORES

A isolação nos transformadores é composta pelo óleo isolante e pela parte sólida. A maior parte da isolação sólida dos transformadores é constituída de papel, ou seja, e de natureza celulósica. Já a parte líquida é na grande maioria das aplicações feita com óleo mineral, e mais recentemente prega-se a utilização de óleos vegetais, como alternativa pouco poluente, e também mais segura e ambientalmente correta.

O sistema de isolamento óleo/papel é bastante antigo e deve continuar a ser utilizado, pois é bastante eficaz e de custo reduzido em relação a outros meios dielétricos.

4.2.1 ISOLAÇÃO LÍQUIDA

As principais funções de um líquido dentro de um equipamento elétrico consistem em dissipar o calor gerado durante a operação e fazer o isolamento interno. A circulação do líquido se faz por convecção natural, ou bombeamento. Este líquido deve possuir boas propriedades dielétricas a fim de fornecer bom isolamento e ter baixa viscosidade para oferecer uma eficiente dissipação do calor, através de uma boa circulação do líquido. Como no contato com os equipamentos elétricos o óleo estará sujeito à temperaturas até certo ponto elevadas, ele não deve sofrer ação da temperatura, ou seja deve ter uma boa estabilidade térmica. Por fim, por estarem continuamente em circulação pelo interior dos equipamentos, e em contato com todos os demais materiais presentes no interior do equipamento, os quais não devem reagir com o líquido isolante, os líquidos isolantes devem apresentar uma baixa reatividade química.

Pra se ter uma idéia da importância da isolação líquida em transformadores, temos no mundo todo bilhões de litros de óleo para transformador sendo utilizados. Eles são de vários tamanhos: grande, médio e de pequena potência assim como de distribuição, cada um usando uns quarenta mil litros por fase em um grande transformador de potência e uns oitenta litros para um pequeno transformador de distribuição. As unidades menores são mais numerosas que as unidades maiores porque a distribuição é mais espalhada por definição, portanto as unidades menores carregam, no total, muito mais líquido que as unidades maiores.

4.2.1.1 ÓLEO MINERAL

Os óleos minerais utilizados como isolantes em equipamentos elétricos são obtidos através da destilação do petróleo cru, da fração de 300 a 400° C. São formados por uma mistura de hidrocarbonetos, parafínicos, naftênicos, aromáticos, e em concentrações menores, compostos de enxofre, nitrogênio e oxigênio, denominados compostos polares. De acordo com a variação do teor dos hidrocarbonetos na sua formação obteremos dois tipos básicos de óleo que são os naftênicos e parafínicos. O tipo e a qualidade dos óleos isolantes minerais dependem respectivamente da origem do petróleo cru e do processo de refinação.

O óleo mineral é sem dúvida o dielétrico líquido de maior utilização nos transformadores de distribuição. As suas características físicas e químicas o bom resultado da associação com os isolantes de papel e o seu preço elegeram-no desde sempre como o dielétrico por excelência. Hoje, sem errar por muito, pode-se dizer que a quase totalidade dos transformadores de distribuição instalados na rede utiliza o óleo mineral como líquido dielétrico isolante e como meio de arrefecimento da máquina.

No entanto, o comportamento ao fogo deste dielétrico (inflamabilidade, alimentação da combustão, etc.) há muito que condiciona a sua utilização exigindo um tratamento especial em determinados locais de instalação ou obrigando a alternativas. Na eventualidade de um derrame accidental, o óleo mineral além de representar um potencial risco de incêndio, constitui uma ameaça ambiental, uma vez que contamina o solo circundante, penetrando nos lençóis freáticos.

4.2.1.2 SILICONE

O produto químico denominado comercialmente de Silicone é um polímero do dimetil siloxano, térmicamente estável e com boa resistência ao fogo.

Os transformadores imersos em silicone surgiram em alternativa aos “PCB’s” também designados por “Askareis”. Este fluído já era utilizado em transformadores para aplicações especiais como, por exemplo em edifícios de comando e de instalações militares, navios e aeronaves, mas o baixo preço do Askarel manteve-o afastado das aplicações correntes durante longos anos.

Embora ainda caro quando comparado com o óleo mineral, as suas características químicas, físicas e de segurança fazem dele uma boa solução de compromisso quando se exige elevada segurança em caso de incêndio.

A grande vantagem do silicone reside na sua baixa inflamabilidade relativamente ao óleo mineral (o *Flash point* do óleo mineral é da ordem dos 150 °C e o do silicone aproxima-se dos 300 °C). Contudo, a utilização do silicone em transformadores com isolantes sólidos de base celulósica é um contra-senso em termos de exploração. Se por um lado se poderia tirar toda a vantagem das características térmicas do dieléctrico líquido, por outro lado sabemos que a celulose começa a degradar-se aos 105 °C. Ou seja, as características térmicas de dimensionamento da máquina (aquecimento em regime nominal e sobrecargas admissíveis) continuam limitadas pela utilização do papel.

Apesar de todas estas vantagens, o silicone continua a não resolver a questão ambiental da contaminação dos solos em caso de derrame accidental, uma vez que não é biodegradável.

4.2.1.3 ÓLEO VEGETAL

A questão ambiental tem preocupado a comunidade internacional de forma crescente. Assim, as novas tendências apontam para a utilização de dieléctricos líquidos de base vegetal da classe dos Ésteres. São óleos com uma elevada resistência ao fogo, *flash point* da ordem dos 330 °C e cujas propriedades ambientais, químicas e físicas, elétricas e de segurança contra incêndio lhe conferem o estatuto de “óleo do futuro”. São formulados à base de óleo de sementes combinado com aditivos de classe alimentar de forma a aumentar a sua eficácia. Não derivam do petróleo e têm a propriedade de se degradarem rapidamente tanto em meios sólidos como em meios líquidos.

4.2.2 ISOLAÇÃO SÓLIDA

A isolação sólida se faz presente nos transformadores entre o núcleo magnético e o enrolamento do primário e secundário, por meio de papel de alta densidade; ou então como alternativa para imersão do núcleo em meio isolante, por meio de resinas.

4.2.2.1 PAPEL

Desde há muito tempo, o papel representa o material indicado para o isolamento elétrico, tendo substituído a proteção de algodão nos enrolamentos dos transformadores. Além de ser um material relativamente barato, sua estrutura permite-lhe ser facilmente impregnado e sua associação com um impregnante bem escolhido confere-lhe ótimas propriedades. O impregnante atualmente associado ao papel é, mais freqüentemente, um óleo mineral.

O papel é formado de longas fibras tubulares, cujo principal constituinte é a celulose, a qual entra igualmente na composição dos papelões, amplamente utilizados em numerosos isolamentos e destinados, sobretudo, a assegurar uma certa resistência mecânica.

Os papéis de algodão e os papéis derivados do cânhamo de manilha foram, durante muito tempo, os únicos a oferecer propriedades satisfatórias para o uso na indústria elétrica.

Os principais materiais celulósicos utilizados são o papel *Kraft*, que é feito de fibra de madeira; o papel manilha, feito de fibras de madeira e cânhamo; o papelão *kraft*, também de fibra de madeiras, e o *pressboard*, que é um papelão com fibra de algodão. Quando se deseja resistências a altas temperatura, emprega-se também o papel termoestabilizado, que é um papel cuja celulose passa por um tratamento especial.

4.2.2.2 TRANSFORMADORES ENCAPSULADOS EM RESINA

Os transformadores secos ou encapsulados em resina epóxica apresentam-se como uma alternativa aos transformadores imersos (em óleo mineral ou silicone) e devem o seu sucesso e utilização devido às restrições legais impostas a estes últimos. São vulgarmente utilizados em edifícios residenciais, em hospitais, centros comerciais e em locais onde a presença de pessoas ou outros aspectos específicos de projeto exijam que seja dada especial atenção à segurança da instalação em caso de derrame acidental ou incêndio.

5. INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

A popularidade do óleo mineral para transformador é devido à disponibilidade e baixo custo, além de ser um excelente meio dielétrico e refrigerante. Desde que as reservas mundiais de óleo foram descobertas nos anos quarenta, produtos de petróleo têm sido disponibilizados amplamente. Produtos derivados de petróleo são tão vitais no mundo de hoje que não podemos imaginar a vida sem tê-los disponíveis. Transformadores e outros equipamentos com óleo usam somente uma pequena fração do consumo total de petróleo, ainda que esta pequena fração seja quase insubstituível. Há duas razões porque devemos pensar em fontes alternativas naturais de líquidos:

O óleo mineral do transformador é pouco biodegradável. Eles podem contaminar o solo e os cursos d'água se ocorrerem grandes vazamentos. Órgãos reguladores do governo já estão olhando para este problema e estão impondo severas multas para vazamentos. Milhares de transformadores estão localizados em áreas povoadas, shopping centers, e perto de cursos d'água.

Produtos de petróleo poderão eventualmente acabar, e poderá haver escassez no meio do século XXI. Conservar as reservas de petróleo e reciclagem são vitais para produtos derivados de petróleo – plásticos, farmacêuticos, químico-orgânicos, e assim por diante. Até se desenvolvem uma alternativa viável de fontes de energia, não há um substituto para a gasolina, combustível para aviação e óleo para aquecimento. Óleos vegetais são produtos disponíveis em abundância. Eles são usados freqüentemente para propósitos comestíveis, mas óleos especiais são usados para secagem e corte. O único uso significativo de óleo vegetal sugerido antes do fim dos anos 90 foi em capacitores de potência. Mesmo lá, o uso foi mais experimental que comercial.

Em anos recentes, preocupações ambientais têm sido levantadas quanto ao uso de líquidos pouco biodegradáveis em equipamentos elétricos em regiões onde vazamentos e falhas podem contaminar as imediações. A última grande evolução que está emergindo é a troca de óleo mineral pelo óleo vegetal, trazendo consigo mudanças positivas tanto na área técnica como para o meio ambiente que nos cerca.

Com a evolução da engenharia de materiais das últimas décadas, e com a necessidade do mercado ter um produto alternativo e amigável ao meio ambiente

que atendessem totalmente os requisitos técnicos para esta aplicação, viabilizando maior segurança na instalação, surgiram diversos óleos vegetais no mercado, tais como:

- *Envirotemp FR3*, desenvolvido pela **Cooper Power Systems** a partir do óleo de soja,
- *Biotemp*, desenvolvido pela **ABB** a partir de óleo de girassol
- *Biovolt A e B*, desenvolvido pela **Mineraltec** a partir de óleo de soja e milho respectivamente.

Esses óleos aplicados em transformadores elétricos conseguem agregar em um único fluido as melhores características do óleo mineral isolante, do óleo silicone e do PCB (difícil inflamabilidade), possuindo assim excelentes características dielétricas como alta estabilidade de temperatura, excelente resistência à explosão e ao incêndio, além de ser biodegradável.

5.1 VANTAGENS NA UTILIZAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS

Os óleos biodegradáveis desenvolvidos são fabricados a partir de fontes naturais, ou seja, são óleo de sementes combinados com aditivos de classe alimentar de forma a aumentar a sua eficácia.

Preocupam-se principalmente com o meio ambiente, portanto não contém materiais à base de petróleo, halogéneos ou silicones. Possuem excelentes características dielétricas e com alta estabilidade a combustão e explosão, além de excelente compatibilidade com materiais isolantes sólidos, sendo biodegradável em um breve período de tempo.

O óleo vegetal não é tóxico para pássaros, animais e seres humanos. Ele tem um ponto de ignição maior que o óleo mineral e outros líquidos resistentes ao fogo usados atualmente em transformadores. A Tabela abaixo ilustra as diversas vantagens dos óleos vegetais.

Descreveremos adiante inúmeros tópicos, com gráficos e Tabelas respectivos as vantagens de uso de óleos vegetais de alguns fabricantes específicos.

5.1.1 BIODEGRADAÇÃO

O óleo mineral, na eventualidade de um derrame acidental, além de representar um potencial risco de incêndio, constitui uma ameaça ambiental, uma vez que contamina o solo circundante, penetrando nos lençóis freáticos.

O óleo biodegradável FR3 é especificamente formulado para minimizar riscos de saúde e ambientais, como o próprio nome indica biodegrada-se totalmente de forma rápida tanto em ambientes sólidos como aquáticos. Está comprovado em teste de toxidez aguda aquática como não tóxico em alevinos de trutas.

Obtido a partir de fontes renováveis tornando-se facilmente reciclável e reutilizável. Com todas estas características favoráveis ao ambiente substitui o petróleo não renovável e óleos sintéticos tornando-se amigo do ambiente.

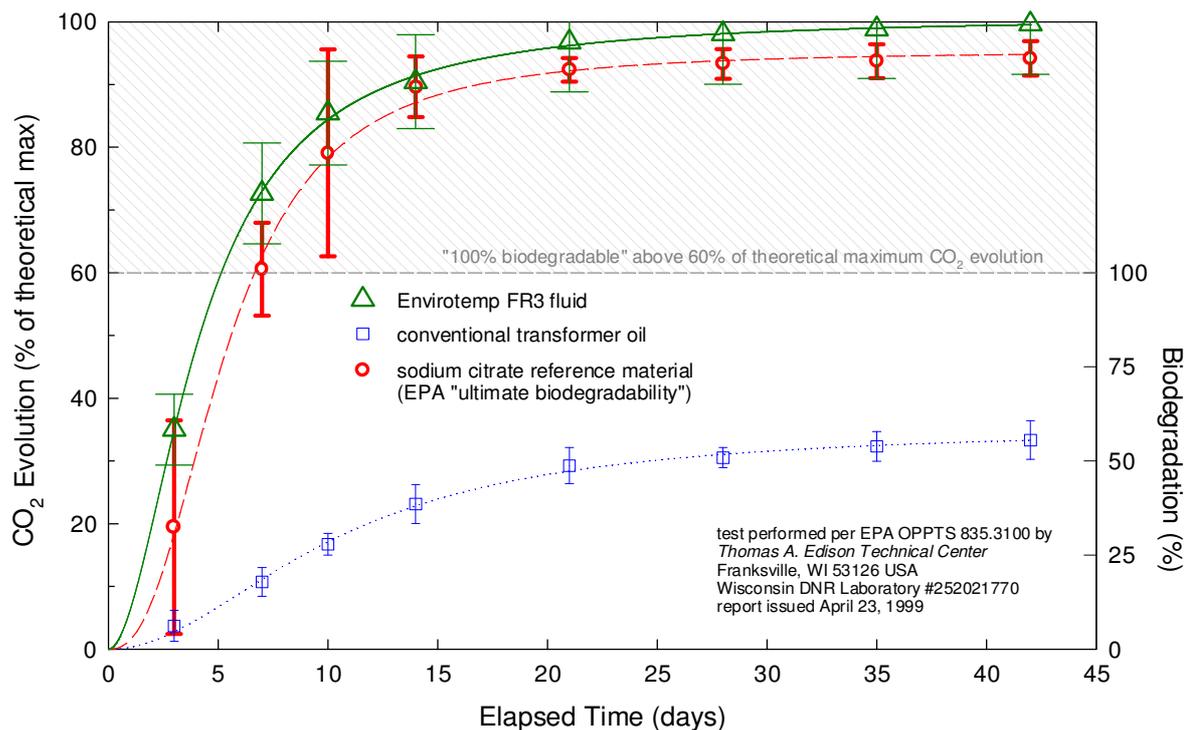


FIGURA 5 – Gráfico da biodegradação

Como se pode observar através do gráfico da biodegradação do FR3, este é totalmente biodegradável em cerca de 5 dias, já o óleo mineral ao fim de 40 dias atinge o seu nível de biodegradação máxima que é da ordem dos 55%.

5.1.2 COMPORTAMENTO EM CASO DE INCÊNDIO

O FR3 é certificado como óleo refrigerante dielétrico resistente ao fogo, sendo que não há relato de incêndios ou explosões envolvendo transformadores imersos em FR3. A probabilidade de um incêndio envolvendo FR3 é tão baixa, que não exige a determinação de libertação de calor, nem requisitos para a instalação do FR3. Com isto pode-se afirmar que estes transformadores imersos em FR3 protegem as pessoas e os edifícios nas zonas que circundam o transformador. O gráfico abaixo mostra os pontos de combustão de alguns materiais dielétricos comparativamente, e descreve o citado acima.

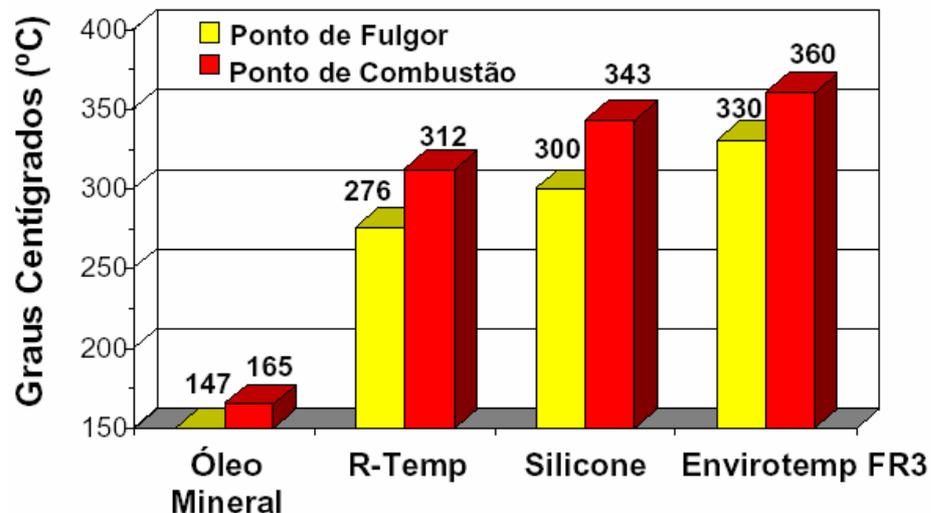


FIGURA 6 – Pontos de fulgor e combustão

5.1.3 COMPORTAMENTO EM CASO DE DERRAME DE ÓLEO

Em caso de derrame do óleo FR3, este transforma-se essencialmente em CO₂ e H₂O, dependendo da temperatura e disponibilidade do oxigênio. Como foi referido este óleo é não tóxico para os animais e foi desenvolvido para minimizar riscos de saúde e ambientais. A taxa de biodegradação é tão boa quanto o material de referência da norma.

A viscosidade um pouco maior do que o óleo mineral, combinado com a sua habilidade de polimerização, quando camadas finas são expostas ao fluxo de ar quente, ajudam a prevenir a migração do líquido da superfície para o solo.

O óleo Envirottemp FR3 é candidato a “Produto Ambientalmente Preferido”, dado que contém perigo nulo para a saúde quanto à reatividade, e negativo para efeitos cancerígenos.

5.1.4 VIDA ÚTIL DO PAPEL ISOLANTE

O óleo FR3 tem uma viscosidade próxima da do óleo mineral, no entanto um pouco maior, fator a ter em consideração em instalações com temperaturas ambientes muito baixas.

O FR3 tem melhor rigidez dielétrica em aplicações novas e existentes e ainda uma excelente estabilidade química ao longo do tempo. A sua exclusiva estrutura química proporciona excelentes características de desempenho, bem como grande capacidade de extrair umidade retida e absorver água libertada pelo envelhecimento do papel. Tem a capacidade de prevenir as moléculas do papel de se desfazerem quando expostas ao calor. Todos estes atributos minimizam a taxa de envelhecimento do papel, havendo testes que revelam que com FR3 o final de vida do papel leva 5 a 8 vezes mais tempo até ser alcançado relativamente ao envelhecimento com óleo mineral. Esses resultados podem ser observados na Figura abaixo, que mostra amostras de papel envelhecidas a 170° C durante certos períodos, e também nos gráficos seguintes:

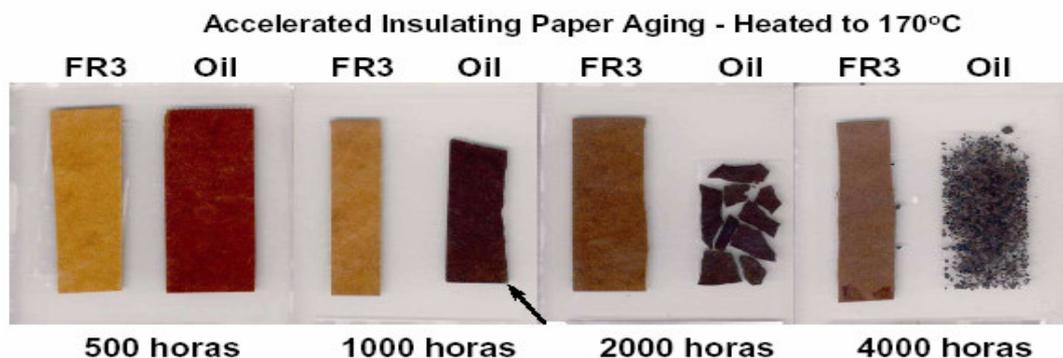


FIGURA 7 – Amostras envelhecidas

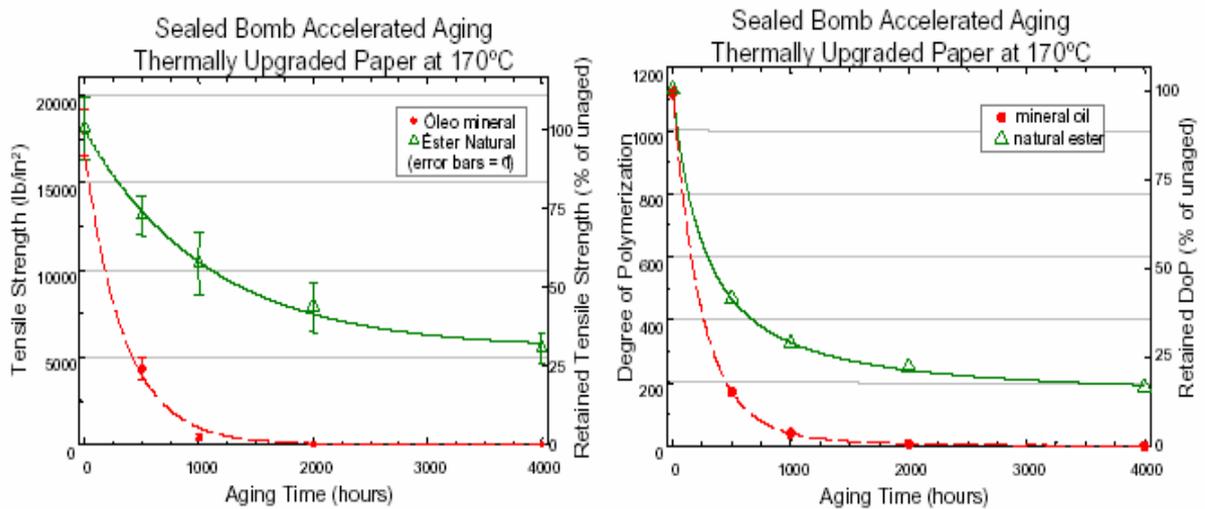


FIGURA 8 – Gráfico envelhecimento x período

5.1.5 GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO ISOLANTE

O óleo vegetal tem muitas vantagens sobre líquidos isolantes existentes em relação à absorção de gás e evolução de gás sob arco. Ensaios têm confirmado que somente um quarto (25%) do total de gases gerados por líquidos derivados de petróleo são produzidos pelo óleo vegetal quando submetido à arco.

Adicionalmente, os gases produzidos não contêm muitos dos hidrocarbonos poliaromáticos associados aos líquidos derivados de petróleo. Quando submetido à arco, o óleo vegetal produz dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogênio e traços detectáveis de que pequenas moléculas de hidrocarbonos, como mostra a análise cromatográfica a seguir:

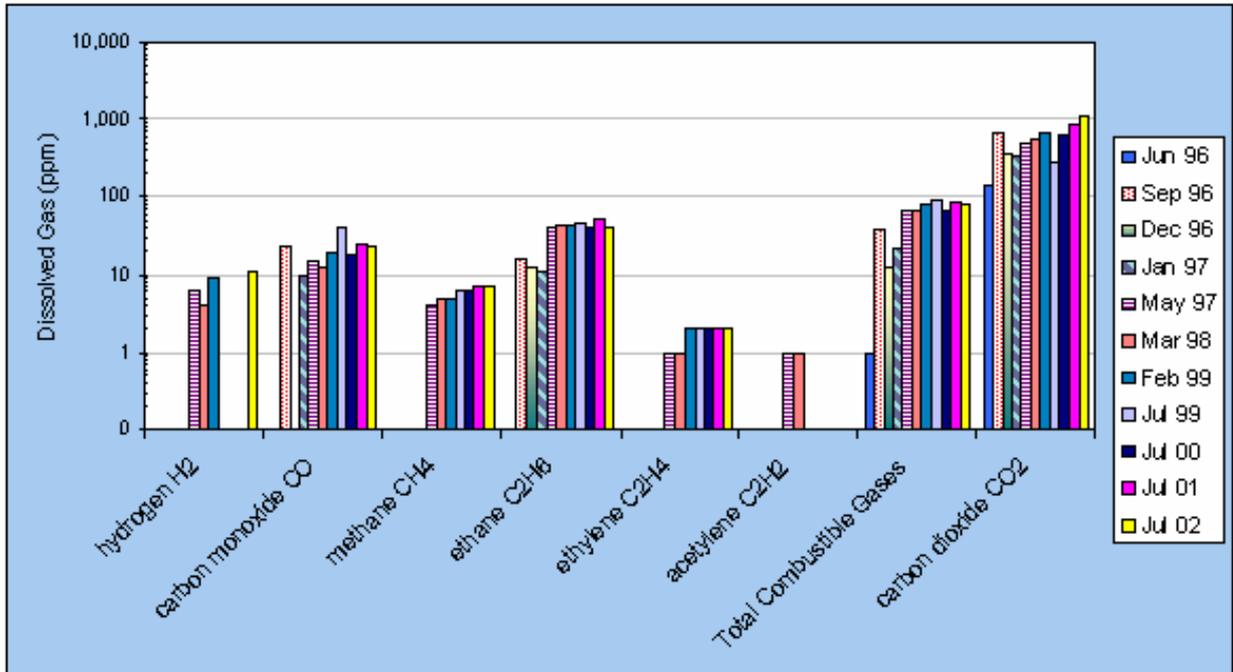


FIGURA 9 - análise cromatográfica

5.1.6 SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL EM TRANSFORMADORES USADOS POR ÓLEO VEGETAL

O óleo vegetal é usado não só em transformadores novos, mas também como óleo de substituição e preenchimento em transformadores usados elevando assim a margem de segurança dos mesmos. Esta operação permite dotar o transformador de novas potencialidades tanto no aspecto ambiental como na segurança contra incêndio. Os óleos vegetais facilitam esta operação dado que são totalmente miscíveis com o óleo mineral, hidrocarbonetos de alto peso molecular e muitos outros substitutos do askarel. O óleo residual que permanece no transformador, não reduz o fire point abaixo do mínimo de 300°C, o suficiente para ser considerado como um líquido resistente ao fogo. Contudo a percentagem de óleo residual, contida no transformador, para satisfazer estas condições deverá ser limitado no máximo aos 7 %, conforme se pode observar no gráfico.

Além destas fundamentais vantagens obtidas com a substituição conseguem-se ainda algumas adicionais tais como:

- Alta rigidez dielétrica
- Excelente lubricidade
- Coeficiente de expansão térmica semelhante ao óleo mineral

E ainda beneficia do fato óleo vegetal atuar como agente de secagem do papel de isolamento, que se tornou úmido devido ao envelhecimento, prolongando-lhe a vida útil. O gráfico abaixo mostra o ponto de combustão de um óleo em relação a percentagem da mistura de óleo mineral e vegetal em um transformador.

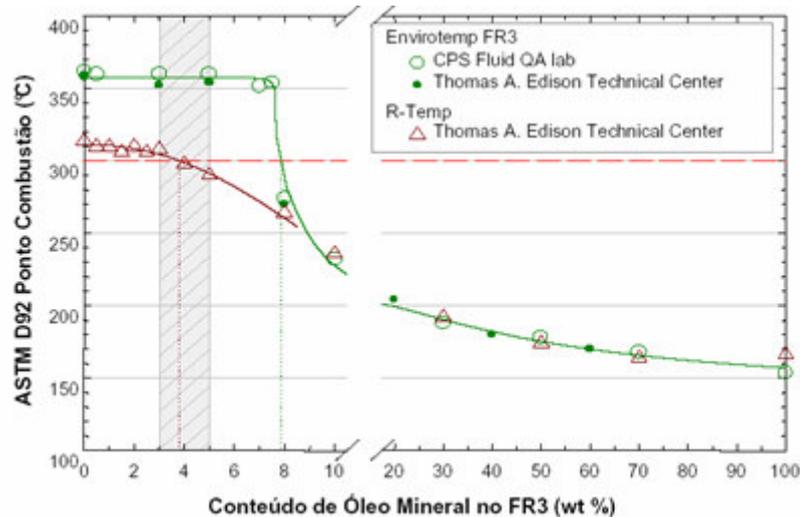


FIGURA 10 – Variação do ponto de combustão

5.2 PRINCIPAIS FABRICANTES E PROJETOS EM ANDAMENTO

Haja vista a importância e atualidade do assunto em torno das energias limpas e renováveis, é natural que as principais empresas do setor estejam antenadas e atuantes neste novo ramo de fabricação de isolamento de transformadores, como mostram as listas a seguir.

5.2.1. PRINCIPAIS FABRICANTES:

- Waukesha Electric Systems
- Areva – Europa / Brasil
- Wilson - Austrália
- Hyundai - Coreia
- Siemens – Europa / Brasil
- WEG/Trafo - Brasil

5.2.2. PROJETOS NO BRASIL:

ITAIPU	COPEL
LIGHT	ELETRONORTE
CELESC	CPFL
AMPLA	CEMIG
CVRD.	

6. CONCLUSÃO

Ao nível dos transformadores imersos, a semelhança de muitas das características físicas e químicas dos diferentes dielétricos, conduz a projetos praticamente iguais para os diferentes tipos em causa. Por vezes, a utilização de um ou outro dielétrico pode resultar em soluções tecnicamente um pouco diferentes, uma vez que a grande disparidade de custo entre eles pode fazer variar ligeiramente as características da própria parte ativa da máquina.

Ao nível da cuba de arrefecimento, encontram-se certamente pequenas diferenças que resultam principalmente de diferenças de viscosidade, densidade e coeficiente de dilatação térmica. Os transformadores imersos em óleos vegetais têm atualmente, alguma dificuldade em competir diretamente com os transformadores imersos em óleo mineral, isto porque o incremento de custo é da ordem dos 25 a 30%, no entanto se acrescentarmos os benefícios ambientais, e de segurança contra incêndio a diferença é menor.

Outro ponto que começa a beneficiar os óleos vegetais é o atual aumento do custo do petróleo bem como o aumento da produção de óleos vegetais contribuindo ambos para uma maior competitividade do transformador imerso em ÓLEO VEGETAL.

Dessa maneira, resta-nos aguardar e manter-se atualizados, observando atentamente as manobras de mercado, de modo que possamos acompanhar essa grande mudança tecnológica no setor de distribuição de energia.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) **MENDES**, José Carlos. *Aplicação de 100% de Óleo Vegetal em Transformadores de 145 Kv. Caso CEMIG – ABB BIOTEMP*.
- 2) Catálogo ABB (Asea Brown Boveri) **BIOTEMP®** , Fluido Isolante Dielétrico Biodegradável.
- 3) **OLIVEIRA**, Afonso. *Dielétricos Usados em Transformadores de Distribuição*. Apresentação FEUP, 2005.
- 4) **MARTINS**, Marcelo Neves. *Fluido Dielétrico a Base de Estér Natural*. Cooper Power Systems.
- 5) **PAIXÃO**, Luis Augusto. *Avaliação da Qualidade do Óleo Isolante em Transformadores*. Dissertação UFPR 2006.
- 7) **OLIVEIRA**, Afonso. *Utilização de Óleos Biodegradáveis em Transformadores de Distribuição*. Monografia FEUP / EFACEC 2005.
- 8) **BATISTA**, Douglas Antônio. *Desenvolvimento de Metodologia para Dosagem de Compostos em Óleo Mineral Isolante*. Dissertação UFPR 2005.

ÓLEO VEGETAL COMO FLUIDO ISOLANTE PARA TRANSFORMADORES

Lincon Pieter Bavaresco

1. INTRODUÇÃO

Estudos referentes a novas alternativas de fluido isolante de transformadores e reatores que minimizem os riscos de incêndio e explosão bem como contaminação ambiental são apresentados como preocupação sobre o desenvolvimento sustentável e de modo a assegurar a integridade de pessoas e equipamentos.

Alguns exemplos de recentes aplicações de óleo vegetal em tal finalidade com satisfatório desempenho são anexados para ilustração. São apresentadas ainda, comparações de cunho químico, térmico e de impacto ambiental entre óleo vegetal e mineral para conferir as vantagens dessa fonte alternativa de fluido isolante para transformadores.

2. ORIGEM DA PREOCUPAÇÃO

O efeito estufa tem sido a causa de constantes mudanças climáticas e isto tem provocado inquietações em toda população mundial. Através deste efeito - que também é conhecido como aquecimento global - originam-se sérios danos sócio-ambientais, tais como o degelo nos círculos polares, avalanches, enchentes, maremotos, estiagens e secas, além de alterações na vida marinha como consequência do aquecimento das águas profundas e também mudanças no regime de correntes oceânicas.

A exploração de petróleo, seguido do processo de refino é uma das atividades que provocam um dos maiores índices de emissão de CO₂, um dos gases de efeito estufa, considerado o principal causador do aquecimento global. O protocolo de Quioto, concebido durante o fórum ambiental Rio-92 e confirmado desde então por mais de 93 países vem tentando mobilizar a comunidade internacional a uma ação conjunta que promova a estabilização da concentração atmosférica dos gases causadores do efeito estufa e limite a interferência antropogênica sobre o sistema climático global.

A maior parte de toda energia consumida no mundo moderno é proveniente de fontes derivadas de petróleo, sendo o óleo mineral isolante, usado em equipamentos elétricos, uma de suas importantes frações. No entanto, a disponibilidade deste produto no mercado mundial é finita e a dependência excessiva em sua oferta traz sérios problemas sócio-econômicos e ambientais. Portanto, para a implantação do protocolo de Quioto, a criação e a manutenção de projetos voltados à investigação de fontes alternativas de energia são de vital importância para as economias que se encontram em desenvolvimento, sempre visando à substituição total ou parcial da energia de natureza não renovável.

3. HISTÓRICO

O primeiro fluido refrigerante e isolante utilizado em transformadores na época da sua invenção foi o óleo vegetal, porém por problemas de viscosidade e oxidação neste fluido, foi substituído pelo óleo mineral, que atendia satisfatoriamente as principais necessidades técnicas deste novo equipamento assim na década de 30, iniciou-se a comercialização do Ascarel - bifenila policlorada (PCB). O Ascarel é um produto tecnicamente chamado de Alocloro 124, é um óleo resultante da mistura de hidrocarbonetos, derivados de petróleo, utilizado como isolante em equipamentos elétricos, sobretudo transformadores. A instalação de novos aparelhos que utilizem Ascarel foi proibida no Brasil em 1981, mas ainda existem muitos equipamentos abandonados contendo este produto em subestações de trens e em edifícios industriais. O maior risco é o vazamento e contaminação, quando do desmonte desses equipamentos para venda como sucata. Os impactos ambientais que pode causar são a contaminação tanto do solo como da água, ameaçando, em especial, os lençóis freáticos. Os riscos à saúde são grandes: é considerado carcinogênico, afetando, sobretudo fígado, baço e rins. Pode causar danos irreversíveis ao sistema nervoso central.

Então, a partir de 1980, são introduzidos os ésteres sintéticos (POEs) como substitutos do Ascarel. Já nos anos 90, iniciam-se as pesquisas com ésteres naturais que após testes de Vida Acelerada, são implantados em mais de 100 protótipos para prova de campo.

Em 2002 a EPA – Environmental Protection Agency – a agência de proteção ambiental dos EUA, emite programa de Verificação de Tecnologia Ambiental. No

ano seguinte, a ASTM - sigla para American Society for Testing and Materials, órgão americano de normatização de vários materiais, produtos, sistemas e serviços – emite norma de especificação D6871-3 que padroniza especificações para o éster natural (óleo vegetal) usado como em aparelhos elétricos.

No ano de 2005 tem início a produção no Brasil e os primeiros transformadores de 230kV são lançados, novos e reenchidos. Em junho do ano seguinte, a ABNT lança o projeto 03:010.02-027 para óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos.

A Figura abaixo sugere uma régua do tempo para o histórico do óleo vegetal no mundo.

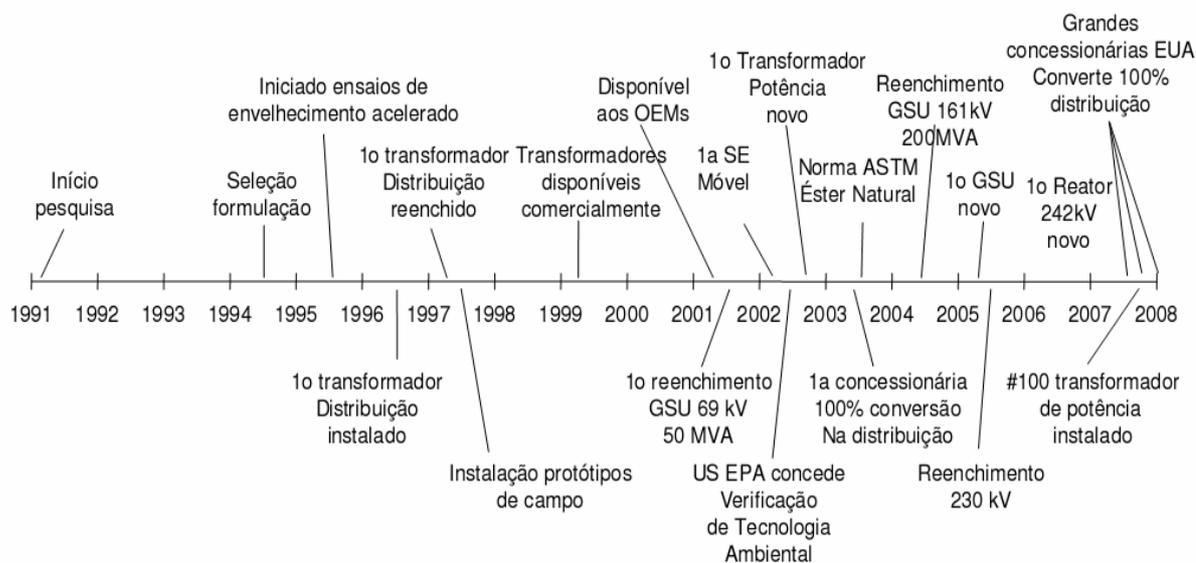


FIGURA 1 – Histórico do óleo vegetal

4. MOTIVAÇÃO

Bilhões de litros de óleo para transformador são utilizados no mundo todo. Há transformadores de todos os tamanhos; grandes, médios e pequenos. Cada grande transformador de potência utiliza aproximadamente quarenta mil litros por fase, em um pequeno transformador de distribuição, aproximadamente oitenta litros. As unidades menores são mais numerosas que as unidades maiores porque a distribuição é mais espalhada por definição, e, portanto elas carregam no total muito mais líquido que as unidades maiores.

Para fins ilustrativos, consideremos as proporções do estado do Paraná. A COPEL - (Companhia Paranaense de Energia) possui atualmente instalado em sua área de concessão 763 transformadores de potência em subestações e 315 mil transformadores de distribuição na rede pública. Estes transformadores, acrescidos de disjuntores e reguladores de tensão possuem óleo mineral isolante em seu interior, cujo volume total ultrapassa 25 milhões de litros. Para manufaturar esta quantidade de óleo isolante, são necessários 138.888.890 (Cento e trinta e oito milhões, oitocentos e oitenta e oito mil, oitocentos e noventa) litros de petróleo, totalizando 873.515 (Oitocentos e setenta e três mil quinhentos e quinze) barris deste recurso não renovável de origem fóssil. Tendo em vista os fatores ambientais apontados anteriormente e o volume exorbitante de óleo mineral em uso no setor elétrico nacional e, sendo o fluído mineral classificado como tóxico (classe I) e não biodegradável, segundo a NBR 10004; é que se iniciou esse estudo que demonstrasse tanto técnica como economicamente a viabilidade de aplicação de fluído vegetal como substituto do óleo mineral isolante, derivado de petróleo.

Algumas fontes para extração de óleo vegetal com potencial para ser utilizado na produção de óleo dielétrico isolante, são: baga de mamona, semente de girassol, grão de amendoim, semente de canola, semente de linhaça, semente de algodão e semente de soja.

5. PRODUTO COMERCIALIZÁVEL

Alguns óleos vegetais isolantes comercialmente disponíveis no Brasil:

- ENVIROTEMP FR3TM – Comercializado pela COOPER POWER SYSTEMS e produzido pela CARGIL. Tem na soja sua fonte de matéria-prima;
- BIOTEMP – Comercializado pela ABB Ltda., tem como base o óleo de girassol;
- BIOVOLT A e BIOVOLT B – Comercializados pela MINERALTEC e tem como base, respectivamente, o milho e a soja.



FIGURA 2 – Ilustração

6. CONSIDERAÇÕES QUÍMICAS

6.1. Óleo Mineral e Óleo Vegetal isolante: Fluidos quimicamente distintos

O óleo mineral é um derivado do petróleo – um hidrocarboneto – portanto. Abaixo, uma representação de sua estrutura química.

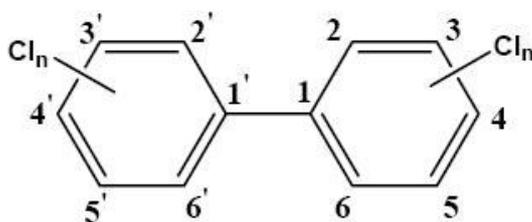


FIGURA 3 – Estrutura de hidrocarbonetos

O óleo vegetal é um éster, extraído de plantas oleaginosas – a soja, por exemplo. Abaixo um componente majoritário do óleo vegetal.

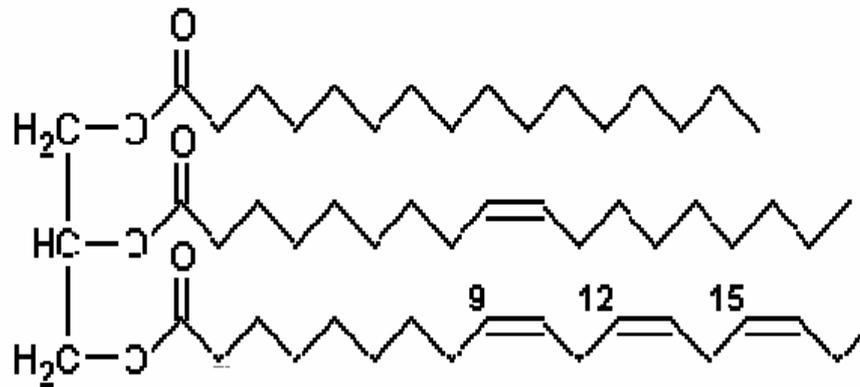


FIGURA 4 - representação de um triacilglicerídeo

A Tabela a seguir sugere uma comparação entre uma marca de óleo vegetal e outros fluidos isolantes:

PROPRIEDADES		BIOTEMP®	ÓLEO MINERAL	H.T.H	SILICONE
Rigidez Dielétrica, kV (ASTM D877)		45	30	40	43
Viscosidade, cSt	100°C	10	3	11.5	16
	40°C	45	12	110	38
	0°C	300	76	2200	90
Ponto Fulgor °C (ASTM D92)		330	145	285	300
Ponto Combustão °C (ASTM D92)		360	160	308	330
Calor Específico (cal/gr°C) (ASTM D2766)		0.47	0.43	0.45	0.36
Coeficiente de Dilatação, °C (ASTM D1903)		6.88×10^{-4}	7.55×10^{-4}	7.3×10^{-4}	1.04×10^{-3}
Ponto de Fluidez °C (ASTM D97)		-15 a -25	-40	-24	-55
Peso Específico (ASTM D1298)		0.91	0.91	0.87	0.96
Cor (ASTM D1500)		<0.5	0.5	0.5 - 2.0	<0.5
Taxa de Biodegradabilidade % 21 - dias CEC - L - 33		97.0	25.2	27.1	0

FIGURA 5 - Comparação

Das propriedades listadas na Tabela, é interessante destacar a grande diferença entre os pontos de fulgor do óleo mineral e o óleo vegetal BIOTEMP. Ponto de fulgor ou ponto de inflamação é a menor temperatura na qual um líquido libera vapor ou gás em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável. Por mistura inflamável, para fins de apuração do ponto de fulgor, entenda-se a quantidade de gás ou vapor misturada com o ar atmosférico suficiente para iniciar uma inflamação em contato com uma chama (isto é, a queima abrupta do gás ou

vapor), sem que haja a combustão do líquido emitente. Outro detalhe verificado é que, ao se retirar a chama, acaba a inflamação (queima) da mistura. Trata-se de um dado importante para a classificação dos produtos combustíveis, em especial no que tange à segurança e aos riscos de transporte, armazenamento e manuseio.

Essa propriedade é merecedora de destaque, pois, com ponto de fulgor mais elevado, o risco de incêndio ou explosão do óleo fica reduzido significativamente, aumentando a segurança e a confiabilidade dos equipamentos elétricos instalados nos interiores de edificações ou próximos a grandes centros comerciais ou residenciais, diminuindo a ocorrência de acidentes dessa natureza. Essa propriedade possibilita ainda a dispensa do uso de paredes corta-fogo entre transformadores de subestações, por exemplo.

O gráfico a seguir mostra um comparativo entre uma marca de óleo vegetal e outros fluidos isolantes:

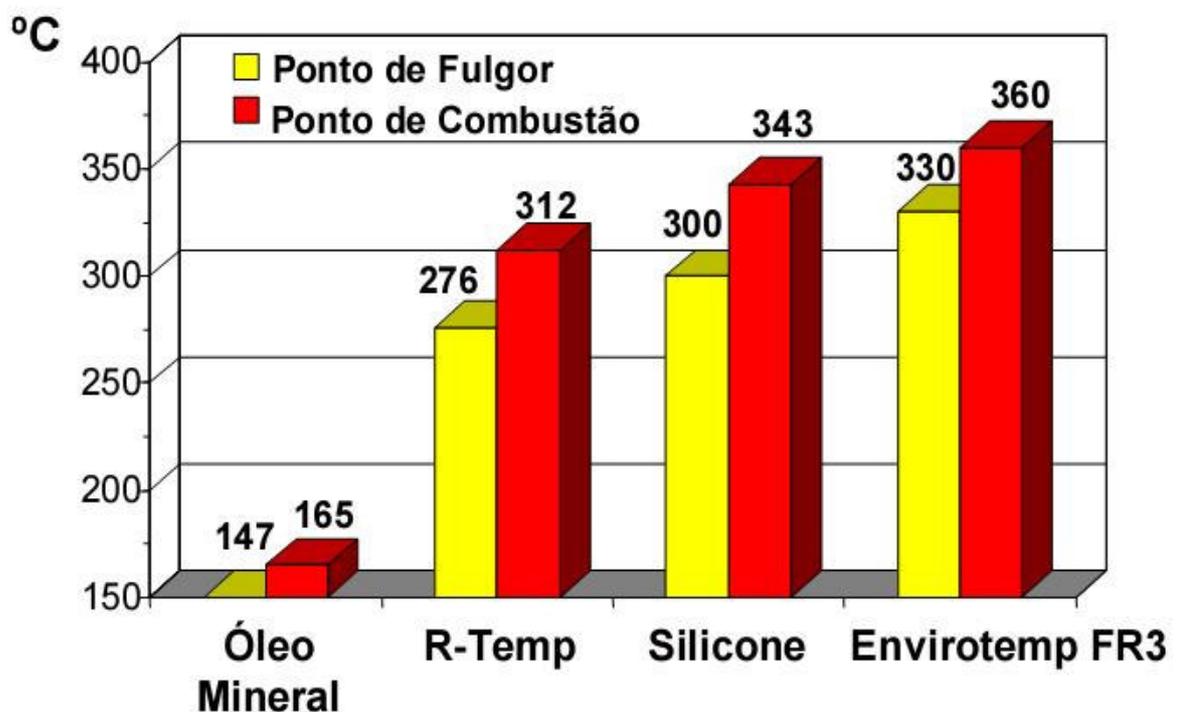


FIGURA 6- Diagrama temp. x fluidos isolantes

De maneira geral, outras propriedades de importante destaque podem ser citadas:

- Fonte de óleo mineral é limitada e não-renovável;
- Razões ambientais como legislação controladora de emissão de gás de efeito-estufa (emissão de CO₂ pelo óleo mineral);

- Esforços locais/regionais para aplicação de combustíveis de fontes renováveis;
- Substituir consumo de óleo mineral importado por razões econômicas;
- Risco à saúde humana exposta a hidrocarbonetos poli-aromáticos;
- Comitês de NORMAS locais e internacionais emitiram ou estão em fase de preparação de NORMAS relativas à especificação e/ou guias de aplicação e/ou guias de manutenção de óleo vegetal.

6.2. Adição de valor para Concessionárias:

- Elevar a confiabilidade e otimizar o fornecimento de energia elétrica aos consumidores através de maior capacidade de carregamento e extensão da vida útil;
- Aplicação de óleo isolante de fonte renovável;
- Segurança e otimização das instalações;
- Biodegradabilidade e segurança ambiental;

6.3. Benefícios para Clientes:

- Alta confiabilidade do transformador;
- Alta disponibilidade do transformador devido à reduzida manutenção;
- Redução dos custos de instalações;
- Futura simplificação e otimização dos arranjos de subestações e do espaço utilizado por elas;
- Extensão da vida útil do transformador;

Segundo estudo realizado pelo Lactec – Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento que apresentou alguns resultados de pesquisas recentes sobre os efeitos de óleos vegetais isolantes (aqui chamado de OVI) para transformadores, verificou-se que não houve falhas nos ensaios em equipamentos projetados especificamente para OVI, entretanto, quando da simples substituição do óleo mineral isolante por OVI em equipamentos originalmente projetados para OMI, os resultados não foram totalmente satisfatórios exigindo, para o uso na prática, a aprovação do projetista do transformador.

7. QUESTÃO AMBIENTAL

7.1. Créditos de Carbono

A produção da maioria das matérias primas gera dióxido de carbono, aço, cobre, óleo mineral, etc. A produção de óleo de soja tem geração de carbono negativa mesmo após fertilização e transporte, pois plantas de soja consomem CO_2 , expelindo O_2 .

Por ser biodegradável, o óleo vegetal não prejudica o meio ambiente em caso de vazamento dos transformadores, por exemplo, o que possibilita inclusive a dispensa do uso das caixas de retenção de óleo na base de cada transformador. Entretanto, para transformadores próximos a rios, o reporte de vazamento ainda é necessário mesmo que a limpeza e remediação sejam muito mais fáceis.

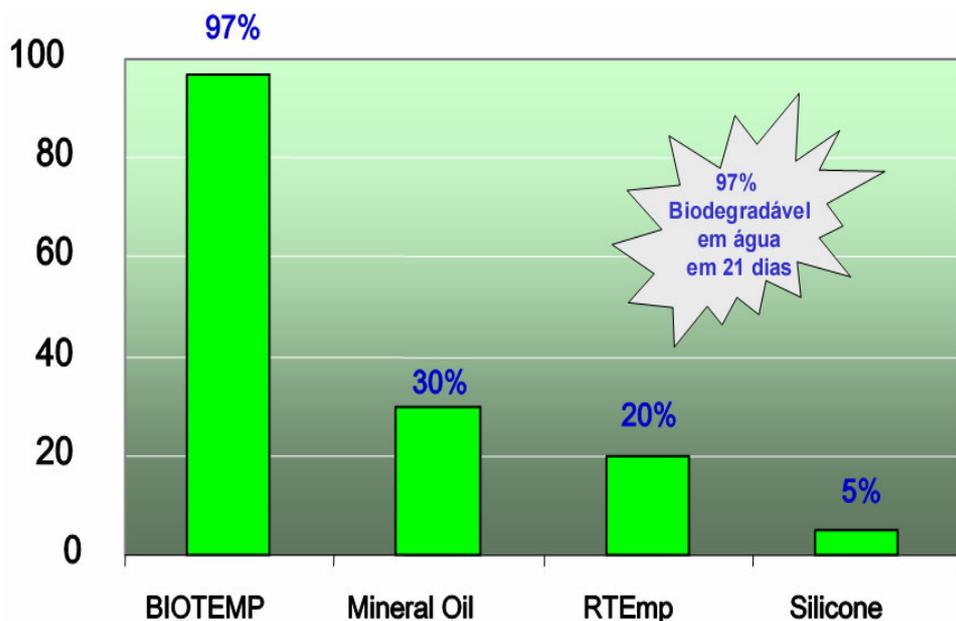


FIGURA 7 – Comparativo entre fluidos isolantes quanto a biodegradabilidade

8. CONCLUSÃO

Devido às grandes vantagens, tanto econômicas, ambientais e de segurança, é que o óleo vegetal pode substituir o óleo mineral na isolação de equipamentos elétricos. Apesar de ser ainda recente e necessitar de aperfeiçoamentos, esse

produto trará muitos benefícios principalmente em tempos onde a busca pelo desenvolvimento sustentável é prioridade.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Disponível em:

- 1) http://www.funcoge.com/premio/html/body_copel.html
- 2) <http://www.arteblog.net/oleo-mineral-composicao especificacoes/>
- 3) <http://www.aenoticias.pr.gov.br/modules/news/article.php?storyid=2469>
- 4) http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponto_de_fulgor
- 5) www.abb.com.br
- 6) <http://www.epa.gov/>
- 7) <http://webstore.ansi.org/RecordDetail.aspx?sku=ASTM+D6871-03>
- 8) <http://www.cooperpower.com/products/dielectric/envirottempFR3/>
- 9) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Óleo Vegetal Isolante para Equipamentos Elétricos. NBR15422. Brasil.

Acessos por volta de 07 de Julho de 2008.

ANEXOS

ANEXO A - Mudança de óleo mineral para vegetal rende prêmios ambientais à Copel.

Editoria Copel, 29/11/2006

O uso de óleo vegetal como fluido isolante em equipamentos e transformadores elétricos, substituindo o potencialmente poluente óleo mineral, derivado de petróleo, rendeu dois importantes destaques ambientais para a Copel em 2006.

Um, de âmbito nacional, foi concedido pela Fundação Coge, entidade que se dedica ao estudo e aprimoramento dos métodos de gestão das empresas brasileiras de energia. Ao selecionar os melhores projetos desenvolvidos na categoria Ações Ambientais, o Coge considerou a iniciativa da Copel como uma das três melhores do país.

O outro, o Prêmio Expressão de Ecologia, é conferido pela revista Expressão, sediada em Florianópolis: de âmbito regional, a iniciativa indica os projetos ambientais mais relevantes desenvolvidos nos três estados do Sul durante o ano e premia os 28 melhores, em diversas categorias. A Copel foi a vencedora na categoria “Produto Verde”.

Refrigeração – O óleo isolante é usado em transformadores e outros equipamentos da rede elétrica com a finalidade de refrigerar seus componentes internos. Tradicionalmente, o óleo utilizado é de origem mineral, derivado de petróleo. Por todo o Estado, a Copel tem atualmente em operação mais de 750 transformadores de potência instalados em subestações e cerca de 315 mil transformadores nas redes de distribuição de energia. Considerando-se mais alguns milhares de disjuntores e reguladores de tensão que também usam óleo isolante, os equipamentos da Companhia armazenam algo próximo de 25 milhões de litros desse fluido, potencialmente perigoso para o meio ambiente e não-biodegradável.

Para reduzir o risco de acidentes em que possa haver vazamento de óleo e contaminação do solo ou cursos de água, a Copel vem conduzindo há cerca de dois anos em Cascavel, no Oeste do Paraná, experiências até agora muito bem-

sucedidas, em que o óleo vegetal é utilizado como isolante em substituição ao de origem mineral. A iniciativa coube aos eletrotécnicos Silas Batista Gomes Júnior e Jaqueline de Quadros Prado, e mais ao eletricitista Adair Camacho Calero, lotados na Divisão de Manutenção Eletromecânica da Superintendência Regional de Distribuição Oeste da Copel, co-autores dos trabalhos que foram destacados pela Fundação Coge e pela revista Expressão.

Mais barato – O óleo que está sendo testado em transformadores e em outros equipamentos da rede elétrica da cidade é extraído da soja, mas poderia vir de outra espécie vegetal qualquer, pois a origem não tem relevância decisiva no rendimento ou no desempenho técnico da substância. De diferente dos óleos comestíveis comuns, o da Copel tem alguns aditivos e passou por ensaios de oxidação e envelhecimento acelerado em estufas até atingir o ponto considerado ideal para ser colocado nos transformadores.

Fonte renovável e econômica de energia, o óleo vegetal traz como vantagem estratégica e decisiva sobre o seu similar mineral o fato de ser biodegradável e, por não ser tóxico, dispensar cuidados especiais no armazenamento, transporte e manipulação, conferindo mais segurança ao meio ambiente e às pessoas que têm contato diretamente com ele. Não bastasse isso, o óleo vegetal é mais barato e é mais resistente ao calor: o seu ponto de combustão, em torno de 300 graus centígrados, é cerca de duas vezes mais elevado que o do óleo isolante mineral (entre 150 e 160 graus), conferindo maior proteção ao equipamento contra o risco de incêndios por superaquecimento.

O uso do óleo vegetal na refrigeração de transformadores e outros equipamentos não é propriamente novidade na Copel. A rede de distribuição subterrânea construída no centro de Foz do Iguaçu, por exemplo, inaugurada em junho passado, foi a primeira do gênero no Brasil a utilizar a tecnologia. Operam sob o movimento da Avenida Brasil, confinados em câmaras especiais, 18 transformadores de grande porte com potência de 500 kVA (quilovolts-ampères) cada, conectados na tensão de 13,8 mil volts.

ANEXO B - Transformadores verdes utilizam óleo vegetal.

Minas Gerais. Quinta-Feira, 17 de maio de 2007.

Considerada uma fonte limpa, a energia hidrelétrica ainda utiliza óleo de origem mineral em seus equipamentos ao longo das redes de transmissão e distribuição para que possa chegar até seu consumidor final. No entanto, a Companhia Energética de Minas Gerais - Cemig, com um parque hidrelétrico de mais de 6 mil megawatts e mais de seis milhões de clientes, começa a tornar realidade a criação de uma fonte de energia 100% limpa para um grande número de consumidores, graças ao desenvolvimento e a entrada em operação do primeiro transformador do mundo que funciona totalmente a óleo vegetal. "O desafio, agora, é a criação de uma subestação verde, uma unidade ecologicamente correta, sem a utilização de nenhum equipamento que possa provocar impactos ao meio ambiente", diz o superintendente de Operação e Manutenção da área de distribuição da Cemig, José Aloise Ragone Filho.

Desde agosto passado, o primeiro transformador 100% a óleo vegetal está em operação em uma subestação de Contagem, na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Esse transformador é responsável para que a energia, transmitida ao longo das linhas de alta tensão que saem das usinas, possa chegar a 37,2 mil consumidores de baixa e média tensão, localizados no município. Entre os clientes, estão a Prefeitura local, indústrias de componentes eletrônicos, como a SID, a GE e a Toshiba, e um hospital.

Ragone explica que as duas principais funções do óleo são resfriar e isolar os condutores de energia do transformador, ficando acondicionado, na maior parte, em um tanque no qual se localiza o núcleo do transformador. No entanto, o transformador desenvolvido pela Cemig em parceria com o fabricante de equipamentos eletroeletrônicos ABB, utiliza o óleo vegetal também para as buchas de alta tensão, que isolam externamente os controladores de energização do aparelho, assim como os cabos de entrada da energia, com tensão elevada. O mesmo óleo vegetal isolante é utilizado na chave comutadora, responsável pela regulação dos níveis de tensão entregue pelo equipamento aos consumidores.

Com os resultados satisfatórios da operação do primeiro transformador, mais dois equipamentos estão prontos para serem implantados, nos próximos meses,

possibilitando que a experiência com a operação dos novos equipamentos possa ser disseminada para outras áreas de atuação da empresa, como o Triângulo Mineiro e o Leste do estado. Nos próximos meses, será dado mais um passo importante na direção da subestação verde, com a entrega da primeira subestação móvel que funcionará com óleo vegetal. Essa subestação servirá para realizar manutenções em localidades afastadas do Estado, quando for necessário fazer o desligamento de subestações fixas, reduzindo os riscos de acidentes ambientais durante seu transporte.

Segundo Ragone, a principal vantagem do óleo vegetal para a natureza é ser 100% biodegradável, sendo 97% do seu conteúdo biodegradável em 21 dias, enquanto no caso do óleo mineral, esse percentual é de apenas 25% no mesmo período. Para os empregados, o óleo vegetal é mais amigável, por sua característica de atoxicidade, o que se traduz, na prática, em menor risco de acidentes no seu manuseio e armazenamento. E, para a empresa, a substituição do óleo mineral pelo vegetal, menos corrosivo, deve aumentar a vida útil do equipamento, significando uma economia de recursos em médio prazo. A combinação do óleo vegetal com a avançada tecnologia de materiais isolantes proporciona a esse transformador, que inicialmente foi projetado para 25 MVA em 138 kV, seja sobrecarregado até 43 MVA, durante quatro horas consecutivas, sem perda de vida útil. Isto corresponde a uma reserva de potência de 70%, o que pode diminuir a necessidade de mobilização de outros equipamentos nos períodos de pico no consumo, aumentar a confiabilidade no fornecimento de energia e, conseqüentemente, reduzir o número de interrupções para os consumidores na outra ponta da linha.

ANEXO C - ABB e CEMIG desenvolvem transformador 100% a óleo vegetal.

Jornal O Debate, Minas Gerais. 30 de Junho de 2008

A ABB, líder em tecnologias de potência e automação, acaba de lançar o primeiro transformador de 145 kV do mundo totalmente isolado com óleo vegetal BIOTEMP. Esse projeto foi desenvolvido através da cooperação tecnológica entre a ABB e a CEMIG.

Devido as características especiais do projeto, combinadas ao BIOTEMP e à tecnologia de materiais isolantes NOMEX da DuPont, o transformador da CEMIG, que inicialmente foi projetado para 25 MVA em 145kV, poderá ser sobrecarregado até 43 MVA, durante seis horas consecutivas, sem perda de vida útil, correspondendo a uma reserva de potência de 70% e aumentando a confiabilidade do fornecimento de energia. "A CEMIG tem a preocupação constante de disponibilizar energia segura, especialmente nos chamados horários de ponta, e sem agressão ao meio ambiente. Esse projeto com a ABB permitirá atingir esse objetivo e maximizar as potências instaladas em nossas subestações", explica o engenheiro Álvaro Jorge A L. Martins, da CEMIG.

Além dos ganhos operacionais para as unidades transformadoras de energia, o BIOTEMP traz um grande benefício ao meio ambiente: Por ser um produto agrícola natural e renovável, o BIOTEMP da ABB é biodegradável e ajuda a preservar o meio ambiente. "Com esse projeto nós estamos dando um passo muito importante para o fornecimento de uma energia limpa e voltada para a responsabilidade social e o desenvolvimento sustentável do Brasil", declara Alex Reis, da ABB.

O óleo isolante é usado para resfriar e isolar os transformadores de alta tensão. Os produtos existentes no mercado atualmente são produzidos a partir do petróleo, uma matéria prima poluente e não renovável. O BIOTEMP é uma revolução verde em líquido isolante. O produto tem características e propriedade únicas, com estabilidade à oxidação superior a qualquer outro óleo isolante vegetal. O BIOTEMP não é tóxico e garante um carregamento seguro, o aumento da vida útil do transformador, maior segurança na utilização e redução dos riscos de incêndio em sua utilização em subestações elétricas.

ANEXO D - Centro de Foz do Iguaçu ganha rede subterrânea.

Copel usa pioneiramente no Brasil transformadores isolados com óleo vegetal.

O presidente da Copel, Rubens Ghilardi inaugurou na manhã desta segunda-feira (26 de junho), em Foz do Iguaçu, a rede subterrânea de distribuição de energia elétrica construída num trecho de 1,5 km da Avenida Brasil, principal via do centro comercial e financeiro daquela cidade.

A obra, iniciada há dois anos, exigiu investimentos de aproximadamente R\$ 8 milhões e integra o projeto de revitalização da avenida, em execução pelo Governo do Estado. Nela estão sendo usados pioneiramente no Brasil transformadores que empregam óleo vegetal como isolante elétrico, material biodegradável e menos agressivo ao meio ambiente, em caso de acidentes com vazamento, que o óleo mineral tradicionalmente utilizado.

Com a conclusão das obras, Foz do Iguaçu torna-se a terceira cidade paranaense a contar com um trecho subterrâneo no seu sistema de distribuição de energia elétrica. As outras são Curitiba, em toda a área central, e o setor histórico da cidade da Lapa.

Consumidores - A rede elétrica subterrânea beneficia diretamente cerca de 650 consumidores ligados no trecho em que foi construída – entre as avenidas República Argentina e Jorge Schimmelpfeng. Nessa área há usuários de porte considerável, como grandes edifícios e galerias, hotéis, bancos e lojas, que passam a ser atendidos por um sistema que utiliza a mais moderna tecnologia e que é praticamente imune a desligamentos provocados, por exemplo, pelas intempéries (raios e ventos) ou acidentes de trânsito com abalroamento de postes. O sistema foi dimensionado de forma a atender sem problema ao crescimento do consumo na região pelos próximos 20 anos, pelo menos.

Em termos de urbanização, a construção da rede subterrânea está permitindo retirar 123 123 postes, 3 mil metros de cabos da rede de alta tensão, 3,6 mil metros de fiação de baixa tensão e 30 transformadores da antiga rede aérea. No lugar, a Copel construiu sob a terra 18 câmaras para transformadores, 240 caixas de passagem e 40 km de dutos, onde foram instalados – além dos transformadores – 31 interruptores submersíveis de 15 mil volts, 5 chaves submersíveis de manobra,

4,1 mil metros de cabos da rede primária de alta tensão e 6 mil metros de condutores de baixa tensão.

“Além do visual mais limpo, a circulação de pessoas pela Avenida Brasil fica facilitada com a retirada dos postes das calçadas”, observa o diretor de distribuição da Copel, Ronald Ravedutti, que também participou da inauguração do sistema.

Pioneirismo - O projeto da rede subterrânea de distribuição de eletricidade na Avenida Brasil em Foz do Iguaçu incorpora algumas inovações técnicas que estão sendo introduzidas pela Copel de forma pioneira no sistema elétrico brasileiro. Uma delas é a adoção de transformadores que usam óleo vegetal como isolante elétrico em lugar do óleo mineral, que é derivado de petróleo e nocivo ao meio ambiente no caso de vazamento. “O óleo vegetal tem diversas vantagens sobre o óleo mineral, que há décadas é usado em equipamentos elétricos”, detalha o diretor de distribuição da Copel. “A principal é o fato de ele ser biodegradável e, assim, mais seguro para as pessoas e para o ambiente, dispensando cuidados especiais na armazenagem, transporte e manipulação”.

O óleo vegetal também é mais barato e tem ponto de combustão mais elevado que o do óleo mineral, praticamente eliminando o risco de explosão ou incêndio no transformador. “A combustão do óleo mineral se dá entre 150 e 160 graus e a do vegetal passa dos 300 graus, permitindo ao transformador funcionar normalmente e com total segurança mesmo em situações críticas”, acrescenta Ronald Ravedutti.

A rede subterrânea da Avenida Brasil tem 18 transformadores desse tipo, com potência individual de 500 kVA (quilovolts-ampères) e operando confinados em câmaras especiais na tensão de 13,8 mil volts.

Outra importante inovação tecnológica adotada pela Copel no projeto é a instalação de um sistema que, em caso de pane ou defeito num dos transformadores, automaticamente transfere e redistribui sua carga entre os demais. Também merece destaque o uso de um sistema automatizado que faz a supervisão de defeitos em cabos e o monitoramento dos transformadores.

DISPOSITIVOS BIMETÁLICOS

Felipe Aguiar Dias

1. INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO

A lâmina bi metálica foi provavelmente inventada no século XVIII por John Harrison, para compensar o erro de relógios, que funcionavam a partir de um pendulo, causado por variações térmicas. A primeira lâmina foi feita de dois metais fixados por rebites. Harrison também descobriu uma técnica de fundir diretamente latão em um substrato de aço. Em 1940 o engenheiro inglês Erick Taylor uso lâminas bimetálica para um mecanismo utilizado na força aérea real, mais tarde Taylor criou a companhia Otter controls, que se baseava na tecnologia bimetal.

1.2 FUNCIONAMENTO

O funcionamento básico deste dispositivo se deve aos diferentes coeficientes de expansão linear dos metais envolvidos. Quando um material é aquecido, sua energia interna aumenta, com isso os átomos podem se movimentar um pouco mais que o usual, ocorrendo a expansão do material. O metal que possui o maior coeficiente de expansão irá se expandir mais do que o outro metal, resultando na curvatura da lâmina para um determinado lado, quando resfriado o metal que possui o maior coeficiente de expansão linear irá se contrair mais do que o outro, com isso o par irá se curvar para o lado oposto ao do primeiro caso.

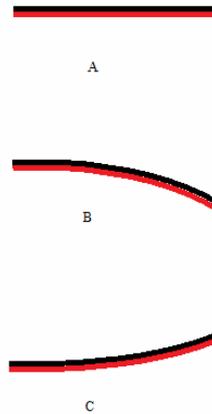


Figura 1- Ilustração do funcionamento do par bi metálico: dois metais, o preto e o vermelho, estão fortemente fixados, o vermelho possui coeficiente de expansão linear maior do que o preto. No caso A os metais estão na temperatura na qual foram fixados, no caso B estão em uma temperatura inferior a qual foram fixados, e no caso C numa temperatura superior.

2. EXPANSÃO TÉRMICA

A maioria dos materiais se expande quando é aquecido, e se contrai quando é submetido a um resfriamento. Essa relação de variação do comprimento devido a uma variação do comprimento é dada por:

$$|f-l_0| = \alpha l (T_f - T_0) \quad (1)$$

Ou por:

$$\Delta l / l_0 = \alpha \Delta T \quad (2)$$

onde l_0 e l_f representam o comprimento inicial e final respectivamente, para uma variação de temperatura de T_0 para T_f , o termo αl é denominado coeficiente linear de expansão térmica, e é uma propriedade do material que representa o grau na qual um material se expande quando é aquecido, esta grandeza possui unidades de inverso da temperatura $1/^\circ\text{C}$. A variação de temperatura afeta todas as dimensões do material, a variação do volume é dada por:

$$\Delta V / V_0 = \alpha_v \Delta T \quad (3)$$

nesta equação ΔV e V_0 são, respectivamente, a variação do volume inicial e o volume inicial e α_v é o coeficiente volumétrico de expansão térmica. Para materiais isotrópicos $\alpha_v \approx 3\alpha$.

De uma perspectiva atômica a expansão térmica é refletida por um aumento da distância entre os átomos. A expansão térmica ocorre devido à assimetria da curva de energia potencial em função da distância interatômica. Quando dois átomos são colocados para interagir surgem forças de um átomo sobre o outro, sendo estas de dois tipos diferentes: atrativas e repulsivas que são ambas funções

da distância entre estes átomos. As forças de atração dependem do tipo específico de ligação que existe entre os dois átomos, a sua magnitude varia com a posição como está mostrado na Figura 2, a repulsão é devido a sobreposição das camadas eletrônicas que geram uma intensa força repulsiva. A força resultante entre os dois átomos é a soma da força repulsiva com a força atrativa:

$$F_{\text{resultante}} = F_{\text{atrativa}} + F_{\text{repulsiva}} \quad (4)$$

Sendo esta também uma função da separação interatômica. Quando as forças de repulsão e de atração se anulam, então a força resultante é zero, existindo um estado de equilíbrio, a distância de equilíbrio é mostrada na Figura 2 como r_0 , cerca de 0,3nm para muitos átomos.

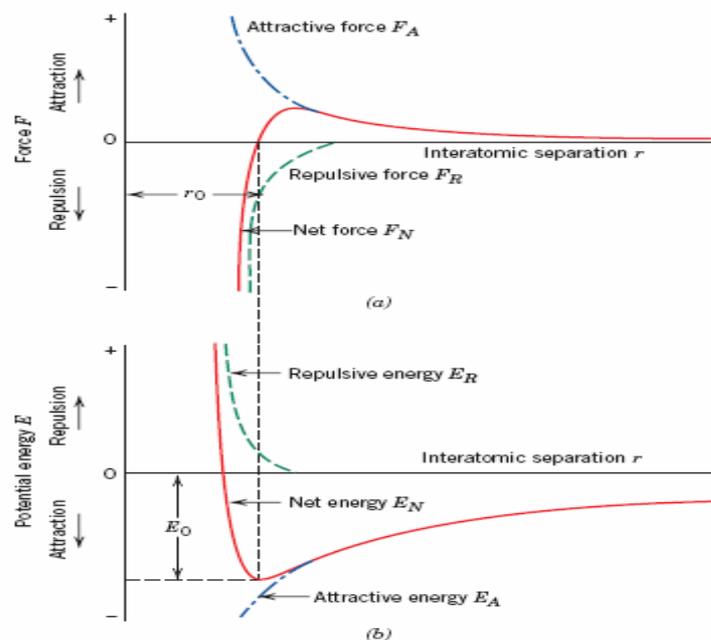


Figura 2– (a) a dependência das forças repulsivas, atrativas e resultante sobre a separação interatômica para dois átomos isolados, (b) dependência das energias repulsivas, atrativas e potencial líquida sobre a separação interatômica para dois átomos isolados.

FONTE: CALLISTER (2007)

No estado de equilíbrio a força de repulsão irá impedir que os átomos se aproximem, enquanto que a força de atração irá impedir que os átomos se afastem. De modo semelhante, pode-se trabalhar com energia ao invés de forças:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{atrativa}} + E_{\text{repulsiva}} \quad (5)$$

Esta equação está representada na Figura 2, sendo a energia total (verde) a soma das outras duas, apresentando um vale ou uma depressão de energia potencial ao redor do ponto de mínima energia potencial E_0 . A energia de ligação é correspondente à energia que seria necessária para separar estes dois átomos da posição de equilíbrio até uma distância infinita.

O aquecimento até temperaturas sucessivamente mais elevadas (T_1, T_2, T_3 , etc.) aumenta a energia vibracional de E_1 para E_2 para E_3 ... (Figura 3). A amplitude vibracional média de um átomo corresponde à largura do poço de energia potencial a cada temperatura, e a distância entre os átomos média é representada pela posição intermediária, que aumenta de r_0 para r_1 para r_2 e assim por diante. Ocorre a expansão térmica devido à assimetria do poço da curva de energia potencial e não devido ao aumento das amplitudes vibracionais dos átomos em função do aumento da temperatura. Se o poço de energia potencial fosse simétrico como a Figura 3, não existiria a expansão térmica mesmo com o aumento da energia vibracional dos átomos.

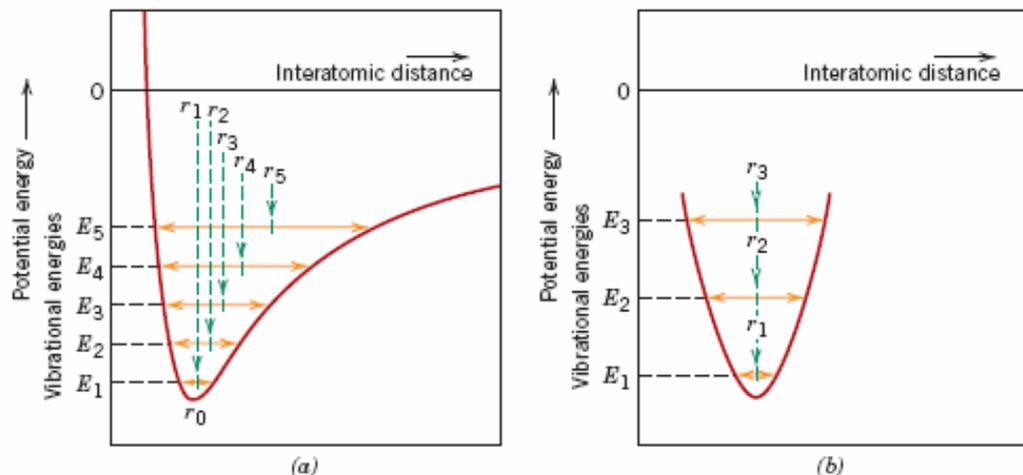


Figura 3- (a) Gráfico da energia interatômica em função da distância atômica, demonstrando o aumento da separação com o aumento da temperatura. (b) Representação de como a distância interatômica não varia com a temperatura se a poço de energia entorno de E_0 fosse simétrico.

FONTE: CALLISTER(2007)

Para qualquer material, quanto maior for a energia de ligação atômica, mais profundo e estreito será o poço, resultando num menor aumento da separação interatômica com o aumento da temperatura, e culminando num menor coeficiente linear de expansão térmica.

Os metais apresentam α variando de 5×10^{-6} até $25 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Para algumas aplicações foram desenvolvidas ligas ferro-níquel e ferro-níquel-cobalto com valores

de α_l da ordem de $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, algumas dessas ligas são o kovar, invar e o super invar. Os materiais cerâmicos apresentam ligações interatômicas relativamente fortes resultando num coeficiente de expansão térmica baixos. Os valores estão entorno de $0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ e $15 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Os materiais cerâmicos que necessitam de um tratamento térmico devem possuir um α_l relativamente pequeno e devem ser isotrópicos, caso contrário o material podem sofrer uma fratura em consequência de variações dimensionais não uniformes, fenômeno conhecido por choque-térmico.

Os polímeros apresentam α_l da ordem de $50 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ até $400 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Maiores valores são encontrados em polímeros lineares e com ramificações, pois estes apresentam ligações intermoleculares secundárias fracas. Com o aumento da quantidades de ligações cruzadas, o α_l diminui.

TABELA 1- coeficientes linear de expansão térmica para alguns materiais**Table 19.1** Tabulation of the Thermal Properties for a Variety of Materials

Material	c_p (J/kg-K) ^a	α_l [(°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶] ^b	k (W/m-K) ^c	L [Ω-W/(K) ² × 10 ⁻¹¹]
<i>Metals</i>				
Aluminum	900	23.6	247	2.20
Copper	386	17.0	398	2.25
Gold	128	14.2	315	2.50
Iron	448	11.8	80	2.71
Nickel	443	13.3	90	2.08
Silver	235	19.7	428	2.13
Tungsten	138	4.5	178	3.20
1025 Steel	486	12.0	51.9	—
316 Stainless steel	502	16.0	15.9	—
Brass (70Cu–30Zn)	375	20.0	120	—
Kovar (54Fe–29Ni–17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe–36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe–32Ni–5Co)	500	0.72	10	2.68
<i>Ceramics</i>				
Alumina (Al ₂ O ₃)	775	7.6	39	—
Magnesia (MgO)	940	13.5 ^d	37.7	—
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	790	7.6 ^d	15.0 ^e	—
Fused silica (SiO ₂)	740	0.4	1.4	—
Soda-lime glass	840	9.0	1.7	—
Borosilicate (Pyrex™) glass	850	3.3	1.4	—
<i>Polymers</i>				
Polyethylene (high density)	1850	106–198	0.46–0.50	—
Polypropylene	1925	145–180	0.12	—
Polystyrene	1170	90–150	0.13	—
Polytetrafluoroethylene (Teflon™)	1050	126–216	0.25	—
Phenol-formaldehyde, phenolic	1590–1760	122	0.15	—
Nylon 6,6	1670	144	0.24	—
Polyisoprene	—	220	0.14	—

^a To convert to cal/g-K, multiply by 2.39 × 10⁻⁴; to convert to Btu/lb_m-°F, multiply by 2.39 × 10⁻⁴.

^b To convert to (°F)⁻¹, multiply by 0.56.

^c To convert to cal/s-cm-K, multiply by 2.39 × 10⁻³; to convert to Btu/ft-h-°F, multiply by 0.578.

^d Value measured at 100°C.

^e Mean value taken over the temperature range 0–1000°C.

FONTA: CALLISTER(2007)

3. MATERIAIS UTILIZADOS

Vários metais podem ser utilizados na confecção de par bi metálico, os mais utilizados são o latão, aço e o invar, material feito a partir de uma liga de níquel e ferro, que apresenta a propriedade de um baixo coeficiente de dilatação térmica. O invar foi descoberto em 1896 por Charles Edouard Guillaume, físico suíço que trabalhava no instituto internacional de pesos e medidas, por este trabalho de ligas Fe-Ni, guillaume recebeu o premio Nobel de física em 1920. O invar é uma liga que

apresenta de 30% a 36% de níquel e o restante de ferro com grupo espacial cúbico de face centrada, podendo também possuir outros elementos. O invar mais utilizado apresenta cerca de 36% de Ni e 64% de Fe, possuindo um coeficiente de dilatação térmica de cerca de $1,6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ à temperatura ambiente. Sua maior aplicação é na construção de lâminas bi metálicas para termostato eletromecânico. O modelo mais popular para a explicação do efeito invar assume que existem duas configurações de spin, uma ferromagnética com grande volume e outra paramagnética com pequeno volume e que, quando a rede cristalina sofre excitação térmica, as duas configurações interagem entre si mantendo o volume da rede constante. No entanto este modelo não é consistente com algumas observações experimentais. Uma explicação totalmente correta do efeito invar ainda não foi estabelecida.

O latão é uma liga metálica de cobre e zinco com porcentagem deste último elemento variando de 3 a 45%. O latão possui um coeficiente de expansão térmica de $19 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, cerca de 12 vezes o do invar. Já o aço é uma liga de ferro e carbono, de 0,008% até 2,1% deste último elemento, formado por difusão intersticial de átomos de carbono no ferro e possui um coeficiente de expansão térmica de cerca de $11 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, em torno de 7 vezes a do invar.

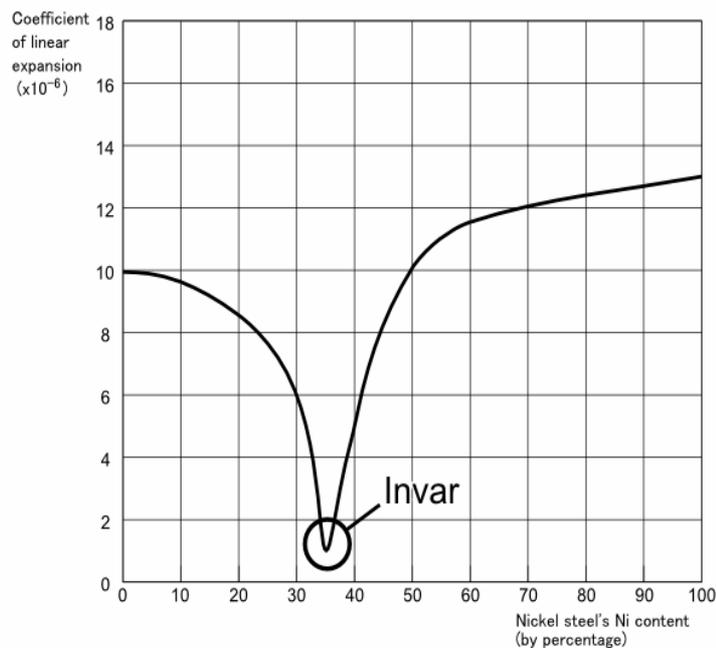


FIGURA 4- Relação entre concentração de níquel e coeficiente de expansão linear para o invar. Pode ser observado que o menor coeficiente de expansão linear ocorrerá para cerca de 36% de níquel.

4. APLICAÇÕES

4.1- TERMOSTATO

São dispositivos que tem por objetivo manter constante a temperatura de um sistema, através da regulação automática. Sua função é fazer com que a temperatura de um sistema não varie além de certos limites preestabelecidos. Um mecanismo deste tipo é formado basicamente por dois elementos: um indica a variação térmica sofrida pelo sistema, elemento sensor, o outro controla esta variação e corrige os desvios de temperatura, mantendo os dentro do intervalo desejado.

Um exemplo de elemento sensor é feito a partir de uma lâmina bimetálica, que quando aquecida irá se curvar e, conseqüentemente, poderá ativar ou desativar um circuito para que ocorra a correção.

4.2- DISJUNTORE TERMOMAGNÉTICO

Disjuntores termomagnéticos são dispositivos de segurança conectados em um circuito elétrico e tem a função de estabelecer, conduzir ou interromper a corrente que passa pelo circuito em condições normais de operação e intervir em condições anormais de operação. Possuem um sistema térmico baseado em um par bi metálico para a proteção de correntes pouco acima da corrente nominal, e um sistema magnético para a proteção contra sobre correntes elevadas.

As três funções do disjuntor termomagnético

- Manobra (abertura ou fechamento voluntário do circuito)
- Proteção contra sobrecarga
- Proteção contra curto circuito- é executado por um atuador magnético, um solenóide, que efetuará a abertura do circuito devido com o aumento instantâneo da corrente.

A Proteção contra sobrecarga, correntes acima da nominal do disjuntor, é efetuada por um par bi metálico. O par pode ser considerado como um resistor de baixa resistência que dissipa energia fornecida pelo circuito em energia térmica, com isso, essa energia irá fazer com que o par bi metálico se aqueça e sofra uma expansão linear. Se a corrente for superior à corrente nominal do disjuntor, depois de certo instante de tempo, o par irá desativar o circuito. Este desativamento ocorre

porque um metal irá se expandir mais do que o outro, fazendo uma curvatura do par e, conseqüentemente, a abertura do circuito:

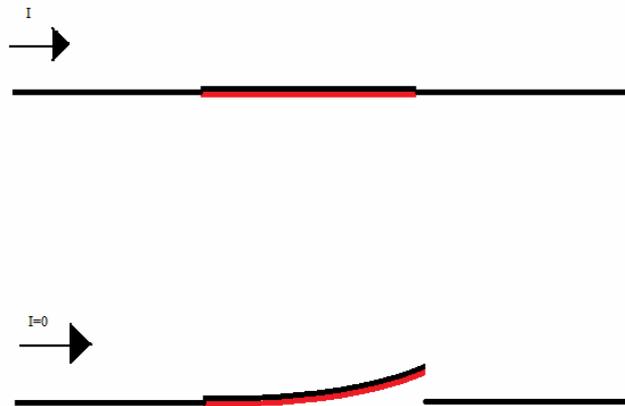


FIGURA 5- Se a corrente I for superior a corrente nominal do disjuntor, depois de um certo instante de tempo o par irá se deformar e em conseqüente abrir o circuito e reduzir a corrente para zero.

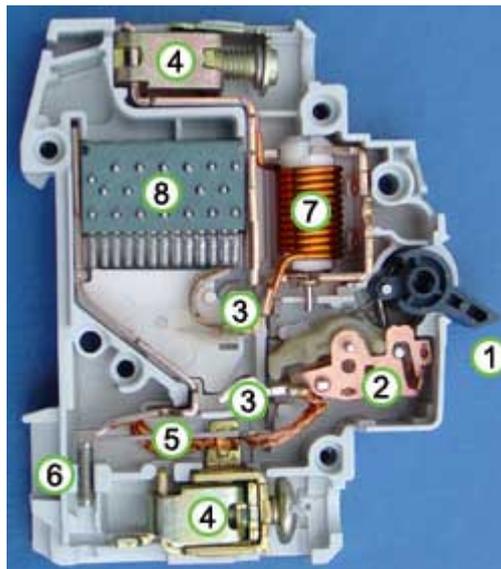


FIGURA 6- interior de um disjuntor, o elemento representado pelo número 5 é o bimetálico.

Disjuntores realizam basicamente a mesma operação que um fusível, porém com uma grande vantagem, quando o disjuntor parar de conduzir devido a uma sobrecarga, para o reativá-lo basta que se ligue sua chave novamente. No fusível ele para de conduzir porque não existe mais contato elétrico, sendo necessária a sua troca por um novo.

No Brasil existe um grande número de fábricas de disjuntores entre elas: DCA-IRTA, GE, SIEMENS.

4.3- TERMÔMETROS BIMETÁLICOS

O termômetro bimetálico consiste em um par de metais de diferentes coeficientes de expansão térmica presos, formando uma lâmina, quando ocorrer uma variação de temperatura do par, ocorrerá um encurvamento do mesmo, que é proporcional à temperatura. Para que a sensibilidade do termômetro seja maior, a lâmina é enrolada em forma de hélice ou espiral, pois com isso a lâmina será maior e a variação de comprimento devido à variação de temperatura também.

Para a fabricação do termômetro é utilizado o invar como o metal de menor coeficiente de expansão e o latão como o de maior coeficiente. Este tipo de dispositivo apresenta um baixo custo de fabricação, construção robusta, um alto tempo de resposta, uma imprecisão de 0.5% a 1% e uma faixa de utilização de -50°C até 500°C . Empresas como a Ashcroft, Baumer, Manotherm, Sika entre outras fabricam termômetros bimetálicos.

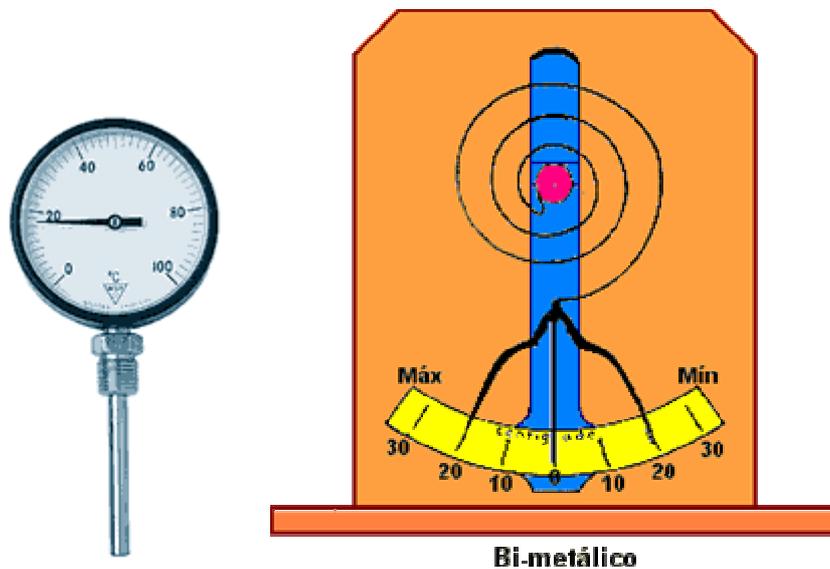


FIGURA 7- esquerda: termômetro bimetálico fabricado por Ashcroft
Direita: esquema de um termômetro bimetálico

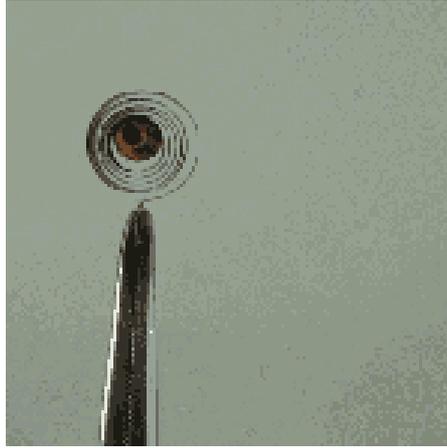


FIGURA 8- lamina bimetálica em espiral usada em termômetros.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER, Materials Science and Engineering, New York 2007

TERMOPAR

Renato Ferreira Simão

1. INTRODUÇÃO

Os termopares são dispositivos eletrônicos com larga aplicação para medição de temperatura. São baratos, podem medir uma vasta gama de temperaturas e podem ser substituídos sem introduzir erros relevantes. A sua maior limitação é a exatidão, uma vez que erros inferiores a 1 °C são difíceis de obter.

2. FUNCIONAMENTO

Em 1822, o físico Thomas Seebeck descobriu (acidentalmente) que a junção de dois metais gera uma tensão elétrica que é função da temperatura. O funcionamento dos termopares é baseado neste fenômeno, que é conhecido como Efeito de Seebeck. Embora praticamente se possa construir um termopar com qualquer combinação de dois metais, utilizam-se apenas algumas combinações normalizadas, isto porque possuem tensões de saída previsíveis e suportam grandes gamas de temperaturas.

Existem Tabelas normalizadas que indicam a tensão produzida por cada tipo de termopar para todos os valores de temperatura que suporta, por exemplo, o termopar tipo K com uma temperatura de 300 °C irá produzir 12,2 mV. Contudo, não basta ligar um voltímetro ao termopar e registrar o valor da tensão produzida, uma vez que ao ligarmos o voltímetro estamos a criar uma segunda (e indesejada) junção no termopar. Para se fazerem medições exatas devemos compensar este efeito, o que é feito recorrendo a uma técnica conhecida por compensação por junção fria.

Caso se esteja a interrogar porque é que ligando um voltímetro a um termopar não se geram várias junções adicionais (ligações ao termopar, ligações ao aparelho de medida, ligações dentro do próprio aparelho, etc...), a resposta advém da lei conhecida como lei dos metais intermédios, que afirma que, ao inserirmos um terceiro metal entre os dois metais de uma junção de um termopar, basta que as duas novas junções criadas com a inserção do terceiro metal estejam à mesma temperatura para que não se manifeste qualquer modificação na saída do termopar.

Esta lei é também importante na própria construção das junções do termopar, uma vez que assim se garante que ao soldar os dois metais a solda não irá afetar a medição. Contudo, na prática as junções dos termopares podem ser construídas soldando os materiais ou por aperto dos mesmos.

Todas as Tabelas normalizadas dão os valores da tensão de saída do termopar considerando que a segunda junção do termopar (a junção fria) é mantida a exatamente zero graus Celsius. Antigamente isto conseguia-se conservando a junção em gelo fundente (daqui o termo compensação por junção fria). Contudo a manutenção do gelo nas condições necessárias não era fácil, logo optou-se por medir a temperatura da junção fria e compensar a diferença para os zero graus Celsius.

Tipicamente a temperatura da junção fria é medida por um termístor de precisão. A leitura desta segunda temperatura, em conjunto com a leitura do valor da tensão do próprio termopar é utilizada para o cálculo da temperatura verificada na extremidade do termopar. Em aplicações menos exigentes, a compensação da junção fria é feita por um semicondutor sensor de temperatura, combinando o sinal do semicondutor com o do termopar.

É importante a compreensão da compensação por junção fria; qualquer erro na medição da temperatura da junção fria irá ocasionar igualmente erros na medição da temperatura da extremidade do termopar.

3. EFEITO SEEBECK

O efeito Seebeck é a produção de uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre duas junções de condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando elas estão a diferentes temperaturas (força eletromotriz térmica).

É o reverso do efeito Peltier que é a produção de um gradiente de temperatura em duas junções de dois condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando submetidos a uma diferença de potencial (tensão elétrica) em um circuito fechado (conseqüentemente, percorrido por uma corrente elétrica).

Estes dois efeitos podem ser também considerados como um só e denominado de efeito Peltier-Seebeck ou efeito termelétrico.

O efeito Seebeck é devido a dois fenômenos: difusão de portadores de carga e arrastamento fônons.

3.1. PRINCIPIO FÍSICO DO EFEITO SEEBECK

O princípio termoelétrico dos termopares deriva de uma propriedade física dos condutores metálicos submetidos a um gradiente térmico em suas extremidades: a extremidade mais quente faz com que os elétrons dessa região tenham maior energia cinética e se acumulem no lado mais frio, gerando uma diferença de potencial elétrico entre as extremidades do condutor na ordem de alguns milivolts (mV).

Na Figura 1 o valor da força eletromotriz ΔE depende da natureza dos materiais e do gradiente de temperatura nos mesmos. Quando o gradiente de temperatura é linear, a diferença de potencial elétrico $\Delta E = E_2 - E_1 > 0$ depende apenas do material e das temperaturas T_1 e T_2 , ($T_2 > T_1$), formalmente representado pela fórmula:

$$S = \frac{\Delta E}{\Delta T}$$

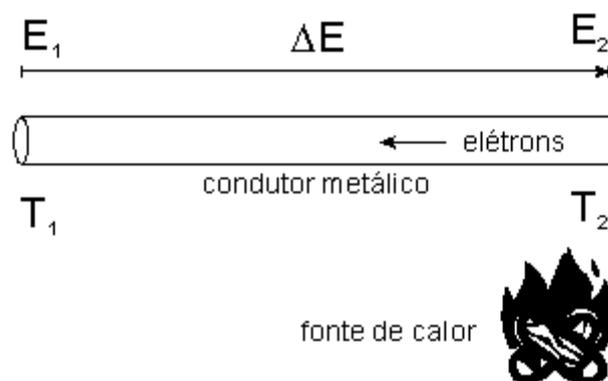


FIGURA 1 - Ilustração

Onde S é o coeficiente termodinâmico de Seebeck, ΔT é a diferença de temperatura $\Delta T = T_2 - T_1$ e ΔE é a diferença de potencial elétrico usualmente medido em milivolts em função da diferença de temperatura ($\text{mV}/^\circ\text{C}$).

Quando dois condutores metálicos A e B de diferentes naturezas são acoplados mediante um gradiente de temperatura, os elétrons de um metal tendem a migrar de um condutor para o outro, gerando uma diferença de potencial elétrico num efeito semelhante a uma pilha eletroquímica. Esse efeito é conhecido como

Efeito Seebeck sendo capaz de gerar energia elétrica com base numa fonte de calor mediante propriedades físicas dos metais.

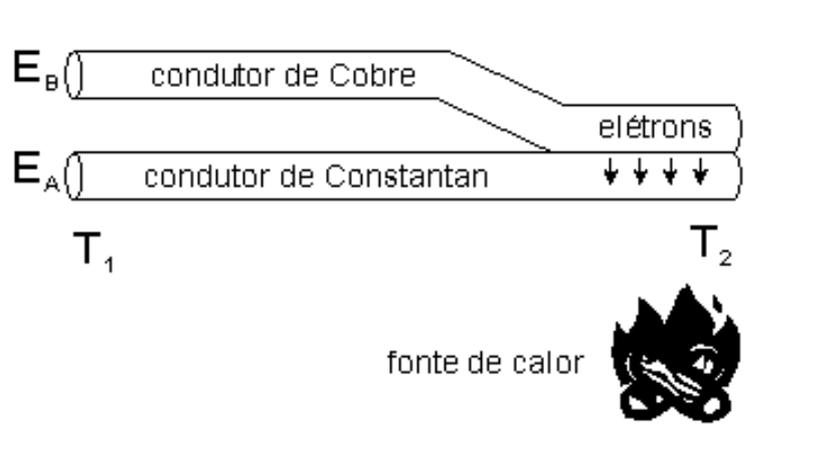


FIGURA 2 - Representa dois metais acoplados num dispositivo termopar do tipo T (Cu 100%; Constantan, Cu 55%, Ni 45%). Quando associamos dois metais num termopar, a força eletromotriz gerada é:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} (S_b(T) - S_a(T)) dT$$

Onde S_A e S_B são os coeficientes de Seebeck dos metais A e B, T_1 e T_2 representam a diferença de temperatura na junção dos materiais. Os coeficientes de Seebeck são não-lineares e dependem da temperatura absoluta, material, e da estrutura molecular. Se os coeficientes de Seebeck podem ser considerados efetivamente constantes numa certa gama de temperatura, a fórmula acima pode ser aproximada por:

$$E = (S_a - S_b)(T_2 - T_1)$$

Desse modo é possível gerar energia elétrica usando-se uma fonte de calor.

4. LINEARIZAÇÃO DO TERMOPAR

O instrumento de medida tem de ter a capacidade de lidar com a compensação da junção fria, bem como com o fato de a saída do termopar não ser linear. A relação entre a temperatura e a tensão de saída é uma equação polinomial de 5ª a 9ª ordem dependendo do tipo do termopar. Alguns instrumentos de alta precisão guardam em memória os valores das Tabelas dos termopares para eliminar esta fonte de erro.

5. TIPOS

Os termopares disponíveis no mercado têm os mais diversos formatos, desde os modelos com a junção a descoberto que têm baixo custo e proporcionam tempos de resposta rápidos, até aos modelos que estão incorporados em sondas. Está disponível uma grande variedade de sondas, adequadas para diferentes aplicações (industriais, científicas, investigação médica, etc...).

Quando se procede à escolha de um termopar deve-se ponderar qual o mais adequado para a aplicação desejada, segundo as características de cada tipo de termopar, tais como a gama de temperaturas suportada, a exatidão e a confiabilidade das leituras, entre outras. A seguir alguns tipos de termopares e suas características:

5.1. Tipo K (Cromel / Alumel)

O termopar tipo K é um termopar de uso genérico. Tem um baixo custo e, devido à sua popularidade estão disponíveis variadas sondas. Cobrem temperaturas entre os -200 e os 1370 °C, tendo uma sensibilidade de aproximadamente 41µV/°C.

- Termoelemento positivo (KP): Ni90%Cr10% (Cromel)
- Termoelemento negativo (KN): Ni95%Mn2%Si1%Al2% (Alumel)
- Faixa de utilização: -270 °C a 1200 °C
- f.e.m. produzida: -6,458 mV a 48,838 mV

5.2. Tipo E (Cromel / Constantan)

Este termopar tem uma elevada sensibilidade (68 µV/°C) que o torna adequado para baixas temperaturas.

- Termoelemento positivo (EP): Ni90%Cr10% (Cromel)
- Termoelemento negativo (EN): Cu55%Ni45% (Constantan)
- Faixa de utilização: -270 °C a 1000 °C
- f.e.m. produzida: -9,835 mV a 76,373 mV

5.3. Tipo J (Ferro / Constantan)

A sua gama limitada (-40 a 750 °C) é a responsável pela sua menor popularidade em relação ao tipo K. Aplica-se sobretudo com equipamento já velho que não é compatível com termopares mais ‘modernos’. A utilização do tipo J acima dos 760 °C leva a uma transformação magnética abrupta que lhe estraga a calibração.

- Termoelemento positivo (JP): Fe99,5%
- Termoelemento negativo (JN): Cu55%Ni45% (Constantan)
- Faixa de utilização: -210 °C a 760 °C
- f.e.m. produzida: -8,096 mV a 42,919 mV

5.4. Tipo N (Nicrosil / Nisil)

A sua elevada estabilidade e resistência à oxidação a altas temperaturas tornam o tipo N adequado para medições a temperaturas elevadas, sem recorrer aos termopares que incorporam platina na sua constituição (tipos B, R e S). Foi desenhado para ser uma “evolução” do tipo K.

5.5. Tipo B (Platina / Ródio-Platina)

Os termopares tipo B, R e S apresentam características semelhantes. São dos termopares mais estáveis, contudo, devido à sua reduzida sensibilidade (da ordem dos 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$), utilizam-se apenas para medir temperaturas acima dos 300 °C. Note-se que devido à reduzida sensibilidade destes termopares, a sua resolução de medida é também reduzida.

Adequado para medição de temperaturas até aos 1800 °C.

Contra aquilo que é habitual nos outros termopares, este origina a mesma tensão na saída a 0 e a 42 °C, o que impede a sua utilização abaixo dos 50 °C. Em compensação, utiliza cabos de extensão de cobre comum desde que a sua conexão com o termopar esteja neste intervalo (0 °C a 50 °C). Os demais termopares necessitam de cabos de ligação com o mesmo material do termopar, sob o risco de

formarem com o cobre um "outro termopar", se a conexão estiver a temperatura diferente do instrumento de processamento do sinal (p.ex. transmissor)

- Termoelemento positivo (BP): Pt70,4%Rh29,6% (Ródio-Platina)
- Termoelemento negativo (BN): Pt93,9%Rh6,1% (Ródio-Platina)
- Faixa de utilização: 0 °C a 1820 °C
- f.e.m. produzida: 0,000 mV a 13,820 mV

5.6. Tipo R (Platina / Ródio-Platina)

Adequado para medição de temperaturas até aos 1600 °C. Reduzida sensibilidade (10 μ V/°C) e custo elevado.

Termoelemento positivo (RP): Pt87%Rh13% (Ródio-Platina)

Termoelemento negativo (RN): Pt100%

Faixa de utilização: -50 °C a 1768 °C

f.e.m. produzida: -0,226 mV a 21,101 mV

5.7. Tipo S (Platina / Ródio-Platina)

Adequado para medição de temperaturas até aos 1600 °C. Reduzida sensibilidade (10 μ V/°C), elevada estabilidade e custo elevado.

Termoelemento positivo (SP): Pt90%Rh10% (Ródio-Platina)

Termoelemento negativo (SN): Pt100%

Faixa de utilização: -50 °C a 1768 °C

f.e.m. produzida: -0,236 mV a 18,693 mV

5.8. Tipo T (Cobre / Constantan)

É dos termopares mais indicados para medições na gama dos -270 °C a 400 °C.

Termoelemento positivo (TP): Cu100%

Termoelemento negativo (TN): Cu55%Ni45% (Constantan)

Faixa de utilização: -270 °C a 400 °C

f.e.m. produzida: -6,258 mV a 20,872 mV

Note-se que a escolha de um termopar deve assegurar que o equipamento de medida não limita a gama de temperaturas que consegue ser medida.

6. ERROS DE UM TERMOPAR

Erro de um termopar é o desvio maior que ele possa apresentar em uma medição, comparando-se a um padrão absoluto. Abaixo a Tabela mostra os erros admissíveis para os termopares de classe standard e classe especial e suas faixas de operação, estes erros estão expressos em graus Celsius e em porcentagem da temperatura que está sendo medida. Sempre utilizar o erro maior para efeito de cálculo.

Tipo de termopar	Faixa de Temperatura	Limite de erro standard	Limite de erro especial
T	0 a 370°C	+1°C ou +0,75%	+0,5°C ou 0,4%
J	0 a 760°C	+2,2°C ou +0,75%	+1,1°C ou +0,4%
E	0 a 870°C	+1,7°C ou +0,5%	+1°C ou +0,4%
K/N	0 a 1260°C	+2,2°C ou +0,75%	+1,1°C ou 0,4%
S/R	0 a 1480°C	+1,5°C ou +0,25%	+0,6°C ou 0,1%
B	870 a 1700°C	+0,5%	+0,25%
T	-200 a 0°C	+1°C ou + 1,5%	-
E	-200 a 0°C	+1,7°C ou + 1%	-
K	-200 a 0°C	+2,2°C ou + 2%	-

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

<pt.wikipedia.org>. acesso em: 09/07/2008

GRISA, Eliane. SUZIN, Evandro. FEIER, Rafael. **Sensores de temperaturas.** disponível em: < <http://www.ucs.br/ccet/demc/vjbrusam/inst/temp1.pdf>> acesso em: 09/7/2008

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

DETECTORES INFRAVERMELHO

Eduardo Augusto Koehler

1. INTRODUÇÃO

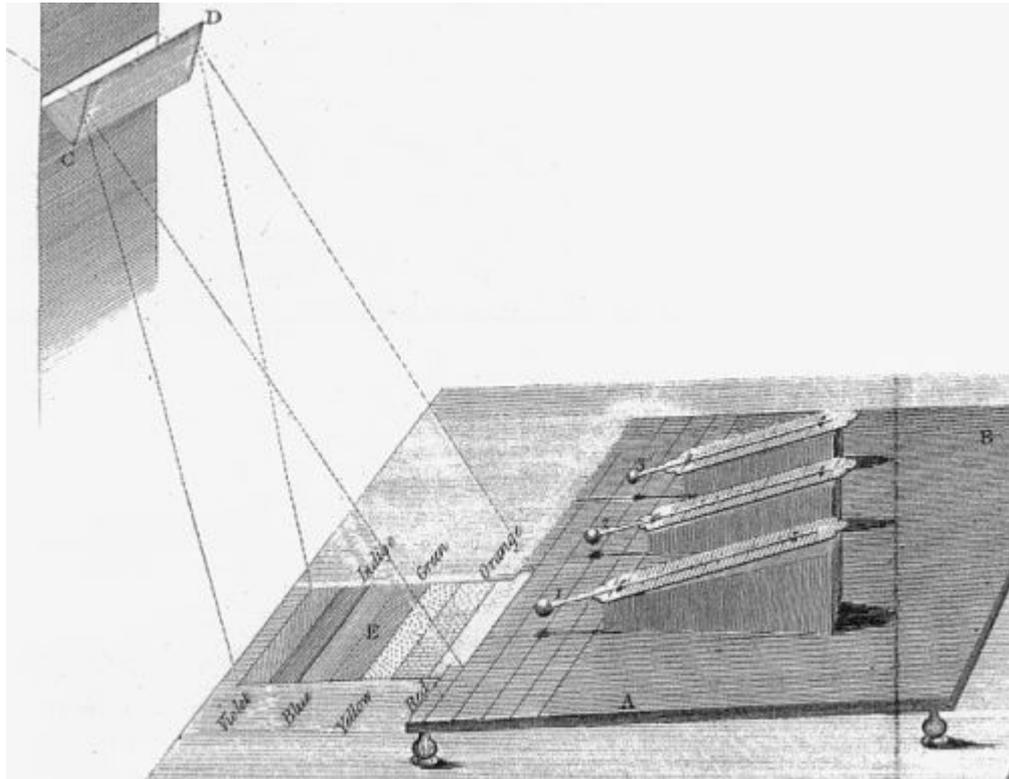


FIGURA 1 - Experimento pioneiro realizado por Sir William Herschel que, por volta de 1800, revelou a existência do que hoje conhecemos como a banda do infravermelho do espectro eletromagnético. Apesar do pioneirismo, o próprio Herschel não deu muita importância à sua descoberta [1,2]. Além disso vale notar o uso do termômetro como primeiro detector de IV.

Durante muito tempo essa radiação desconhecida foi denominada de “raios invisíveis”, “espectro termométrico”, “raios que provocam calor” e “calor escuro”. O termo infravermelho só apareceu por volta de 1880 e, lamentavelmente, parece não haver um autor ao qual possamos creditar o nome. Para alguns autores, a raiz latina (infra = abaixo, em baixo de...) é um indicativo de que o termo tenha aparecido naturalmente na literatura da época sem uma autoria específica. Mas para outros autores, essa explicação não é satisfatória.

2. LINHA DO TEMPO

Até 1830 – Termômetros de mercúrio (Com auxílio de microscópio era possível perceber incremento de 0,1oC)

1829 – Nobili desenvolve o primeiro termopar (O efeito termoelétrico foi descoberto por Seebeck em 1821)

1833 – Termopilha de Melloni (São vários termopares ligados em série e apresentava-se 40 vezes mais sensível que os melhores termômetros da época)

1840 – John Herschel (filho do pioneiro) faz protótipo de “Evaporagraph” (Espécie de imageador baseado na evaporação diferencial de um filme de óleo).

1843 – Becquerel demonstra a fosforescência de certos materiais sob infravermelho bem como a sensibilidade de filmes fotográficos.

1883 – Abney detecta 1,3 mm com filmes fotográficos especiais.

Década de 1880 surge o bolômetro de Langrey (30 vezes mais sensível que a termopilha de Melloni).

1917 – Case desenvolve o primeiro fotocondutor de Sulfeto de Tálio (Primeiro detector quântico)

Durante II Guerra Mundial os Alemães desenvolvem vários fotocondutores e demonstram o ganho de sensibilidade com resfriamento.

Durante a Guerra Fria houve grande desenvolvimento na área (Novos materiais, novas técnicas, grande aperfeiçoamento eletrônico etc...)

3. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

De modo geral, radiação é o único efeito observável em inúmeros eventos físicos que ocorrem em uma escala de tempo muito breve ou em uma escala de tamanho muito reduzido. É também o único aspecto observável e, portanto, fundamental, no estudo de eventos que ocorrem a distâncias muito grandes. Deste modo, os detectores de radiação têm um papel fundamental no progresso científico e tecnológico nos mais variados campos do conhecimento.

A radiação, no sentido mais amplo a que estamos nos referindo, pode assumir uma das seguintes formas: (a) Partículas carregadas: elétrons, prótons e núcleos atômicos dentre outras partículas elementares; (b) Partículas neutras: nêutrons,

partículas elementares e “grávitons”; (c) Fótons (Radiação Eletromagnética): microondas, infravermelho, visível, ultravioleta, raios X e raios gama.

De modo geral, a radiação absorvida interage com o detector produzindo alguma forma de sinal elétrico que é processado por um circuito eletrônico associado (Figura 2). A sensibilidade do sistema (detector + eletrônica), isto é, o menor nível de intensidade de radiação incidente que pode ser detectado depende, basicamente, de fatores intrínsecos ao detector e de fatores intrínsecos à eletrônica associada. Para maximizar a sensibilidade de um sistema, devemos considerar a formação do sinal no detector, o acoplamento do detector com a eletrônica e as flutuações introduzidas pela eletrônica durante o processamento do sinal. O acoplamento detector-eletrônica compreende uma variedade de aspectos bastante ampla e, por vezes, bastante complexa. O assunto é bastante extenso e extrapola o contexto desta apostila. Entretanto, alguns aspectos mais relevantes serão abordados mais a frente.

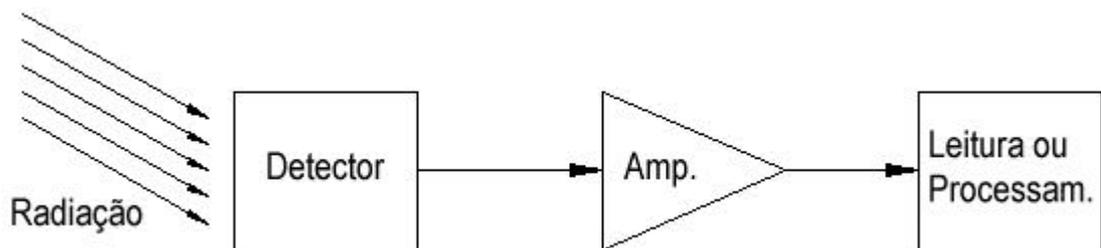


FIGURA. 2 - Diagramas esquemático de um sistema sensor de radiação

O desenvolvimento de um sistema de detecção de radiação apresenta um elevado grau de interdisciplinaridade, envolvendo a participação de várias áreas da física e da engenharia. Por exemplo, a compreensão de um sistema de detecção moderno, seja para aplicação em Física de Altas Energias, seja para Imageamento Médico, envolve conhecimentos nas seguintes áreas:

- Física da Matéria Condensada;
- Física de Dispositivos Semicondutores;
- Tecnologia de Fabricação de Dispositivos;
- Técnicas em Amplificadores de Baixo Ruído
- Microeletrônica Analógica e Digital
- Transmissão de dados em alta velocidade;

- Aquisição e Processamento de dados por Computador

Além desses tópicos, um aspecto que vem ganhando importância cada vez maior é o problema de compatibilidade eletromagnética. Esta área busca identificar e minimizar o problema de interferência eletromagnética entre aparelhos que operam no mesmo ambiente. Trata-se de um problema delicado, mas de fundamental importância em diversos setores. Além disto, os detectores podem se apresentar sob uma ampla gama de diferentes formatos tendo em vista o efeito físico utilizado no processo de detecção e a utilização do dispositivo

O objetivo deste curso não pretende, é claro, ir tão longe e discorrer sobre todos esses aspectos. Procuraremos apenas compreender alguns princípios fundamentais tendo como foco principal os detectores de infravermelho. Esta escolha tem relação direta com os materiais semicondutores de “gap” estreito, PbTe e PbSnTe, que são objeto de estudos no LAS.

Antes de adentrarmos no estudo dos detectores e sua caracterização, devemos situar um pouco melhor alguns aspectos importantes do espectro de infravermelho. Uma parte especialmente importante da região do infravermelho está detalhada na Fig. 3. Percebe-se claramente nessa Figura que existem algumas “janelas”, onde a atmosfera terrestre permite a passagem de grande parte da radiação infravermelha. Isto tem especial importância em inúmeras aplicações como veremos a seguir. Para entendermos bem estes aspectos e sua importância, precisamos entender como um objeto qualquer com temperatura acima de 0 K (zero Kelvin) emite radiação eletromagnética.

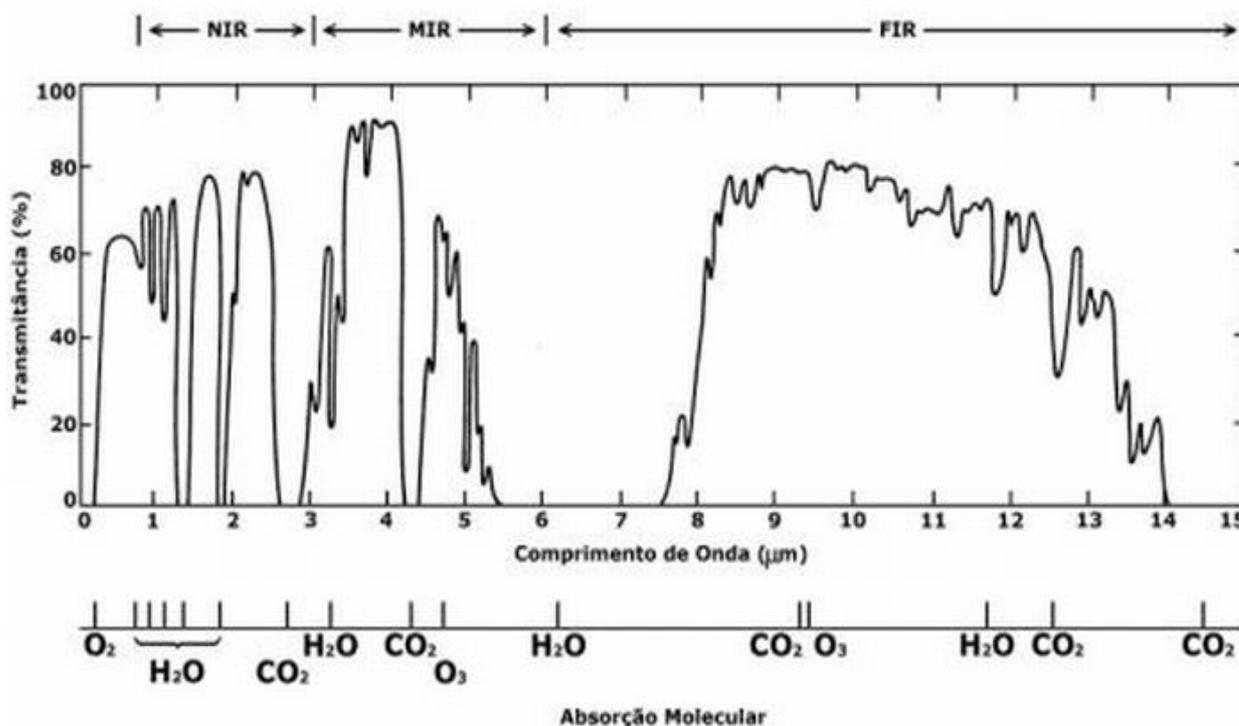


FIGURA 3 - Transmitância atmosférica na região do infravermelho (Para uma camada de ar de 1830 metros de espessura ao nível do mar com 17 mm de água precipitável)

4. RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO (RESUMO HISTÓRICO DO PROBLEMA)

No princípio do século passado (por volta de 1900), já havia uma razoável compreensão da natureza macroscópica e microscópica da matéria. A mecânica Newtoniana explicava e previa muito bem os movimentos dos objetos terrestres e astronômicos; A estrutura atômica da matéria já não era mais segredo; A termodinâmica estava praticamente desenvolvida e a teoria eletromagnética de Maxwell já havia atingido um estágio bastante adiantado explicando muito bem uma série de fenômenos elétricos e magnéticos. Vale notar que havia inclusive a sensação de que a Ciência havia chegado aos seus limites, restando apenas o acerto de alguns detalhes (Atualmente, parece que existe um sentimento semelhante). Um dos aspectos ou “detalhe” que intrigava os Físicos da época era a radiação emitida pelos corpos aquecidos.

Havia uma compreensão geral do mecanismo envolvido. Sabia-se que o calor fazia com que os átomos e moléculas de um corpo sólido vibrassem, e que esses átomos e moléculas eram arranjos complexos de cargas elétricas. Das experiências de Hertz e Maxwell com antenas simples, já havia sido confirmado que

cargas oscilantes emitiam radiação eletromagnética. Sabia-se das equações de Maxwell que essa radiação propagava-se com a velocidade da luz e, portanto, havia se chegado à conclusão que luz e a radiação dos corpos aquecidos estavam intimamente relacionadas e eram ambas, radiação eletromagnética.

O quadro então era o seguinte. Em um corpo aquecido as moléculas e átomos vibram e, como consequência, temos cargas elétricas vibrando. Assumindo que a teoria de Maxwell, que funcionava bem na escala macroscópica, também fosse válida na escala microscópica, essas cargas oscilantes deveriam irradiar luz e calor. O grande mistério era por que as previsões baseadas na teoria acima não eram condizentes com as medidas experimentais. Posto de outra forma, o grande problema era encontrar uma teoria que explicasse a distribuição da radiação de Corpo Negro pelas várias frequências ou comprimentos de onda observadas experimentalmente (Figura 4).

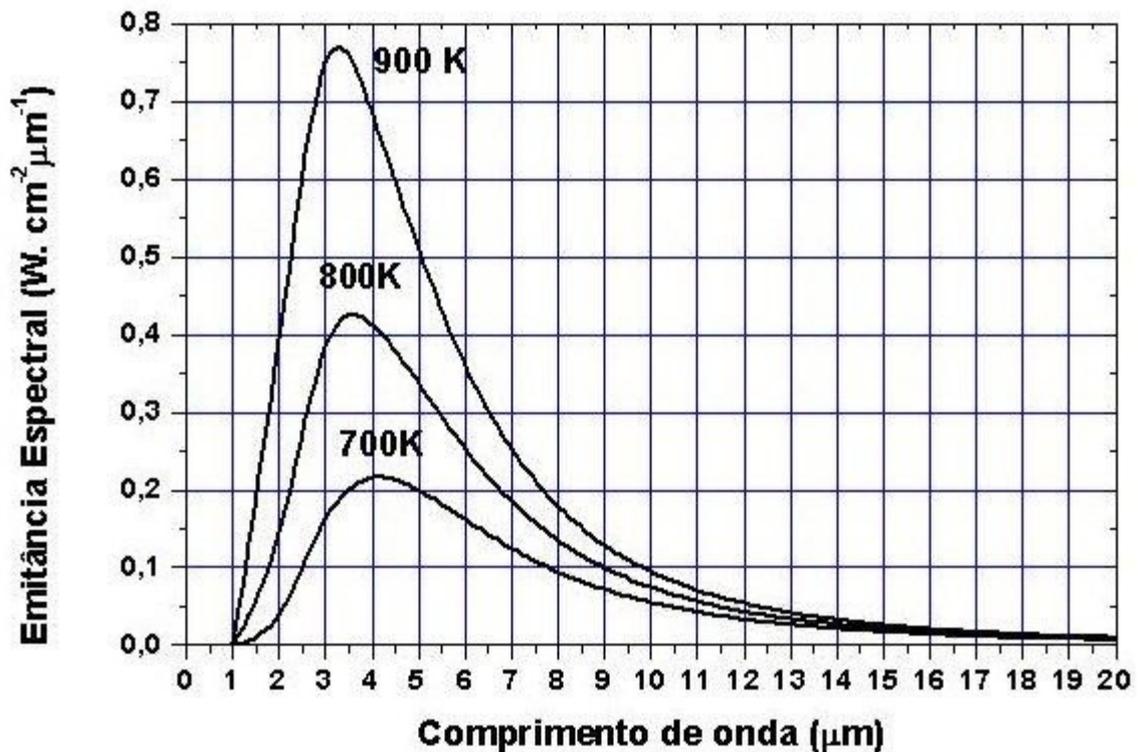


FIGURA 4 - Espectro da Radiação de Corpo Negro

As teorias clássicas não ofereciam um modelo adequado e completo do problema. Tínhamos a lei de Kirchhoff que estabelecia que um bom absorvedor de radiação é também um bom emissor. Foi o próprio Kirchhoff que em 1860 propôs o termo “Corpo Negro” referindo-se a um corpo capaz de absorver toda a radiação que incide sobre o mesmo e, conseqüentemente, seria também o melhor emissor de

radiação, funcionando como um padrão de referência. Em 1879 Stefan deduziu, experimentalmente, que a quantidade total de energia irradiada por um Corpo Negro era proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta. Em 1884 Boltzmann chegou à mesma conclusão através de considerações Termodinâmicas. O Resultado final ficou conhecido como lei de Stefan-Boltzmann.

$$W = s.T^4 \quad (s = 5,67 \times 10^{-12} \text{ W.cm}^{-2}.\text{K}^{-4})$$

Em 1894 Wien publicou sua “lei do Deslocamento” que procurava explicar a distribuição da radiação do Corpo Negro. Infelizmente, sua equação só concordava com os dados experimentais em baixas temperaturas e para pequenos comprimentos de onda. Apesar disso, uma consequência importante dos estudos de Wien e válido até hoje, é a relação entre a temperatura absoluta de um Corpo Negro e o comprimento de onda de máxima emissão ou comprimento de onda de pico.

$$\lambda_{\text{max}} T = 2897,8 \text{ mm.K}$$

Em 1900, a partir de considerações eletromagnéticas clássicas, Rayleigh derivou uma expressão (posteriormente corrigida por Jeans) que se ajustava aos dados experimentais para comprimentos de onda grande e altas temperaturas. Infelizmente, essa expressão previa a radiação de Corpo Negro proporcional ao inverso da quarta potência do comprimento de onda, conduzindo a um aumento ilimitado da energia irradiada para pequenos comprimentos de onda e que ficou conhecido como “catástrofe do ultravioleta”.

Apesar de mal sucedidas, todas essas tentativas serviram de importante subsídio para que Planck apresentasse uma solução satisfatória e definitiva para o problema. Planck buscou um meio de interpolar os resultados de Wien e Rayleigh-Jeans que funcionavam bem nos extremos inferior e superior, respectivamente, do espectro de Corpo Negro. O raciocínio de Planck pode ser resumido do seguinte modo: Sabia-se que cargas elétricas oscilantes emitiam energia eletromagnética e que o Corpo Negro podia ser visto como um conjunto de osciladores harmônicos. De acordo com a teorias clássica, esse conjunto de osciladores podia emitir em todas as frequências e com qualquer amplitude de oscilação, isto é, com qualquer energia. Esse raciocínio conduzia à formulação de Rayleigh-Jeans que Planck sabia estar errada. Planck concluiu então que a teoria clássica não deveria ser adequada à descrição de processos na escala atômica.

Como antes, Planck admitiu que todas as frequências fossem possíveis, mas introduziu a idéia de que a amplitude da oscilação e, portanto, a energia irradiada só poderia variar de modo discreto de uma quantia dada por hn , hoje chamada de quantum de energia. Planck designou o termo “h” de quantum de ação. Entre o anúncio preliminar de suas idéias em 19 de Outubro de 1900 em um encontro da Escola de Física Germânica, e a formulação completa da equação do Corpo Negro apresentada em 14 de Dezembro de 1900 transcorreram menos de 2 meses. Temos então que em menos de 2 meses uma verdadeira revolução ocorreu na Física. Gradualmente os conceitos introduzidos por Planck foram ganhando aceitação geral e acabaram por culminar no formalismo da moderna Mecânica Quântica. A equação de Planck para a distribuição de radiação do Corpo Negro é dada por:

$$W_{\lambda} = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1}$$

Onde:

W_l - Emitância radiante espectral (W. cm⁻².mm⁻¹)

l - Comprimento de onda em mm

h - Constante de Planck (6,6256 x 10⁻³⁴ W.s²)

T - Temperatura absoluta

c - Velocidade da luz (2,9979 x 10¹⁰ cm/s)

k - Constante de Boltzmann (1,38 x 10⁻²³ W.s.K⁻¹)

Sabemos que Terra com temperatura média de cerca de 300K é, em boa aproximação, um corpo negro. Com isto podemos comparar o espectro correspondente da Figura 5 com a transmitância Atmosférica da Figura 3. Comparando as duas Figuras, pode se ver claramente que a janela Atmosférica entre 8 e 14 mm permite ver muito bem a região de emissão máxima da Terra. Este fato faz dessa região do espectro, apropriadamente chamada de Infravermelho Termal, uma importante banda para sensoriamento remoto e controle de atitude de Satélites com referência à Terra.

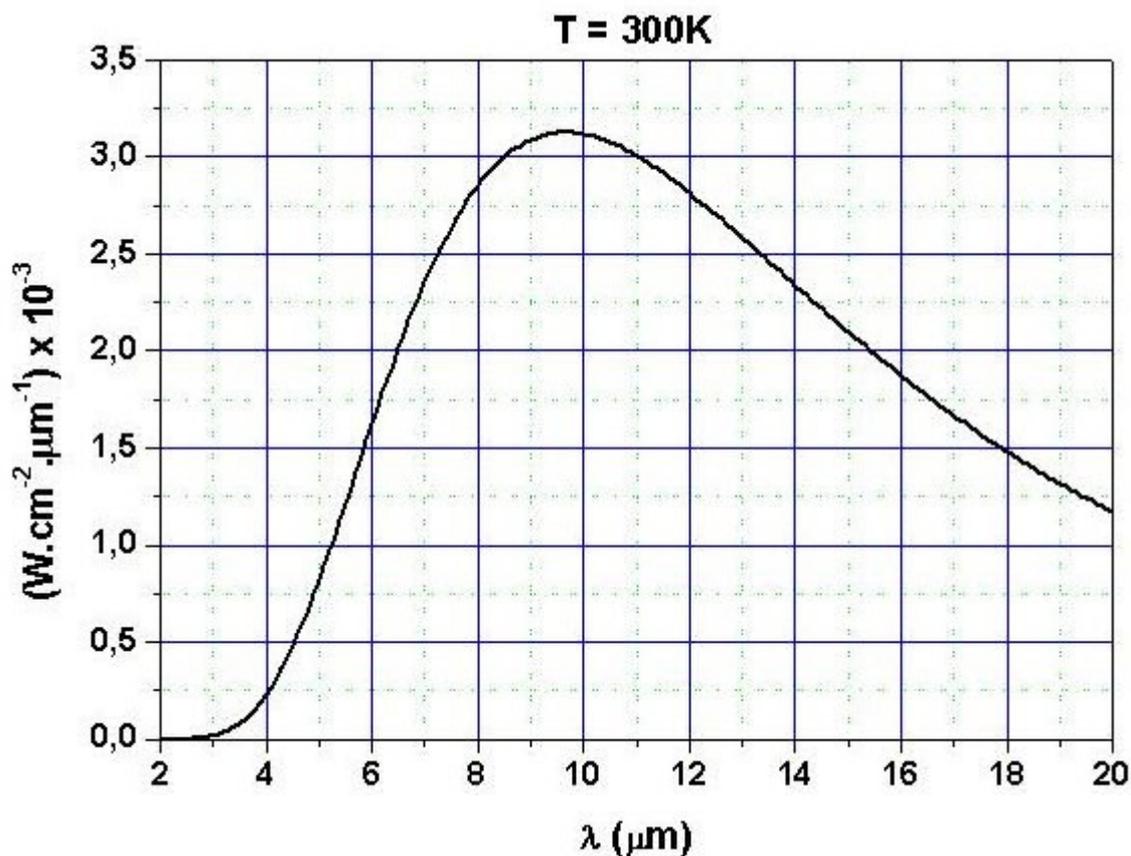


FIGURA 4 – Espectro de Emissão da Terra aproximada por um corpo negro a 300K.

A título de ilustração, a figura 5 a seguir mostra o espectro de um corpo negro a 6000K, ou seja, o espectro do Sol. Pode-se perceber que o pico de emissão Solar cai em cerca de 0,5 μm (Pela Lei de Wien obtemos o valor mais exato de 0,48 μm).

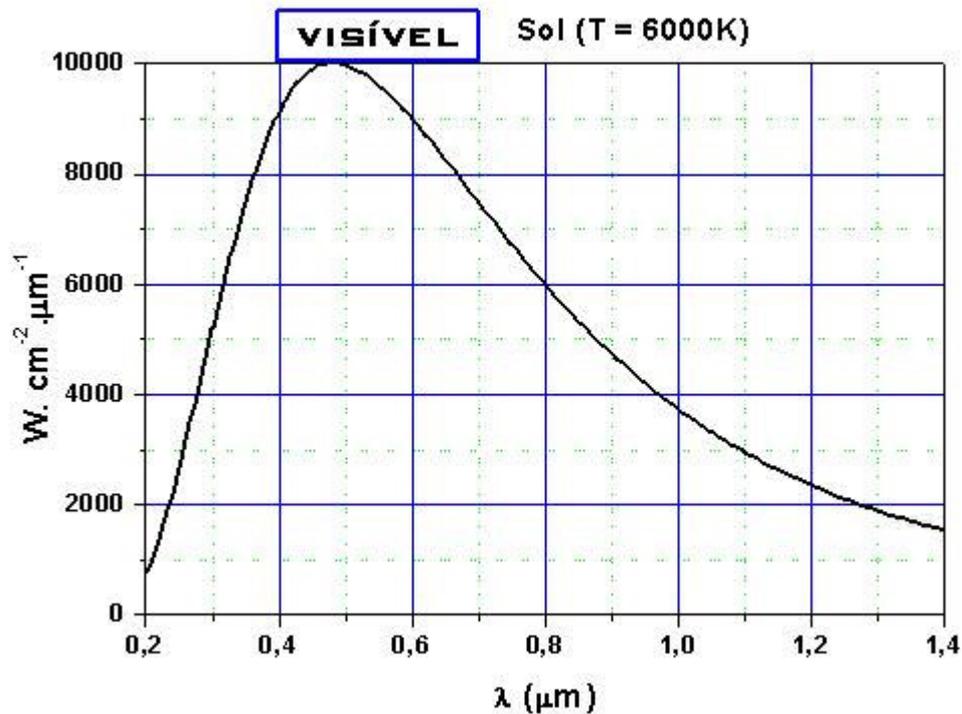


FIGURA 5 - Espectro de um corpo negro

Os aspectos vistos acima deixam bem clara a importância de sensores sensíveis à faixa do infravermelho, principalmente do infravermelho termal. De outro lado, sabemos que os semicondutores absorvem com grande facilidade fótons cujas energias ($h\nu$) sejam próximas do valor correspondente ao “gap” (E_g) do material. Deste modo, o semicondutor pode funcionar com um sensor de fótons com energias próximas àquela do seu “gap” (Figura 6). Isto também define um critério prático e fácil para selecionarmos materiais semicondutores com “gap” de energia adequado aos nossos propósitos. Da relação, $E=h\nu$ obtemos $E_g = hc/l$ que é muito útil para relacionarmos o “gap” de um semicondutor com o comprimento de onda que o mesmo absorve com maior intensidade:

$$E(eV) = \frac{1,24}{\lambda(\mu m)}$$

A Tabela abaixo mostra alguns materiais semicondutores e os respectivos comprimentos de onda no qual ocorre maior absorção de energia. Isto deixa claro a importância de estudarmos os materiais do grupo IV-VI representados principalmente pelos compostos PbTe, SnTe, PbSnTe e PbEuTe. Na Tabela temos que E_g é a largura de banda proibida; a_0 é o parâmetro de rede; $blin$ é o coeficiente

de dilatação térmica linear; r é a massa específica e IP é o comprimento de onda medido em mm onde ocorre a máxima absorção do material.

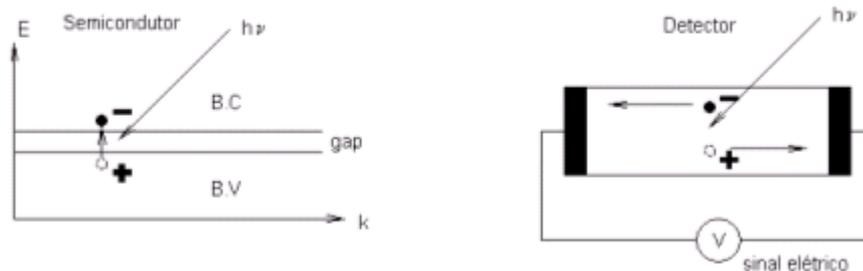


FIGURA 6 – Ilustração do princípio físico de funcionamento de um detector.

Tabela 1 : Constantes físicas à 300K de alguns compostos semicondutores (Excetuando o CdTe, o Si e o SiC, os demais semicondutores são também chamados semicondutores de “gap” estreito – NGS (*Narrow Gap Semiconductor*)).

Composto	E_g (eV)	a_0 (Å)	b_{lin} ($10^6 \cdot K^{-1}$)	r ($g \cdot cm^{-3}$)	l_p (mm)
PbTe	0,319	6,462	19,8	8,16	3,89
PbSe	0,278	6,124	19,4	8,15	4,46
PbS	0,410	5,936	20,3	7,61	3,02
SnTe	0,260	6,300	21,0	6,45	4,77
$Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$	0,20	6,432	20	7,91	6,2
HgTe	0,15	6,463	4	8,976	8,26
CdTe	1,45	6,482	5,5	5,85	0,86
$Hg_{0,8}Cd_{0,2}Te$	0,165	6,4645	4,3	7,63	7,5
Si	1,12	5,431	2,6	2,33	1,1
SiC (fcc)	2,3	4,35	405	3,21	0,54

TABELA 1 – Constantes físicas à 300K

Evidentemente, em termos de detectores de radiação, não basta o material ter um “gap” cuja energia corresponda ao comprimento de onda desejado. Apesar de importante este é apenas um dos critérios. Na construção de um detector, inúmeros outros fatores devem ser levados em consideração como veremos com mais detalhes a seguir.

5. DETECTORES DE INFRAVERMELHO

É fácil notarmos que o termo detector é bastante genérico podendo significar, dentre outras coisas, um filme fotográfico ou um termômetro. Para nossos propósitos, um detector ou sensor de radiação infravermelha é um transdutor de energia eletromagnética, isto é, um dispositivo que converte a energia radiante incidente sobre o mesmo em alguma outra forma conveniente de sinal mensurável, geralmente, um sinal elétrico.

5.1. DETECTORES ELEMENTARES OU PUNTUAIS IMAGEADORES (ARRAYS DE DETECTORES PUNTUAIS).

Um detector elementar também pode fornecer uma imagem desde que seja providenciado algum tipo de varredura (scanners). Isto requer detectores muito rápidos. Por outro lado, quando analisamos o mecanismo físico envolvido no processo de detecção podemos estabelecer duas outras categorias distintas de detectores:

5.2. DETECTORES TÉRMICOS DETECTORES QUÂNTICOS

Além disso, dependendo do material empregado, do mecanismo físico envolvido e da óptica e eletrônica associadas, os detectores cobrem diversas faixas de comprimento de onda. A problemática do custo e da facilidade de operação também desempenham um papel muito importante na seleção de um sistema de detecção para uma determinada aplicação. Na pesquisa e desenvolvimento de detectores, todos esses aspectos precisam ser analisados com bastante cuidado. Nos tópicos que seguem procuraremos detalhar um pouco mais os principais tipos de detectores e sua caracterização. Como a caracterização envolve procedimentos genéricos e aplicáveis a qualquer tipo de sensor vamos abordá-la em primeiro lugar. Voltaremos a tratar dos diversos mecanismos de detecção no item VIII.

6 - CARACTERIZAÇÃO DE DETECTORES

Para facilitar a avaliação do desempenho de um dispositivo e compará-lo com outros similares, emprega-se um conjunto de Figuras de mérito. Estas Figuras provêm de uma convenção internacional e envolvem a medida de diversos parâmetros tais como, os níveis de sinal e de ruído produzidos pelo sensor sob determinadas condições de operação. Desta forma é possível a comparação, qualitativa e quantitativa, entre dispositivos semelhantes. A seguir vamos detalhar todo o processo e condições de medida normalmente utilizados.

Um detector quando iluminado por radiação eletromagnética, responde com um sinal elétrico contínuo (CC) e proporcional à intensidade da luz incidente. Isto ocorre porque, apesar de a radiação incidente ser um sinal alternado, as frequências são muito altas (>100 THz). Estas frequências correspondem a intervalos de tempo

(<10-14s) muito menores que aqueles característicos das transições eletrônicas em um semicondutor, na faixa de 10^{-9} – 10^{-8} s. Além deste problema, dependendo dos níveis de potência da radiação incidente, o sinal elétrico produzido pode ser extremamente baixo, requerendo amplificadores de alto ganho para que se possa processá-los. Esses dois aspectos colocam uma restrição importante no processo de amplificação do sinal detectado. Embora os amplificadores CC sejam perfeitamente factíveis, sabe-se que sofrem de instabilidade devido à flutuações de temperatura, principalmente se o ganho for alto. Além disto, o sinal elétrico produzido por qualquer radiação espúria incidente no detector, seria igualmente amplificado, limitando bastante o uso do sistema.

Se, entretanto, a radiação incidente sobre o detector for modulada em frequências menores que 1GHz, o sinal de saída do detector será também modulado, permitindo a amplificação em modo alternado (CA). Os amplificadores CA são estáveis e não respondem à sinais CC, tornando possível a distinção entre os sinais provenientes do alvo de interesse cujo sinal acha-se modulado, daqueles de fontes espúrias. Além disto, a amplificação CA permite tratar o sinal modulado em uma faixa estreita de frequências, possibilitando otimizar a relação sinal-ruído para a configuração do dispositivo utilizado. Esta forma de detecção com sinal modulado e amplificação sintonizada na frequência de modulação chama-se detecção síncrona. Este processo, além da informação em frequência, possibilita também uma informação de fase entre o sinal e sua referência, ampliando as possibilidades de uso do sistema.

Em termos de caracterização em laboratório, a radiação incidente sobre um detector de infravermelho é fornecida por um corpo negro calibrado, cuja radiação é modulada por uma retícula giratória que, alternadamente, deixa passar ou não a radiação incidente. Essas retículas ou moduladores mecânicos (choppers) permitem a modulação na faixa de frequências de áudio, desde alguns poucos Hz até vários KHz. Em aplicações civis ou militares, o problema de modulação óptica é mais complexo, é pertinente à engenharia de sistemas e extrapola o presente contexto. Todavia, na caracterização de um sensor, a frequência de modulação da radiação incidente é um parâmetro importante, pois afeta tanto o sinal quanto o ruído do dispositivo, devendo ser estabelecida e aferida com bastante cuidado como veremos a seguir.

8. FIGURAS DE MÉRITO

O desempenho de um detector de radiação pode ser avaliado e comparado com sistemas similares através de suas Figuras de mérito. O denominação “Figura de Mérito” diz respeito à um conjunto de parâmetros que devem ser medidos sob determinadas condições convencionadas internacionalmente. As principais Figuras são:

Detetividade – D^* , Responsividade - \hat{A} , Resposta espectral, Tempo de resposta.

O arranjo experimental típico usado para as medidas de D^* e \hat{A} está esquematizado na Figura 6. Nesse arranjo o detector é “iluminado” por um corpo negro cuja radiação é modulada mecanicamente por uma retícula rotatória (Chopper). O sinal produzido pelo dispositivo é medido com um amplificador síncrono (Lock-in Amplifier) com frequência e banda passante ajustáveis.

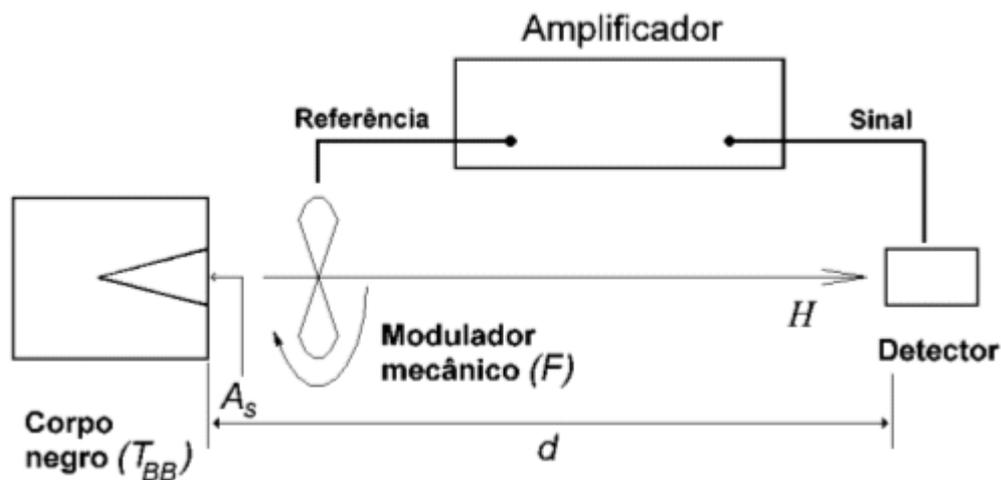


FIGURA 6 – Arranjo experimental típico

O amplificador síncrono, do tipo Lock-in, possui características muito importantes para este tipo de medida. Vamos ver isso com mais detalhes. Os principais módulos do instrumento estão ilustrados no diagrama de blocos da Figura 8. O módulo principal do instrumento é o misturador ou detector síncrono sensível a fase que faz a interconexão dos módulos de entrada, de referência e de saída. O princípio de funcionamento é análogo à detecção heteródina.

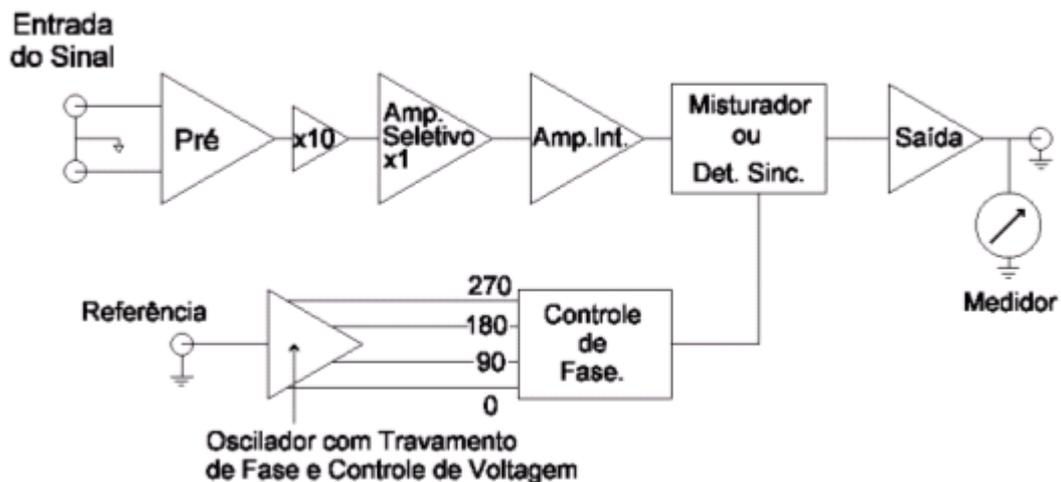


FIGURA 7 - Diagrama de blocos simplificado de um amplificador síncrono sensível a fase.

Vamos acompanhar, grosso modo, a trajetória do sinal no amplificador. O sinal modulado na frequência ω_s , mais o ruído injetados no instrumento, são amplificados nos estágios de entrada, sem que haja qualquer alteração na relação sinal/ruído. A seguir o sinal passa pelo amplificador seletivo, onde um filtro passa banda, com “Q” ajustável e centrado em ω_s , propicia um incremento na relação sinal/ruído. Isto ocorre porque as várias formas de ruído, presentes no experimento e no laboratório, são de banda larga (ruído branco), ou previsíveis, como 60 Hz da rede elétrica, de modo que a limitação da banda passante, centrada em uma frequência apropriada, permite uma certa redução do ruído, neste estágio do processamento do sinal.

Na sequência, o misturador faz a multiplicação eletrônica do sinal, na frequência ω_s , proveniente do amplificador seletivo, com o sinal de referência na frequência ω_r , fornecendo ao estágio de saída, um sinal na forma: $V_m = [V_s \sin(\omega_s t + j_s)] \times [V_r \sin(\omega_r t + j_r)]$, onde $V_{s,r}$ são as amplitudes do sinal e da referência e $j_{s,r}$ as respectivas fases.

O sinal resultante, $V_m = \frac{1}{2} V_s V_r \cos[(\omega_s - \omega_r)t + j_s - j_r] - \frac{1}{2} V_s V_r \cos[(\omega_s + \omega_r)t + j_s + j_r]$, é composto por dois sinais CA, um com a soma das frequências e outro com a diferença. Este sinal é aplicado a um filtro passa baixa, que elimina a componente de alta frequência de forma que, se as frequências do sinal e da referência forem iguais, como é usual, um sinal CC puro, $V_m = \frac{1}{2} V_s V_r \cos(j_s - j_r)$, proporcional ao sinal de entrada, é fornecido ao amplificador CC de saída. Observe que este sinal CC já é

um sinal previamente amplificado e filtrado e, portanto, diferente da situação mencionada anteriormente com relação à amplificação CC.

Voltando ao arranjo da Figura 6, a densidade de potência produzida pelo corpo negro e incidente no sensor é dada pela equação 5 abaixo. Esta equação nada mais é que a equação de Stefan-Boltzman reescrita para uma situação particular. Na equação 5, F é o fator de transferência do modulador mecânico ilustrado na Figura 9; A_s a abertura da cavidade do corpo negro na temperatura T_{BB} e afastado de uma distância d do sensor. s é a constante de Stefa-Boltzman.

$$H = F \sigma T_{BB}^4 \frac{A_s}{\pi \cdot d^2}$$

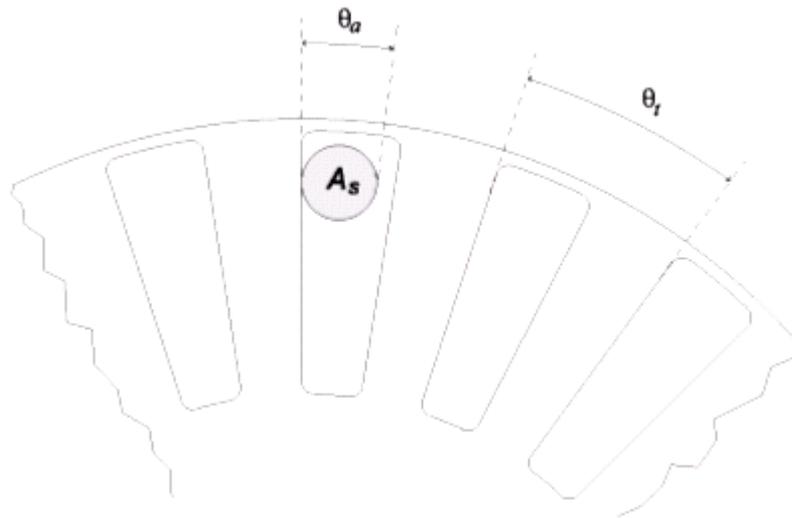


FIGURA. 8 - Ilustração da lâmina reticulada de um modulador mecânico. A relação, $C=qa/qt$, também é expressa em termos do diâmetro (D_c) e número de aberturas (n) da lâmina, pela relação: $C = nDa/[p(Dc-Da)]$, sendo Da o diâmetro da abertura do corpo negro.

O fator F refere-se ao valor rms do sinal modulado. Este fator depende da relação entre a abertura A_s e a abertura da retícula do modulador, como mostra a Figura 9 e Tabela III. Em termos ideais, se a abertura do corpo negro fosse pontual, o sinal modulado seria na forma de uma onda quadrada. Na prática isso não ocorre. No caso de nosso equipamento, por exemplo, o fator é $F=0,294$, e será utilizado para a correção das detetividades e responsividades.

Medindo-se a tensão de sinal, V_S , produzida pela densidade de potência H e a tensão de ruído, V_N , bloqueando-se a radiação incidente no dispositivo, pode-se calcular a detetividade dada pela relação 6.

Tabela II - Fator rms do modulador mecânico.	
$C = q_d/q_t$	F (fator rms)
0 (onda quadrada)	0,450
0,05	0,448
0,08	0,445
0,10	0,442
0,15	0,433
0,20	0,421
0,25	0,405
0,30	0,386
0,40	0,340
0,50 (onda triangular)	0,286

TABELA 2 – Fator rms

$$D^*(T_{BB}, f_0, \Delta f) = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{\Delta f}{A} \frac{V_S}{V_N}} \quad (\text{cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}) \quad [6]$$

Na relação acima, f_0 é a frequência de modulação da radiação incidente, Δf a banda passante do amplificador e A a área sensível do detector. Nesta Figura de mérito é importante controlar e explicitar sempre os parâmetros T_{BB} , f_0 e Δf , ou seja, o resultado final só tem significado se acompanhado dos valores T_{BB} , f_0 e Δf , que representam as condições de medida. T_{BB} define a distribuição espectral da radiação de corpo negro enquanto f_0 e Δf afetam o nível de ruído presente no detector.

A medida do ruído requer alguns cuidados adicionais, já que o amplificador, mesmo com as características acima, sempre introduz algum ruído extra na medida. A correção para este ruído adicional é feita com base nas Figuras de ruído do pré-amplificador, mostrada na Figura 10. Esta correção é feita a partir da própria definição da Figura de ruído, NF , dada por:

$$NF = 20 \log \left(\frac{V_{N,OUT}}{GV_{SN}} \right) \quad [7]$$

Onde: $V_{N,OUT}$ é a tensão rms total de ruído na saída do pré-amplificador; G é o ganho e V_{SN} é a tensão rms de ruído da carga. A razão da tensão de ruído na

saída pelo ganho do amplificador pode ser expressa como uma tensão equivalente de ruído, $V_{EQ, IN}$, na entrada do amplificador. Esta tensão equivalente corresponde ao valor efetivamente medido pelo equipamento de modo que a tensão de ruído da carga é dada por:

$$V_{SN} = \frac{V_{EQ, IN}}{10^{NF/20}} \quad [8]$$

O parâmetro NF, é obtido graficamente da Figura 9 em função da frequência de operação e da resistência do dispositivo, previamente, determinada. Com o valor da tensão de sinal do detector podemos calcular também responsividade do mesmo dada por:

$$\mathcal{R} = \frac{V_S}{HA} \quad (\text{V.W}^{-1}) \quad [9]$$

Observe que, ao contrário da Detetividade, a Responsividade não leva em conta a banda passante do circuito eletrônico, pois não depende do ruído. É uma medida que traduz a eficiência de conversão do dispositivo.

Se a densidade de potência incidente sobre o detector (H) for discreta, isto é, medida em função do comprimento de onda (λ), a detetividade e responsividade acima, passam a representar a Detetividade espectral – DI^* e a Responsividade espectral - $\hat{A}\lambda$, respectivamente. Todavia, a resposta espectral é, normalmente, dada em termos relativos, isto é, trazendo informação apenas da faixa de resposta do dispositivo sem considerar sua sensibilidade ou eficiência.

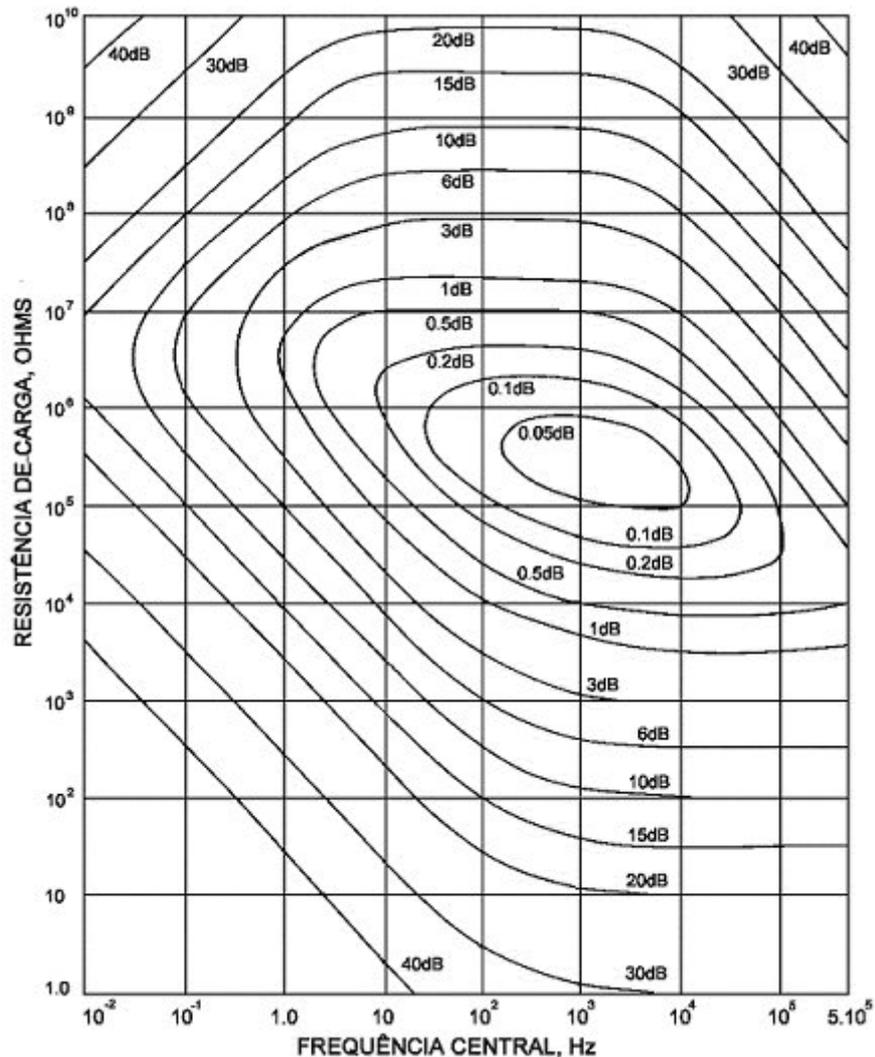


FIGURA 9 - Figuras de ruído do pré-amplificador modelo 116, no modo direto (traduzido do manual).

Para medida da resposta espectral o arranjo experimental é um pouco diferente, como mostrado na Figura 10 a seguir. Entre o modulador e o sensor, é intercalado um monocromador e uma lente para focar a radiação no detector. Devido ao maior número de componentes e aumento do caminho óptico, a radiação incidente sobre o detector fica bastante atenuada, sendo necessário a substituição do corpo negro por uma fonte tipo Globar, mais intensa.

Esta medida requer que em primeiro lugar seja levantada a curva de resposta do sistema fonte-modulador-monocromador-lente, utilizando-se um radiômetro piroelétrico calibrado cujo sinal de saída é independente do comprimento de onda. Em seguida deve-se repetir o mesmo procedimento com o dispositivo em teste, sendo a resposta relativa dada pela razão entre as duas medidas. O sistema pode ser

microcontrolado com uma interface GPIB, permitindo a varredura automática do intervalo de comprimentos de onda desejado.

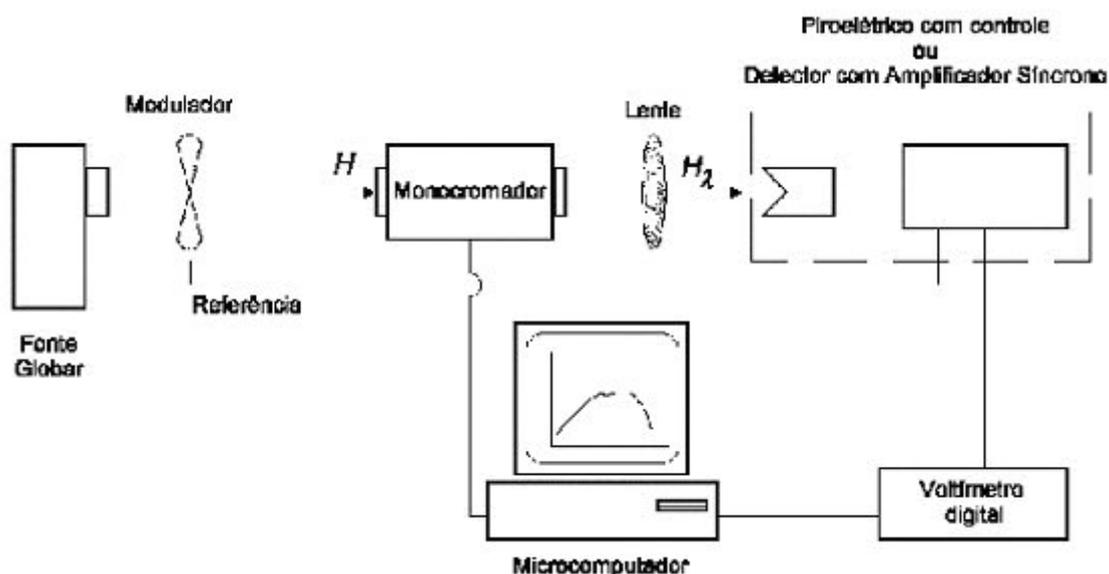


FIGURA 10 - Diagrama da montagem para medidas de resposta espectral relativa.

O monocromador opera com redes de difração adequadas à diferentes faixas de comprimentos de onda. Desta forma, a varredura de todo o intervalo espectral desejado deve ser feita em etapas, utilizando-se diferentes redes e filtros para corte dos harmônicos. A Tabela 3, a seguir, lista as redes e filtros utilizados em nosso laboratório na varredura do intervalo de 0,7 - 7,0 mm, no qual os dispositivos de PbTe são normalmente sensíveis. A Figura 11 mostra as curvas de transmissão dos filtros utilizados e a Figura 12 mostra o espectro da janela de ZnSe de um criostato utilizado para o resfriamento dos detectores fotovoltaicos que serão descritos mais adiante.

Rede de difração	Faixa primária (mm)	Filtro	Varredura (mm)
ORIEL7272 (600 linhas/mm)	0,67 - 1,5	RG695	0,8 - 1,3
ORIEL7273 (300 linhas/mm)	1,33 - 3,0	Si	1,2 - 2,0
ORIEL7273 (300 linhas/mm)	1,33 - 3,0	Ge	1,8 - 3,8
ORIEL7274 (150 linhas/mm)	2,67 - 6,0	ORIEL5793 (*)	3,6 - 6,8

TABELA 3 – Redes e filtros

(*) 65% de transmissão na faixa de 3,8 – 6,5 mm

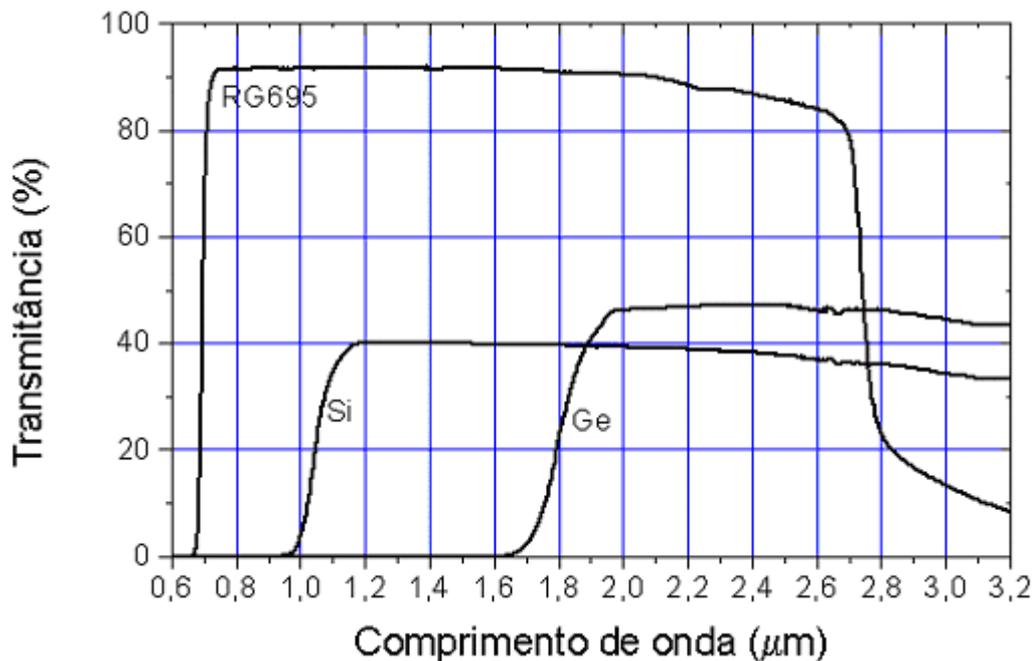


FIGURA. 11 - Espectro de transmissão dos filtros utilizados para corte de 2° harmônica nos subintervalos da Tabela IV.4.

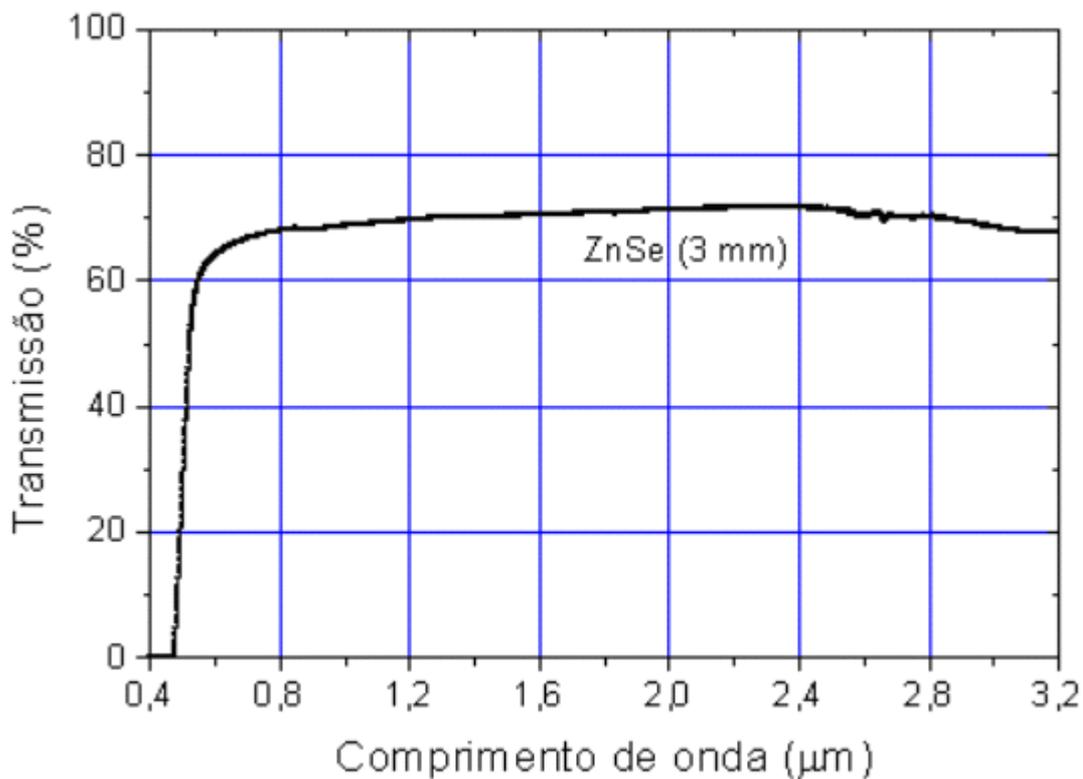


FIGURA 12 - Irradiância típica da Globar 6363M por cada 0,1 cm² de área do emissor, para uma distância de 0,5 m (traduzida do manual).

9. DETECTORES QUÂNTICOS

Estes detectores utilizam a conversão direta dos fótons incidentes em portadores de carga via transição eletrônica em um material semiconductor. Esses dispositivos podem ser construídos e operados sob duas formas diferentes:

9.1. FOTOCODUTOR

Neste caso, os fótons absorvidos acarretam um aumento na população de portadores de carga (elétrons ou buracos) fazendo com que a resistência elétrica do dispositivo diminua. O circuito de operação é análogo ao empregado com um bolômetro, todavia a diferença fundamental é que para transição eletrônica, os tempos de resposta são bem menores que aqueles dependentes do acoplamento e inércia térmica do dispositivo. Uma outra diferença também fundamental é que para os detectores quânticos, principalmente aqueles fabricados com semicondutores de “gap” estreito, a taxa de portadores gerados devido à radiação de fundo na temperatura ambiente é alta, impondo a condição de que para operar, eficientemente, o dispositivo precisa ser resfriado.

9.2. FOTODIODO

Consiste em uma junção p-n, ilustrada na Figura 13, onde ocorre a formação de uma zona de transição entre uma região de material semiconductor cuja condutividade elétrica é dominada por portadores de carga tipo-n (elétrons) e uma região cuja condutividade é dominada por portadores de carga tipo-p (buracos). A largura w e a simetria dessa região, dependem dos processos de fabricação e dos materiais envolvidos. Se a concentração de portadores, elétrons por exemplo, varia lentamente ao longo da distância w relativamente ampla, entre o valor máximo do lado n e o mínimo do lado p, a junção é chamada gradual.

No outro extremo, quando essa variação é brusca e a região w estreita, tem-se uma junção abrupta. A região de transição, também chamada de zona de depleção, é caracterizada pela existência em seu interior de um forte campo elétrico E . Este campo é devido à existência de cargas elétricas fixas na rede cristalina, originadas pela depleção de portadores livres que durante a formação da junção se difundiram para o lado oposto. No equilíbrio, forma-se uma barreira de potencial,

eVB, que impede a difusão continuada de portadores majoritários de um lado para o outro.

Quando os semicondutores dos dois lados da junção são do mesmo material e a zona de depleção é estreita, tem-se uma homojunção p-n abrupta, cujas propriedades físicas são mais facilmente modeladas e formam a base de operação de grande parte dos dispositivos semicondutores. As junções graduais e heterojunções entre materiais diferentes, em termos qualitativos, obedecem aos mesmos princípios fundamentais.

Os principais processos utilizados para a fabricação de junções são implantação iônica de impurezas (dopantes), difusão térmica de impurezas, deposição térmica de filmes finos e técnicas epitaxiais. Dentre as várias técnicas de epitaxia, o crescimento por MBE vem ganhando cada vez maior importância pela sua flexibilidade e facilidade de controle. Quando se cresce epitaxialmente um material tipo-n sobre um substrato do mesmo material, porém com condutividade oposta, obtém-se uma homojunção p-n, cuja largura da zona de depleção depende dos materiais, temperaturas e tempos de crescimento.

No crescimento epitaxial de junções de PbSnTe, em geral obtêm-se junções graduais ($w \approx 1\text{mm}$), devido à interdifusão de Sn, mas usando-se temperaturas e tempos de crescimento não muito altos, é possível a obtenção de junções praticamente abruptas ($w < 0,05\text{mm}$).

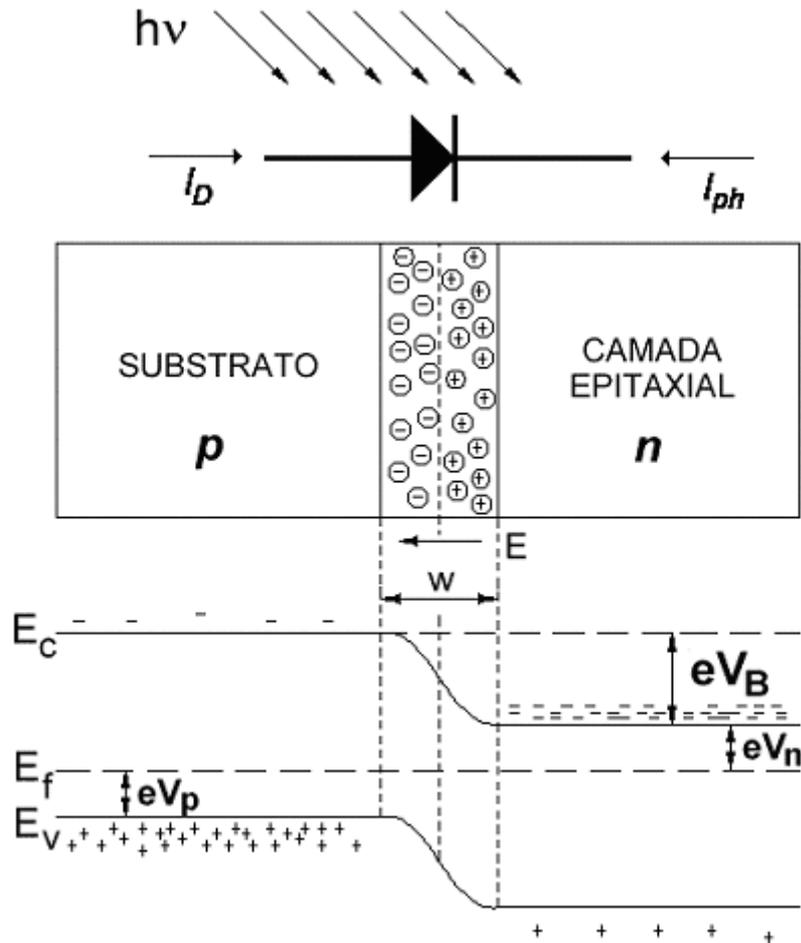


FIGURA 13 - Homojunção p-n e o correspondente diagrama de bandas de energia. I_D representa a corrente direta de portadores majoritários e I_{ph} a fotocorrente de minoritários.

No caso de uma homojunção no equilíbrio, o acoplamento entre as bandas de energia das regiões p e n, ocorre de modo contínuo e determinado apenas pela variação do potencial elétrico dos portadores ao longo da direção perpendicular à junção, de modo que o nível de Fermi, E_f , seja o mesmo nos dois lados. Evidentemente, pressupõe-se que a interface é livre de defeitos e contaminações, sem descontinuidade da rede cristalina. Em termos práticos, nos modernos sistemas de MBE com ambiente de ultra-alto vácuo, as interfaces de homojunções podem se aproximar bastante dessa idealização.

Na Figura 13, E_c e E_v correspondem respectivamente à energia mínima da banda de condução e máxima da banda de valência, sendo a diferença, $E_g = E_c - E_v$, a largura de banda proibida do semiconductor. A energia potencial dos portadores de carga majoritários em relação ao nível de Fermi, E_f , no fundo da banda de condução e no topo da banda de valência, é eV_n e eV_p , respectivamente.

Supondo que um fluxo F de fótons ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) com energia $h\nu > E_g$, incida sobre o dispositivo, propiciando a excitação de pares elétrons-buracos em ambos os lados da junção, os portadores minoritários fotoestimulados à uma certa distância da junção podem, por difusão, atingir a zona de depleção antes de se recombinarem sendo acelerados pelo campo elétrico para o outro lado onde se tornam majoritários. Desta forma cria-se uma corrente de portadores minoritários, chamada fotocorrente I_{ph} , dada por:

$$I_{ph} = \eta e A \Phi \quad [11]$$

$$I = I_s [\exp(eV/k_B T) - 1] \quad [12]$$

onde I é a corrente total na junção ou diodo; I_s a corrente de saturação; V a tensão de polarização; k_B a constante de Boltzman e T a temperatura absoluta. Essa relação pode ser graficamente representada pela curva característica $I \times V$, mostrada na Figura 20 e, embora traduza o comportamento de um diodo ideal, permite a análise e obtenção de uma série de parâmetros importantes de qualquer dispositivo fotovoltaico a junção.

Convém enfatizar que a relação [12], refere-se à corrente líquida total de portadores (majoritários e minoritários) quando a junção está submetida à uma tensão de polarização, enquanto que o efeito fotovoltaico é devido apenas à corrente de portadores minoritários fotogerados, independente de a junção estar polarizada ou não. A fotocorrente desloca a curva de corrente-tensão no sentido reverso, como mostrado na Figura 14. No equilíbrio termodinâmico, sem radiação incidente e sem polarização, a corrente líquida total, para um fotodiodo ideal, é nula, em primeiro lugar porque as taxas de geração e recombinação térmica se igualam e, em segundo, porque as correntes de difusão e de deriva (em sentidos opostos), se equilibram perfeitamente.

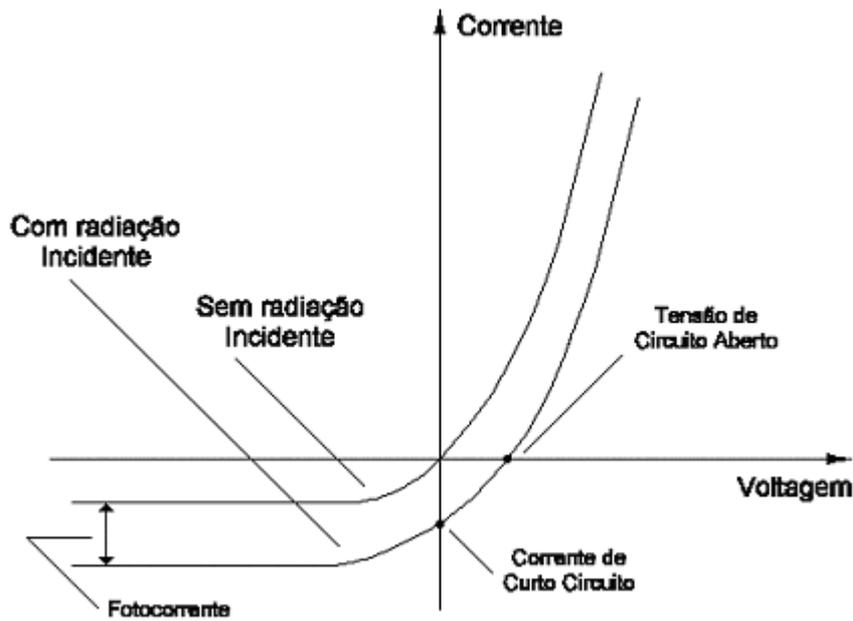


FIGURA 14 - Curva característica $I \times V$ de um fotodiodo ideal iluminado e não iluminado.

Em termos de circuito equivalente, um fotodiodo pode ser representado como no diagrama simplificado da Figura 15.

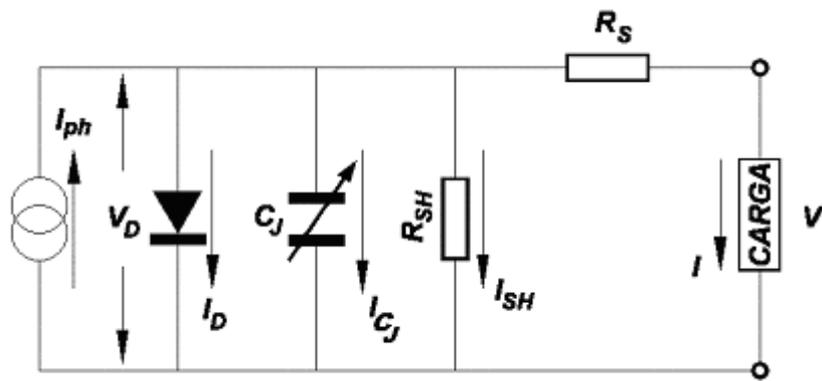


FIGURA. 15 - Circuito equivalente de um fotodiodo, onde a corrente I_D é dada pela equação IV.2 e I_{SH} corresponde à uma corrente de fuga sobre uma resistência paralela (shunt) ao diodo.

A partir da expressão [11] para a fotocorrente e da lei de Ohm, lembrando que a energia do fóton é dada por hc/λ , podemos escrever a Responsividade Espectral pode ser escrita como:

$$\mathcal{R}_\lambda = \frac{e\lambda}{hc} \eta R_o$$

[13]

com a qual pode-se determinar a eficiência quântica, h , do dispositivo. Analogamente, supondo-se que a tensão de ruído, V_N , seja devida apenas ao ruído térmico ou Johnson, que veremos logo a seguir, a Detetividade Espectral pode ser dada por:

$$D_\lambda^* = \frac{e\eta\lambda}{hc} \left(\frac{R_o A}{k_B T} \right)^{1/2}$$

[14]]

Percebe-se nesta expressão [14] que o produto da resistência dinâmica pela área sensível, $R_o A$, pode ser considerado também uma Figura de mérito do dispositivo, já que a detetividade é diretamente proporcional à raiz quadrada deste produto.

LASER

Mauro Disner Girardi

1. INTRODUÇÃO

Na física à medicina, da indústria ao comércio, da computação ao entretenimento, não há hoje atividade humana em que essa inovação não tenha uma aplicação. Embora suas aplicações sejam importantes, o estudo do laser em si está longe de ser concluído. Entender esse fenômeno é papel de uma das mais ativas áreas da investigação científica deste início de século.

Hoje, o laser tem uma gama de aplicações que ainda está para ser completamente explorada; quando menos se espera, alguém aparece com uma nova utilidade para essa luz. Assim sendo, antes de discutirmos suas aplicações, vamos conhecer fundamentos do laser.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que seja possível entendermos o funcionamento do laser, é necessário antes de tudo descrever alguns pontos fundamentais, tais como a estrutura atômica e propagação da luz.

Os sábios consideravam que a matéria era composta de uma parte fundamental, para tanto, imaginavam que por mais que esta fosse dividida chegaríamos a um ponto onde isso não seria mais possível.

Para exemplificar este conceito pode-se imaginar um bloco de pedra, de modo que através de sucessivas marteladas obtemos inúmeros fragmentos resultantes do bloco original. Tomamos agora o menor destes fragmentos e prosseguimos da mesma maneira. Chegaremos então em uma porção que não mais pode ser dividida sem que se percam as propriedades básicas do material. Essa porção, os sábios denominaram de átomo.

Esta idéia intrigava os sábios, mas tinha apenas caráter filosófico, contudo, em 1803 o cientista inglês John Dalton deu um caráter científico à idéia do átomo.

A teoria de Dalton esta fundamentada em postulados que se resumem brevemente e estabelecem que “todo átomo é uma minúscula partícula material, indestrutível, mantendo massa e dimensão inalteradas, os átomos podem combinar-se produzindo diferentes espécies de matéria” (BAGNATO, VANDERLEI S, 2001).

Embora tenham sido comprovadas falhas nesta teoria, algumas dessas idéias ainda hoje são aceitas, mas o principal mérito da mesma foi o estímulo para a pesquisa sistemática sobre a natureza do átomo.

O modelo de Dalton “*átomo como uma esfera rígida*” reinou por 93 anos (1804 a 1897), porém já não respondia corretamente à maioria das perguntas relativas a fenômenos que ocorrem na natureza. Entretanto, sabe-se que toda descoberta científica resulta da conjunção de uma série de eventos sucessivos que permitem finalmente o estabelecimento da mesma. Assim, as novas descobertas e postulados sobre a natureza átomo são conseqüências da contribuição de vários cientistas ao longo de décadas, destacando entre eles:

- *W. Crookes*, ao realizar experimentos com tubos de descarga de gás ou tubos de Crookes (1850), resultando na descoberta da natureza elétrica da matéria;

- *J. J. Thomson*, se valendo da descoberta da natureza elétrica da matéria, e das experiências com tubos de Crookes em 1897, demonstrou que os raios catódicos ao se chocarem com o eletrodo de um eletrômetro, este indicaria uma carga negativa, concluindo que, se os raios catódicos comportam-se semelhantemente a um corpo carregado negativamente, eles são cargas de eletricidade negativa transportadas por partículas de matéria e que, tais partículas são encontradas em todos os átomos.

Thomson, então sugeriu que o “átomo seria uma esfera uniforme, carregada positivamente, com um raio de aproximadamente 10^{-8} cm, na qual os elétrons estariam incrustados, semelhante a um pudim de ameixas”;

- *Millikan* (1908), através do experimento da gota de óleo, demonstrado incontestavelmente que a matéria é formada por partículas carregadas eletricamente e capaz de provar que todas as cargas elétricas são múltiplos de uma unidade elementar definida, cujo valor é igual à $1,6 \times 10^{-19}$ C.

- *Ernest Rutherford* (1911) apresentou um novo modelo para o átomo, suas proposições indicavam que “o átomo deveria ser constituído de uma parte central, denominada núcleo, composto de cargas positivas, sendo que ao redor do núcleo os elétrons descreveriam trajetórias circulares mantendo um equilíbrio dinâmico”. A

carga elétrica positiva presente no núcleo se justificava através da neutralidade da matéria, ou seja, o equilíbrio resultante entre cargas positivas e negativas (elétrons). Além disso, este núcleo teria proporções muito pequenas em relação ao tamanho do átomo (de 10.000 a 100.000 vezes maior).

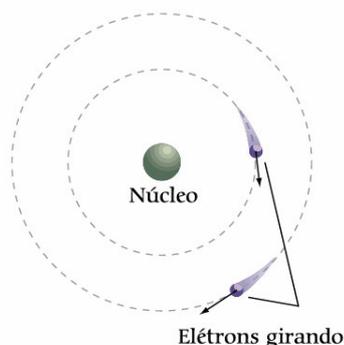


FIGURA 1 – Modelo de Rutherford para o átomo.

Porém, o modelo de Rutherford apresenta uma contradição. Como explica a teoria da eletricidade e do magnetismo, uma carga elétrica em movimento acelerado emite energia. Assim, como os elétrons estão se movendo em torno do núcleo, eles deveriam emitir energia constantemente.

Para compensar a diminuição de sua energia, o raio de sua trajetória diminuiria. Isto significa que os elétrons descreveriam uma trajetória em espiral e, ao término da sua energia, chocariam-se com o núcleo provocando rapidamente um colapso da matéria e conseqüentemente dos átomos.

A justificativa para a energia dos elétrons seria dada pelo físico dinamarquês Niels Bohr.

- Niels Bohr (1913), utilizou as idéias básicas de outro físico, Planck. As proposições feitas por Bohr são conhecidas como seus postulados, e indicados abaixo:

- Os elétrons giram ao redor do núcleo em trajetórias circulares bem definidas e nesse movimento de rotação não há emissão de energia pelos elétrons.
- Quando, de alguma maneira, o elétron passa de uma órbita para outra, ocorre emissão ou absorção de certa quantidade de energia determinada pela expressão $\Delta E = h \cdot f$, onde h é uma constante conhecida como constante de Planck, e f a frequência da radiação.

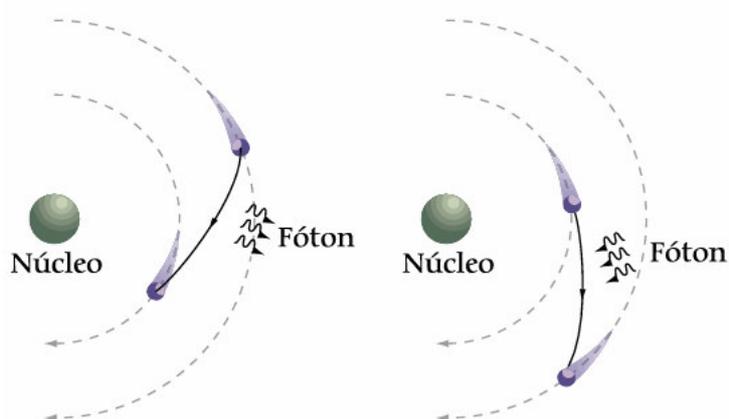


FIGURA 2 – Processos de absorção e emissão de fótons nas transições de órbitas.

Quando o elétron que gira em torno do núcleo salta de uma órbita externa para outra interna, ele emite um fóton de energia e, no processo inverso, ele absorve um fóton de energia (fig.2) Esta mudança de órbita, ou salto, é denominada transição eletrônica.

Toda essa fundamentação a respeito da transição foi baseada em resultados experimentais, tais resultados se devem aos espectros de emissão de certos gases, principalmente do gás hidrogênio.

2.1 A ESPECTROSCOPIA ATÔMICA

A luz solar (branca) é composta por uma mistura de ondas eletromagnéticas de diversos comprimentos de onda do espectro visível. Se a luz branca visível for colimada em um feixe estreito, passando por uma fenda e depois atravessar um prisma, ao se chocar com um anteparo, observa-se um espectro contínuo semelhante a um arco-íris, neste caso as cores vão passando de uma a outra continuamente, temos o chamado espectro contínuo. Este processo é conhecido como espectroscopia.

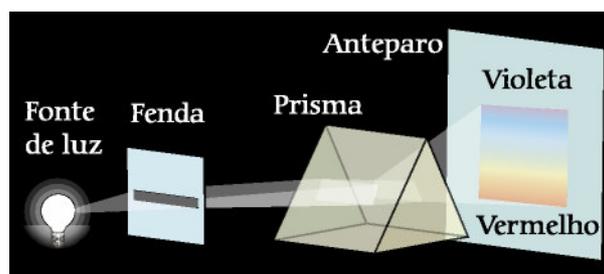


FIGURA 3 – Espectro de emissão de uma lâmpada de luz branca.

Se, ao invés da lâmpada no esquema da Figura 3, for colocada uma ampola de vidro contendo gás hidrogênio a baixa pressão, como mostra a Figura 4, o espectro que aparece no anteparo é de linhas claras e espaçadas, como mostra a Figura 5.

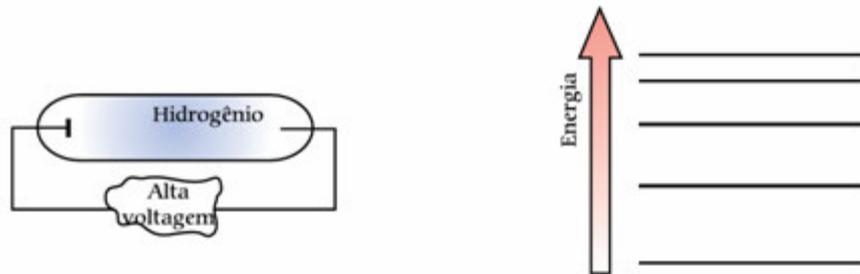


FIGURA 4 e 5 – Ampola de descarga em gás a baixa pressão e Espectro de emissão do gás hidrogênio.

2.2 A QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA

Quando um elétron é promovido a uma órbita mais energética, ou seja, mais distante do núcleo, esta não é a melhor situação para ele, portanto após certo tempo o elétron retorna à órbita inicial. Neste processo de retorno ao nível mais estável há emissão de um fóton, que constitui a radiação que será vista no anteparo da fig.3.

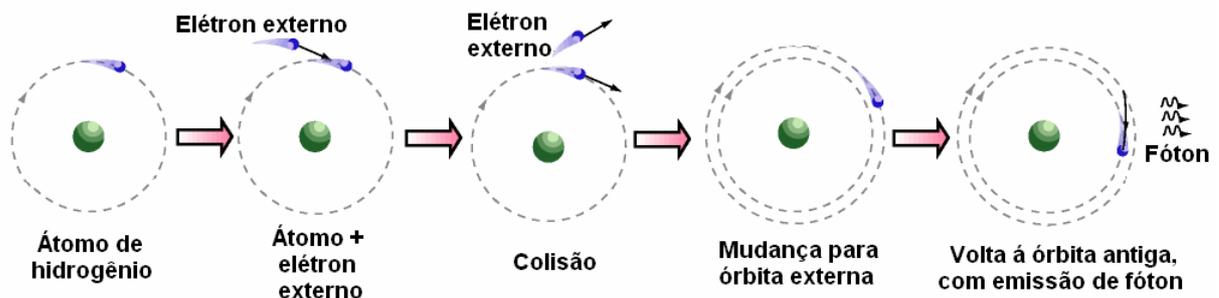


FIGURA 6 – Esquema do processo de emissão de um fóton através da colisão de um elétron externo.

Várias órbitas são possíveis, contudo dependendo da quantidade de energia recebida pelo elétron este “pulará” para uma órbita mais externa ou menos externa. Quanto mais externa for esta órbita, maior energia terá o elétron quando nela estiver. Desta forma, no retorno do elétron ao seu nível fundamental teremos pulos diferentes, que resultara em radiação com diferentes comprimentos de onda, como é observado no espectro do hidrogênio.

Em cada órbita o elétron tem determinada energia. Cada uma será, então, chamada de nível energético, e a ela se atribui um número inteiro ($n = 1, 2, 3, \dots$), chamado número quântico principal. Esse número inteiro n caracteriza a energia que o elétron apresenta quando em uma determinada órbita.

O conceito de quantização da energia foi introduzido por Max Planck, em 1900. Este novo conceito contrariava as leis clássicas da física, e propunha que um sistema mecânico não poderia ter uma energia arbitrária e que somente certos valores definidos de energia seriam permitidos, esta proposta viria a ser a hipótese quântica.

3. A conexão laser/átomo: Emissão estimulada

Vimos que o processo de transferência de um elétron de um nível de mais baixa energia para um nível de mais alta energia pode ser ocasionado pela absorção de um fóton, ou seja, quando é fornecida energia ao átomo causando um desequilíbrio, no entanto sabemos que a tendência do elétron é retornar ao seu nível de mais baixa energia, ocasionando um processo de emissão espontânea de um fóton pelo sistema atômico.

Porém, um terceiro processo pode ocorrer no sistema atômico, tão importante quanto os dois anteriores. Este processo foi denominado de *emissão estimulada*, e consiste na análise de um átomo no estado excitado (WESCHLER, MATTHEW).

Esse elétron excitado apresenta uma forte tendência em retornar ao nível de mais baixa energia. Porém, sozinho, esse processo é relativamente demorado para acontecer, podendo, no entanto, ser acelerado por um agente externo.

O agente externo provoca de forma mais rápida o salto para um nível energético menor é outro fóton. Assim, um fóton externo estimula o decaimento do elétron excitado e este, ao passar para o estado de mais baixa energia, emite um fóton que emerge do sistema juntamente com aquele que causou a transição. Desse modo, na emissão estimulada, o causador do efeito sai intacto e o fóton gerado é o seu irmão gêmeo. A representação deste processo não espontâneo é exemplificado na Figura 7.

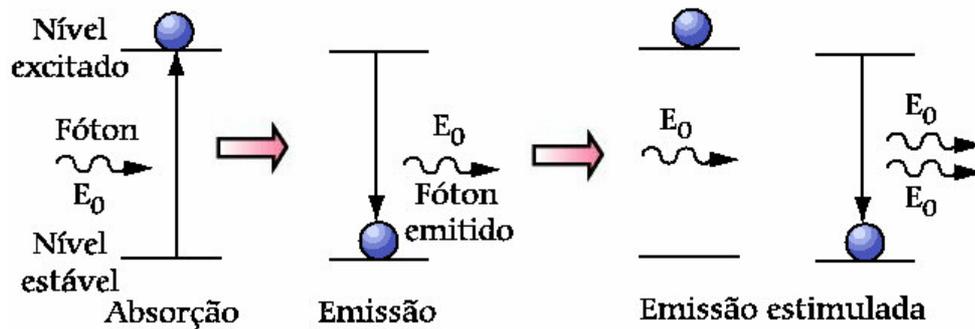


FIGURA 7 – Esquema do processo de emissão estimulada.

Os dois fótons que emergiram da emissão estimulada vão perturbar outros átomos com elétrons em seus estados excitados, havendo emissão de mais fótons que se juntam aos iniciais.

Assim, a luz do laser provém da emissão estimulada que ocorre quando elétrons decaem de seus níveis energéticos de forma não espontânea, produzindo um feixe de luz onde todas as pequenas porções (fótons) comportam-se identicamente.

3.1 AMPLIFICAÇÃO DA EMISSÃO ESTIMULADA

Para aumentar o número de interações os fótons que emergem do sistema são novamente jogados sobre os átomos por meio do uso de espelhos, estes são colocados em cada extremidade da amostra. Desta forma maior será o número de fótons emitidos através do processo de emissão estimulada, aumentando a quantidade de luz que sairá do sistema.

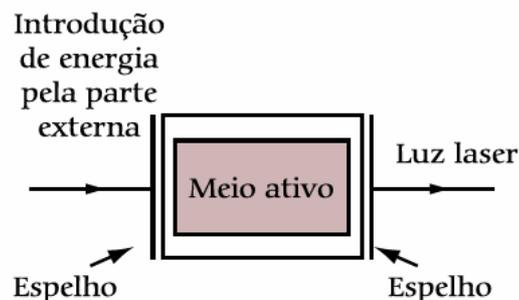


FIGURA 8 – Esquema simplificado das partes que constituem um laser.

Após vários passos, os fótons que se movimentam através do meio que forma o laser constituirão um feixe que apresenta uma intensidade considerável,

A saída de uma fração dessa luz é propiciada através de uma abertura em um dos espelhos permitindo que continuamente a luz produzida deixe o sistema.

3.2 ETAPAS NA PRODUÇÃO DA LUZ NO LASER

Para exemplificar as etapas da produção de luz no laser vamos utilizar Figuras, nelas adotaremos: círculos vazios como sendo átomos no estado fundamental e círculos cheios como sendo átomos com estados excitados.

Assim sendo, inicialmente temos um meio ativo com seus átomos no estado fundamental, este meio se encontra conectado a uma fonte externa de energia, que pode ser uma bateria, outro laser, etc.

A fonte externa de energia deixa a maioria dos átomos em seus estados excitados, criando o que se chama de uma inversão de população. A emissão espontânea de um fóton por um desses átomos adiciona mais luz à porção já existente fazendo com que ocorra reflexão dos fótons nos espelhos da cavidade.

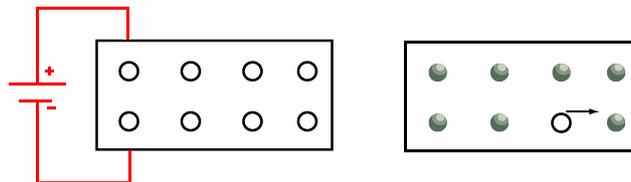


FIGURA 9 – Esquema simplificado das etapas da produção de luz no laser.

Esta reflexão ocasiona mais emissões estimuladas, até que todos os átomos tenham decaído ao estado fundamental. Essa é a máxima quantidade de luz que pode ser extraída desse meio. Uma porção dessa luz emerge do sistema, constituindo o feixe da luz laser.

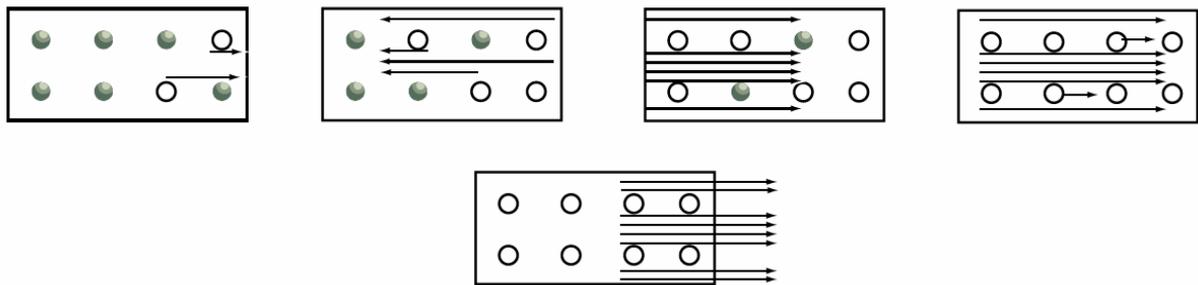


FIGURA 10 – Esquema simplificado das etapas da produção de luz no laser.

Este processo ocorre de forma muito rápida e contínua o que faz com que a luz emergente seja um feixe contínuo e não interrompido.

4. CARACTERÍSTICAS DA LUZ LASER

Após a inversão de população ter ocorrido, produzindo a excitação dos elétrons com ajuda de uma fonte externa, o decaimento espontâneo de um dos átomos para o estado fundamental começa a provocar a emissão estimulada dos demais átomos e, conseqüentemente, produz luz. Somente a luz que se propaga ao longo do eixo principal do laser é que vai sofrer as várias reflexões no interior da cavidade ressonante, fazendo com que haja a formação de um feixe de luz.

As principais características desse feixe emergente são as seguintes (BAGNATO, VANDERLEI S.):

- a luz laser é monocromática, já que a energia carregada pelo fóton estimulante e pelo fóton emitido são as mesmas. Portanto, se verificarmos o espectro da luz laser, veremos apenas uma linha, mostrando que ela é composta de apenas um comprimento de onda (fig.11).
- a intensidade do feixe laser pode ser extremamente grande, ao contrário das fontes de luz convencionais. Sua potência pode atingir ordens de tera watt (10^{12} W). Essas grandes intensidades ocorrem em lasers pulsados, onde a energia acumulada em longo tempo é emitida toda em um intervalo de tempo muito pequeno, da ordem de 10^{-12} s.
- caráter direcional do feixe laser. Fótons emitidos inclinados com relação ao eixo central não contribuirão para o feixe de laser final. O feixe

resultante, que é constituído de ondas caminhando na mesma direção, é bastante estreito; ou seja, todo feixe propaga-se na mesma direção, havendo um mínimo de dispersão. Essa característica é extremamente importante para uma série de aplicações em comunicação, na indústria, na eletrônica etc.

- coerência da luz produzida. Ou seja, os trens de onda têm todos a mesma direção e o mesmo comprimento de onda.



Figura 11 – Espectro contínuo da luz visível e espectro discreto do laser.

5. CONSTRUÇÃO DO LASER

Um laser consiste principalmente de 3 partes. A primeira parte é o chamado meio ativo, que pode ser gasoso, sólido ou líquido. Essa parte do laser é a que contém os átomos ou moléculas, as quais contêm os elétrons que, através dos saltos de níveis de energia emitem luz (fótons), que finalmente constituirão a luz laser.

De um modo geral, um sistema constitui um bom meio ativo quando os elétrons conseguem permanecer um tempo relativamente longo (10^{-4} s) em um estado excitado (normalmente um elétron permanece apenas 10^{-10} s no nível excitado).

Sabemos que a energia do fóton emitido está relacionada com seu comprimento de onda ($\Delta E = h \cdot f$). Assim, quando queremos construir um laser que emita luz com determinado comprimento de onda, deveremos escolher um meio que apresente átomos com elétrons em níveis cujo espaçamento tenha justamente a energia do feixe de luz que desejamos obter.

Antes de iniciar-se a ação do laser, é preciso que tenhamos a maioria dos átomos com elétrons em seus estados excitados, assim sendo, para que os elétrons saltem para seus níveis mais energéticos, é preciso fornecer energia.

Esse é o trabalho de uma fonte externa de energia, que é a segunda parte principal do laser. A fonte terá a obrigação de produzir estados excitados, a fim de que nos decaimentos haja produção de luz. Ela atua no meio ativo, muitas vezes emitindo fótons sobre ele, e isso faz com que um grande número de átomos fique no estado excitado.

A terceira parte importante do laser é a cavidade ótica ou ressonador. Sua função é justamente a de fazer com que os fótons que emergem do sistema voltem para ele, produzindo mais e mais emissão estimulada. Isso é feito por meio de espelhos que são colocados nas extremidades dessa cavidade e provocam a reflexão dos fótons de volta à amostra.

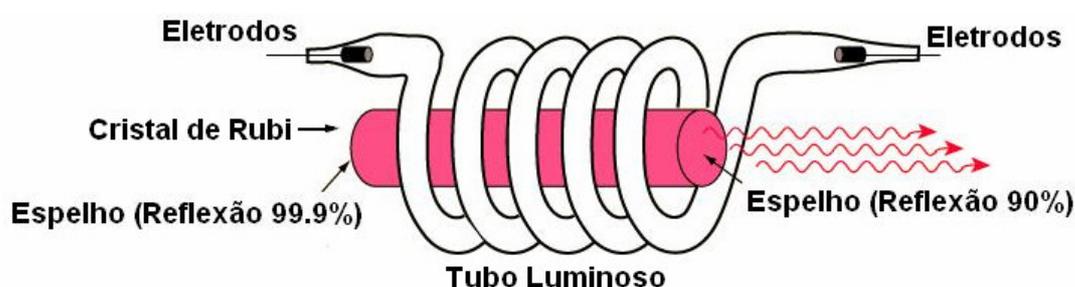


Figura 12 – Esquemática do Laser de Rubi.

5.1 FUNCIONAMENTO DO LASER

O bastão de rubi é cercado por um tubo luminoso contendo xenônio ou outro gás adequado. Quando uma pulsação de eletricidade passa pelo tubo luminoso, o gás se ioniza e brilha por instantes. Essa luz é absorvida por átomos de cromo no cristal de rubi, levando os elétrons que se encontravam no estado fundamental para o estado metaestável (<http://br.geocities.com/saladefisica/laser>)

Em seguida segue-se o disparo. Há várias formas pelas quais o sistema pode ser acionado, mas supondo que o sistema seja abandonado em repouso, basta que um só dos átomos excitados decaia, para desencadear todo o processo de emissão. As radiações, em virtude dos espelhos, são continuamente refletidas de um lado para o outro, criando um conjunto de ondas estacionárias ao longo do cristal e varrendo toda a sua extensão, o sistema volta ao estado fundamental. A luz produzida, por sua vez, escapa pouco a pouco através do espelho semitransparente.

5.2 ESPECIFICAÇÕES DO LASER

O comprimento de onda (λ) da luz emitida depende do material utilizado no tubo luminoso, do sistema óptico e da forma de energizá-lo.

Observações:

- 1) λ é o comprimento de onda dado em nanômetros;
- 2) IV significa infravermelho e UV, ultravioleta;
- 3) "Excimer" significa "excited dimer", ou seja, um dímero (composto formado pela união de duas moléculas de um monômero) excitado;
- 4) YAG é do inglês "Yttrium Aluminum Garnet" (cristal de ítrio e alumínio);
- 5) YLF é do inglês "Yttrium Lithium Fluoride" (fluoreto de ítrio e lítio). Os elementos citados na Tabela são dopados nesses cristais.

Lasers a cristal	Cor	λ (nm)
Alexandrita	IV	700 a 815
Cromo safira	Vermelho	694
Érbio (vidro)	IV	1540
Érbio (YAG)	IV	2940
Hólmio (YAG)	IV	2100
Hólmio (YLF)	IV	2060
Neodímio (YAG)	IV	1064
Neodímio dobrado (YAG)	Verde	532
Titânio-Safira	IV	840 a 1100

TABELA 1.1 – Laser a cristal.

FONTE: <http://www.mspc.eng.br/elettrn/laser110.shtml>

Lasers a gás	Cor	λ (nm)
Argônio	Azul	488
Idem	Verde	514
Criptônio	Amarelo	568
Criptônio	Azul	476
Criptônio	Verde	528
Criptônio	Vermelho	647
Dióxido de carbono	IV	10600
Fluoreto de hidrogênio	IV	2700
Hélio-Cádmio	Violeta	441
Hélio-Cádmio	UV	325
Hélio-Neônio	Amarelo	594
Hélio-Neônio	Laranja	612
Hélio-Neônio	Verde	543
Hélio-Neônio	Vermelho	633

Hélio-Neônio	IV	1152
Hélio-Neônio	IV	3390
Nitrogênio	UV	337
Xenônio	branco	vários
Laser a gás "Excimer"	Cor	λ (nm)
Cloreto de criptônio	UV	222
Cloreto de xenônio	UV	308
Fluoreto de argônio	UV	193
Fluoreto de criptônio	UV	248
Fluoreto de xenônio	UV	351
Laser a líquido	Cor	λ (nm)
Coumarin C30	verde	504
Rhodamine 6G	IV	570 a 650
Laser a semiconductor	Cor	λ (nm)
Arseniato de gálio (usado em leitores de CDs)	IV	840
Arseniato de gálio e alumínio (usados em impressoras)	IV	670 a 830
Fosfato arseniato de gálio (usados em telecomunicações)	IV	1300
Laser a vapor metálico	Cor	λ (nm)
Cobre	Amarelo	570
Idem	Verde	510
Ouro	vermelho	627

TABELA 1.5 – Laser a vapor metálico.
 FONTE: <http://www.mspsc.eng.br/elettrn/laser110.shtml>

6. LASER DE RUBI

O primeiro laser foi criado em 1961 por Theodore Maiman no Hughes Research Laboratories. Ele usava uma vareta de rubi sintético, este material possui estrutura cristalina semelhante à de um corindo, ou seja, um cristal de óxido de alumínio (Al_2O_3) em que a pequena parte de átomos de alumínio (cerca de 0,05%) é substituído por íons Cr^{++} .

O rubi é iluminado por um impulso de luz intensa, o que é gerado por uma lâmpada xénon helicoidal. As extremidades da barras de rubi são altamente polidas e prateadas de maneira que possam servir como espelhos.

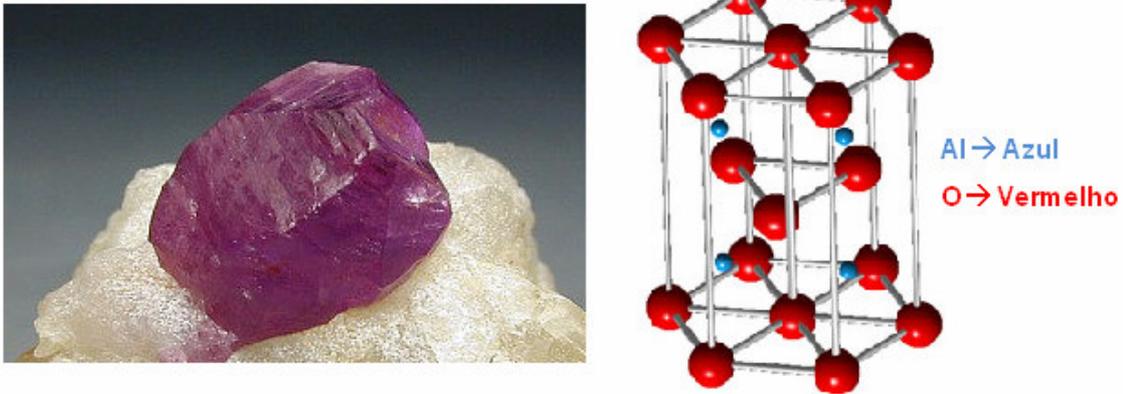


Figura 13 – Cristal de óxido de alumínio (Al_2O_3).

7. O LASER E O FUTURO

7.1 NAVE DE LUZ PROPULSIONADA A LASER

Foguetes propulsionados a luz lembram alguma coisa relativa à ficção científica - uma nave espacial que passeia no espaço sobre um feixe de laser, que precisa de pouco ou nenhum propelente a bordo e não cria poluição. Isso parece bastante artificial, considerando que não conseguimos desenvolver nada que chegasse perto disso na Terra para viagens convencionais, tanto terrestres quanto aéreas. Mas, mesmo que isso só vá acontecer dentro de 15 a 30 anos, os princípios por trás da nave de luz já foram testados com êxito várias vezes. Uma empresa chamada Lightcraft Technologies continua a refinar a pesquisa que começou no Rensselaer Polytechnic Institute em Troy, N.Y.

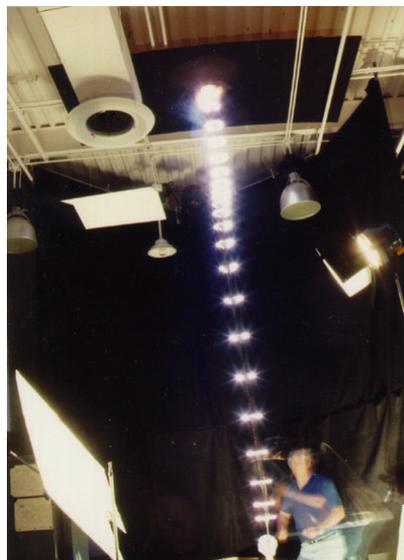


FIGURA 14 – Nave de luz com propulsão a laser.

A idéia básica da nave de luz é usar espelhos para receber e focalizar o feixe de laser incidente para aquecer o ar, o qual explode para impelir a nave (BONSOR, KEVIN).

Antes do lançamento, um jato de ar comprimido é usado para girar a nave de luz a aproximadamente 10.000 revoluções por minuto (RPMs). O giro é necessário para estabilizar o artefato giroscopicamente. Quando o giro é aplicado a essa nave extremamente leve, ele faz que ela atravesse o ar com maior estabilidade.

Quando a nave de luz está girando a uma velocidade adequada, o laser é ligado, impulsionando a nave no ar. O laser de 10 kW pulsa a uma taxa de 25-28 vezes por segundo. Pulsando, o laser continua a empurrar a nave para cima. O feixe de luz é focalizado pelo espelho parabólico no fundo da nave de luz, aquecendo o ar entre 9.982 e 29.982°C - várias vezes mais quente do que a superfície do [Sol](#). Quando se aquece o ar a essas temperaturas altas, ele é convertido em um estado de plasma - esse plasma, então, explode para propulsionar a nave para cima.

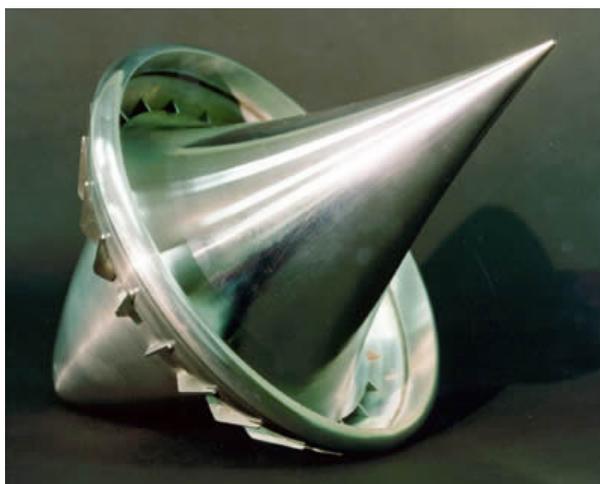


FIGURA 15 – Modelo experimental de nave de luz movida a laser.

7.2 laser transforma grafite em diamante por um instante

Um flash de luz pode alterar temporariamente a estrutura do grafite. Uma equipe de pesquisadores, que acaba de publicar um artigo a respeito em uma das mais importantes revistas de Física do mundo, descobriu que - pelo menos por um breve momento - a exposição à luz altera as ligações químicas no grafite para formar uma estrutura similar à do diamante (WOFSEY, 2008).



Figura 16 – Alotropia do carbono.

A equipe iluminou um alvo de grafite com pulsos de 45 fento segundos de duração de um laser emitindo luz na faixa do infravermelho próximo. Em sincronia com os pulsos de luz foram feitos disparos de um feixe de elétrons que permitiu aos cientistas detectar a posição dos átomos utilizando a técnica de difração de elétrons.

Os átomos de grafite normalmente ligam-se em camadas bidimensionais separadas entre si por uma distância de 0,34 nanômetro, contendo apenas ligações fracas entre as camadas. Mas os pesquisadores viram uma grande quantidade dos átomos nas camadas mais superiores ajustarem-se brevemente em uma camada separada por apenas 0,19 nanômetro de sua vizinha mais próxima.

Combinando essa observação com outras análises de difração e simulações computadorizadas, eles concluíram que, num intervalo de 14 picossegundos após a aplicação do pulso de laser, muitos átomos formaram ligações intercamadas em vários aspectos similares às existentes no diamante. 30 picossegundos depois, essas ligações desapareceram retornando novamente a estrutura inicial do grafite.

8. CONCLUSÃO

As propriedades do laser fazem dele um dos instrumentos de maior aplicabilidade em nosso cotidiano. Por isso, há quem diga que o laser é a solução à procura de problemas.

Entretanto o desenvolvimento de tipos de laser depende de se encontrar materiais que possam favorecer a inversão de população. O primeiro material usado foi o rubi sintético e é esse que se discute aqui, porém muitos outros materiais podem ser usados, como a mistura dos gases hélio e neônio e certos corantes líquidos. A escolha depende da aplicação que se deseja obter, e entende-se que a

potência do laser está intimamente ligada a atividade para a qual o mesmo será utilizado.

Cabe ressaltar a aplicação do laser na medicina, em todas as suas especialidades. Isto é observado pela disseminação de seu uso pelos médicos, que procuram assegurar aos seus pacientes as mais avançadas tecnologias, levando à diminuição dos riscos de infecção, cauterização simultânea e precisão.

10.REFERÊNCIAS

RESNIK, R. D.; HALLIDAY. **Fundamentos de Física**. Rio de Janeiro: LTC, 1996. V. 4

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

CALLISTER Jr., W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**, LTC, RJ, 2006.

SMITH, W. F. **Princípio de ciência e engenharia de materiais**. 3. ed. Lisboa: McGraw-Hill, 1998.

BAGNATO, VANDERLEI S. **Os fundamentos do laser**. Disponível em: < www.sbfisica.org.br/fne/Vol2/Num2/a02.pdf > Acesso em: 17 mar. 2009.

BAGNATO, VANDERLEI S. **O magnífico laser**. Disponível em: < www.sbfisica.org.br/fne/Vol2/Num2/a02.pdf > Acesso em: 17 mar. 2009.

WESCHLER, MATTHEW. **Como funciona o laser**. Disponível em: < <http://ciencia.hsw.uol.com.br/laser3.htm>> Acesso em: 17 mar. 2009.

WESCHLER, MATTHEW. **A conexão laser/átomo**. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/laser3.htm>> Acesso em: 17 mar. 2009.

WESCHLER, MATTHEW . **Laser de rubi**. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/laser5.htm>> Acesso em: 17 mar. 2009.

HEXAFLUORETO DE ENXOFRE (SF₆)

Evandro Junior Rodrigues

1. INTRODUÇÃO

A utilização mais comum para SF₆, tanto a nível interno e internacional, é como um isolante elétrico em alta tensão equipamento que transmite e distribui energia elétrica. Desde a década de 1950 os E.U. elétricas indústria tem utilizado amplamente em SF₆ disjuntores, gás-isolados subestações, comutadores e outros utilizados no sistema de transmissão para gerenciar a alta tensão desenvolvidas entre geradores e estações cliente centros de carga.

Vários fatores afetam SF₆ emissões a partir de sistemas de energia elétrica, tais como o tipo e idade do SF₆ contendo material (por exemplo, disjuntores velho podem conter até 2.000 kg de SF₆, ao mesmo tempo moderno disjuntores contêm geralmente inferior a 100 libras), e a manipulação e manutenção procedimentos praticados pela eletricidade. Por causa de sua longa vida e alta PAG potência, até mesmo uma relativamente pequena quantidade de SF₆ pode ter um impacto significativo sobre o nosso clima.

O SF₆ Emission Reduction A parceria é um dos APE é voluntário da indústria programas destinados a reduzir emissões de gases de estufa. O principal objectivo da parceria é reduzir as emissões através do SF₆ custo-eficácia tecnologias e práticas. Através de melhorias na taxa de fuga de novos equipamentos, reparação de equipamentos mais antigos, assim como o uso mais eficiente de operação e manutenção técnicas, utilitários frequentemente encontrar soluções econômicas para reduzir emissões de SF₆.

2. UTILIZAÇÃO

SF₆ é usado como um isolante de gás nas subestações, como um isolante e refrigeração médio em transformadores e como um isolante e arco quenching médio em comutadores de alta e média tensão aplicações. Estes são todos os sistemas fechados, que são extremamente seguro e com poucas probabilidades de fuga. Em sistemas de energia elétrica, de alta e média tensão Comutadores é necessário para cortar a energia em caso de uma falha, a fim de proteger pessoas e equipamentos. Quando o poder está ligado, um arco elétrico entre o circuito greves-breaker

contactos. Breakers preenchido com SF₆ são isolante e um controlo eficaz sobre arcos. Gás isoladas subestações são encontrados principalmente em zonas urbanas, onde quer que eles ocupam pouco espaço como possível e, muitas vezes, integrá-las em edifícios. Estas subestações reduzir o campo magnético e remover completamente o campo eléctrico. Esta é uma real vantagem para os instaladores, mantenedores e as pessoas que vivem na proximidade de subestações. SF₆ também é utilizado em outras formas. Misturado com argônio, ele pode ser usado em janelas isoladas. SF₆ é utilizado na indústria de metais, por exemplo, quando vazamento magnésio. Olho cirurgiões utilização SF₆ como um agente arrefecimento nas operações. SF₆ também pode ser utilizada como um agente extintor de incêndio, porque é não-inflamável e de frio. Nas aplicações eléctricas, SF₆ só é usado em sistemas fechados e seguros, que em circunstâncias normais não vazamento de gás. SF₆ é recolhido e reciclado se uma peça de equipamento ou de uma subestação deve ser aberto.

Disjuntores de alta tensão preenchido com SF₆ são capazes de fazer face à unidade de tensão mais elevada do que qualquer outra técnica. Portanto, SF₆ disjuntores exigem menos quebrar unidades em série que o ar ou óleo-cheia demolidores. SF₆ disjuntores de média tensão têm vantagens consideráveis em comparação com as alternativas. SF₆ subestações pode ser totalmente construído como sistemas fechados que oferecem os mais elevados níveis de segurança operacional e do usuário. Os desenhos requerem pouco material; SF₆ todos os aparelhos são compactos. Comparado com aparelhos eléctricos, sem SF₆, o impacto ambiental é baixo.

Especialmente se você levar em consideração todos os impactos ambientais "do berço ao túmulo", ou seja, desde o fabrico, instalação, operação e manutenção todo o caminho até final demolição (quando demolição equipamento, todos os SF₆ é recuperada). Então SF₆ tem muitas vantagens importantes enquanto actualmente disponíveis alternativas representar um regresso à tecnologia mais antiga e inferior. Sem SF₆, teríamos um maior impacto sobre o meio ambiente como as alternativas requerem mais espaço, são menos seguros e afectar o ambiente mais para instaladores, pessoal de serviço e as pessoas que vivem na área. Comparado aos desenhos e modelos que não usam SF₆, o impacto sobre o ambiente é baixa. Sem SF₆, teríamos menos um ambiente de trabalho seguro para instalação, operação e de serviço pessoal.

SF₆ é um gás que, entre outras coisas, é utilizado em equipamentos elétricos. O gás é muito estável e muito eficaz para isolamento elétrico e é totalmente inofensivo para o ambiente. SF₆ é utilizado em equipamentos elétricos em todo o mundo; SF₆ contribui para garantir que o consumidor recebe eletricidade segura e barata. É a estabilidade do SF₆ que o torna tão útil nos aparelhos elétricos. Isso significa também que a estabilidade SF₆, quando libertados, poderia contribuir para o efeito estufa. Mas muito pouco é liberada assim que o contributo para o efeito estufa é extremamente baixo. Os cálculos mostram que a SF₆ contribui menos de 0,1 por cento para o total efeito estufa. Não deve haver dúvidas de que a ABB é uma empresa amiga do ambiente, que assume a responsabilidade pelos seus produtos e do ambiente - por isso é que é política da ABB para cuidar de todos os SF₆ durante a concepção, manutenção e demolição de SF₆ cheia equipamento.

3. BENEFÍCIOS

Existem duas razões para a utilização de SF₆ em equipamentos elétricos: SF₆ oferece excelente isolamento elétrico e muito eficaz quenches arcos elétricos. Estas propriedades de SF₆ tornar possível construir equipamentos elétricos e aparelhos que são compactos, utilize uma pequena quantidade de material, são seguros e irá durar um longo tempo. Na pressão atmosférica normal, SF₆ tenha um dielétrico resistir a capacidade que é de 2,5 vezes melhor do que o ar. Normalmente, o gás é usado em 3-5 vezes a pressão atmosférica e, em seguida, as propriedades dielétricas são dez vezes melhor do que a do ar. SF₆ isola bem porque é fortemente eletronegative. Isto significa que as moléculas de gás livre capturar elétrons e íons negativos construção pesada, que não se movem rapidamente. Esta é eficaz contra a criação de electrões avalanches que podem levar à flashovers. SF₆ efetivamente controla circuito-breaker arcos porque tem excelentes propriedades arrefecimento a temperaturas (1500-5000 K) em que os arcos extinguir (o gás utiliza energia quando se dissocia e, portanto, produz um efeito arrefecimento). Comutadores de alta tensão com SF₆ é, em princípio, por si só sobre o mercado e o volume de média tensão Comutadores com SF₆ é grande. Complete com isolamento gasoso subestações, GIS ou URM, são utilizados sempre que o espaço é limitado ou o ambiente é grave. Eles são praticamente isentos de manutenção. O equipamento elétrico preenchido com SF₆ foi em uso por cerca de 40 anos de serviço e experiência é muito boa. SF₆ tem uma elevada capacidade de resistir dielétrico. SF₆

eficazmente quenches arcos em disjuntores. -SF₆ aparelho é compacto e praticamente livre de manutenção. -SF₆ equipamento é extremamente segura em funcionamento e para os usuários.

4. PERIGOS DO SF₆

Desde que entrou em SF₆ uso, quase 50 anos atrás, uma pequena quantidade de gás tenha vazado para a atmosfera. Atualmente, zona ronda 0,000'000'000'003 partes (por volume) de SF₆ na atmosfera. A estabilidade dos gases que ele vai permanecer na atmosfera por um longo tempo. Alguns gases que são liberados destroem a camada de ozônio. Emagrecimento da camada do ozônio significa que mais luz ultravioleta pode chegar ao solo, aumentando o risco de cancro da pele. Os gases que afetam a camada de ozônio, todos contêm cloro. SF₆ não contém qualquer cloro e não afeta a camada de ozônio. O termo "efeito estufa" é utilizado para descrever a atmosfera que se aquecer lentamente devido a emissões antropogênicas de gases. Algumas moléculas do gás na atmosfera, principalmente dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄) reflectem longo comprimento de onda da radiação de calor proveniente da terra de modo que o calor permanece preso na atmosfera em vez de desaparecer no espaço exterior. A molécula SF₆ é muito reflexivo e contribui para o efeito de estufa. Mas a concentração do gás é extremamente baixa (0,000'000'000'003 por volume). Isto significa que a contribuição do SF₆ para o efeito estufa é muito pouco, menos de 0,1 por cento do total efeito. Isto deve ser comparada com o dióxido de carbono CO₂, que contribui com cerca de 60%. SF₆ não destroem a camada de ozônio. A contribuição de SF₆ para o efeito de estufa é inferior a 0,1 por cento do total que a humanidade gera.

Apesar do fato de o gás SF₆ ser muito estável, ele será parcialmente decomposto em associação com descargas elétricas e arcos, por exemplo, em um disjuntor. Em seguida, gases e sólidos são produzidos da decomposição. Normalmente, o nível de produtos gasosos da decomposição é mantido através da utilização de baixos absorvedores construídos em comutadores. Em grandes concentrações, os produtos de decomposição são corrosivos e tóxicos. Portanto, existem rotinas estabelecidas para o serviço ao abrir SF₆ em equipamentos para manutenção ou demolição. Os produtos sólidos da decomposição são principalmente fluoretos metálicos sob a forma de um pó fino cinzento. O pó só

aparece quando, por exemplo, utilizados disjuntores. O pó pode ser facilmente manuseado para separar dos resíduos. Os produtos de decomposição são reativos, o que significa que eles irão decompor rapidamente e desaparecem sem qualquer efeito em longo prazo sobre o ambiente. A ABB utiliza SF₆ unicamente em recipientes de sistemas hermeticamente fechados. Isso significa que o gás é constante para toda a vida útil do equipamento, não há necessidade de abrir o equipamento para manutenção e o gás não pode escapar. ABB se compromete a demolição dos equipamentos antigos, incluindo o tratamento e reciclagem do gás SF₆. Em SF₆, comutadores criam produtos da decomposição - podem ser tratados de forma segura e são inofensivos para o ambiente. Todo gás SF₆ é recolhido e reciclado. Aparelhos de gás são muito apertados e em funcionamento normal apenas uma pequena quantidade do gás pode vazar para fora. O gás é monitorado continuamente, e qualquer fuga seria descoberta numa fase precoce. Aparelho de SF₆ não precisa de muita manutenção. No caso raro de um aparelho cheio de gás, uma secção do aparelho precisa ser aberta, o gás é então bombeado para um recipiente. Após filtração, o gás pode ser usado novamente e recolocado no aparelho. Há também equipamentos que nos permitem lidar com grandes quantidades de gás (subestações GIS) e também em pequenas quantidades, por exemplo, em disjuntores únicos. SF₆ contaminados podem ser limpos por um fornecedor de gás e utilizados novamente. Se o gás não tiver mais utilidade nenhuma, pode ser destruído por aquecimento em conjunto com calcário em um forno de temperatura elevada. Neste processo, está sendo transformado em produtos naturais ambientalmente inofensivos e não tóxicos, como o gesso. É política da ABB que gás SF₆ não deve ser liberado na atmosfera. Isto se aplica a cada vez que um aparelho que utiliza SF₆ passe por manutenção ou seja eliminado. SF₆ podem ser limpos e usados novamente. SF₆ pode ser facilmente destruído. OPA da política é que não deverá ser liberado gás SF₆ quando o equipamento é construído, sofre manutenção ou é desmantelado.

5. EMISSÕES

A energia elétrica industrial utiliza cerca de 80% de todos os SF₆ produzidos em todo o mundo. Idealmente, nenhuma quantia deste gás poderá ser emitido para a atmosfera. No envelhecimento dos equipamentos ocorrem fugas de gás e perdas também ocorrem durante a manutenção do equipamento. Com um potencial de

aquecimento global 23.900 vezes superior ao CO₂ e de uma vida atmosférica de 3200 anos, uma libra de SF₆ tem o mesmo impacto do aquecimento global de 11 mil toneladas de CO₂. Em 2002, emissões de SF₆ provenientes da indústria de energia elétrica foram estimados em 14,9 Tg CO

5.1 CONTRIBUIÇÃO DO SF₆ PARA ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS GLOBAIS

SF₆ é o mais potente gás do efeito de estufa conhecido até a data. Durante um período de 100 anos, SF₆ é 23.900 vezes mais eficaz na captura a radiação infravermelha do que uma quantidade equivalente de dióxido de carbono (CO₂). SF₆ também é um produto químico muito estável, com uma vida atmosférica de 3.200 anos. Como o gás é emitido, se acumula na atmosfera em um estado essencialmente não-degradado por muitos séculos. Assim, uma relativamente pequena quantidade de SF₆ pode ter um impacto significativo sobre as alterações climáticas globais.

6. SOLUÇÃO

Todas as empresas devem desenvolver uma estratégia de redução das emissões de SF₆. O primeiro passo é desenvolver um inventário dos equipamentos usando SF₆ e a estimativa atual de emissões. A EPA prevê uma ferramenta de fácil utilização, para facilitar este processo. O segundo passo é desenvolver e programar uma empresa de dimensão política para a gestão da taxa de fuga de corrente e equipamentos para garantir o bom andamento do SF₆.

7. UTILIZAÇÃO DO SF₆ NA INDÚSTRIA DE ENERGIA

SF₆ é um não-perigoso, gás inerte que é usado tanto como um arco e quenching isolante no meio de comutadores de alta tensão, disjuntores e subestações de gás isolado. Equipamento de SF₆ isolado é predominantemente utilizado no sistema de transmissão que gera a alta tensão desenvolvida entre as estações geradoras de carga e de clientes centres. O maior uso de SF₆ ocorre em disjuntores de alta tensão. Aqui, além de proporcionar isolamento, o SF₆ é usado para resfriar o arco formado quando energizado um disjuntor já aberto.

Interruptores utilizam SF₆, principalmente, para o isolamento e, individualmente, disjuntor que contem apenas um pouco menos de SF₆. Estes

dispositivos são utilizados para isolar porções do sistema de transmissão que atualmente seu fluxo foi interrompido (utilizando um disjuntor). Aparelhos de isolamento das subestações também podem utilizar uma quantidade significativa de SF₆. Instalações em casas de disjuntores isolados de SF₆, Barras coletoras, e equipamentos de vigilância.

Vários fatores afetam emissões SF₆ de equipamentos elétricos, tais como o tipo e idade dos equipamentos contendo SF₆ (por exemplo, disjuntores mais velhos podem conter até 2.000 kg de SF₆, enquanto os disjuntores mais modernos contêm menos de 100 libras), e os protocolos de manuseio e manutenção utilizados.

8. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA O TRABALHO COM SF₆

Unidade de recuperação de gás SF₆:

- Unidade de recuperação de gás conveniente, portátil.
- Extremamente fácil de operar.
- Ideal pra consolidar garrafas parcialmente usadas.
- Purifica, seca e filtra o gás SF₆ até 0.1 micron durante a recuperação e re-enchimento dos frascos.



FIGURA 1 – Unidade de recuperação de gás SF₆

Sistema de transferência de gás SF₆:

- Solução de baixo custo para recuperação de gás SF₆.

- Pequeno, portátil e fácil de usar.
- O indicador de umidade exclusivo muda de cor pra indicar a secura do gás SF₆.



FIGURA 2 – Sistema de transferência de gás

- Liquefação do gás SF₆ a alta pressão.
Carro de distribuição de gás SF₆:
- Linha feita sob medida com capacidades de armazenamento de até 4.000 libras (1.800 quilogramas).
- Opções de compressor incluem compressor sem uso de óleo ou normal.
- Disponível com operação inteiramente automática ou manual.
- Ideal para maiores disjuntores de circuitos.



FIGURA 3 – Carro de distribuição de gás SF₆

Tanque de armazenamento de gás SF₆:

- Tamanhos para servir cada necessidade, até 4.000 libras (1.800 quilogramas).
- Os tanques são certificados pela ASME.
- Unidades estacionárias ou móveis disponíveis.

- O interior é revestido especialmente pra impedir corrosão.



FIGURA 4 – Tanque de armazenamento de gás SF₆

Acessórios para gás SF₆:

Uma grande variedade de acessórios para gás SF₆ existe disponível, inclusive detetores de escape de gás, filtros-purificadores, calefatos de frascos e vestes para eliminação de gás.



FIGURA 5 – Exemplos de acessórios para gás SF₆