

**MATERIAIS ELÉTRICOS: COMPÊNDIO DE TRABALHOS****VOLUME 3****SUMÁRIO**

ENERGIA EÓLICA: AEROGERADORES E MATERIAIS EMPREGADOS - Juliano Yudi Izumi.....	234
ENERGIA SOLAR: MATERIAIS UTILIZADOS - Dabit Gustavo Sonoda .....	248
MATERIAIS UTILIZADOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM USINAS TERMOELÉTRICAS - Humberto José de Oliveira Alencar.....	261
MATERIAIS UTILIZADOS EM GERADORES DE HIDRELÉTRICAS - Bruno Rafael Gris .	291
PÁRA-RAIOS - Hugo Eiji Imai.....	308
ESTUDO DA FIBRA ÓTICA: MATERIAL COM APLICAÇÃO NO SETOR ELÉTRICO - Wagner André Geroletti .....	320

## **ENERGIA EÓLICA: AEROGERADORES E MATERIAIS EMPREGADOS**

Juliano Yudi Izumi

### **1. INTRODUÇÃO**

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cataventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento de água.

Da mesma maneira que a energia hidráulica, a energia eólica é utilizada a milhares de anos, mas para a geração de energia elétrica, as primeiras tentativas datam do final do século XIX, mas somente na década de 70, com a crise internacional do petróleo, é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial.

### **2. INFORMAÇÕES GERAIS**

A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca, onde esse tipo de energia representa 23% da produção do país.

No Brasil este tipo de energia é bastante utilizada para o bombeamento de água na irrigação, e quase não existem usinas eólicas produtoras de energia elétrica. O primeiro projeto de geração foi desenvolvido em Pernambuco, na ilha de Fernando de Noronha, para garantir o fornecimento de energia para ilha que antes só contava com um gerador movido a diesel. Até o final de 2007 a capacidade de produção Brasileira era de 247 MW.

Apesar de quase todo o território nacional possuir boas condições de vento para instalação de aerogeradores infelizmente existem poucas áreas exploradas, como é o caso de Mucuripe (Fortaleza – CE), Prainha (CE) e os maiores, Parque eólico de Osório (RS), com 150 MW de produção e o Parque eólico de Rio do Fogo (RN), produzindo 49,3MW.

**TABELA 1 – Energia eólica no Mundo**

Pais	Alemanha	EUA	Espanha	Índia	China	Dinamarca	Itália	França	Reino Unido	Portugal	Resto do Mundo
<b>MW</b>	22.247	16.818	15.145	8.000	6.050	3.125	2.726	2.454	2.389	2.150	13.019
<b>%</b>	23,6	17,9	16,1	8,5	6,4	3,3	2,9	2,6	2,5	2,3	13,8

**TABELA 2 – Energia eólica no Brasil**

PARQUES EÓLICOS	LOCAÇÃO	MW	Quantidade de Turbinas	Capacidade turbinas	Tipo	Em operação
<b>BRASIL</b>						
OSÓRIO: Sangradouro, Osorio, Dos Índios	Rio Grande do Sul	150	75	2	E - 70	2006
Rio Do Fogo	Rio Grande do Norte	49,6	62	0,8	E - 48	2006
Água Doce	Santa Catarina	9	15	0,6	E - 40	2006
Horizonte	Santa Catarina	4,8	8	0,6	E - 40	2003
Bom Jardim da Serra	Santa Catarina	0,6	1	0,6	E - 40	2002
Central Eólica Experimental do Morro do Camelinho	Minas Gerais	1	4	0,25		1994
Taíba	Ceará	5	10	0,5		1998
Prainha	Ceará	10	20	0,5		1999
Mucuripe	Fortaleza, Ceará	2,4	4	0,6	E-40	2002
Palmas	Paraná	2,5	5	0,5		2000
Macau	Rio Grande do Norte	1,8	3	0,6	E - 40	2004
Olinda	Pernambuco	0,3	1	0,3		
Eólica de Fernando de Noronha	Pernambuco	0,225	2			

### 3. PARQUES EÓLICOS

Para que a produção de energia elétrica seja rentável, é necessário o posicionamento de vários aerogeradores num mesmo espaço, esta concentração é chamada de Parque eólico.

Apesar da energia eólica ser uma energia limpa e renovável, esta ainda apresenta alguns problemas a serem considerados antes da instalação de um novo parque eólico. Nas proximidades dos parques é detectada poluição sonora, devido ao ruído produzido. Há também quem considere a poluição visual gerada. Os pontos apropriados para a instalação dos parques muitas vezes coincidem com rotas de aves migratórias, e a escolha desses pontos depende unicamente do “tipo de vento” encontrado.

Tecnicamente, para que a energia eólica seja aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W por metro quadrado a uma altura de 50m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s (GRUBB; MEYER, 1993). Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície terrestre o vento apresenta estas características e a proporção varia muito entre regiões e continentes, chegando a 32% na Europa Ocidental.

Mesmo assim, estima-se que o potencial eólico bruto mundial seja da ordem de 500.000 TWh por ano, porém, devido a restrições socioambientais, apenas 53.000 TWh (cerca de 10%) são considerados tecnicamente aproveitáveis, vide tabelas abaixo.

**TABELA 3** – Distribuição da área de cada continente segundo a velocidade média do vento

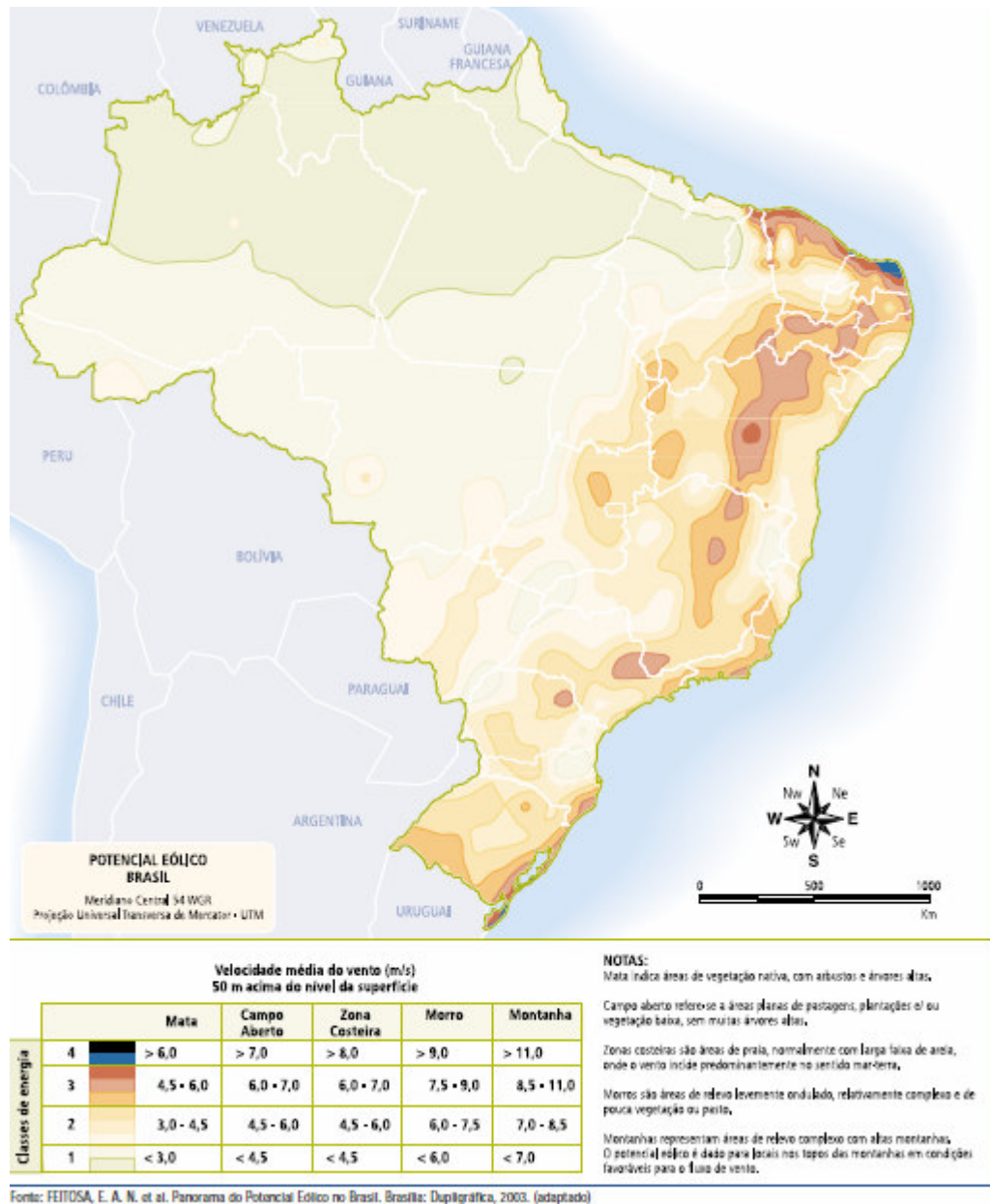
Região/Continente	Distribuição da área de cada continente segundo a velocidade média do vento					
	Velocidade do Vento (m/s) a 50 m de Altura					
	6,4 a 7,0		7,0 a 7,5		7,5 a 11,9	
	(10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	(%)	(10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	(%)	(10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	(%)
África	3.750	12	3.350	11	200	1
Austrália	850	8	400	4	550	5
América do Norte	2.550	12	1.750	8	3.350	15
América Latina	1.400	8	850	5	950	5
Europa Ocidental	345	8,6	416	10	371	22
Europa Ocidental & ex-URSS	3.377	15	2.260	10	1.146	5
Ásia (excluindo ex-URSS)	1.550	6	450	2	200	5
Mundo	13.650	10	9.550	7	8.350	6

Fonte: GRUBB, M. J; MEYER, N. I. Wind energy: resources, systems and regional strategies. In: JO-HANSSON, T. B. et. al. Renewable energy: sources for fuels and electricity. Washington, D.C.: Island Press, 1993. p.

Fonte: GRUBB, M. J; MEYER, N. I. Wind energy: resources, systems and regional strategies. In: JO-HANSSON, T. B. et. AL. Renewable enegy: sources for fuels and electricity. Washington, D.C.: Island Press, 1993.p.

**TABELA 4** – Estimativas do potencial eólico mundial

Estimativas do potencial eólico mundial				
Região	Porcentagem de Terra Ocupada*	Potencial Bruto (TWh/ano)	Densidade Demográfica (hab/km <sup>2</sup> )	Potencial Líquido (TWh/ano)
África	24	106.000	20	10.600
Austrália	17	30.000	2	3.000
América do Norte	35	139.000	15	14.000
América Latina	18	54.000	15	5.400
Europa Ocidental	42	31.400	102	4.800
Europa Ocidental & ex-URSS	29	106.000	13	10.600
Ásia (excluindo ex-URSS)	9	32.000	100	4.900
Mundo**	23	498.400	-	53.000



**FIGURA 1 – Panorama do Potencial Eólico no Brasil**

**FONTE:** FEITOSA E. A. N. et al. Panorama do Potencial Eólico no Brasil. Brasília: Dupligráfica, 2003.(adaptado)

#### 4. VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO NO BRASIL

No Brasil, estima-se que o potencial eólico chegue a 60.000 MW, mas surgem muitas divergências decorrentes de falta de informações sobre superfície e diferentes metodologias empregadas.

Independente da metodologia empregada, os dados obtidos nos estudos são organizados referindo-se à velocidade média do vento a 50m acima da superfície

para 5 condições topográficas distintas: zona costeira – áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente do sentido mar-terra; campo aberto – áreas planas de pastagens, plantações e/ou vegetação baixa sem muitas árvores altas; mata – áreas de vegetação nativa com arbustos e árvores altas mas de baixa densidade, tipo de terreno que causa mais obstruções ao fluxo de vento; morro – áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo, com pouca vegetação ou pasto; montanha – áreas de relevo complexo, com altas montanhas.

**TABELA 5 – Definição das classes de energia**

Definição das classes de energia										
Classe	Mata		Campo aberto		Zona costeira		Morros		Montanhas	
	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )
4	> 6	> 200	> 7	> 300	> 8	> 480	> 9	> 700	> 11	> 1250
3	4,5 – 6	80 - 200	6 – 7	200 - 300	6,5 - 8	250 - 480	7,5 – 9	380 – 700	8,5 – 11	650 – 1250
2	3 – 4,5	25 - 80	4,5 – 6	80 - 200	5 – 6,5	100 - 250	6 – 7,5	200 – 380	7 – 8,5	300 - 650
1	< 3	< 25	< 4,5	< 80	< 5	< 100	< 6	< 200	< 7	< 300

Fonte: FEITOSA, E. A. N. et al. Panorama do Potencial Eólico no Brasil. Brasília: Dupligráfica, 2003.

Fonte: FEITOSA E. A. N. et al. Panorama do Potencial Eólico no Brasil. Brasília: Dupligráfica, 2003.

De acordo com a tabela acima, que trata do panorama do potencial eólico brasileiro, a classe 1 representa regiões de baixo potencial eólico, de pouco ou nenhum interesse para o aproveitamento da energia eólica. A classe 4 corresponde aos melhores locais para aproveitamento dos ventos no Brasil. As classes 2 e 3 podem ou não ser favoráveis, dependendo das condições topográficas. Por exemplo: um local de classe 3 na costa do Nordeste (zona costeira) pode apresentar velocidades médias anuais entre 6,5 e 8 m/s, enquanto que um local de classe 3 no interior do Maranhão (Mata) apresentará apenas valores entre 4,5 e 6m/s.

Os valores encontrados na tabela, e no mapa, foram obtidos nas seguintes condições padrão: altitude igual ao nível do mar, temperatura de 20 °C. A mudança de altitude para 1.000 m acima do nível do mar acarreta uma diminuição de 9% na densidade média de energia e a diminuição de temperatura de 15 °C provoca um aumento de cerca de 2% na densidade de energia média.

## 5. AEROGERADORES

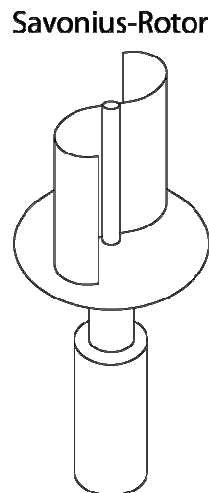
É um gerador elétrico integrado ao eixo de um cata-vento cuja missão é converter energia eólica em energia elétrica.

Existem dois tipos básicos de rotores, os de eixo vertical e os de eixo horizontal. Eles diferem em seu custo relativo de produção, eficiência, e na velocidade do vento em que têm sua maior eficiência.

### 5.1 ROTORES DE EIXO VERTICAL

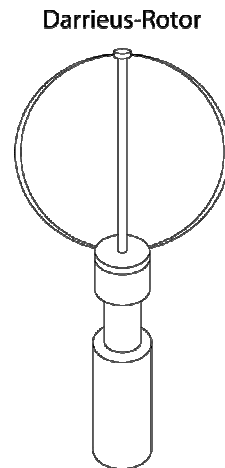
Geralmente são mais baratos que os de eixo horizontal, pois o gerador não gira seguindo a direção do vento, apenas o rotor gira enquanto o gerador fica fixo. No entanto, são menos eficientes que os horizontais.

O rotor tipo Savonius é um dos mais simples, movido principalmente pela força de arrasto do ar, sua maior eficiência se dá em ventos fracos e pode chegar a 20%.



**FIGURA 2** - Rotor de eixo vertical, tipo Savonius

O rotor tipo Darrieus é constituído por 2 ou 3 pás, funciona através da força de sustentação tendo assim eficiência melhor que o rotor Savonius podendo chegar a 40% em ventos fortes.



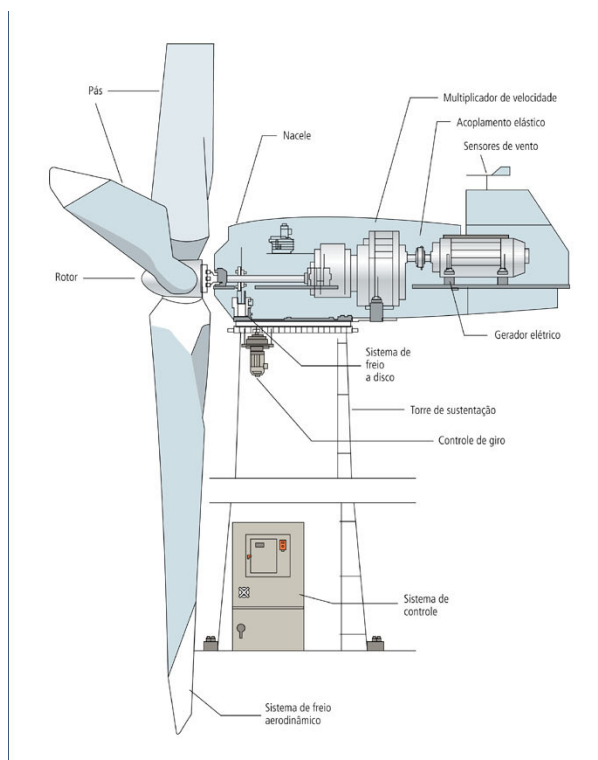
**FIGURA 3** - Rotor de eixo vertical, tipo Darrieus

## 5.2 ROTORES DE EIXO HORIZONTAL

Os rotores de eixo horizontal são os mais conhecidos e utilizados por ter uma eficiência maior que a dos rotores de eixo vertical. Seu maior custo é compensado pela eficiência, fazendo destes os mais utilizados para geração em larga escala.

Existem vários tipos de rotores, variando no número de pás utilizados, mas basicamente funcionam pela força de sustentação, a capacidade de geração é geralmente de 5MW e sua eficiência máxima é atingida em ventos fortes, podendo passar de 45%.





**FIGURA 4 - Rotor de eixo horizontal**

Com o passar do tempo, consolidou-se o projeto de turbinas eólicas com as seguintes características: eixo de rotação horizontal, três pás, alinhamento ativo, gerador de indução e estrutura não-flexível.

Entretanto, algumas características desse projeto ainda geram polêmica, como a utilização ou não do controle de ângulo de passo (pitch) das pás para limitar a potência máxima gerada. A tendência atual é a combinação das duas técnicas de controle de potência (stall e pitch) em pás que podem variar o ângulo de passo para ajustar a potência gerada, sem, contudo, utilizar esse mecanismo continuamente.

Quanto à capacidade de geração elétrica, as primeiras turbinas eólicas desenvolvidas em escala comercial tinham potências nominais entre 10 kW e 50 kW. No início da década de 1990, a potência das máquinas aumentou para a faixa de 100 kW a 300 kW. Em 1995, a maioria dos fabricantes de grandes turbinas ofereciam modelos de 300 kW a 750 kW.

Em 1997, foram introduzidas comercialmente as turbinas eólicas de 1 MW e 1,5 MW, iniciando a geração de máquinas de grande porte. Em 1999 surgiram as primeiras turbinas eólicas de 2MW e hoje existem protótipos de 3,6MW e 4,5MW sendo testados na Espanha e Alemanha. A capacidade média das turbinas eólicas instaladas na Alemanha em 2002 foi de 1,4MW e na Espanha de 850kW.

Atualmente, existem mais de mil turbinas eólicas com potência nominal superior a 1 MW em funcionamento no mundo (BOYLE, 1996; BTM, 2000; WINDPOWER, 2000; WIND FORCE, 2003].

Quanto ao porte, as turbinas podem ser classificadas da seguinte forma: pequenas – potência nominal menor que 500 kW; médias – potência nominal entre 500 kW e 1000 kW; e grandes – potência nominal maior que 1 MW.

A geração de energia elétrica por meio de turbinas eólicas constitui uma alternativa para diversos níveis de demanda. As pequenas centrais podem suprir pequenas localidades distantes da rede, contribuindo para o processo de universalização do atendimento. Quanto às centrais de grande porte, estas têm potencial para atender uma significativa parcela do Sistema Interligado Nacional (SIN) com importantes ganhos: contribuindo para a redução da emissão, pelas usinas térmicas, de poluentes atmosféricos; diminuindo a necessidade da construção de grandes reservatórios; e reduzindo o risco gerado pela sazonalidade hidrológica, à luz da complementaridade citada anteriormente.

Entre os principais impactos socioambientais negativos das usinas eólicas destacam-se os sonoros e os visuais. Os impactos sonoros são devidos ao ruído dos rotores e variam de acordo com as especificações dos equipamentos (ARAÚJO, 1996). Segundo o autor, as turbinas de múltiplas pás são menos eficientes e mais barulhentas que os aerogeradores de hélices de alta velocidade. A fim de evitar transtornos à população vizinha, o nível de ruído das turbinas deve atender às normas e padrões estabelecidos pela legislação vigente.

Os impactos visuais são decorrentes do agrupamento de torres e aerogeradores, principalmente no caso de centrais eólicas com um número considerável de turbinas, também conhecidas como fazendas eólicas.

Os impactos variam muito de acordo com o local das instalações, o arranjo das torres e as especificações das turbinas. Apesar de efeitos negativos, como alterações na paisagem natural, esses impactos tendem a atrair turistas, gerando renda, emprego, arrecadações e promovendo o desenvolvimento regional.

Outro impacto negativo das centrais eólicas é a possibilidade de interferências eletromagnéticas, que podem causar perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão de dados (rádio, televisão etc.) (TAYLOR, 1996). De acordo com este autor, essas interferências variam muito, segundo o local de instalação da usina e suas especificações técnicas, particularmente o material utilizado na fabricação das

pás. Também a possível interferência nas rotas de aves deve ser devidamente considerada nos estudos e relatórios de impactos ambientais (EIA/RIMA).

## 6. MATERIAIS EMPREGADOS

Durante a vida útil esperada de 20 anos, as hélices de um aerogerador podem girar 500 milhões de vezes. Mas ninguém pode esperar tanto para ver se um material é mais resistente que outro.

Construtivamente, as pás podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais. Em particular, pás rígidas de madeira, alumínio, aço, fibra de vidro, fibra de carbono e/ou Kevlar são os mais promissores.

Fibras de vidro: Materiais compostos reforçados com fibra de vidro oferecem boa resistência específica e resistência à fadiga, bem como os custos competitivos para as pás. É o material utilizado em quase todas as pás dos aerogeradores dos parques eólicos da Califórnia ( EUA ), e já foi utilizado em rotores de até 78m de diâmetro. As pás em materiais compostos possibilitam uma geometria aerodinâmica lisa, contínua e precisa. As fibras são colocadas estruturalmente nas principais direções de propagação das tensões quando em operação.

Aço: Os aços estruturais são disponíveis a custo relativamente baixo no mercado interno de alguns países, e há bastante experiência na sua utilização em estruturas aeronáuticas de todos os tamanhos. No entanto, uma desvantagem do aço é que as pás nesse material tendem a ser pesadas, o que acarreta aumentos de peso e custo de toda a estrutura suporte. Pás de aço necessitam de proteção contra a corrosão, para a qual existem diversas alternativas possíveis.

Madeira: Essa fibra natural, que também constitui um material composto, evoluiu ao longo de milhões de anos para suportar cargas de fadiga induzidas pelo vento, que tem muito em comum com aquelas a que são submetidos os rotores de aerogeradores. A madeira é amplamente utilizada no mundo para pás de rotores pequenos ( até 10 m de diâmetro ). O baixo peso da madeira é uma vantagem, mas deve-se cuidar para evitar variações do teor de umidade interna, o que pode causar degradação das propriedades mecânicas e variações dimensionais, que enfraquecem a estrutura das pás e podem causar rompimentos na estrutura.

Alumínio: a maior parte dos aerogeradores do tipo Darrieus usam pás feitas de ligas de alumínio, extrudadas na forma de perfil aerodinâmico. Entretanto, ligas

de alumínio não têm limite inferior de tensão de fadiga, à medida que os ciclos de carregamento são aumentados, e este comportamento sempre tem levantado dúvidas quanto à possibilidade de se atingir a longa vida de 20 anos ou mais para um rotor de alumínio.

Fibra de carbono e/ou Kevlar: são materiais compostos mais avançados, que podem ser utilizados em áreas críticas (longarina da pá, por exemplo), para melhorar a rigidez da estrutura. Tem sido utilizados experimentalmente, mas tais materiais tem preços altos demais para serem utilizados nos aerogeradores economicamente mais competitivos.

A maioria dos rotores modernos tem duas ou três pás. Os projetistas americanos tem escolhido geralmente duas pás com base no argumento de que o custo de duas pás é menor que o de três. Outros, especialmente os dinamarqueses, argumentam que o custo extra da terceira pá é compensado pelo comportamento dinâmico mais suave do rotor de três pás, e que o custo total do aerogerador é virtualmente idêntico quer se usem duas ou três pás. Um rotor de três pás fornece oscilações menores de torque no eixo, o que simplifica a transmissão mecânica.

Se um rotor de duas pás é escolhido - pelo menos para aerogeradores grandes - é usual se ter o rotor articulado, isto é, permitindo uns poucos graus de movimento perpendicular ao eixo de rotação. Com um cubo articulado, cada pá, ao passar pelo topo do círculo de rotação - onde a velocidade do vento é maior devido ao gradiente vertical - move-se um pouco para trás; ao mesmo tempo a outra pá, no curso inferior do círculo de rotação - onde o vento é menor - move-se para frente. Este movimento de articulação alivia significativamente as tensões na raiz das pás, e o conseqüente custo/benefício mais do que compensa pelo custo extra da articulação no cubo. Como o peso próprio das pás introduz cargas cíclicas na raiz (no plano de rotação), e também penaliza a estrutura da torre, as pás devem obedecer ao critério de peso mínimo, resistência à fadiga e rigidez estrutural.

Rotores modernos com mais de três pás são apenas usados quando se necessita de um grande torque de partida, o que é basicamente o caso de bombeamento mecânico de água. Aerodinamicamente, no entanto, grande número de pás e alto torque de partida implicam em menor eficiência. O rotor deve ser fabricado com grande esbeltez, precisão nos perfis aerodinâmicos, bom acabamento superficial, que são requisitos para maximizar a eficiência aerodinâmica.

As pás dos geradores mais modernos chegam a medir 60 metros e pesar mais de 20 toneladas cada uma. Para agüentar os esforços a que são submetidos durante a sua vida útil, são aplicados combinações de fibra de vidro fibra de carbono, resinas e outros materiais. Os cientistas John Mandell e Dan Samborsky, da universidade de Montana tem uma base de dados com mais de 10000 resultados com cerca de 150 diferentes materiais compósitos, estes dados disponíveis na faculdade de Montana.

Dentre as várias possibilidades, as mais utilizadas são poliéster, ou epóxi com fibra de vidro, pois encontra a melhor relação custo / resistência.

Uma resina epóxi ou poliepóxido é um plástico termofixo que se endurece quando se mistura com um agente catalizador, são geralmente produtos de uma reação entre epiclorohidrina e bisfenol-a.

A fibra de vidro é um material compósito produzido basicamente a partir da aglomeração de finíssimos filamentos flexíveis de vidro com resina poliéster (ou outro tipo de resina) e posterior aplicação de uma substancia catalisadora de polimerização. É geralmente altamente resistente, possui excelentes propriedades mecânicas e baixa densidade.

As resinas são compostos orgânicos derivados do petróleo, que passa do estado líquido para o sólido através de um processo chamado polimerização. Os principais tipos são:

- Resina Poliéster Ortoftálica – mais comum e de uso generalizado;
- Resina Poliéster Isoftálica – aplicada em moldes feitos de Fibras de Vidro, em tubulações e piscinas;
- Resina Poliéster Isoftálica com NPG – alta cristalinidade e boa flexibilidade (resistente a temperaturas elevadas, água natural e à manchas);
- Resina Éster Vinílica – Possui alta resistência química e mecânica (impactos), usada na fabricação de equipamentos de fibras de vidro para o combate a corrosão;
- Resina Epóxi Amina – peças estruturais e principalmente em revestimentos para proteção química e de interpéries.

As torres que elevam os rotores a altura desejada, estão sujeitas à inúmeros esforços. Primeiramente forças horizontais devem ser levadas em conta: resistência do rotor ( "drag" ) e da própria torre à força do vento. Em seguida, forças torsionais,

impostas pelo mecanismo de controle de rotação da gávea giratória e esforços verticais (peso do próprio equipamento), não devem ser desprezados.

Quanto ao material, as torres podem ser de aço (em treliças ou tubulares), ou tubulares de concreto. Para aerogeradores menores, é possível a utilização de torres de madeira sobre um poste de eucalipto com estais de aço.

A torre suporta a massa da nacela e das pás; as pás, em rotação, excitam cargas cíclicas no conjunto, com a frequência da rotação e seus múltiplos, e assim uma questão fundamental no projeto da torre é a sua frequência natural, que deve ser desacoplada das excitações para evitar o fenômeno de ressonância, o qual aumenta a amplitude das vibrações e tensões resultantes e reduz a vida em fadiga dos componentes, entre outros efeitos desagradáveis. Logo após 1973, a primeira geração de aerogeradores ditos modernos foi projetada com torres rígidas, com frequências naturais bem acima das forças de rotação do rotor. Entretanto, esse enfoque conduziu a torres desnecessariamente pesadas e caras.

À medida que a compreensão dos problemas dinâmicos de aerogeradores foi aumentando, durante a última década, tornou-se possível aerogeradores mais leves, que são conseqüentemente, menos rígidos, mas também significativamente mais baratos que seus antecessores.

Desde que tenha as suas frequências naturais desacopladas das da excitação do rotor, as torres podem ser estaiadas ou não. De modo geral, as frequências naturais de uma torre estaiada podem ser melhor reguladas variando-se a tensão de estaiamento. Interessante notar que um estaiamento por barras de aço é preferível ao uso de cabos, pois estes são mais elásticos e necessitam de pré-tensões muito maiores do que as que seriam necessárias em barras para atingir a mesma frequência natural, numa mesma configuração.

Um aerogerador moderno constitui uma estrutura esbelta, com a massa das pás em rotação sobre uma torre, excitando cargas cíclicas sobre todo o sistema. Um problema básico do projeto é determinar todos os modos e frequências naturais de vibração dos componentes, em especial pás e torre, para evitar ressonância com as frequências de excitação do rotor em operação.

A ressonância causa aumento das amplitudes de carregamento cíclico no sistema, comprometendo a resistência à fadiga e reduzindo a vida útil prevista para o aerogerador, que é de aproximadamente 20 anos.

Além da questão estrutural, os avanços relacionados com material também visa diminuir o custo da construção, transporte e manutenção de parques eólicos.

## **7. CONCLUSÃO**

Para o futuro podemos esperar geradores muito diferentes dos encontrados hoje, utilização de tecnologias semelhantes ao do trem MagLev, onde o rotor do gerador se encontra sobre ímas permanentes, ou de balões que giram em torno de si mesmos ao invés de terem hélices, e pesquisas envolvendo até biologia, onde a observação de nadadeiras de baleias e golfinhos apresentam características de fluxo que desafiam os conceitos tradicionais de engenharia.

Como foi apresentado, este tipo de energia oferece um grande potencial, garantindo uma relação mais harmoniosa com o meio ambiente, relação essa cada vez mais procurada devido a preocupação, tardia, com o mundo e os impactos que causamos nele. Os primeiros passos foram dados, projetos de governo em todo mundo visam aumentar os estudos e os investimentos sobre este tipo de energia, e toda a comunidade científica, cada vez mais, vem buscando alternativas para se obter mais, com menos danos à natureza.

## ENERGIA SOLAR: MATERIAIS UTILIZADOS

Dabit Gustavo Sonoda

### 1. INTRODUÇÃO

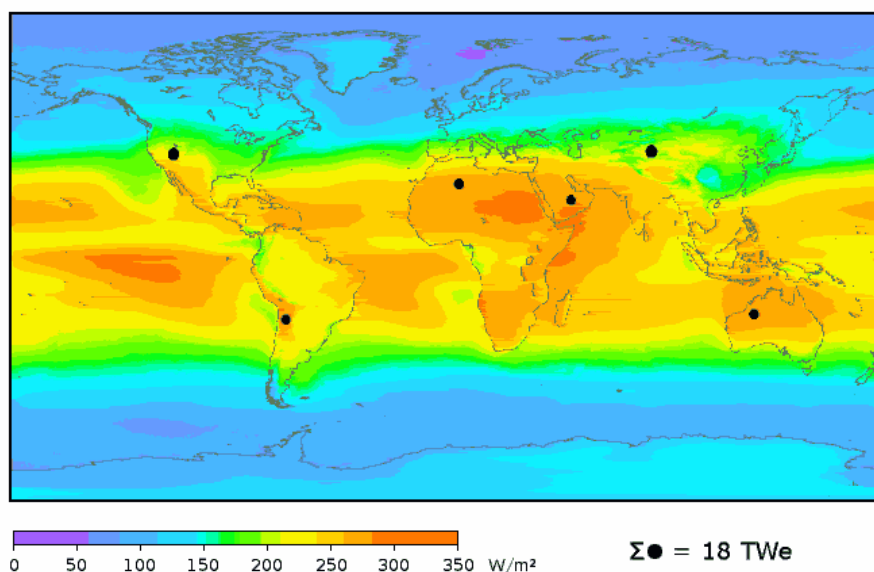
O Sol desempenha um papel fundamental sobre a vida na Terra. Quase todas as fontes de energia conhecidas – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e a energia dos oceanos – são formas indiretas da energia solar. O Sol permite que você leia este artigo, seja pela iluminação direta ou pela eletricidade. A radiação solar pode ser diretamente transformada em energia térmica, para o aquecimento de fluídos e ambientes e para a geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica com a utilização de materiais adequados – semicondutores – pelas chamadas células solares. Tais células, também conhecidas como fotoelétricas, representam uma excelente solução para a crescente demanda energética e escassez de recursos naturais não-renováveis.

Atualmente, governos de vários países adotam planos de utilização de painéis solares para a obtenção de energia elétrica e, paralelamente, a comunidade científica trabalha no aprimoramento dessas células, tendo como principais objetivos, o aumento de sua eficiência e a redução no custo de sua produção.

### 2. ENERGIA SOLAR

No Sol, o hélio é sintetizado a partir do hidrogênio liberando grande quantidade de energia. Mesmo estando a uma distância aproximada de  $1,5 \times 10^8$  km a Terra recebe anualmente  $1,5 \times 10^{18}$  kWh desse total. Tal quantidade corresponde a 10000 vezes o consumo energético mundial neste período e mostra o enorme potencial que pode ser aproveitado por meio de sistemas de captação e conversão em outras formas de energia. O mapa abaixo representa a distribuição diária da energia recebida do Sol pela Terra:





**FIGURA 1** – Distribuição da energia solar ao redor do mundo.

**FONTE:** Matthias Loster (2006)

Os pontos pretos no mapa são as áreas necessárias para suprir toda a demanda energética atual do planeta. A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar que é uma camada tênue com aproximadamente 300 km de espessura e temperatura superficial de 5800 K. “Esta radiação não se apresenta de maneira regular devido às camadas externas do Sol (cromosfera e coroa), com pontos quentes e frios, erupções, etc.” (GUIMARÃES et al., 2008). Com isso, o nível de radiação solar que atinge a Terra é definido como um valor médio. Os dados recentes da *World Meteorological Organization* (WMO) apontam para um valor médio de  $1367 \text{ W/m}^2$  para a superfície atmosférica em ângulo reto.

Ao entrar na atmosfera a radiação solar sofre algumas absorções e reflexões de modo que apenas uma fração atinge a superfície terrestre. Aproximadamente 50% da radiação solar atinge o solo e os oceanos. Mesmo a metade dessa energia – do total que provem do Sol - representa um enorme potencial energético que pode ser aproveitado de diversas formas. Um promissor meio de utilização dessa radiação é através dos painéis solares, os quais transformam a energia luminosa em eletricidade de maneira direta.

“Atualmente, o custo de instalação de células fotovoltaicas esta por volta de US\$ 4/W mas em 2050 a estimativa é de US\$ 1,20/W.” (ZWEIBEL, 2008) Esta estimativa mostra como a energia solar pode se tornar totalmente viável no futuro.

### 3. FUNCIONAMENTO DA CÉLULA SOLAR

Para a compreensão do fenômeno fotovoltaico - que é o fenômeno responsável pela geração de energia elétrica através da célula solar - é fundamental entender as características dos semicondutores, que são os materiais utilizados em tais células. Só então será apresentada a relação do fóton com material semicondutor e como ocorre a produção de energia a partir dessa interação.

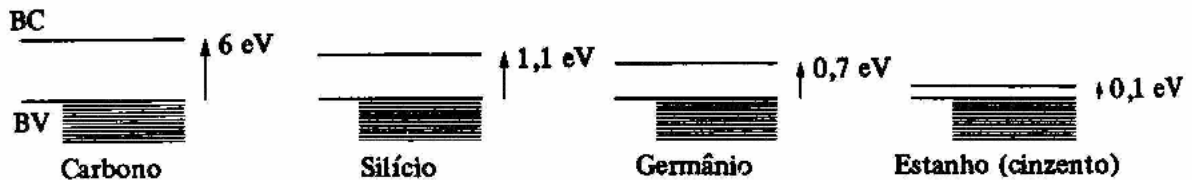
#### 3.1. SEMICONDUTORES

Material condutor é qualquer material que sustenta um grande fluxo de cargas quando é aplicada uma tensão em seus terminais. Materiais isolantes fornecem um valor muito baixo de condutividade quando submetidos a uma tensão. “O prefixo *semi* normalmente se aplica a uma faixa de níveis que se situa entre dois limites.” (Boylestad, 2004). Logo, um material semicondutor tem como característica um nível de condutividade intermediário entre esses dois extremos (condutor e isolante).

Semicondutores são formados por átomos que se repetem em estruturas periódicas, formando o chamado cristal (diamante tridimensional no caso do germânio e do silício). “O silício cristalino que pode ser utilizado como matéria prima da célula, possui certas propriedades físicas específicas.” (Meirelles, 2002)

A principal característica de um semicondutor é que sua banda de valência está totalmente preenchida por elétrons e sua banda de condução totalmente “vazia”. O potencial (potencial de ionização) necessário para remover qualquer um dos elétrons de valência é menor do que o necessário para remover qualquer um dos outros átomos. Esses elétrons de valência - que no caso do germânio e do silício são quatro - estão ligados a outros quatro átomos, através de uma ligação covalente. Embora a ligação covalente resulte em uma ligação mais forte do elétron de valência com o átomo, esses podem adquirir energia cinética suficiente e assumir o estado “livre”. Para a diferença de energia entre a banda de condução e a banda de valência, da-se o nome de *gap*. Um *gap* representa uma região proibida para o

elétron. Isso significa que o elétron não pode estar na região intermediária entre as bandas, mas sim, ou na banda de condução ou na banda de valência. Para os isolantes, esse gap é  $> 5$  eV, para um semicondutor é 1,1 eV (no caso do silício) e para um condutor, há uma sobreposição das duas bandas, resultando num numero grande de elétrons “livres”.



**FIGURA 2:** Alguns elementos com seus respectivos níveis de *gap*.

**FONTE :** Velásquez (2008)

Atualmente, o processo de obtenção de silício, é feito a partir de uma reação entre o carbono e a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em uma temperatura de  $1700^\circ\text{C}$ . Nesse processo, chamado de redução *carbotérmica*, o silício é obtido com uma pureza superior a 98%. Além da grande quantidade de energia envolvida, para cada tonelada de silício é gerado 1,5 toneladas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

### 3.2. EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico é transformação da energia luminosa em energia elétrica de maneira direta, através de células solares ou fotovoltaicas. “Este fenômeno foi observado pela primeira vez em 1839 por Henry Becquerel.” (Meirelles,2002) Apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial dessas células, seguindo o desenvolvimento da microeletrônica.

Uma propriedade fundamental para as células fotovoltaicas é a possibilidade dos fótons, na faixa visível, com energia igual ou superior ao *gap* do material, excitarem elétrons à banda de condução. Mas esse efeito que é observado em semicondutores puros – também chamados de intrínsecos – não garante por si só o funcionamento da célula fotovoltaica. É necessária uma estrutura apropriada para que os elétrons excitados possam produzir uma corrente útil. Para satisfazer as características necessárias, recorre-se ao processo chamado de dopagem, que consiste na contaminação do semicondutor com outro material. Embora essa

contaminação seja na ordem de uma parte em dez milhões, isso causa uma mudança completa nas propriedades elétricas do material. Um semicondutor submetido à dopagem é chamado semicondutor extrínseco.

Na estrutura do silício – semicondutor mais utilizado – que possui quatro elétrons na camada de valência que se ligam na estrutura cristalina - pode ser introduzido o fósforo, que possui cinco elétrons na camada de valência, ficando assim um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e ficara “sobrando”. Dessa forma, pouca energia é necessária para que esse elétron vá para a banda de condução. O fósforo é então um doador de elétrons, chamado de dopante n ou impureza n.

Da mesma maneira, podem ser introduzidos átomos com três elétrons de valência – o boro, por exemplo – e haverá então a falta de elétrons para satisfazer as ligações. Esta falta é denominada lacuna ou buraco e ocorre que, com pouca energia, os átomos dos sítios vizinhos à lacuna podem receber energia suficiente e se deslocarem para essa posição, fazendo com que o buraco se desloque. Assim, o boro é um aceitador de elétrons ou dopante p.

É importante frisar que mesmo que haja um numero grande de elétrons livres no material do tipo n, ele ainda é eletricamente neutro, pois o numero de prótons carregados positivamente no núcleo ainda é igual ao numero de elétrons livres orbitando com carga negativa a estrutura. O mesmo acontece para o material p.

Para uma célula fotovoltaica, é necessária a criação de uma estrutura com os dois materiais citados – material n e material p – formando a chamada junção pn. Nesta configuração, ocorre que os elétrons em excesso do material n passam para o lado p onde encontram as lacunas que os capturam. Isso faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado p, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons no lado n, que o torna positivamente carregado. Esse processo alcança o equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes do lado n.

Quando essa junção pn é exposta a fótons com energia superior ao *gap*, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna; se isso acontecer na região onde o campo é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim uma corrente através da junção. É esse deslocamento que dá origem a uma diferença de potencial, o qual recebe o nome de efeito fotovoltaico. Se conectarmos as duas extremidades de um pedaço de silício, haverá uma circulação de elétrons.

## **4. CÉLULAS SOLARES**

### **4.1. GERAÇÕES DAS CELULAS SOLARES**

As células solares são classificadas em três gerações, cada uma com suas características próprias como eficiência, custo de produção e modo de funcionamento. Atualmente, as células de terceira geração representam objeto de continuo estudo, mas as células de primeira geração são as mais utilizadas, representando 89,7% da produção total de células solares.

#### **4.1.1. PRIMEIRA GERAÇÃO**

A primeira geração é caracterizada pela utilização de junções simples, numa camada única e com uma grande superfície coletora, com junção pn. As células dessa geração são capazes de gerar energia através dos comprimentos de onda da luz solar. São normalmente feitas com placas de silício e possuem uma eficiência em torno de 33%. Seu processo de produção é oneroso, pois envolve muita energia e trabalho e o retorno financeiro desse tipo de célula é de 5 à 7 anos.

#### **4.1.2. SEGUNDA GERAÇÃO**

Geração caracterizada pela utilização de materiais e meios de produção mais viáveis economicamente. Utiliza-se da tecnologia de deposição em películas finas, as quais reduzem a quantidade de materiais necessários, diminuindo dessa forma os custos. Há também técnicas como a deposição por vapor, que reduz a alta temperatura e, portanto a energia, requerida na produção. Sua eficiência é menor se comparada com a primeira geração, estando na faixa de 13% a 18%. Nessa geração, foi possível a construção de células em filmes-finos, os quais possibilitam maior versatilidade na instalação devido a sua flexibilidade. Os materiais que se destacam nessa geração são: cádmio-telúrio, silício amorfo, silício micro amorfo, cobre-índio-gálio-selênio (CIGS). Os filmes finos não possuem estrutura cristalina e sua eficiência é baixa devido a perda de energia na própria célula. No processo de obtenção de painéis solares de filmes finos, o silício é introduzido na estrutura

através de um gás ( $\text{SiH}_4$ ) e desse processo, podem-se originar dependendo dos parâmetros de deposição as seguintes estruturas:

- Silício amorfo;
- Silício protocristalino;
- Silício nanocristalino.

Tais estruturas, embora representem um baixo custo de produção possuem muitas falhas.

### **4.1.3. TERCEIRA GERAÇÃO**

A terceira geração veio para melhorar a eficiência das células da segunda geração (tecnologia de filmes finos), e mesmo assim manter o seu preço de produção. O objetivo dessa geração é a conversão de energia com eficiência na faixa de 30% a 60%. Tal eficiência supera o limite estabelecido em 1961 por Shockley e Queisser que era de 31% sob a luz natural e de 40,8% sob a luz concentrada. Os principais motivos para essa elevada eficiência se devem a:

- utilização de células com multijunção (multiplicando a energia limite do material);
- Modificando o espectro de luz incidente (concentrando a luz);
- Usar o espectro infravermelho para a produção noturna de energia.

## **4.2. PRINCIPAIS TIPOS DE CELULAS SOLARES**

### **4.2.1. SILÍCIO CRISTALINO**

É a tecnologia mais empregada no mercado atual com cerca de 95%. Para essas células, tem-se a eficiência na faixa de 15% a 21% para cada célula. Para os painéis solares constituídos dessa forma a eficiência cai para a faixa de 13% a 17%.

### **4.2.2. SILÍCIO AMORFO**

Com uma participação de 3,7% no mercado essas células têm uma eficiência de aproximadamente 7%. Nessa célula, utiliza-se a tecnologia de filmes finos, a qual

resulta numa grande versatilidade na montagem de painéis devido a sua flexibilidade. Sua produção é uma das mais econômicas atualmente, e o principal processo de fabricação é através de um gás ( $\text{SiH}_4$ ) e sua relativa baixa eficiência é devido às falhas originadas desse processo.

#### **4.2.3. COBRE-ÍNDIO-GÁLIO-SELÊNIO (CIGS)**

Com a estrutura  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  é uma célula com uma representabilidade de 0,2% do mercado mundial. Sua eficiência é de 13% e atualmente sua produção esta sendo afetada devido a falta de índio pois o material é utilizado em telas de LCD. Nesse tipo de célula, não ocorre um modelo como o da junção pn (silício cristalino), mas sim um modelo de heterojunção mais complexo. A mais alta eficiência, na categoria dos filmes-finos, foi conseguida com as células CIGS.

#### **4.2.4. ARSENETO DE GÁLIO**

O GaAs é a tecnologia mais eficiente que temos atualmente. Esta tecnologia é empregada somente em painéis solares de satélites devido ao seu alto custo de produção. Utilizando o modelo de multijunção, para o aproveitamento de diversos espectros da luz com eficiência de cerca de 40% (em laboratório). Já com o modelo de filmes-finos, essa eficiência de aproximadamente 28%.

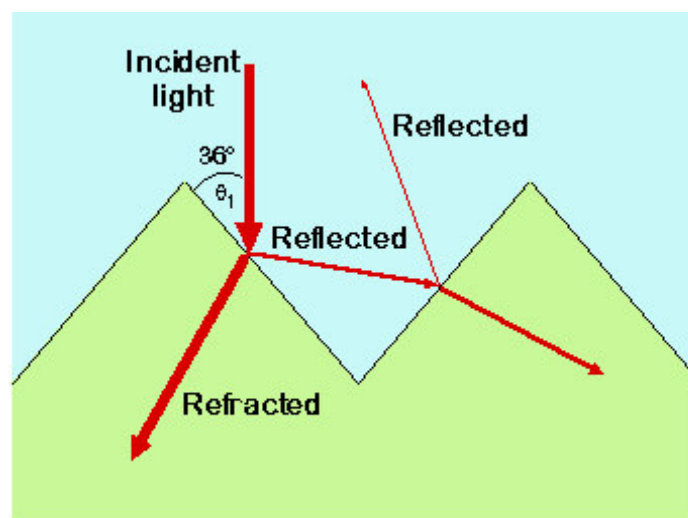
#### **4.2.5. TELÚRIO DE CÁDMIO**

Também se utilizada da tecnologia de filmes finos. O CdTe tem uma eficiência de 16% mas possui pouca aceitação comercial devido a toxicidade do cádmio. Também utiliza a tecnologia de filmes-finos e seu custo de produção é relativamente baixo. Pelo CdTe ser de fácil deposição nos filmes-finos, apresenta grande empregabilidade para a produção em massa.

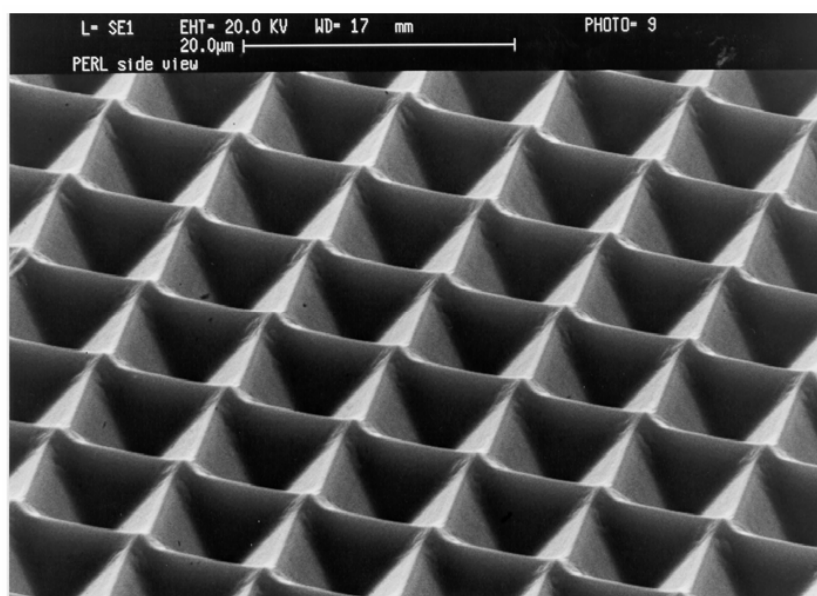
### 4.3. FATORES QUE INFLUENCIAM NA EFICIÊNCIA DA CÉLULA

#### 4.3.1. REFLEXÃO DA LUZ

O silício é um material muito brilhante e, portanto, reflete muito. Os fótons que são refletidos não podem mais ser utilizados pela célula. Por esta razão, é necessário um revestimento anti-reflexo, que é aplicado na parte superior da célula, de modo a reduzir o reflexo para aproximadamente 5%.



**FIGURA 4:** Princípio de funcionamento de uma superfície anti-reflexo.



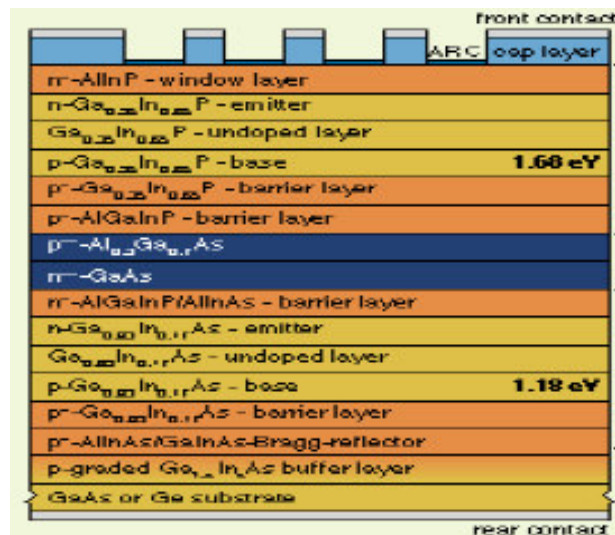
**FIGURA 5:** Detalhes de uma estrutura anti-reflexo real.



O princípio básico de funcionamento de uma superfície anti-reflexo, é que ocorre mais de uma contato com a superfície e, dessa forma, aumentando a intensidade de luz refratada para dentro da célula solar.

#### 4.3.2. ENERGIA DE ESPAÇAMENTO ENTRE BANDAS

A luz é composta por vários comprimentos de onda e, dessa forma, vários fótons com diferentes energias. Em uma célula solar, fótons com energia inferior a energia do *gap* passam pela estrutura como se ela fosse transparente, sem interação. Já os fótons com energia superior a energia do *gap* tem sua energia transformada em outros processos (por exemplo, produzindo calor) então essa energia é perdida. Esses dois efeitos sozinhos representam cerca de 70% da perda da energia incidente na célula. Para esse tipo de problema, recorre-se a configuração de multijunção, onde há dois ou mais semicondutores com materiais diferentes e, portanto, energia do *gap* diferentes, de modo que aumente a coleta de fótons. Trivialmente, os materiais com maior energia de *gap* precisam estar na parte superior, seguido dos materiais de menos energia.

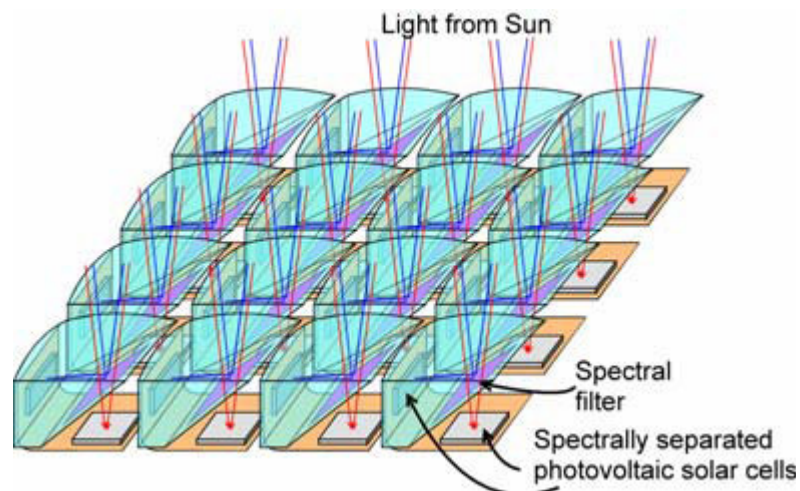


**FIGURA 6:** Célula fotovoltaica com materiais de diferentes níveis de *gap*.

#### 4.3.3. DIFUSÃO DA LUZ

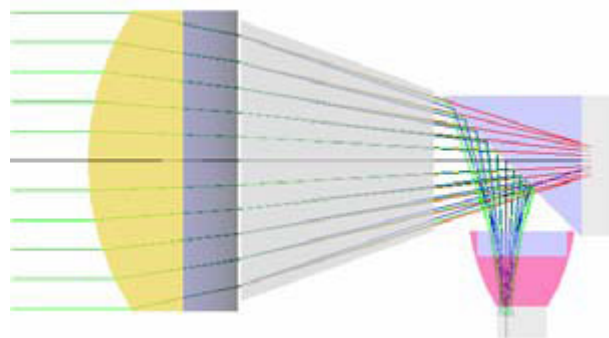
A luz que chega à superfície de um painel solar possui um numero de fótons por unidade de área. Pode-se aumentar esse fator através da concentração dos

raios solares através de lentes específicas. Através disso, é possível um aproveitamento bem maior da radiação solar. “As células de alta eficiência utilizam sistemas óticos em módulos portáteis para operar com grande desempenho.” (Barnett et al., 2007) É possível também, através de lentes específicas, fazer a separação do espectro da luz, aproveitando mais de um espectro da luz. Nesse tipo de situação, dois ou mais semicondutores, com diferentes níveis de *gap* são utilizados.



**FIGURA 2:** Concentração e separação espectral da luz.

**FONTE:** Barnett (2007)



**FIGURA 3:** Detalhe do concentrador e separador espectral

**FONTE:** Barnett (2007)

As lentes concentradoras (em cor bege) são feitas de *diamond-turning plastic*, a pirâmide concentradora (em cor azul claro) feito com partes plásticas e *dichroic prism* feito de vidro BK7.

#### **4.3.4. ÂNGULO DE INCIDENCIA DA LUZ**

Para um melhor aproveitamento da luz do sol, é necessário que os raios atinjam a superfície da melhor maneira possível. Para isso, utiliza-se de orientadores mecânicos para otimização da captação do sol. Esses orientadores podem ser ativos (motores elétricos através de configurações eletrônicas) e passivos (sistemas hidráulicos que utilizam do calor do sol para o alinhamento).

#### **4.4. DADOS INTERESSANTES SOBRE AS CÉLULAS SOLARES**

O recorde atual de eficiência é de um time de pesquisadores da universidade de Delaware com a eficiência de 42,8% com a utilização de células com multijunções.

O maior parque de solar do mundo em operação é o Olmedilla Photovoltaic Park, localizado na Espanha, com uma capacidade de 60 MW e foi concluído em setembro de 2008.

O maior parque que está em estudo atual é o Rancho Cielo Solar Farm, nos estados unidos, e terá uma capacidade de 600MW e utilizara a tecnologia de filmes finos.

### **5. CONSIDERAÇÕES**

O potencial energético advindo da radiação solar é algo grandioso. Vivemos numa época de escassez de recursos naturais não-renováveis e esse potencial representa uma saída viável para esse problema. A utilização dessa energia para produção de eletricidade através das células solares é algo real e que está em pleno desenvolvimento atualmente. Em menos de meio século, já aumentamos a eficiência das células solares para valores que eram teoricamente impossíveis no passado. Diversas pesquisas contribuíram para a diminuição dos custos de produção garantindo sua crescente demanda e novas tecnologias surgiram para o melhor aproveitamento da luz solar. O uso crescente desse tipo de energia também representa uma saída para as questões ambientais, tão comentadas atualmente. A energia solar é uma energia limpa e com os processos de fabricação das células solares controlados, podemos contribuir para o meio ambiente. Mais que uma saída,

a energia solar representa um triunfo para nós, pois, através do empreendimento científico, encontramos soluções para os problemas da humanidade.

## **6. REFERÊNCIAS**

**BARNETT A. Intial test bed for very high efficiency solar cells. 2007.**

**BARNETT A. Milestones toward 50% efficient solar cell modules. 22<sup>nd</sup> European photovoltaic solar energy conference, 2007.**

**BOYLESTAD R. L. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.**

**GUIMARÃES A. P. C. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Ediouro, 2008.**

**MEIRELLES B. R. Fabricação de células solares. 2002.**

**ZWEIBEL, Ken et al., Perspectivas para a energia solar. Scientific American Brasil, n. 69, p. 34-43, Fevereiro 2008.**

## MATERIAIS UTILIZADOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM USINAS TERMOELÉTRICAS

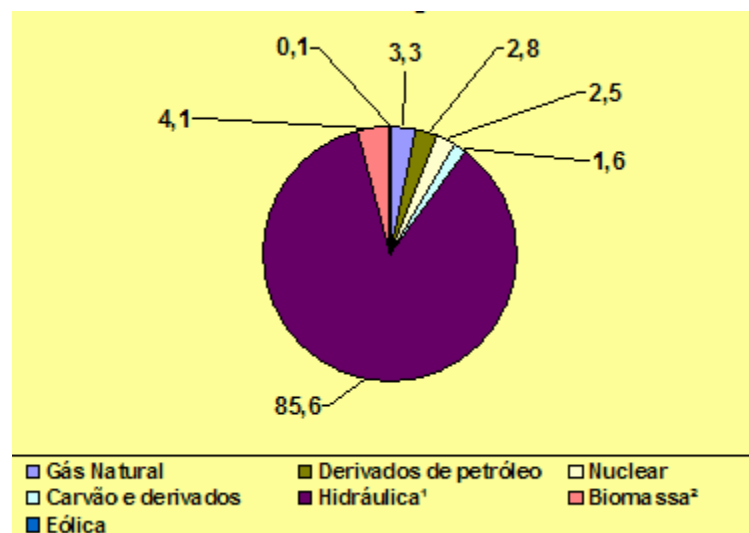
Humberto José de Oliveira Alencar

### 1. INTRODUÇÃO

Materiais são utilizados para fazer coisas. E são essas coisas que nos permitem viver no mundo de hoje, com avanços tecnológicos, praticidade e conforto.

Podemos dizer que a eletricidade foi um dos principais propulsores para esses avanços e que atualmente sem ela não viveríamos. Mas para termos ela em nossas casas elas são produzidas por usinas que nos fornecem diariamente esta energia para nosso consumo.

Uma das usinas de geração de energia é a termoelétrica, esta por sua vez apresenta, como podemos ver na figura 1 abaixo, um número expressivo, pois representam todas as outras energias quando desconsideramos a hidroelétrica e a nuclear, sendo de suma importância o seu conhecimento, sendo a qual explanaremos sobre seu funcionamento, as partes e os materiais constituintes das mesmas durante todo este trabalho.

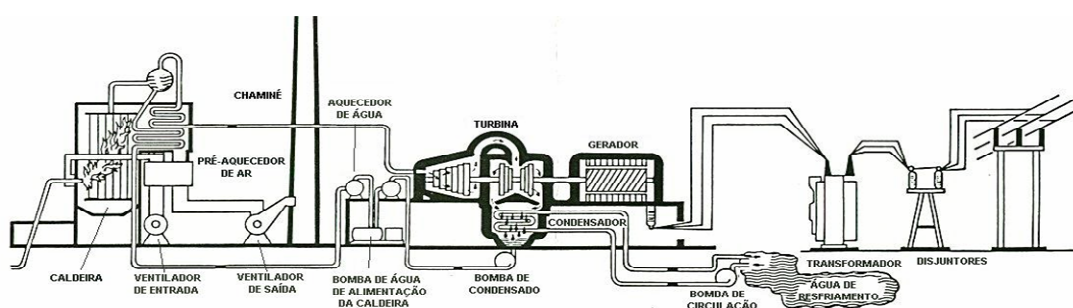


**FIGURA 1** – Oferta de energia elétrica no Brasil

## 2. FUNCIONAMENTO GENÉRICO DE UMA USINA TERMOELÉTRICA

Podemos dizer que uma usina termoeletrica é uma grande máquina térmica que tem por objetivo a conversão de energia de um combustível em energia elétrica.

Seu funcionamento baseia-se na queima de gás ou na vaporização da água, em uma caldeira, através da queima de um combustível que pode ser: gás natural, carvão mineral, óleo diesel, entre outros. Este vapor d'água ou este gás faz com que uma turbina gire, esta por sua vez, está acoplada a um gerador que gera energia elétrica através da energia mecânica da rotação do eixo da turbina, enquanto isso o vapor d'água é resfriado e volta para a caldeira.



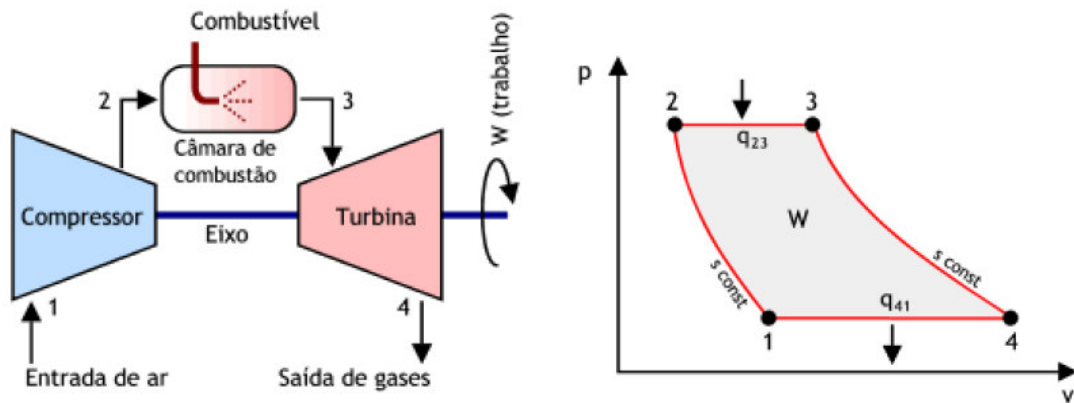
**FIGURA 2** – Esquema de uma usina termoeletrica de ciclo fechado

### 2.1 TIPOS DE FUNCIONAMENTO DE UMA USINA TERMOELÉTRICA

#### 2.1.1 CICLO DE BRAYTON

No ciclo Brayton, que é o ciclo de funcionamento de uma turbina a gás. A figura 1 mostra o ciclo Brayton de circuito aberto, que é utilizado na maioria das turbinas a gás.

Entre 1 e 2 o ar é comprimido por um compressor tipo axial (processo adiabático), tornando a pressão interna na turbina maior que a pressão externa. Ao passar pelo queimador ou câmara de combustão (de 2 a 3), o ar se expande devido ao fornecimento de calor pelo processo de combustão. Isso ocorre supostamente sob pressão constante (processo isobárico) porque a forma construtiva da câmara oferece pouca resistência ao fluxo, mas há um considerável aumento no volume dos gases.



**FIGURA 3** – Esquema genérico e gráfico pressão x volume do ciclo de Brayton

O ar aquecido pela combustão movimenta a turbina (processo adiabático) de 3 a 4. Saindo da turbina, o ar troca calor com o ambiente (processo isobárico).

O diagrama da Figura 19 não corresponde ao modo construtivo real. Normalmente há vários queimadores dispostos em círculo entre o compressor e a turbina. Este ciclo também é conhecido como Ciclo de Joule.

Relembrando:

Adiabático – conhecido também como isentrópico, ocorre quando não há troca de calor, e a entropia se mantém constante.

Isotérmico – é um processo que ocorre com a temperatura constante.

Isobárico – quando a pressão se mantém constante.

Politrópico – todas as propriedades envolvidas na transformação se modificam.

Uma característica observada nesse ciclo é o contato direto da combustão com o gás de operação (normalmente ar). Isso demanda o emprego de combustíveis nobres, no estado líquido ou gasoso, como gasolina, álcool, óleo diesel, querosene, gás natural.

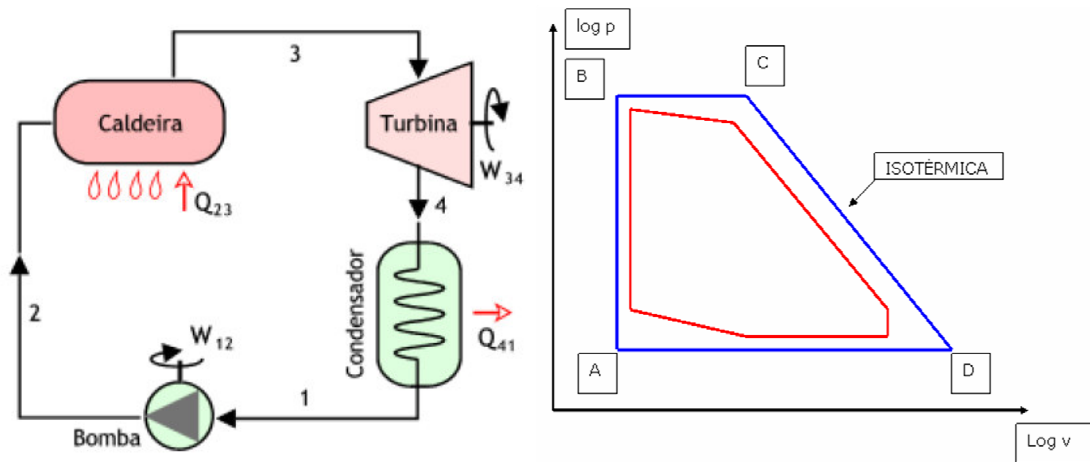
### 2.1.2 CICLO DE RANKINE

O ciclo de Brayton não pode ser usado quando o calor é proveniente da queima de combustíveis sólido ou residuais, como carvão, lenha, bagaço, óleo pesado, etc.

O vapor de água é uma alternativa: o combustível é queimado e um recuperador de calor produz vapor que, por sua vez pode ser usado como trabalho.

Este ciclo contém uma fase de compressão em pressão constante (D para A), uma fase de elevação de pressão em volume constante (A para B), uma fase de expansão em pressão constante (B para C) e uma fase de dilatação isotérmica (C para D), conforme mostra a Fig. 3. O ciclo real é indicado em vermelho. Aqui foram utilizadas escalas logarítmicas de modo que as hipérbolas  $PV=\text{constante}$  de uma transformação isotérmica se tornem retas de inclinação negativa  $\log p = C - \log v$ .

O ciclo de Rankine é efetivamente utilizado para calcular o rendimento de uma máquina a vapor. O ramo AB representa a evaporação da água e o superaquecimento do vapor resultante. O ramo CD a expansão isotérmica (isoentrópica) no cilindro do motor. O ramo DA a condensação no condensador, retornando a água a caldeira.



**FIGURA 4** – Esquema genérico e gráfico pressão x volume do ciclo de Rankine

Se a água (ou qualquer outro líquido) é evaporada ou condensada, o processo ocorre de forma isotérmica (temperatura constante). A expansão em uma turbina ou a compressão em uma bomba são transformações aproximadamente adiabáticas (sem troca de calor).

### 2.1.3 CICLO COMBINADO

Num ciclo simples, a caldeira ou a turbina a gás operam isoladamente. Para o ciclo combinado os dois sistemas interagem, configurando o que se chama de CCPPs (Combined Cycle Power Plants).

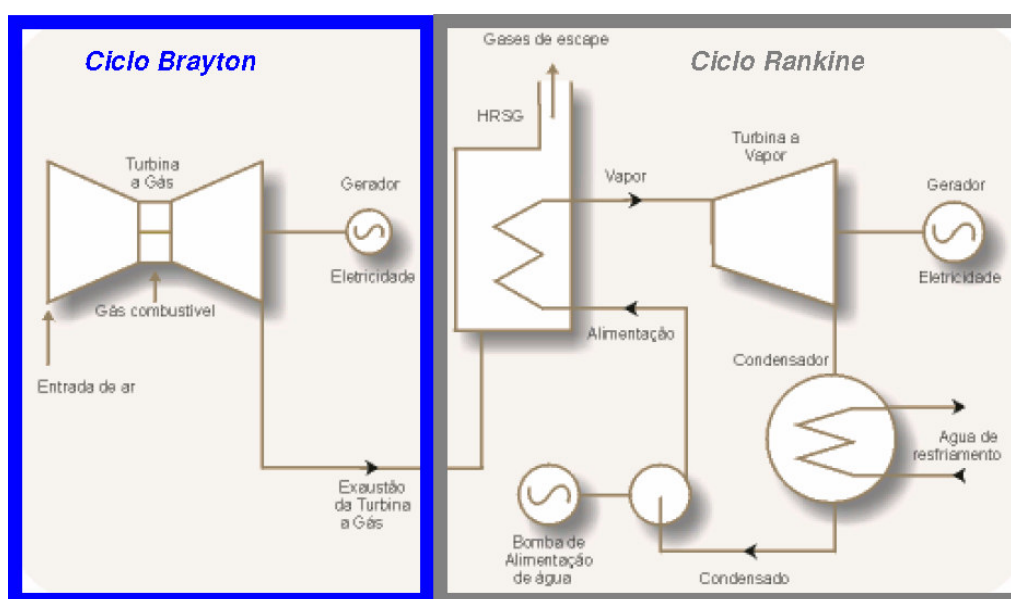
O calor proveniente da combustão presente nos gases de exaustão da turbina a gás é recuperado nos HRSGs (Heat Recovery Steam Generators), produzindo o vapor necessário para o acionamento da turbina a vapor.



As CCPPs têm como um dos seus principais elementos um gerador de vapor capaz de recuperar parte do calor dos gases de exaustão das turbinas a gás (HRSG – Heat Recovery Steam Generator). Com isto, a eficiência térmica eleva-se substancialmente, pois o vapor assim produzido aciona uma turbina outra turbina sem necessidade de queima de combustível adicional.

A temperatura máxima que se pode obter no vapor depende da temperatura dos gases de exaustão da turbina a gás. A temperatura dos gases na saída das turbinas a gás é, em média, da ordem de 550°C. A quantidade de vapor produzida é suficiente para acionar uma turbina a vapor capaz de gerar a metade da energia elétrica da turbina a gás correspondente.

O gás de exaustão proveniente da turbina a gás é rico em oxigênio, o que permite a queima suplementar de combustível se for desejado vapor em temperaturas mais elevadas ou em maior quantidade.



**FIGURA 5** – Esquema de funcionamento de uma usina termoeletrica de ciclo combinado

## 2.2 A USINA TERMOELÉTRICA DA TERMORIO

Esta usina está localizada no município de Duque de Caxias, no estado do Rio de Janeiro, sendo que hoje, é a maior termoeletrica a gás natural instalada no Brasil, com 1040 MW de potência instalada. Controlada pela Petrobrás, acha-se apta a ofertar sua energia elétrica quando despachada pela ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

Os três blocos constituintes da usina são formados por seis turbo-geradores a vapor. Cada um deles é composto por duas turbinas a gás GT-11N2 e uma turbina a vapor (com os respectivos geradores), duas caldeiras de recuperação, sistemas auxiliares e uma torre de resfriamento de água. A Alstom construiu a termelétrica fornecendo o projeto completo em turn-key com custo de US\$ 800 milhões.

A capacidade de geração de energia da UTE corresponde a 22% da energia elétrica gerada no estado do Rio de Janeiro.

### **3. MATERIAIS UTILIZADOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM USINAS TERMOELÉTRICAS**

Grande parte dos materiais utilizados na geração de energia em usinas termoelétricas trabalham em altas temperaturas e pressões, devendo ser projetados com propriedades mecânicas características para trabalhar com essas condições, além de serem resistentes a corrosão e a muitas solicitações mecânicas.

O grande uso das ligas de ferro em usinas termoelétricas pode ser atribuídos às notáveis propriedades desta liga, à abundância das matérias-primas necessárias à sua produção e o seu preço competitivo. Pois o aço pode ser produzido em uma enorme variedade de características que podem ser bem controladas, de modo a atender aos usos específicos das usinas e das partes da mesma.

O aço é uma liga formada principalmente pelos elementos ferro e carbono, já o aço inoxidável é uma liga de ferro e cromo, podendo conter também níquel, molibdênio e outros elementos. Esse tipo de aço contém aproximadamente 11% de cromo, e é justamente por isso que se torna resistente à corrosão. Essa característica torna o aço inoxidável superior ao aço comum, as propriedades físico-químicas como a alta resistência à oxidação atmosférica o torna especial para várias finalidades.

Para conhecimentos gerais sobre alguns aços pode-se observar o anexo deste trabalho.

O cromo permite a formação de uma película finíssima de óxido de cromo sobre a superfície do aço, que é impermeável e insolúvel nos meios corrosivos usuais. A corrosão é uma reação que ocorre entre os aços comuns e o oxigênio, levando a formação de uma camada porosa de óxido de ferro, mais conhecida como “ferrugem”. A película formada pelo cromo não deixa que essa camada porosa se

forme, ela impede que o ferro presente na liga entre em contato com o oxigênio do ar.

Os principais fatores que afetam os valores medidos das propriedades mecânicas são a composição química, o histórico termomecânico do material, a geometria, temperatura, estado de tensões e velocidade de deformação da estrutura.

O fator mais importante na determinação das propriedades de um certo tipo de aço é a composição química. Nos aços carbono comuns, os elementos Carbono e Manganês tem influência no controle da resistência, ductilidade e soldabilidade. A maior parte dos aços carbono estruturais tem mais de 98% de Ferro, de 0,2 a 1% de Carbono e aproximadamente 1% de Manganês (em peso). O Carbono aumenta a dureza e a resistência, mas, por outro lado, afeta a ductilidade e a soldabilidade. Assim, pequenas quantidades de outros elementos de liga são utilizados na melhoria das propriedades do aço, obtendo o máximo em propriedades de uma liga contendo um baixo teor de Carbono.

A influência de alguns dos elementos químicos comumente encontrados pode ser visto na figura abaixo:

ELEMENTO	SOLUÇÃO SÓLIDA	FORMANDO CARBONETOS	TAMANHO DE GRÃO	TEMPERATURA DE TRANSFORMAÇÃO A <sub>1</sub>	TENACIDADE	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	RESISTÊNCIA À CORROSÃO	SOLDABILIDADE
Si	SIM	NÃO	↗	↗	↗	↗	↗	↘
Mn	SIM	NÃO	↗	↘	↗	↗	---	↘
Cr	PARTE	PARTE	↗	↗	↗	↗	↗	↘
Ni	SIM	NÃO	REFINA	↘	↗	↗	↗	↘
Cu	SIM	NÃO	REFINA	↘	↘	↗	↗	↘
V	NÃO	SIM	REFINA	↗	↗	---	---	---
W	NÃO	SIM	REFINA	↗	↗	---	---	---
Co	SIM	NÃO	IMPEDE AUMENTO	---	---	---	---	---
Mo	NÃO	SIM	IMPEDE AUMENTO	↗	↘	↗	↗	↗

**TABELA 1** – Influências de alguns elementos químicos nas ligas de ferro

A composição química junto com o processamento termo-mecânico, confere aos aços inoxidáveis propriedades diferentes. Abaixo, temos os grupos de aços inoxidáveis.

- Austenítico (resistente à corrosão)

- Ferrítico (resistente à corrosão, mais barato por não conter níquel)
- Martensítico (dureza elevada)

### **3.1 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UMA USINA TERMOELÉTRICA E OS PRINCIPAIS MATERIAIS QUE CONSTITUEM ESTES COMPONENTES**

#### **3.1.1 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS**

Por definição podemos falar que os combustíveis são todas as substâncias naturais e artificiais que nos três estados da matéria podem reagir com o oxigênio, mediante contato centelha ou tocha simples, liberando energia na forma calorífica e luminosa. E para que haja combustão temos que ter uma combinação de três fatores: combustível, ar e calor.

Os combustíveis são basicamente constituídos por Carbono (C), Hidrogênio (H) e em alguns casos, o Enxofre (S). Podemos verificar que para os combustíveis industriais podemos classificar basicamente em três grupos: carvão mineral, hidrocarbonetos líquidos e gasosos. A maioria dos combustíveis, constituídos por hidrocarbonetos líquidos ou gasosos, são uma mistura de muitos hidrocarbonetos diferentes. Por exemplo, a gasolina é constituída, fundamentalmente, por uma mistura de cerca de 40 hidrocarbonetos diferentes, com muitos outros presentes em quantidades mínimas.

##### **3.1.1.1 GÁS NATURAL**

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos de origem fóssil que se encontra no subsolo e procede da decomposição de matéria orgânica retirada entre as camadas rochosas.

Sua origem fóssil provém da decomposição vegetal e animal há milhares de anos. Este processo de erosão levou remanescentes biológicos por meio de rios e riachos em direção às costas, onde foram depositados com lama e sedimentos. Através do tempo foram cobertos por mais e mais sedimentos e, gradualmente, comprimidos pelo peso das camadas dos mesmos.

Com a evolução, o material que continha, originalmente, remanescentes biológicos, tornou-se rocha sedimentar. Hoje, essas rochas sedimentares, arenitos, xistos e dolomita são os locais onde geralmente são encontrados os depósitos de petróleo e gás natural.

Muitas vezes, eles ficam retidos entre as camadas de rocha que foram formadas sobre as rochas sedimentares que as produziram.

Como o gás natural é o combustível fóssil de queima mais limpa, ele ajuda na manutenção da qualidade do ar e da água, especialmente quando usado em substituição a outras fontes de energia mais poluentes. O gás natural é um produto incolor e inodoro, não tóxico e mais leve que o ar.

Uma vez extraído do subsolo, deve ser transportado às zonas de consumo, que podem estar próximo ou a quilômetros de distância. O transporte de suas jazidas até as áreas de consumo se realiza por meio de tubos de aço de grande diâmetro, chamados de gasodutos.

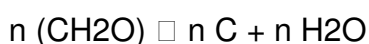
Além disso, é uma energia livre de enxofre e a sua combustão é completa, liberando como produtos da mesma o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e vapor de água.

### **3.1.1.2 CARVÃO MINERAL**

O carvão mineral é uma substância sólida, de cor escura, constituída principalmente de carbono. Junto com o carvão mineral também são encontrados alguns líquidos como águas amoniacais e alcatrão, assim como a presença de gases. O seu principal uso é como combustível e também na redução do minério de ferro na obtenção do aço. Teve grande valor no início da era industrial e provocou guerras entre os povos pela posse de suas jazidas.

A pureza do carvão decorre do processamento das misturas dos materiais celulósicos com as substâncias minerais por ocasião das modificações verificadas na crosta terrestre.

O carvão foi formado a partir de restos de vegetais e florestas, há centenas de milhões de anos. À medida que elas morriam eram cobertos por sedimentos (lama ou areia trazidas pelo vento). Nas profundezas da crosta terrestre, sob pressão, calor e na ausência de oxigênio, a madeira foi decompondo-se, perdendo a água da celulose, restando o carvão (carbono). Um pouco da resina das plantas ficou retida, dando origem ao alcatrão. A composição do carvão varia conforme a idade geológica da jazida, podendo ser encontrado em vários estágios. A composição da celulose é baseada em muitos radicais do tipo (CH<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>, que perde água sobrando o carbono, conforme reação abaixo:



O carvão mineral é considerado um recurso natural não renovável por serem necessários milhões de anos para sua formação.

As suas águas amoniacais têm grande importância na produção de adubos químicos, enquanto o alcatrão destina-se à indústria química. Dele são extraídos compostos importantes como o benzeno, o antraceno, o naftaleno, o tolueno, o fenol, etc, dos quais podem ser feitos os solventes, plásticos, corantes, medicamentos, inseticidas, explosivos, essências artificiais de sabor e odor para perfumaria e alimentos.

A separação da fase sólida da líquida é feita por destilação. O carvão é fechado em um recipiente (retorta) e aquecido. Os gases e o alcatrão vaporizam-se e a fase líquida é recondensada em recipientes separados. O resíduo sólido que sobra na retorta é chamado carvão coque, usado principalmente na siderurgia devido a sua pureza. O gás produzido, uma mistura de hidrogênio, monóxido de carbono e metano, é utilizado como gás combustível (gás de rua).

### **3.1.1.3 PETRÓLEO**

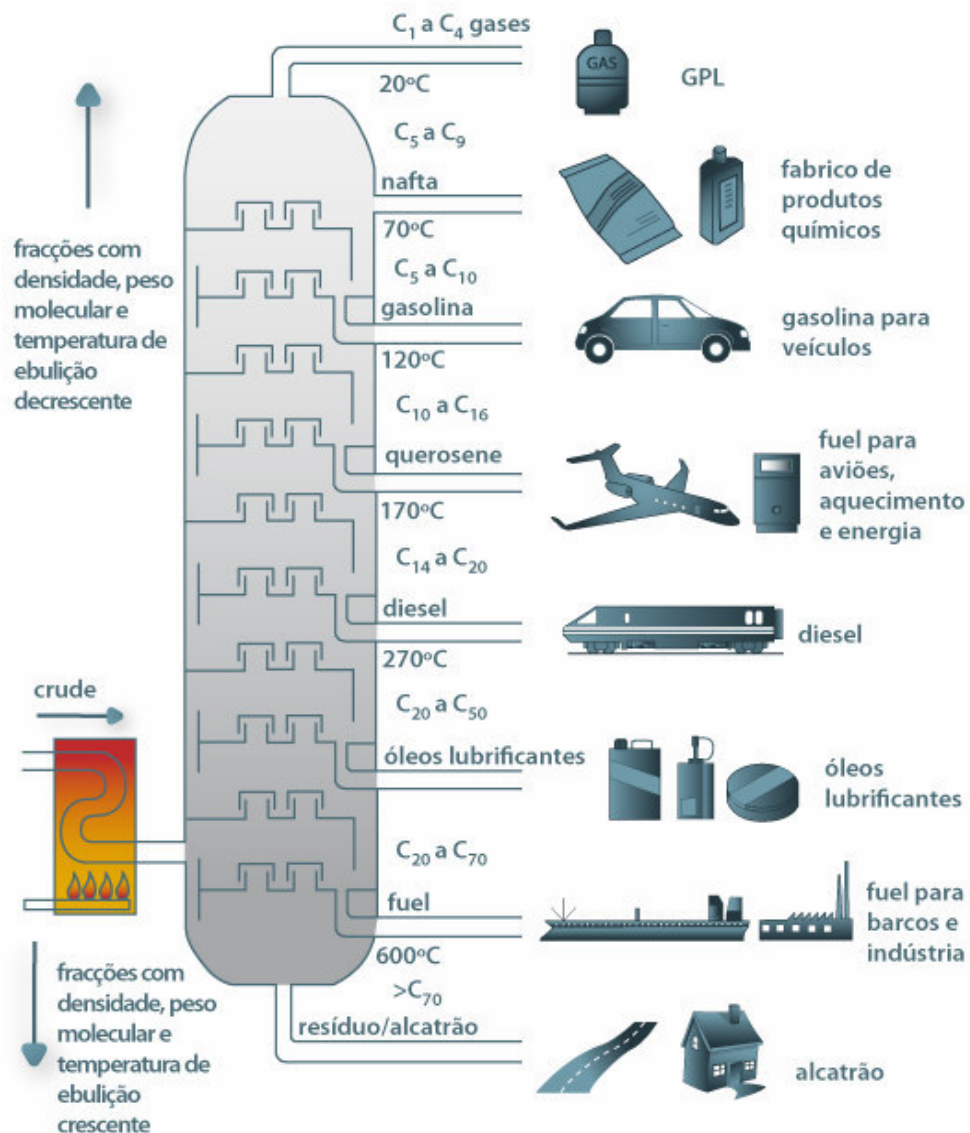
O petróleo é uma substância líquida fóssil natural de origem orgânica formada no subsolo ao longo dos anos pela ação da temperatura e pressão.

O petróleo é formado basicamente por hidrocarbonetos saturados de cadeia não cíclica, porém podemos encontrar também alguns contendo hidrocarbonetos cíclicos. Também são substâncias presentes no petróleo os compostos oxidados como os naftênicos, ácidos orgânicos, fenóis, aldeídos e substância asfálticas.

O petróleo quando extraído do subsolo não pode ser utilizado diretamente, tendo que ser submetido a um processo de destilação fracionada de onde são extraídos os produtos conhecidos como óleos residuais.

A destilação fracionada é feita em uma grande torre metálica, conforme figura 6, onde o petróleo é vaporizado em uma fornalha e entra por baixo de uma coluna. A mistura de hidrocarbonetos gasosos esfriam à medida que sobem pela coluna.

Conforme a temperatura baixa, aqueles que possuem o maior ponto de ebulição tornam-se líquido (condensam) antes, separando-se dos demais, sendo retirados da coluna.



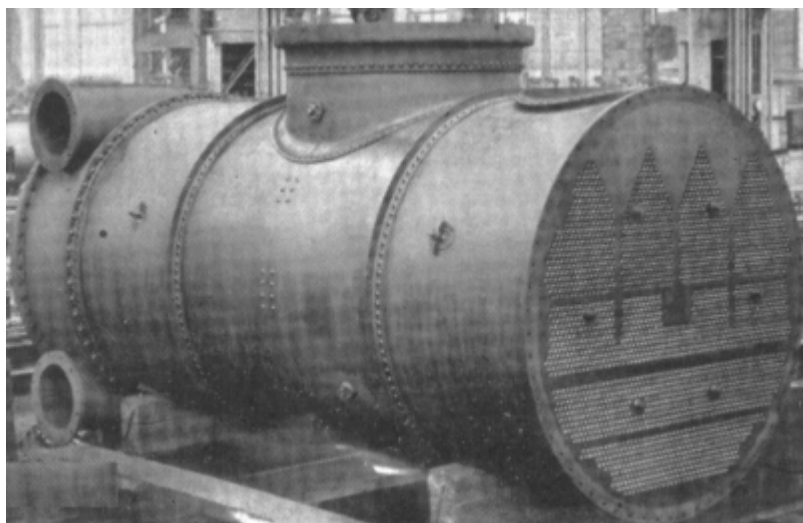
**FIGURA 6** – Esquema de destilação fracionada do petróleo em torre metálica

### 3.1.2 CALDEIRA

As caldeiras, ou geradores de vapor, são equipamentos destinados a transformar água em vapor. Por isso, são utilizadas apenas com turbinas a vapor.

Ao iniciar-se a produção de vapor em uma caldeira, primeiramente todo o calor fornecido a água (pela queima do combustível e pelos gases de combustão) serve para aumentar sua temperatura. Ao calor associado à mudança de temperatura da água dá-se o nome de *calor sensível*. Em uma caldeira, como em uma panela de pressão de cozinha, por ser um recipiente rígido, a medida que o calor é fornecido à água, a pressão aumenta junto com a temperatura até que aconteça a abertura da válvula de segurança. Na temperatura de saturação relativa à

pressão de abertura da válvula de segurança (pressão de trabalho da caldeira) inicia-se a geração de vapor com alta intensidade e todo calor fornecido à água é para sua mudança de fase, que acontece a pressão e temperatura constantes. Ainda, se a esse vapor for transferido calor, isso fará aumentar sua temperatura (*calor sensível*) e provocará o seu superaquecimento (*vapor superaquecido*) em um determinado grau de superaquecimento.



**FIGURA 7** – Foto de uma caldeira

Relacionado à fase gasosa da substância, utiliza-se com freqüência o nome vapor para essa fase quando a substância está próxima de um estado em que parte da mesma pode condensar-se. O comportamento pressão, volume e temperatura, que para os chamados Gases Perfeitos é expresso pela equação  $pV = RT$ , para o vapor, que é considerado um gás real, essa equação não representa muito bem comportamento mencionado.

É importante destacar aqui que o vapor d'água é utilizado como agente transportador de energia em diversos processos industriais e nas centrais termelétricas. Isso se deve às vantagens a seguir:

- A água é a substância mais abundante sobre a Terra.
- Possui grande conteúdo energético (entálpico).
- Pouco corrosivo.
- Não é tóxico.
- Não é inflamável nem explosivo.

A espessura de uma caldeira é dimensionada a partir da equação abaixo:

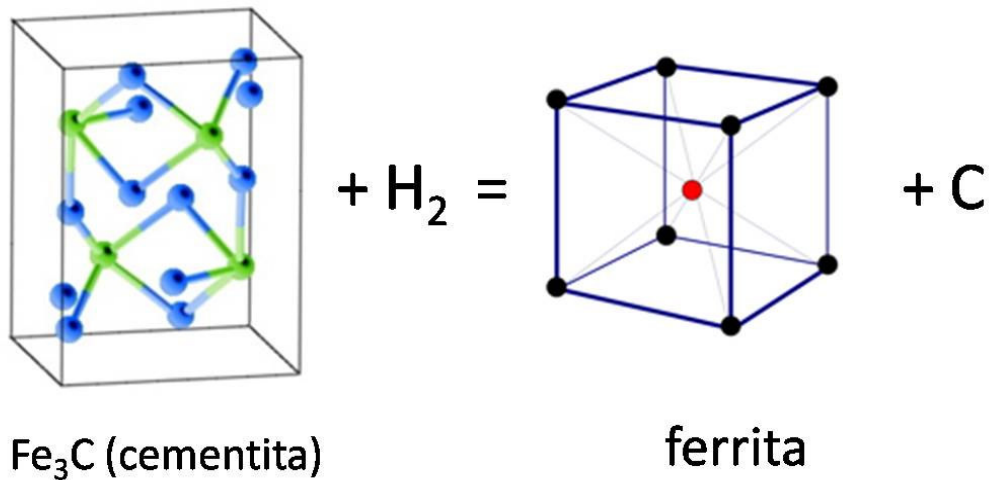


$$e \approx p R / \sigma_{adm}$$

sendo  $e$  a espessura;  $p$  a pressão de projeto;  $R$  o raio interno e  $\sigma_{adm}$  a tensão admissível.

### 3.1.2.1 ALGUNS PROBLEMAS RELACIONADOS A CALDEIRAS

Uma alteração na estrutura metalográfica do aço, é devido à alta capacidade de produção de vapor, ocorre nas caldeiras que operam a pressões elevadas, a decomposição da água, com o conseqüente desprendimento de oxigênio e de hidrogênio. O  $H_2$ , difundindo-se na estrutura do aço, atua sobre a cementita ( $Fe_3C$  – confere dureza e resistência ao aço carbono), decompondo-a em ferrita e carbono, o que reduz a resistência do aço. O  $H_2$  pode ainda reagir com o carbono, produzindo  $CH_4$  (gás metano), que provoca o empolamento do aço, ou seja, a formação de protuberâncias superficiais.



**FIGURA 8** – Alteração na estrutura metalográfica do aço da caldeira

Outros problemas na caldeiras podem ser incrustações. As incrustações são deposições de sólidos sobre as superfícies de aquecimento, no lado da água, devido à presença nessa de impurezas: sulfatos, carbonatos de cálcio e/ou magnésio, silicatos complexos (contendo Fe, Al, Ca e Na) e sólidos em suspensão. Aparecem ainda, devido à presença de precipitados que resultam de tratamentos inadequados da água da caldeira (barras de fosfato de cálcio ou magnésio) e de óxidos de ferro não protetores. A incrustação, se comportando como isolante térmico (a condutividade térmica é cerca de 45 vezes menor que a do aço), não

permite que a água mantenha refrigerada as superfícies de aquecimento. Isso reduz a transferência de calor do aço para a água, fazendo com que o aço absorva mais calor sensível e aumentando sua temperatura de forma proporcional à quantidade de calor recebida. Nos casos de incrustações generalizadas há um agravamento da situação para manter-se a água na temperatura de ebulição, pois é necessário o aumento do fornecimento de calor no lado dos gases. Com esse aumento de temperatura, podem ocorrer as seguintes conseqüências indesejáveis com relação à segurança do equipamento:

- O aço, previsto para trabalhar em temperaturas da ordem de 300°C, fica exposto a temperaturas da ordem de 500°C, fora dos limites de resistência. Portanto, o risco de explosão acentua-se.
- A camada incrustante pode romper-se e soltar-se, fazendo a água entrar em contato direto com as paredes do tubo em alta temperatura, o que pode provocar a expansão repentina da água e, de conseqüência, a explosão.
- Formação de zonas propícias à corrosão, em virtude da porosidade da camada incrustante e a possibilidade da migração de agentes corrosivos para sua interface com o aço.

Um dos principais responsáveis pela degradação das caldeiras é a corrosão, que age como fator de redução da espessura das superfícies submetidas a pressão. A corrosão não é sentida pelos instrumentos de operação da caldeira, ou seja, os pressostatos e as válvulas de segurança não detectam sua evolução por que não é acompanhada por elevação de pressão de trabalho. A corrosão avançada das partes da caldeira, pode ser causa de explosões até mesmo em pressões inferiores à PMTA – Pressão Máxima de Trabalho Admissível. Portanto, o avanço da corrosão em caldeiras só pode ser detectado por meio de inspeções minuciosas do equipamento (obrigatórias por lei).

A corrosão nas caldeiras podem ocorrer tanto nas partes em contato com a água (corrosão interna), como nas partes em contato com os gases (corrosão externa).

### 2.1.3 TURBINAS

As turbinas podem ser organizadas quanto ao tipo de material que utilizam para seu trabalho. Sendo: turbinas a gás e a vapor. É preciso considerar que grande parte dessas turbinas apresentam-se de forma semelhante e que serão abordadas apenas uma vez.

O que difere as turbinas é que na turbina a gás, ela é considerada juntamente com o compressor e o combustor, pois estes ficam praticamente em uma peça. Já em turbinas a vapor pode-se observar muito bem a distinção entre a turbina e as outras partes.

Os critérios de escolha do material empregado na fabricação dos componentes das turbinas dependem fortemente:

- Das diferentes condições de serviço (Temperatura e Pressão),
- De sua dimensão,
- Tipo de fabricação,
- Esforços a que está submetido o componente,
- Aspectos econômicos

A capacidade dos materiais para desempenhar o papel que lhe é designado se define e controla mediante:

- ensaios mecânicos,
- ensaios químicos,
- ensaios metalográficos
- ensaios elétricos

(Estes ensaios são realizados em peças acabadas ou em processo de fabricação)

As partes críticas de uma turbina são aquelas em contato com o vapor de admissão (alta pressão, alta temperatura) visto que as características mecânicas de um metal se modificam bastante com a elevação da temperatura.

Os materiais escolhidos devem:

- apresentar boa resistência à oxidação e corrosão;
- apresentar boa estabilidade estrutural sob elevada temperatura durante um espaço de tempo prolongado;
- apresentar dureza superficial para resistir à erosão

- ser soldável, pois em alguns casos o único modo de montagem (resistência e construção) é a soldagem.

### 3.1.3.1 TURBINAS A GÁS

Nas termelétricas, o combustível mais utilizado é o gás natural, embora seja quase sempre dada a possibilidade de operar com um segundo combustível, por exemplo, como o óleo diesel, para evitar interrupções no caso de problemas no suprimento do gás.

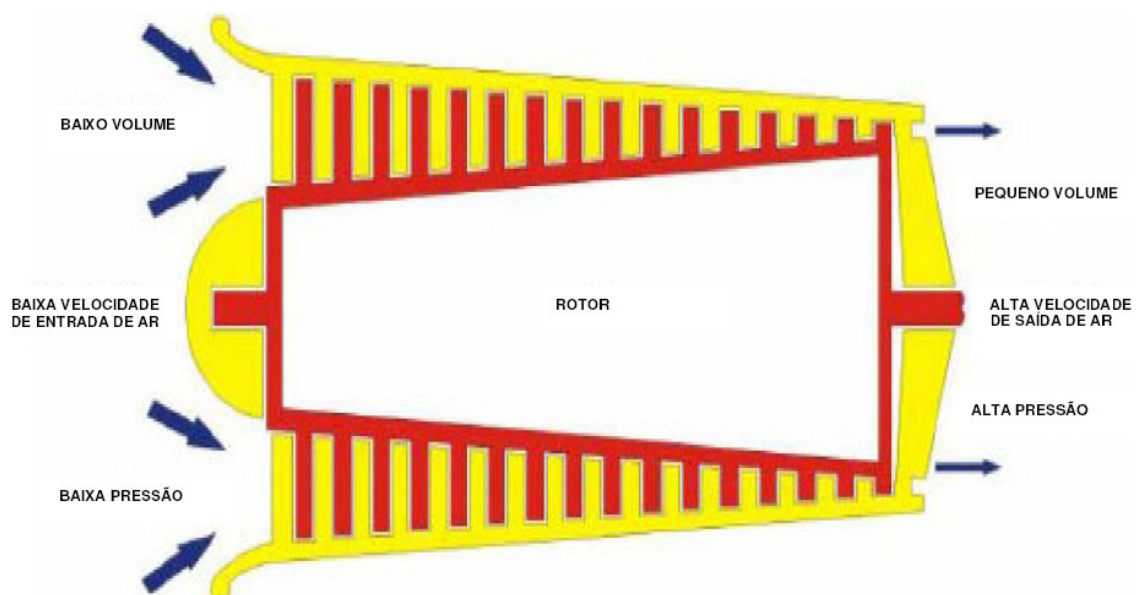
Usinas onde não há o fornecimento de gás ainda operam com o óleo diesel, mas têm um custo de geração maior que na geração com o gás natural, além dos problemas trazidos para o meio ambiente pela queima do óleo diesel.

Pode se distinguir três componentes principais em uma turbina a gás:

- O compressor;
- O sistema de combustão (combustor);
- A turbina propriamente dita.

Mas iremos dividir estes assuntos em partes, pois a turbina propriamente dita das turbinas a gás e a vapor são, consideravelmente, parecidas e serão abordadas simultaneamente.

### 3.1.3.2 COMPRESSOR



**FIGURA 9** – Esquema de funcionamento do compressor

O ar atmosférico captado pelo compressor é comprimido e direcionado para o sistema de combustão.

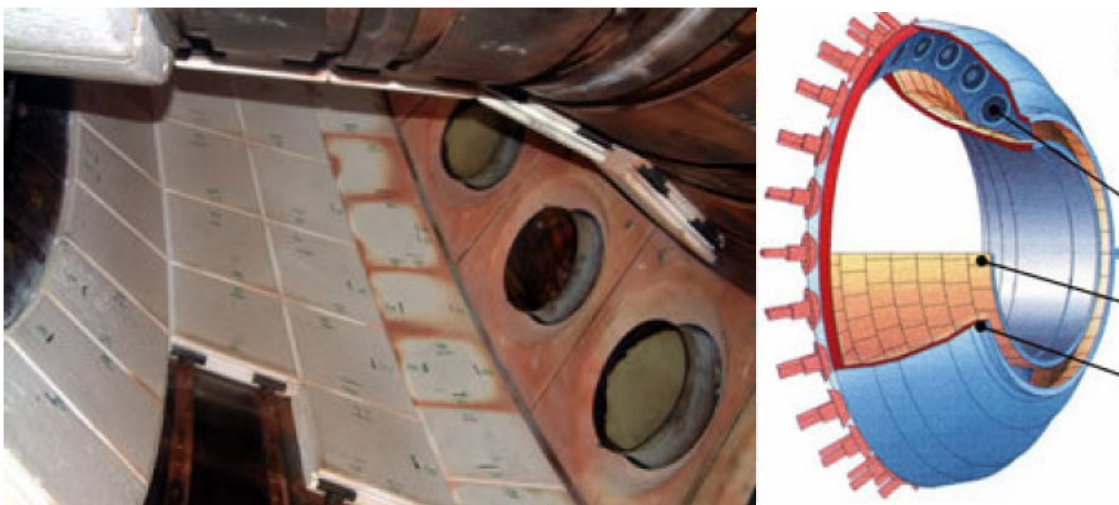
O movimento das palhetas do compressor converte energia mecânica em cinética. As palhetas móveis são adaptadas, dentro de seus respectivos encaixes, nos discos do rotor.

Essas palhetas são travadas aos discos do rotor, prevenindo que se soltem durante o movimento de rotação do eixo. Uma camada especial na superfície é adotada para as lâminas dos primeiros estágios do compressor para evitar corrosão. As palhetas são fixadas à carcaça externa, possuindo um anel de fixação interno e outro externo.

### 3.1.3.3 COMBUSTOR

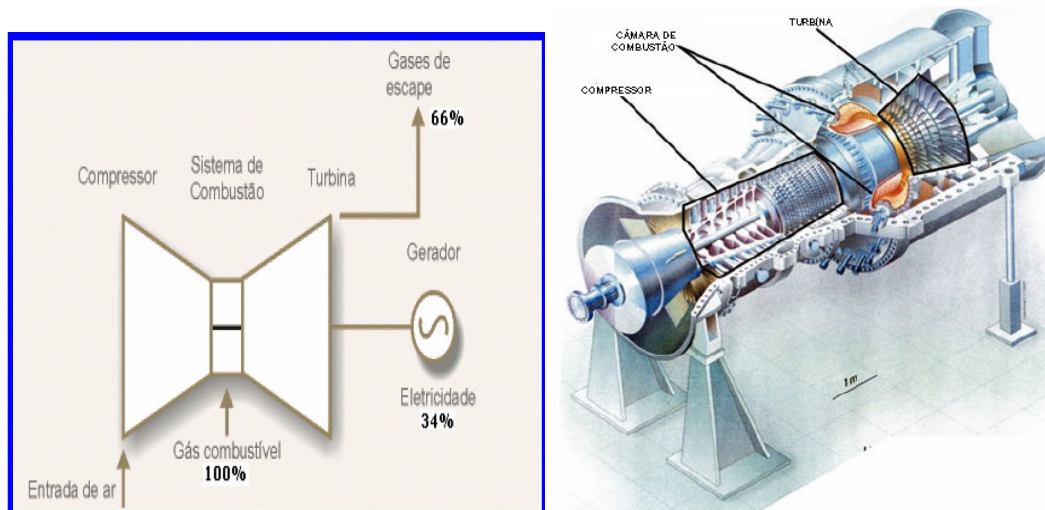
O propósito da câmara de combustão (ou combustor) é aquecer e acelerar o ar que é entregue pelo compressor. Após passar pelo sistema de combustão, a temperatura se eleva para aproximadamente 1250°C, devido à queima dos gases, expandindo-se e direcionando-se para o acionamento da turbina. O combustor tem formato anular com superfícies de tijolos cerâmicos e placas metálicas defletoras de calor.

Quase todo o ar entra no combustor pelos 24 queimadores. Parte deste ar é misturado com o combustível para sustentar o processo de combustão, e o resto é aquecido/expandido pelo calor. Uma pequena porcentagem do fluxo de ar é usada no resfriamento dos tijolos cerâmicos.



**FIGURA 10** – Estrutura interna do combustor (revestida de placas cerâmicas)

A Fig. 10 apresenta um arranjo típico de uma turbina a gás em ciclo simples, apresentado a energia de entrada e saída.



**FIGURA 11** – Esquema e foto de uma turbina a gás

### 3.1.3.4 TURBINAS A VAPOR

As turbinas a vapor são máquinas de combustão externa (os gases resultantes da queima do combustível não entram em contato com o fluido de trabalho que escoar no interior da máquina e realiza os processos de conversão da energia do combustível em potência de eixo). Devido a isto apresentam uma flexibilidade em relação ao combustível a ser utilizado, podendo usar inclusive aqueles que produzem resíduos sólidos (cinzas) durante a queima.

A turbina a vapor não se caracteriza como a turbina a gás pois esta por sua vez apresenta apenas a turbina separada, não necessitando um compressor e um combustor.

### 3.1.3.5 TURBINA

Em turbinas a gás, a turbina é responsável pelo acionamento tanto do compressor como do gerador elétrico. Já em turbinas a vapor, ela é responsável apenas pelo acionamento do gerador elétrico.

Uma turbina a vapor consiste basicamente de:

- Um eixo: montado internamente à carcaça através dos mancais de deslizamento,

- Mancais de deslizamento: suportam as cargas verticais e circunferenciais
- Rolamentos de carga axial: resistem ao esforço provocado pelo fluxo de vapor
- Discos: são montados sobre o eixo
- Lâminas: são fixadas nos discos
- Bocais: direcionam o fluxo de vapor para as lâminas
- Selos: usados para prevenir a perda de vapor
- Carcaça: envoltório que suporta os elementos estacionários

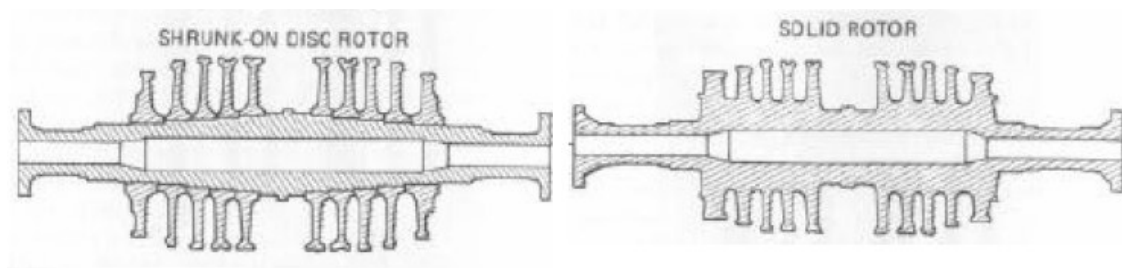
O rotor é o elemento móvel da turbina (envolvido pelo estator) cuja função é transformar a energia cinética do vapor em trabalho mecânico através dos receptores fixos. Ele consiste em um eixo em que um ou mais discos são montados.

Os discos da turbina são montados por ajuste de interferência e chaveta ou soldados ao eixo do equipamento. Nestes, o eixo pode ser usinado a partir de uma barra laminada de aço carbono, para temperaturas de trabalho moderadas, ou a partir de uma barra laminada ou um tarugo forjado de aço liga, para temperaturas de trabalho mais elevadas.

As rodas podem ser usinadas a partir de chapas de aço carbono laminadas, para temperaturas moderadas, ou a partir de discos forjados em aço liga, para temperaturas mais elevadas.

Para turbinas maiores ou para aquelas que operam em temperaturas maiores que 400°C, os discos são forjados no eixo.

Em ambos os casos é indispensável o balanceamento estático e dinâmico do conjunto rotativo. Conjuntos rotativos integrais são normalmente obtidos por usinagem a partir de uma peça forjada em aço liga.



**FIGURA 12** – Esquema de rotores de receptores fixos e móveis



A carcaça pode ser sub-dividida ao longo do seu comprimento o que caracteriza as seções de alta e baixa pressão.

O material empregado na carcaça da turbina pode ser ferro fundido, aço ou liga de aço, dependendo das condições pressão e temperatura.

À medida que as condições da pressão e temperatura de vapor vão se tornando mais severas, o material da carcaça muda para um aço de baixa liga fundido ou um aço inoxidável ferrítico.

Em condições extremas, usa-se aço inoxidável austenítico.

Em turbinas condensantes de potência elevada, é bastante comum, por facilidade construtiva, a adoção de uma construção soldada, a partir de chapas de aço carbono, que oferecem também como vantagens, maior rigidez, menor tempo e custo de fabricação e união perfeita com o condensador diretamente por soldagem.

A função dos mancais é de suportar o rotor na seção do compressor e da turbina. O compartimento do mancal do compressor engloba uma concha interna e uma concha externa, que forma o canal de entrada de ar do compressor. A concha interna acomoda o mancal e o impulsor do *turning gear* da turbina a gás, que é acoplado ao eixo intermediário.



**FIGURA 13** – Mancais da turbina e do compressor

O mancal é revestido internamente por um material chamado “babbit”, uma combinação de metais ditos “moles”, que se fundem a uma temperatura mais baixa quando comparado com o metal do eixo e do mancal. Isto previne danos ao metal do eixo do turbogerador e ao metal do mancal.

Óleo lubrificante é fornecido sob pressão através de perfurações do babbit do mancal, assegurando que a lubrificação seja mantida.



Três termopares monitoram a temperatura do casquilho do mancal, objetivando proteger o mancal contra excesso de temperatura.

O compartimento do exaustor da turbina e a carcaça do mancal compreendem um cilindro interno, que é apoiado por cinco suportes radiais. Este mancal é protegido por um revestimento térmico, devido à elevada temperatura de exaustão da turbina a gás.

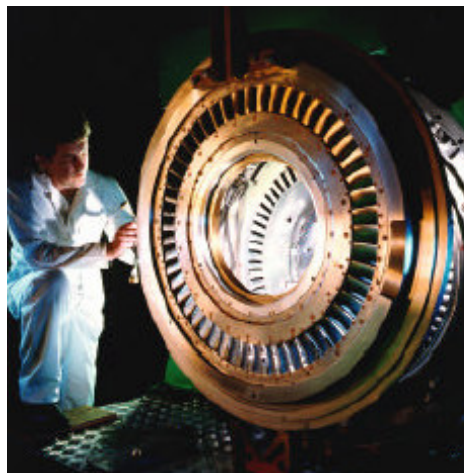
O expansor (que não estão presentes em turbinas a gás) possui a função é orientar o jato de vapor sobre as palhetas móveis. No expansor o vapor perde pressão e ganha velocidade.

O arco de expansores usado no primeiro estágio de máquinas multi-estágio é obtido pela usinagem individual dos expansores, a partir de blocos de aço inoxidável ferrítico com 12% Cr. Estes expansores são então encaixados e soldados no arco de expansores.

O anel de expansores fica colocado em uma peça circular, encaixada na carcaça da turbina, o diafragma.

Já os diafragmas são constituídos por dois semicírculos, que separam os diversos estágios de uma turbina de ação multi-estágios.

Entre o eixo e o diafragma existe um conjunto de anéis de vedação que reduz a fuga de vapor de um para outro estágio através da folga existente entre diafragma-base do rotor de forma que o vapor só passa pelos expansores.



**FIGURA 14** – Foto de um diafragma e as palhetas

As palhetas fixas (guias, diretrizes), estão acopladas ao rotor, orientam o vapor para a coroa de palhetas móveis seguinte. Elas podem ser encaixadas

diretamente no estator (carcaça), ou em rebaixos usinados em peças chamadas de anéis suportes das palhetas fixas, que são, por sua vez, presos à carcaça.

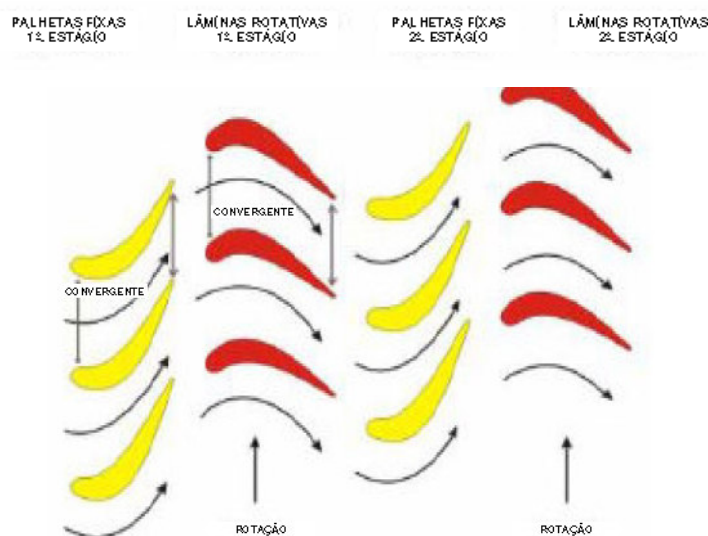
As palhetas móveis, são aquelas acopladas ao rotor, sendo entendidas como peças com a finalidade de receber o impacto do vapor proveniente dos expansores (palhetas fixas) para movimentação do rotor.

Palhetas de turbinas são quase sempre feitas em aço inoxidável ferrítico com 13% cromo:

- este material apresenta boa resistência mecânica em temperaturas elevadas,
- boa capacidade de amortecimento de vibrações e
- boa resistência à erosão.

O compartimento das palhetas fixas da turbina transmite as forças de reação do fluxo de gases quentes que passa através da mesma.

A ilustração da figura 14 apresenta os fundamentos da operação da seção da turbina. Os gases quentes entram no primeiro estágio da turbina, que é formado por palhetas fixas. A entrada da turbina é um duto convergente. Isto faz com que os gases quentes do combustor acelerem ainda mais antes de atingir as palhetas móveis do primeiro estágio, que estão localizadas imediatamente após as palhetas fixas do primeiro estágio. Com o impacto (impulso) da força dos gases quentes, a palheta móvel é empurrada, causando a rotação. O mesmo ocorre com as demais seções da turbina (2º, 3º e 4º estágios).

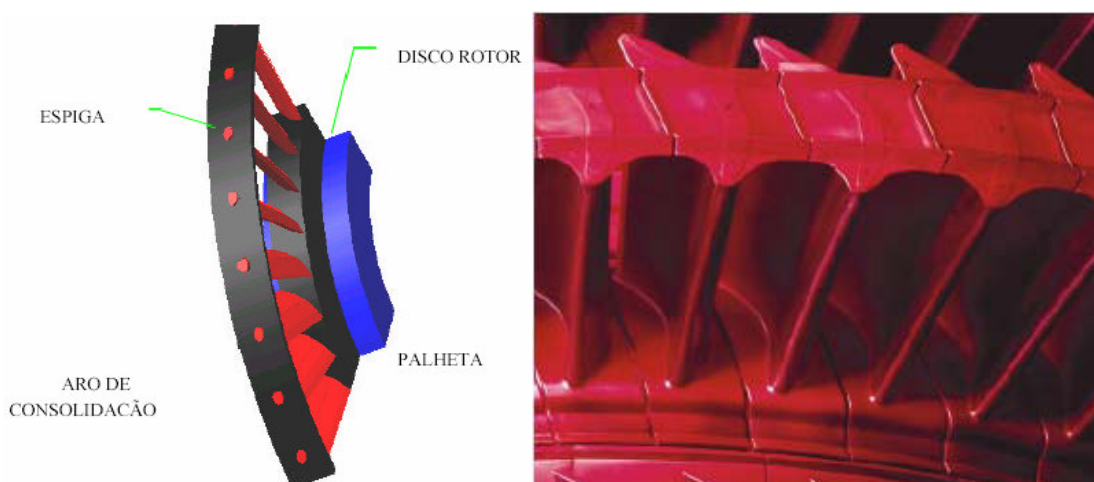


**FIGURA 15** – Esquema de funcionamento das palhetas

As palhetas são protegidas com ar de resfriamento devido ao estresse rigoroso a altas temperaturas. Uma camada protetora é aplicada às palhetas para aumentar sua resistência a corrosão. As primeiras fileiras possuem uma camada adicional de cerâmica protetora (*thermal coating*).

O aro de consolidação é uma tira metálica, seccionada, presa às espigas das palhetas móveis com a finalidade de aumentar a rigidez do conjunto, diminuindo a tendência à vibração das palhetas e de reduzir a fuga do vapor pela sua periferia.

Nas selagens externas de uma turbina a vapor ocorre uma condensação contínua de vapor. Para resistir à corrosão, nestas condições, todos os componentes da selagem, como labirintos, espaçadores dos anéis de carvão, molas, devem ser de material resistente à corrosão, como aço inoxidável, monel, inconel.



**FIGURA 16** – Foto do aro de consolidação

### 3.1.3.6 CHAMINÉS

Para minimizar os efeitos contaminantes da combustão sobre as redondezas possibilitando uma ampla dispersão dos gases resultantes da queima do combustível, a central dispõe de uma chaminé de grande altura (aproximadamente 150 metros podendo chegar até 300 metros). Feitas de concreto ou com um base de concreto de alta resistência e anéis de aço.

### 3.1.3.7 CONDENSADOR

O condensador é um trocador de calor. Na maioria dos casos práticos, é usado um circuito separado de água com torre de resfriamento. Uma vez condensado o vapor, a água retorna para a caldeira através de uma bomba e o ciclo se completa.

Ela é uma caixa provida de tubos metálicos que são dispostos de forma transversal ao fluxo de vapor. Por estes tubos faz-se passar água com temperatura ambiente, muito mais baixa que a temperatura do vapor de exaustão da turbina. Ao entrar em contato com a superfície fria destes tubos o vapor se condensará.

Este condensado de vapor ou água será bombeado para a caldeira novamente, completando o ciclo fechado.

### **3.1.3.8 GERADORES ELÉTRICOS**

O gerador elétrico mais simples é formado por uma espira plana com liberdade suficiente para se mover sob a ação de um campo magnético uniforme. Essa espira gira em torno de um eixo perpendicular à direção das linhas de força do campo magnético aplicado. A variação do valor do fluxo que atravessa a espira móvel induz nela uma força eletromotriz. Assim, a força eletromotriz resulta do movimento relativo que há entre a espira e o campo magnético. A corrente produzida desse modo é alternada. Para se obter corrente contínua, é preciso dotar o gerador de um dispositivo que faça a retificação da corrente, denominado coletor dos dínamos. Pela descrição do princípio de funcionamento dos geradores, vê-se que possuem dois circuitos distintos: o do induzido e o do indutor. No caso do gerador elementar descrito, o induzido seria a bobina móvel e o indutor o campo magnético.

O dínamo é formado das seguintes partes principais: carcaça, núcleo e peças polares, núcleo do induzido ou armadura, induzido, coletor, escovas, porta-escovas, eixo e mancais. A carcaça é o suporte mecânico da máquina e serve também como cobertura externa. É normalmente construída de aço ou ferro fundido. Os pólos são feitos de aço-silício laminado, para reduzir ao máximo as perdas por corrente de Foucault, e as bobinas de campo são de fios de cobre. A armadura, peça que aloja as bobinas do induzido, é de aço laminado e possui condutores internos por onde se faz o resfriamento da máquina.

O coletor consiste numa série de segmentos de cobre ou bronze fosforoso, isolados entre si por finíssimas lâminas de mica, que têm a forma externa

perfeitamente cilíndrica. Ao coletor são soldados os terminais das bobinas do induzido. As escovas, órgãos que coletam a corrente retificada no coletor, são de carvão e grafita ou metal e grafita. O porta-escovas é a armação metálica que mantém ajustadas as escovas de encontro ao coletor. Os mancais mais usados são os do tipo de luva, lubrificados por óleo, ou então do tipo de esferas ou rolamentos lubrificados a graxa. No alternador, não existe o coletor. Quando o induzido é giratório, as escovas fazem contato com anéis coletores, a partir das quais a corrente alternada gerada é transferida para o circuito externo. Quando, ao contrário, o induzido é estacionário (caso mais freqüente), o papel dos anéis coletores e escovas é conduzir a corrente contínua necessária para a excitação do campo girante. Nos alternadores de grande porte é comum a instalação, no mesmo eixo do rotor das máquinas, de um gerador de corrente contínua de menores proporções (denominado excitatriz) para o fornecimento dessa corrente.

#### **4. VANTAGENS E DESVANTAGENS**

##### **4.1 VANTAGENS DAS TERMOELÉTRICAS**

- O impacto de construção de uma usina termoelétrica é zero. Já para a usina térmica é justamente o contrário.
- Há uma grande flexibilidade e disponibilidade quanto aos combustíveis utilizados.
- As termoelétricas têm a vantagem de podem ser instaladas mais próximas dos centros consumidores, diminuindo assim a extensão das linhas de transmissão, minimizando conseqüentemente as perdas ao longo dessas linhas, que poderiam chegar até a 16%.
- Não inunda grandes áreas a beira rio (como as hidrelétricas).
- Serve como medida de segurança, aumentando a segurança no abastecimento de energia, onde o risco de “apagões” é reduzido.
- O gás natural pode ser usado, com a vantagem de ser menos poluente que os combustíveis derivados do petróleo e o carvão.

##### **4.2 DESVANTAGENS DAS TERMOELÉTRICAS**

- O impacto da térmica está na operação, poluindo muito mais que a hidroelétrica.
- Matéria prima de recursos naturais não renováveis, ou seja, ainda promove a escassez futura destes recursos naturais.
- O alto preço do combustível é um fato desfavorável.
- Os impactos ambientais, como poluição do ar, contribuindo com o efeito estufa, devido a liberação dos gases pela queima dos combustíveis.
- A necessidade do transporte do combustível.

## **5. PERSPECTIVAS, EVOLUÇÃO E AVANÇOS TECNOLÓGICOS**

Grande parte dos avanços tecnológicos se apresenta quanto aos combustíveis utilizados nas usinas termoeletricas, sendo que estes avanços se caracterizam pela busca de fontes renováveis e limpas de energia.

Abaixo sejam apresentados alguns desses avanços quanto aos combustíveis.

### **5.1 USINA TERMELÉTRICA PRODUZIRÁ ENERGIA POR MEIO DA CASCA DO ARROZ**

A Cooperativa Agroindústria Alegrete (Caal) está construindo, no município de Alegrete (RS), uma usina termelétrica que produz energia a partir da casca de arroz.

A produção de 26856 MW/h por ano vai representar economia de R\$ 1,8 milhão. O excedente de energia que a cooperativa não utilizar poderá ser oferecido a outros consumidores.

A idéia é que a energia termelétrica será produzida a partir da queima da casca de arroz. A expectativa é que a usina, que produzirá, 3,8 megawatts, e está em obra desde meados de 2008. A energia gerada será utilizada em todo o município.

### **5.2 FLEXGAS**

É um gás combustível alternativo formado a partir da mistura de GLP (gás liquefeito de petróleo) com o ar, realizada por um equipamento denominado misturador dentro da central, sem qualquer intervenção operacional do cliente, e que apresenta características de queima semelhantes ao Gás Natural. Se tornando um

forte aliado ao Gás Natural, permitindo assim, que o consumidor possa trabalhar com o Gás Natural ou o Flexgas.

Podendo ser utilizados em indústrias (ideal para processos que exigem a queima em contato direto com o produto final), geração de energia (atendendo as legislações ambientais cada vez mais rigorosas) e comerciais (climatização, cocção, refrigeração, e produção de água quente).

### **5.3 USINAS TERMOELÉTRICAS A LIXO**

Os moradores de Fairfax, no estado americano da Virginia, estão, de certa forma, contribuindo com a limpeza das ruas. O lixo de um milhão de pessoas vai todo para uma usina. A energia é suficiente para abastecer 80 mil casas, 20% da população.

Cerca de 15 mil toneladas de lixo torna-se energia elétrica, diariamente.

Restos de comida, eletrônicos, plástico, tudo que não presta arde num inferno a mais de 1000°C. Os gases tóxicos que sobram depois da queima do lixo são filtrados, e só uma quantidade mínima sai pela chaminé.

Eles não mostram, mas 10% do lixo que entra na usina saem daqui em forma de cinzas e vão para um aterro. Ainda assim, o diretor de sustentabilidade, Paul Gilman, diz que a usina de lixo polui muito menos que as termoelétricas que usam gás ou carvão.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A utilização de materiais em usinas termoelétricas tem grande parte base nas estruturas de liga de ferro e/ou isoladores (térmicos) cerâmicos, pois estas apresentam características ideais para o trabalho em temperaturas elevadas.

Porém, a utilização de termoelétricas é uma questão muito polêmica, ainda mais com as mudanças climáticas que estamos enfrentando atualmente, devido ao fato da grande poluição resultante da queima dos combustíveis.

Observou-se também que há constantes estudos e avanços para a area das termoelétricas quando relacionados aos combustíveis, devido a busca de combustíveis mais baratos, menos poluentes e de preferência com fontes renováveis.

## 7. REFERÊNCIAS

ALTAFANI, Carlos Roberto. Apostila sobre caldeiras. Disponível em:

<<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/caldeiras-apostila.pdf>>. Acesso em: 1 abr. 2009.

BHADESHIA, H. K. D. H. Metrollography os steels. Disponível em:

<<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2008/Steel-Microstructure/SM.html>>.

Acesso em: 1 abr. 2009.

CALLISTER, Jr. W. D. Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

GIACAGLIA, Giorgio Eugênio Oscare. Ciclos termodinâmicos técnicos. Disponível em: <<http://br.geocities.com/resumodefisica/termodinamica/trm08.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2009.

MULLER, Garcia. Usina termelétrica produzirá energia por meio de casca do arroz. Disponível em: <[http://www.gestaoct.org.br/eletronico/inov\\_energ/inform/IEnumero07.htm#8](http://www.gestaoct.org.br/eletronico/inov_energ/inform/IEnumero07.htm#8)>. Acesso em: 10 abr. 2009.

PANNONI, Fabio Domingos. Aços estruturais. Disponível em:

<[http://www.gerdau.com.br/GerdauAcominas/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnica/artigostecnicos/A%C3%A7os\\_estruturais.pdf](http://www.gerdau.com.br/GerdauAcominas/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnica/artigostecnicos/A%C3%A7os_estruturais.pdf)>. Acesso em: 1 abr. 2009.

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

Aço inoxidável. Disponível em: <<http://www.mundoeducacao.com.br/quimica/aco-inoxidavel.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2009.

Aço inoxidável. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Aço\\_inoxidável](http://pt.wikipedia.org/wiki/Aço_inoxidável)>. Acesso em: 10 abr. 2009.



Apostila de turbina a vapor (1 a 3). Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/turbinas-a-vapor-1-a7233.html>>. Acesso em: 1 abr. 2009.

Energia. Disponível em:

<<http://www.global21.com.br/informessoriais/setor.asp?cod=5>>. Acesso em: 27 jun. 2009.

FLEXGAS. Disponível em:

<[http://www.liquigas.com.br/wps/portal!/ut/p/c0/04\\_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hvPwMjIw93IwMDFzCjA6OgoADLQA8XQ-dQM\\_2CbEdFALWZiCs!/?PC\\_7\\_KN022HG20OVI40270TOD3A1OM6\\_WCM\\_CONTENT=/wps/wcm/connect/web+content/Liquigas/Menu/Produtos+e+Servicos/FLEXGAS/](http://www.liquigas.com.br/wps/portal!/ut/p/c0/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hvPwMjIw93IwMDFzCjA6OgoADLQA8XQ-dQM_2CbEdFALWZiCs!/?PC_7_KN022HG20OVI40270TOD3A1OM6_WCM_CONTENT=/wps/wcm/connect/web+content/Liquigas/Menu/Produtos+e+Servicos/FLEXGAS/)>. Acesso em: 12 abr. 2009.

Geração de energia. Disponível em:

<[http://m.albernaz.sites.uol.com.br/geracao\\_de\\_energia\\_eletrica.htm](http://m.albernaz.sites.uol.com.br/geracao_de_energia_eletrica.htm)>. Acesso em: 8 abr. 2009.

Gerador elétrico. Disponível em: <<http://m.albernaz.sites.uol.com.br/geradores.htm>>. Acesso em: 8 abr. 2009.

MÓDULO I – Fundamentos de geração termoelétrica. Disponível em:

<<http://www.ebah.com.br/fundamentos-da-geracao-termoeletrica-pdf-a10344.html>>. Acesso em: 28 mar. 2009.

MÓDULO II – Descrição do ciclo combinado. Disponível em:

<<http://www.ebah.com.br/descricao-do-ciclo-combinado-pdf-a10345.html>>. Acesso em: 28 mar. 2009.

MÓDULO III – Turbina a gás. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/turbina-a-gas-pdf-a10349.html>>. Acesso em: 28 mar. 2009.

MÓDULO IV – Água e vapor. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/agua-e-vapor-pdf-a10351.html>>. Acesso em: 28 mar. 2009.

Termelétrica, Ciclo Combinado e Cogeração. Disponível em:

<<http://m.albernaz.sites.uol.com.br/termeletrica.htm>>. Acesso em: 8 abr. 2009.

Usina Termoelétrica. Disponível em:

<<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/index.html&contedo=./energia/termeletrica.html>>. Acesso em: 1 abr. 2009.

## **MATERIAIS UTILIZADOS EM GERADORES DE HIDRELÉTRICAS**

Bruno Rafael Gris

### **1. INTRODUÇÃO**

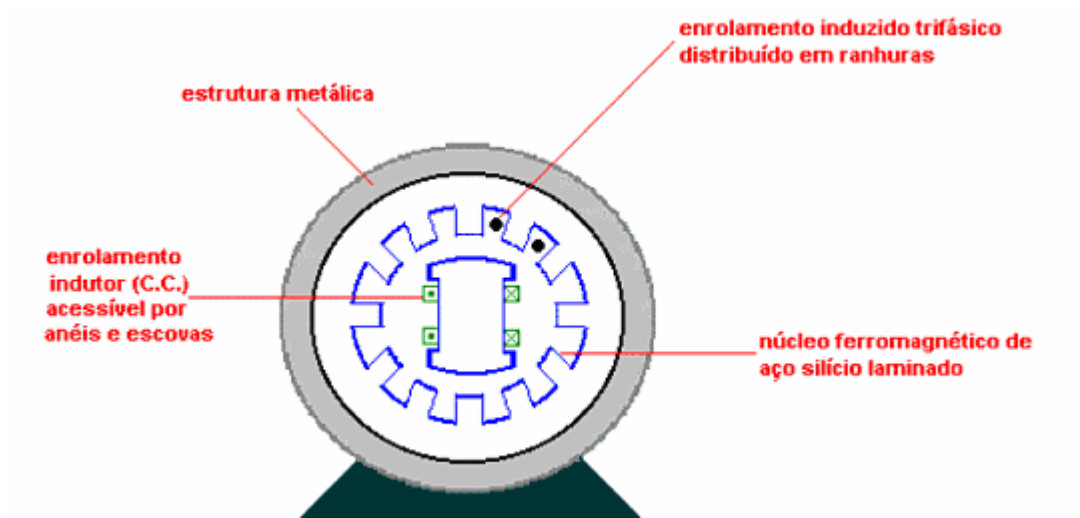
Existem diversos tipos de materiais encontrados em um gerador sendo os materiais como aço silício, aço carbono, e o cobre os mais importantes a serem estudados quanto as sua características térmicas, elétricas, ferro magnéticas e mecânicas

O aço silício possui uma alta capacidade de conduzir o fluxo magnético e baixa capacidade de conduzir corrente elétrica devido a presença de 3% do silício, reduzindo assim as perdas por correntes induzidas chamadas de correntes de Foucault . As correntes de Foucault ocorrem por indução do próprio fluxo magnético que percorre o material, o silício é adicionado ao material justamente por possuir característica de isolante aumentando a resistividade elétrica do material.

O cobre é um excelente condutor de eletricidade e é utilizado como enrolamentos do rotor e estator, no rotor de um gerador ele tem a função junto ao material ferromagnético produzir um campo magnético constante e no estator que é parte fixa da maquina gerar energia elétrica a partir do campo magnético aplicado a ele normalmente chamado de induzido.

### **2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM GERADOR ELETROMECHANICO**

O gerador elétrico mais simples é formado por uma espira plana com liberdade suficiente para se mover sob a ação de um campo magnético uniforme. Essa espira gira em torno de um eixo perpendicular à direção das linhas de força do campo magnético aplicado. A variação do valor do fluxo que atravessa a espira móvel induz nela uma força eletromotriz. Assim, a força eletromotriz resulta do movimento relativo que há entre a espira e o campo magnético. A corrente produzida desse modo é alternada. Para se obter corrente contínua, é preciso dotar o gerador de um dispositivo que faça a retificação da corrente, denominado coletor dos dínamos. Pela descrição do princípio de funcionamento dos geradores, vê-se que possuem dois circuitos distintos: o do induzido e o do indutor. No caso do gerador elementar descrito, o induzido seria a bobina móvel e o indutor o campo magnético.



**FIGURA 1** - Corte transversal de um gerador

## 2.1 PARTES CONSTITUINTES DO GERADOR

### 2.1.1 ROTOR (CAMPO)

Parte girante da máquina, constituído de um material ferromagnético, normalmente o aço silício, envolto em um enrolamento chamado de enrolamento de campo, que tem como função de produzir um campo magnético constante assim como no caso do gerador de corrente contínua para interagir com o campo produzido pelo enrolamento do estator. A tensão aplicada nesse enrolamento é contínua e a intensidade da corrente suportada por esse enrolamento é muito menor que o enrolamento do estator, além disso o rotor pode conter dois ou mais enrolamentos, sempre em número par e todos conectados em série sendo que cada enrolamento será responsável pela produção de um dos pólos do eletro-ímã.

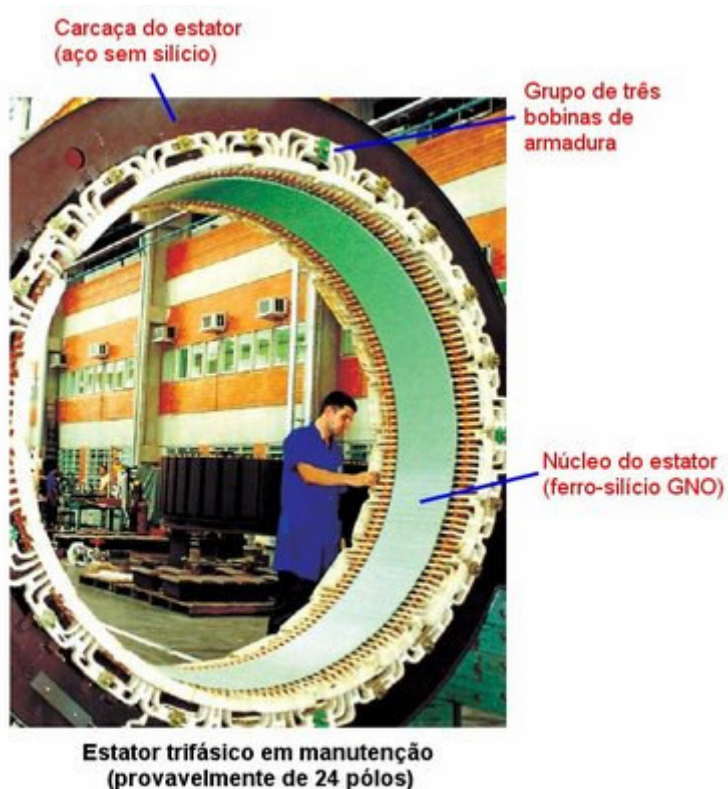


**FIGURA 2** – Rotor de um gerador

### 2.1.2 ESTATOR (ARMADURA)

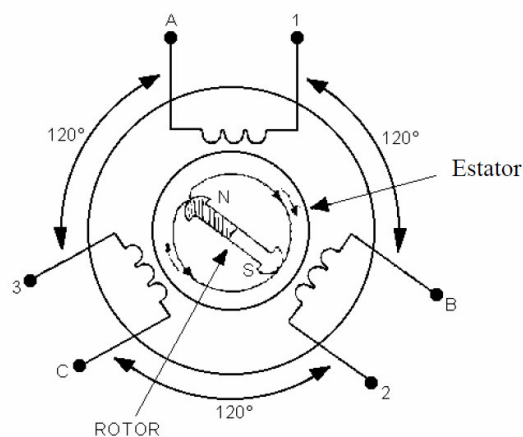
Parte fixa da máquina, montada em volta do rotor de forma que o mesmo possa girar em seu interior, também constituído de um material ferromagnético envolto em um conjunto de enrolamentos distribuídos ao longo de sua circunferência. Os enrolamentos do estator são alimentados por um sistema de tensões alternadas trifásicas.

Pelo estator circula toda a energia elétrica gerada, sendo que tanto a tensão quanto a corrente elétrica que circulam são bastante elevadas em relação ao campo, que tem como função apenas produzir um campo magnético para "excitar" a máquina de forma que fosse possível a indução de tensões nos terminais dos enrolamentos do estator.



**FIGURA 3** – Estator de um gerador

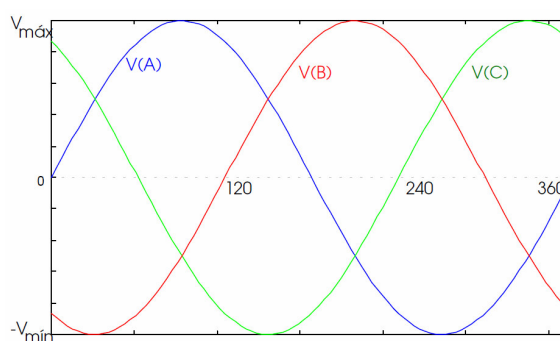
## 2.2 MODELO ESQUEMÁTICO DE UM GERADOR TRIFÁSICO



**FIGURA 4** – Representação básica de um gerador

$n_s$  (velocidade angular constante) = 3600 rpm

número de pólos = 2



$$V(A)_{MÁX} = (\text{sen } \pi t) [V]$$

$$V(B)_{MÁX} = \text{sen } (\pi - (2/3) \pi) t . [V]$$

$$V(C)_{MÁX} = \text{sem } (\pi - (4/3) \pi) [V]$$

**FIGURA 5** – Representação das tensões elétricas geradas no domínio do tempo

O gerador deve operar com velocidade síncrona constante para poder manter

a frequência da tensão alternada constante. Quando o gerador recebe carga, uma corrente irá circular nas bobinas do estator.

Esta corrente alternada trifásica consumida do gerador pela carga, irá criar no

estator um campo magnético de oposição ao campo magnético do rotor. Assim, para manter a velocidade do rotor constante, a turbina deve receber mais água (turbina hidráulica) para compensar o magnético frenante imposto ao valor pela corrente consumida pela carga.

Se agora, a carga for subitamente desligada do gerador, a tendência do rotor seria de dissipar a sua velocidade. Nesta condições, deve-se diminuir a quantidade de água que aciona a turbina, para se manter constante a velocidade do gerador.

Características desejáveis para um material ferro magnético em geradores:

- Alta permeabilidade magnética relativa;
- Baixa coercitividade magnética;
- Alta resistividade ou resistência elétrica;
- Alta indução de saturação.

### **3. FERROMAGNETISMO**

O ferromagnetismo é explicado pelo conceito de que algumas espécies de átomos possuem um momento magnético, que é um eletromagnetismo elementar produzido pelo movimento dos elétrons ao redor do núcleo e pelo spin dos seus elétrons sobre seus próprios eixos.

Um requisito de um material ferroelétrico é que seus átomos ou íons devem ter momento magnético permanente. O momento magnético de um átomo vem de seus elétrons, desde que a contribuição nuclear é negligenciável. Outro requisito para o ferromagnetismo é a existência de alguma força interatômica que deixe os momentos magnéticos de muitos átomos paralelos uns com os outros. Sem essa força os átomos estariam desordenados por agitação térmica, os momentos dos átomos vizinhos neutralizariam um ao outro e o alto momento magnético que é característico do ferromagnetismo não existiria.

### **4. COBRE**

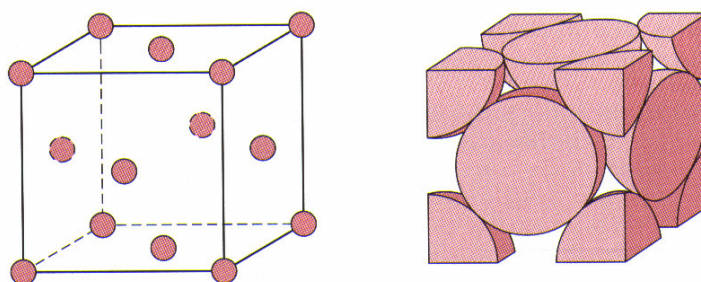
O cobre é um elemento químico metálico, vermelho-amarelado, de símbolo Cu (do latim *cuprum*), tem densidade 8,9 e funde-se a 1.084<sup>o</sup> C. Possui dois isótopos

estáveis, de massa 63 e 65, e nove radioativos, de massa, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 66, 67 e 68. Cristaliza no sistema cúbico e não possui formas alotrópicas.

Apresenta-se em compostos estáveis de valência 1 (cuprosos) e 2 (cúpricos). Não é atacado pelo ar seco, mas em ar úmido que contenha dióxido de carbono forma-se uma camada protetora esverdeada de carbonato básico (azinhavre). Dissolve-se bem no ácido nítrico, mas não é atacado a frio pelos ácidos clorídrico e sulfúrico; a quente, produz com esses ácidos, respectivamente: cloreto cuproso e sulfato de cobre. O cobre forma dois óxidos: óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), e óxido cúprico ( $\text{CuO}$ ).

O cobre é facilmente atacado pelo ácido nítrico. À exceção da prata, é o metal que melhor conduz eletricidade. Destaca-se também por sua elevada condutividade térmica, o que faz com que, devido a sua resistência à deformação e à ruptura, ele seja matéria-prima preferencial para a fabricação de cabos, fios e lâminas. É também maleável e dúctil, pois pode ser estirado sem quebrar. Por meio de tratamentos metálicos, como a laminação e o chapeamento, pode-se aumentar sua dureza.

- N° de coordenação: 12
- N° de átomos no interior do reticulado: 4 ( $8 \times 1/8 + 6 \times 1/2$ )
- Fator de empacotamento atômico: 0,74 (74% do volume da célula é ocupado por átomos)
- Parâmetro do reticulado:  $a = 2.R. 2$



**FIGURA 6** – Célula unitária do cobre

#### 4.1 HISTÓRIA DO COBRE

O cobre nativo, o primeiro metal usado pelo homem, era conhecido por algumas das mais antigas civilizações que se tem notícia e tem sido utilizado pelo

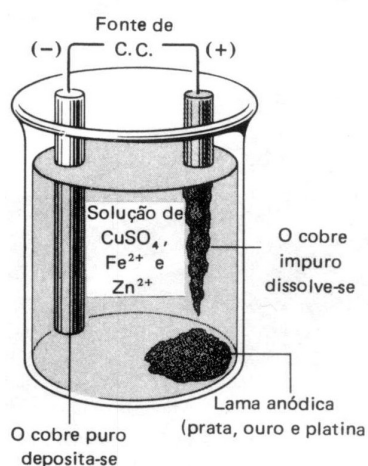


menos há 10.000 anos - onde atualmente é o norte do Iraque foi encontrado um colar de cobre de 8.700 a.C.; porém o descobrimento acidental do metal pode ter ocorrido vários milênios antes. Em 5.000 a.C. já se realizava a fusão e refinação do cobre a partir de óxidos como a malaquita e azurita.

## 4.2 OBTENÇÃO DO COBRE

A produção do cobre começa com a extração do mineral. Esta pode ser realizada a céu aberto (a exploração mais comum), e em galerias subterrâneas, este último procedimento, minoritário, consiste em filtrar ácido sulfúrico na mina de cobre bombeando, posteriormente, para a superfície as soluções ácidas ricas em cobre. O mineral extraído por métodos mecânicos, óxidos e sulfetos, é triturado obtendo-se um pó que contém usualmente menos de 1% de cobre. Este deverá ser enriquecido ou concentrado obtendo-se uma pasta com aproximadamente 15% de cobre que, posteriormente, é secado. A partir deste ponto pode-se utilizar outros métodos. O mineral é trasladado a um tanque de lixiviado no qual se filtra ácido sulfúrico diluído obtendo-se uma solução fraca de sulfato de cobre, do qual se obtém o cobre catodo, por eletrólise. Com o mineral enriquecido se prepara um misto, adicionado os fundentes necessários de base sílica para sulfetos e sulfetos para óxidos, que fundido produz o cobre blister. Este é refinado através de procedimentos térmicos obtendo-se anodos de cobre que, por sua vez, se refinam por eletrólise usando-os junto a lâminas mãe de cobre como catodo em meio ácido. Do lodo (subproduto da eletrólise) retira-se o ouro, a prata e a platina.

### 4.2.3 ELETRÓLISE DO COBRE

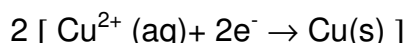


**FIGURA 7** – Eletrólise do cobre

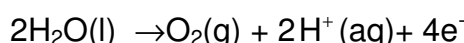
Aplicando-se uma corrente elétrica controlada, apenas o cobre se separa do ânodo e viaja através do eletrólito até depositar-se nas placas iniciadoras (o catodo), constituindo-se no cátodo de cobre, com pureza superior a 99,99%. Impurezas tais como Fe, Ni, As, Sb e Bi permanecem na solução. Somente os íons  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Cu}^{2+}$  passam à solução. Se houvesse apenas impurezas de Fe e Ag a tendência de oxidação diminuiria do Fe à Ag. A oxidação da Ag é difícil e assim na medida que o anodo se dissolve, precipita Ag, Au e vestígios de Pt, metais que não se oxidam, e sempre e quando o processo seja eficiente, obtém-se esse lodo anódico (que consiste numa fina lama de metais nobres) cujo valor paga todos os custos do processo de refino e o lucro é o cobre.

As reações do processo eletrolítico são:

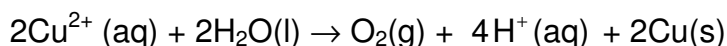
- No cátodo o cobre se reduz:



- No ânodo a água se oxida:



- Reação global:



Normalmente, o produto final originário da produção de cobre é o cátodo refinado cuja produção é vendida quase que inteiramente para a indústria de transformação do cobre, na qual é processado por laminação, extrusão, forjagem, fundição e metalurgia do pó, obtém-se uma larga variedade de produtos tais como fios e cabos elétricos, chapas, tiras, tubos e outras aplicações principalmente na indústria da construção civil, eletro-eletrônica, automobilística.

## 5. AÇO-SILÍCIO

Uma vez que o conteúdo de carbono é muito pequeno, atualmente estas ligas são conhecidas como ferro-silício. A adição de silício ao ferro resulta nos seguintes efeitos sobre as propriedades físicas:

A resistividade elétrica aumenta, causando uma redução nas correntes parasitas; a anisotropia cristalina diminui, causando um aumento na permeabilidade, e diminui a indução de saturação.

O percentual de silício varia de aproximadamente 1,05 a 3,25% para as ligas não orientadas e 3,25% para as ligas orientadas, e o percentual de carbono varia 0,03% (não orientado) a 0,01% (orientado).

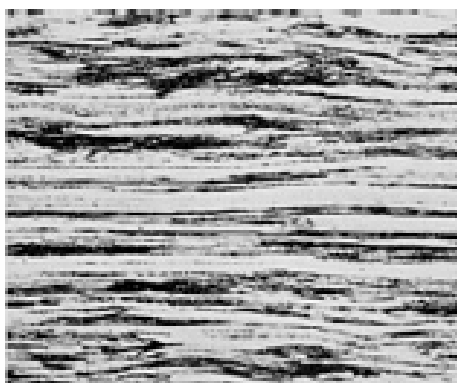
## **5.1 HISTÓRIA DO AÇO SILÍCIO**

### **5.1.1 AÇO SILÍCIO COM GRÃO NÃO ORIENTADO**

Este tipo de aço foi desenvolvido pelo metalurgista inglês Robert Hadfield em 1900 e logo se tornou o material preferido para construção de núcleo de transformadores, motores e geradores.

### **5.2.2 AÇO SILÍCIO COM GRÃO ORIENTADO**

Este material foi desenvolvido pelo metalurgista americano Norman Goss em 1933. Ele descobriu que, com uma laminação a frio com um recozimento intermediário, acrescido de um recozimento final a alta temperatura, produz-se chapas com melhores propriedades magnéticas na direção de laminação, que as chapas com laminação a quente. Esta melhora é devido a uma textura magneticamente favorável, produzida por uma recristalização secundária, durante o recozimento a alta temperatura. Chapas com grãos orientados começaram a ser produzidas comercialmente por volta de 1945, e desde então, suas propriedades têm sido melhoradas continuamente. A história dos aços elétricos no mundo se confunde com a história da indústria da eletricidade, que nasce em 1880. A importância dos aços ao silício foi rapidamente reconhecida. Os aços de grão orientado foram desenvolvidos em 1934.



**FIGURA 8** - Aço silício de grão orientado 100 x

## 5.2 OBTENÇÃO DO AÇO-SILÍCIO

Ligas de Ferro-Silício para aplicações magnéticas são produzidas de pó pela mistura do mesmo pó puro de ferro atomizado usadas para peças de ferro puro com pó de ferro-silício que pode conter de 17 a 33% de silício. O pó de ferro-silício é duro e frágil, mas desde que ele constitui somente uma menor parte da mistura do pó para uma liga 3% silício, a mistura pode ser compactada sem maiores dificuldades. Na sinterização dos compactados desta mistura, o controle da atmosfera de sinterização, que é freqüentemente amônia dissociada, é crítico. Um ponto de orvalho menor é necessário para manter a atmosfera de redução das partículas de ferro-silício. Caso contrário, a camada de óxido nestas partículas retidas durante a sinterização impede a interdifusão entre o ferro e ferro-silício e impede a formação de uma liga de solução sólida de ferro-silício homogênea. Sob uma condição de redução adequada, como uma liga homogênea é formada quando compactados são sinterizados 1 hora em 1260 [°C]. Por causa da mudança na constante de equilíbrio para a reação de oxidação-redução com aumento da temperatura, mais altos pontos de orvalho são permitidos na mais alta de temperatura de sinterização. Na temperatura de sinterização de 1250 a 1315 [°C], ferro-silício compactado contrai 2 a 3%, o qual cria dificuldades de controle dimensional durante a sinterização. Sinterização a vácuo é uma alternativa adequada para sinterização a seco em amônia dissociada.

As chapas são obtidas por laminação a quente até aproximadamente à espessura final; a seguir é realizada uma decapagem para retirar a película de óxido, e após, laminado a frio para a espessura final, melhorando as características mecânicas; finalmente é realizado um recozimento a baixa temperatura. A adição de Si ao Fe diminui um pouco a magnetização de saturação mas por outro lado reduz a anisotropia magneto cristalina e a magnetostricção, e aumenta consideravelmente a resistividade elétrica do material magnético. A presença do Si também torna mais fácil a tarefa de redução de inclusões e o aumento dos grãos por tratamentos metalúrgicos. Uma das ligas mais utilizadas comercialmente é a com 3% de Si, conhecida pelo nome de Hypersil.

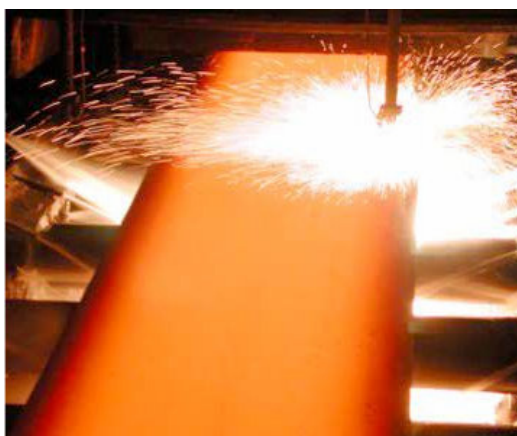
### 5.2.1 REDUÇÃO

O gusa produzido nos alto fornos é transportado em carros torpedo para a aciaria, onde recebe tratamento de desciliciação, desfosforação e dessulfuração, tornando-o adequado para produção de aços especiais.

### 5.2.2 ALCIARIA

Os aços Silício de Grão Orientado e Não Orientado, bem como os aços Carbono, são produzidos a partir do gusa, nos equipamentos: Convertedor a Oxigênio, Forno de Desgaseificação, Forno Panela e Lingotamento Contínuo.

Os aços inox, são produzidos no Convertedor de Sopro Combinado, a partir do ferro cromo líquido adicionado ao gusa e sucata, fundidos nos Fornos Elétricos a Arco; o Forno Panela é utilizado para acertos finais de temperatura e composição química. O Lingotamento Contínuo é utilizado para transformar o aço líquido em placas. Os aços destinados à Laminação de Barras, são vazados em lingoteiras, formando lingotes.



**FIGURA 9** – Lingotamento contínuo

### 5.2.3 LAMINAÇÃO A FRIO DE SILÍCIO

A laminação a frio de aço silício produz dois tipos de aço silício:

- (a) GNO, que é processado pelo recozimento e decapagem química, descarbonetação e recozimento final.
- (b) GO, que é processado pelo recozimento e decapagem química, forno de descarbonetação e revestimento, forno de revestimento em caixa,

linha de revestimento e aplainamento térmico. Após serem processados seguindo o mencionado acima, esses aços são enviados para linhas de acabamentos (tesouras), cortados e embalados.

Depois de laminados a frio, os aços siliciosos atingem uma espessura entre 0,3 (trinta centésimos) e 3,5 (três inteiros e cinquenta centésimos) milímetros.

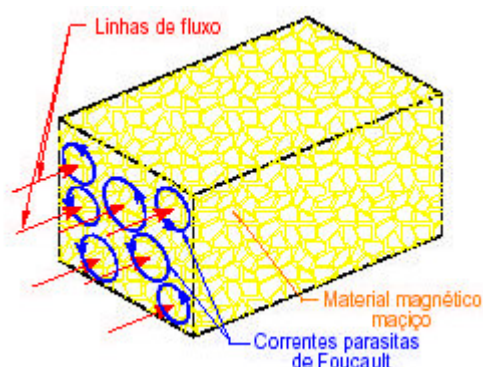
### 5.2.3.1 LAMINAÇÃO A FRIO DE SILÍCIO, ATRAVÉS DOS EQUIPAMENTOS:

Recozimento e Decapagem Química, Laminador Sensimir, linhas de Descarboxidação e Recozimento final, transforma o aço de Grão Não Orientado laminado a quente, em produto final laminado a frio.

As bobinas a quente de aço destinadas a produção de aço Silício Grão Orientado, são processadas nos equipamentos: Recozimento e Decapagem Química, Laminador Sensimir, Forno de Descarboxidação e Revestimento, Forno de Revestimento em Caixa, Linha de Revestimento e Aplainamento Térmico, sendo transformadas em aço Silício Grão Orientado laminado a frio.

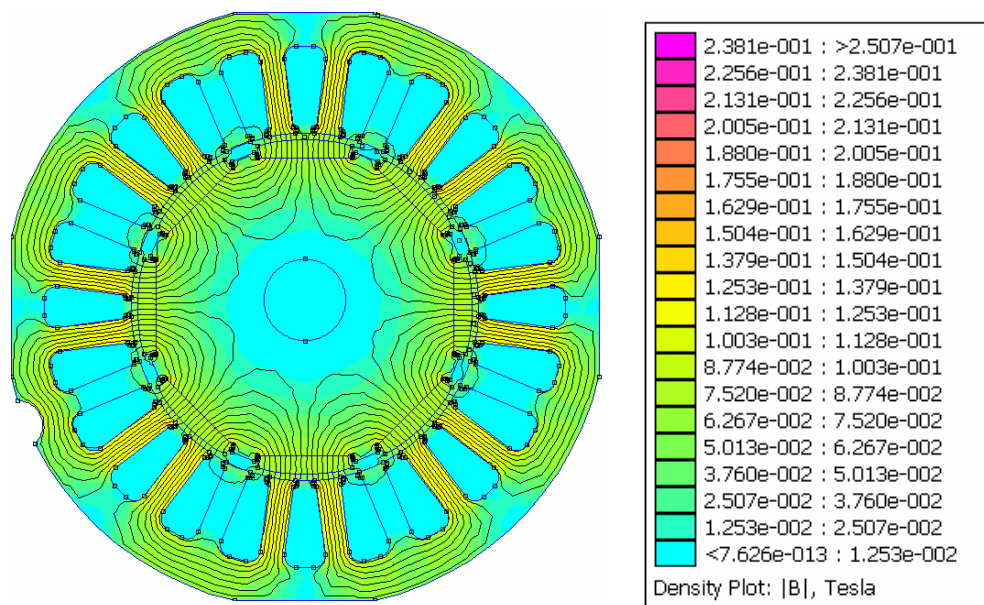
## 6. CORRENTES DE FOCAULT

Por volta de 1855 Jean Bernard Leon Foucault observou que quando um disco de cobre era colocado entre os pólos de um magneto era preciso mais força para fazê-lo girar do que quando não havia o magneto, fato que ocorre devido ao surgimento de correntes parasitas no interior do metal produzidas pela variação do fluxo, correntes estas que também ficaram conhecidas como correntes de Foucault



**FIGURA 10** – Representação das correntes parasitas de Foucault em um material ferromagnético.

Como foi explicado as correntes de Foucault surgem a partir de um fluxo magnético variável no material, tornando importante conhecer o comportamento do fluxo magnético no material e o comportamento que o entreferro apresenta devido a este fluxo. A figura abaixo ilustra uma simulação das linhas de campo de um motor deste, a qual o desenvolvimento não está abordado neste trabalho, como propósito apenas de confirmar a importância do conhecimento sobre materiais em geradores.



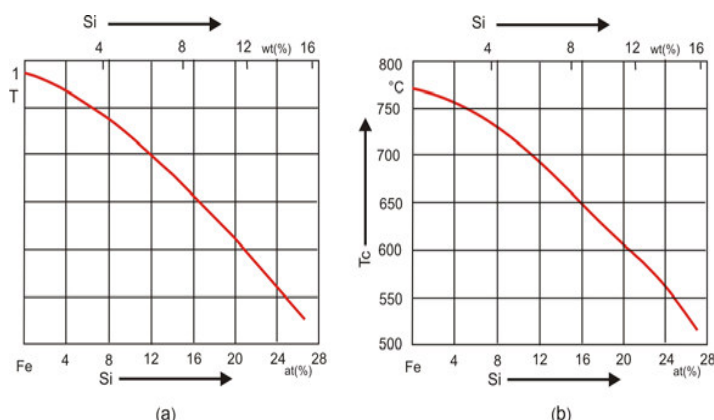
**FIGURA 11** - Linhas de FIGURA Simulação de fluxo magnético em um motor

**TABELA 1** - Características do motor simulado

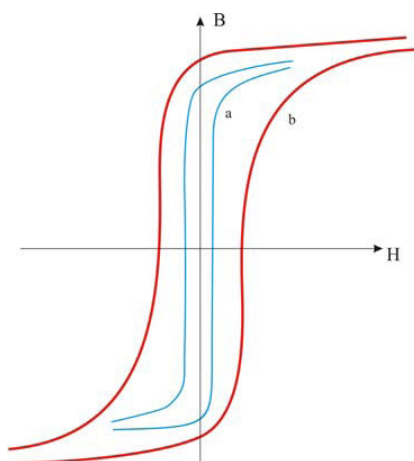
Rotação Nominal	3000 RPM
Pólos	8
Potência	400 W
Corrente Nominal	2 A
Espiras	42
Comprimento	40 mm
Torque	1.6 Nm

## 7. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO AÇO SILÍCIO

As figuras abaixo mostram claramente o comportamento do material ferromagnético em relação a temperatura, magnetização. O aço silício usado como material ferromagnético em geradores trifásicos de alta potência apresenta em sua maioria vantagens como baixa força coercitiva, alta magnetização.

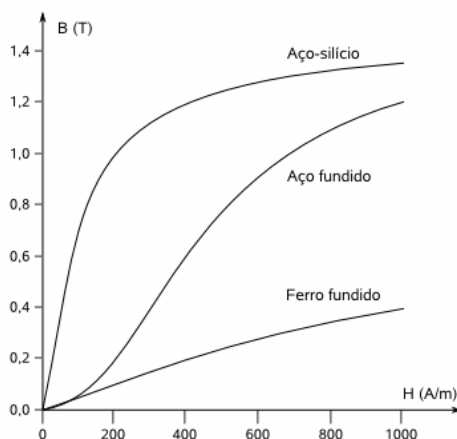


**FIGURA 12:** (a) Magnetização de saturação em função da concentração de Si; temperatura ambiente; (b) Temperatura de Curie em função da concentração de Si, wt = peso e at = átomos.



**FIGURA 13** - Curva de histerese para Fe puro (b) e FeSi - Hypersil (a).





**FIGURA - 14** – comparação da curva de magnetização de três materiais ferromagnéticos.

A Figura mostra curvas de magnetização para alguns materiais ferrosos. Notar que o aço-silício oferece uma elevada permeabilidade e sugere uma curva de histerese estreita.

## 8. VANTAGENS DO COBRE

O cobre é padrão de condutibilidade desde 1913 devido a alta capacidade de condução de corrente elétrica.

### 8.1 O COBRE É COMPATÍVEL COM CONECTORES E OUTROS DISPOSITIVOS

Resistência mecânica, flexibilidade e resistência à corrosão tornam o cobre ideal para ligações a conectores, realização de soldas.

### 8.2 O COBRE POSSUI RESISTÊNCIA E DUCTIBILIDADE

Esta única combinação faz do cobre o metal ideal para condutores. Normalmente quanto mais resistente é um metal, menos flexibilidade ele terá. Isto não ocorre com o cobre. Assim você terá as vantagens de durabilidade e ductibilidade quando especificar o cobre como material condutor.

### 8.3 O COBRE É FÁCIL DE INSTALAR

A resistência, dureza e flexibilidade do condutor de cobre assegura ao mesmo tempo facilidade de manuseio e instalação, reduzindo assim os custos de mão de obra associados. Quando você puxa um condutor de cobre através de um

eletroduto, ele resiste ao estiramento e não quebra. Podemos dobrá-lo ou torcê-lo, e ele ainda resiste à quebra.

#### **8.4 O COBRE RESISTE À CORROSÃO**

O cobre puro (>99,9% de cobre), usado em condutores elétricos, é um metal nobre que quando em contato com outros metais (ferro, aço etc.) não está sujeito à corrosão galvânica. Os fios de cobre também resistem à corrosão por umidade, poluição industrial e outras influências atmosféricas que possam causar danos ao sistema.

#### **8.5 O COBRE É ECONÔMICO**

Numa primeira avaliação, o condutor de alumínio é algumas vezes mais barato que o condutor de cobre, mas economia não é medida somente pelo custo inicial de aquisição. O custo ao longo do tempo, que inclui ferramentas extras de instalação, procedimentos, materiais, serviços, reparos e potencial para expansão do sistema, deve ser também avaliado. Estes custos normalmente são esquecidos numa primeira avaliação. Então considere todas as questões envolvidas e você descobrirá que o cobre é o condutor mais econômico.



**FIGURA 15** – Fios de cobre

## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É interessante observar como a fusão entre dois materiais pode mudar as propriedades da liga, o ferro silício é um exemplo de como é importante conhecer as propriedades dos materiais e saber manipulá-los a fim de obter um material com características desejáveis para a aplicação na indústria, no caso do aço silício, o setor elétrico.

## 10. REFERÊNCIAS

Conversão eletromecânica de energia

Disponível em: < <http://eletricaunivix.sites.uol.com.br> >.

Acesso em 18/03/2009.

Ligas sinterizadas por metalurgia do pó convencional

Disponível em: < <http://www.tecsinter.com.br> >.

Acesso em 19/03/2009.

Perdas magnéticas

Disponível em: < <http://www.eletrica.ufpr.br>>.

Acesso em 17/03/2009.

Propriedades magnéticas de aços para fins elétricos

Disponível em: < <http://www.pmt.usp.br> >.

Acesso em 17/03/2009.

## **PÁRA-RAIOS**

Hugo Eiji Imai

### **1. INTRODUÇÃO**

Descargas atmosféricas são o principal fator de desligamentos de linhas de transmissão, causando distúrbios na qualidade do suprimento e da oferta de energia aos consumidores, e acarretando perda de faturamento em muitos casos. Os desligamentos de linhas provocam adicionalmente uma sobrecarga nos serviços de manutenção durante os períodos chuvosos, elevando os gastos com a troca de isoladores danificados e com o deslocamento das equipes de manutenção para execução dos reparos.

Para a redução dos índices de desligamento em virtude de descargas atmosféricas a instalação de pára-raios ZnO, conectados eletricamente em paralelo com as cadeias de isoladores, é a técnica mais atual para se reduzir o número de desligamentos de linhas já em operação e pode-se constituir em uma alternativa mais econômica e eficiente do que os métodos clássicos (instalação de cabos contra peso e alteração de ângulos de blindagem), os quais, em muitos casos, são de difícil execução prática em certos tipos de terreno ou de torres.

Na tentativa de reduzir o número de desligamentos por descargas atmosféricas em linhas de transmissão, foram sendo instalados pára-raios de linha. As inovações nessa tecnologia foram muitas, inicialmente eram ineficientes na eliminação das correntes de falta, e após o surgimento dos pára-raios de óxido de zinco e o encapsulamento polimérico, os pára-raios adquiriram milhares de vantagens na redução das interrupções das linhas por quedas de raios.

O trabalho a seguir apresenta o funcionamento de pára-raios, e os materiais do qual são construídos e suas vantagens.

## 2. PÁRA-RAIOS

Um pára-raios ideal como dispositivo de proteção contra sobretensões deve possuir as seguintes características:

- Apresentar uma impedância infinita entre os seus terminais nas condições de regime permanente do sistema, ou seja, comportar-se como um circuito aberto até a ocorrência de uma sobretensão no sistema;
- Ter a capacidade instantânea de entrar em condução quando da ocorrência de uma sobretensão com valor prospectivo próximo ao da tensão nominal do sistema, mantendo esse nível de tensão de início de condução durante toda a ocorrência da sobretensão;
- Parar de conduzir, ou seja, retornar à condição de circuito aberto assim que a tensão do sistema retornar ao seu estado inicial e com sua característica “tensão x corrente” original restaurada e
- Deve operar sem causar nenhum distúrbio ou degradação ao sistema ou ao próprio dispositivo de proteção.

No entanto, os pára-raios atualmente disponíveis não têm a capacidade de atender plenamente a nenhum dos requisitos de um pára-raios ideal. A tecnologia mais aprimorada e próxima de um pára-raios ideal é representada pelo pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores, os quais representam o que há de mais moderno depois de desenvolvimentos e aperfeiçoamentos sucessivos e que teve início nos centelhadores a ar, ainda hoje utilizados em algumas aplicações específicas.

Os pára-raios, quando corretamente selecionados e aplicados, possibilitam uma redução nos custos dos demais equipamentos, uma vez que a isolação dos equipamentos constitui uma parcela significativa no custo final de um equipamento, especialmente aqueles aplicados em sistemas com tensão igual ou superior a 138 kV. Enfim, são equipamentos responsáveis por funções de grande importância nos sistemas elétricos de potência, contribuindo decisivamente para a sua confiabilidade, economia e continuidade de operação.

## 3. FUNCIONAMENTO DE PÁRA-RAIOS

Um pára-raios é composto de elementos de resistores não-lineares, conectados em série com centelhadores ou não. Para representar a característica

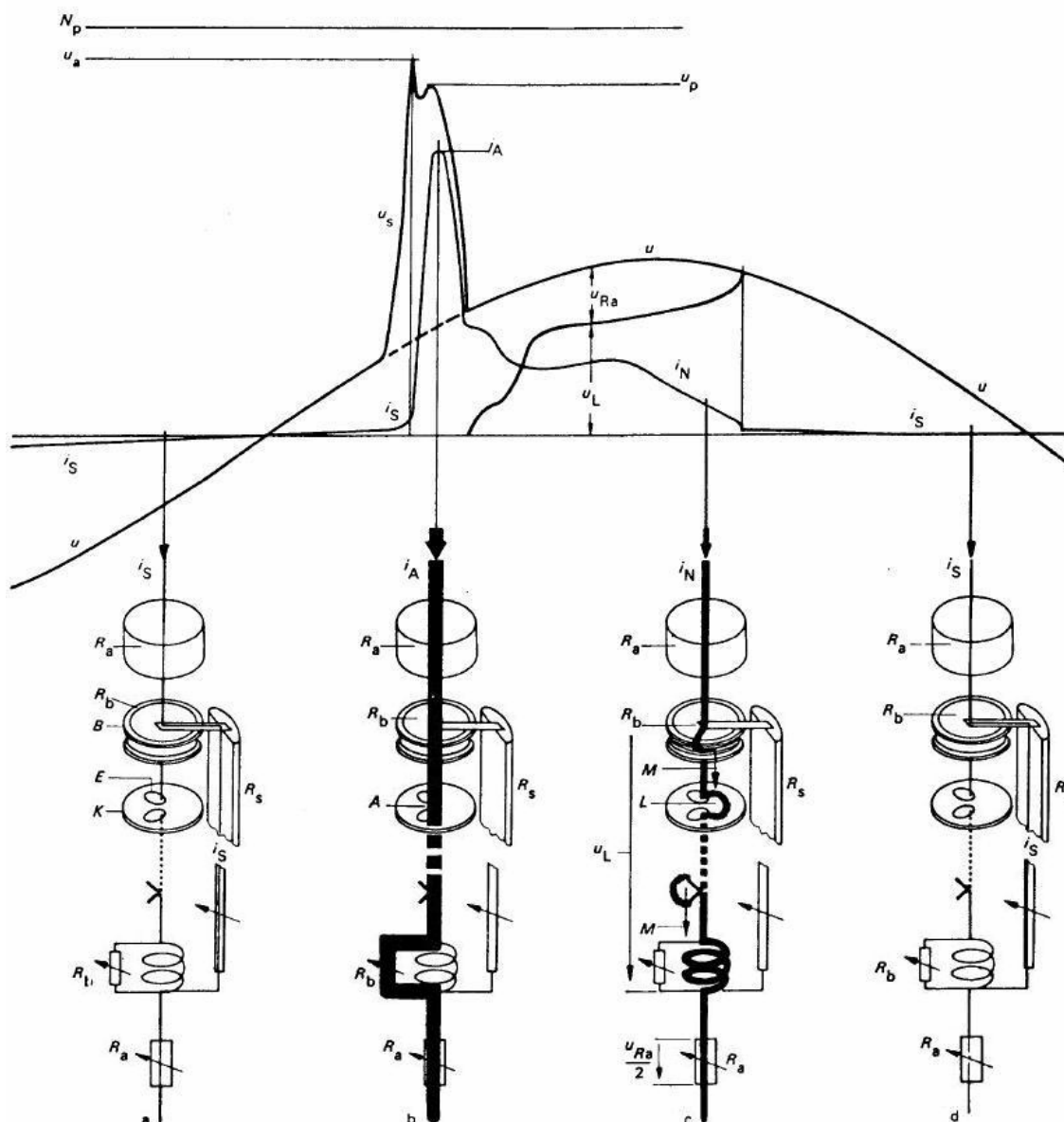
“tensão x corrente” dos blocos resistivos, é utilizado a expressão  $I = k V^n$  onde  $I$  é a corrente no pára-raios,  $V$  é a tensão aplicada em seus terminais,  $K$  é uma constante dependente do projeto do pára-raios, e  $n$  é um fator característico não-linear com valor compreendido entre 4 e 6 nos pára-raios convencionais (SiC) e entre 25 e 30 nos pára-raios ZnO. Em operação normal a corrente é de alguns miliampères, mas pode alcançar vários kA durante o surto e algumas centenas de ampères após a sua dissipação, devendo o pára-raios ser capaz de interromper a corrente subsequente e permanecer sem conduzir, mesmo que submetido a alguma sobretensão temporária, no caso de um pára-raios convencional. Nos pára-raios ZnO a condução é permanente, sendo a amplitude da corrente dependente da tensão aplicada a seus terminais. Quando ocorre o surto a corrente é elevada, podendo alcançar vários kA, e, se o pára-raios é submetido a sobretensões temporárias, a corrente de condução alcança centenas de ampères, havendo condução por vários ciclos.

A Figura 1 ilustra o processo de condução no pára-raios. Na Figura 1.a, é iniciada a condução com a operação do pára-raios em condições normais. Os resistores não-lineares  $R_a$  e os resistores equalizadores limitam a corrente que circula pelo pára-raios em miliampères. Esta pequena corrente assegura que a tensão do sistema aplicada aos terminais do pára-raios se distribua uniformemente através dos centelhadores e demais componentes do equipamento.

Na Figura 1.b, como as indutâncias das bobinas de sopro magnético impedem a circulação da corrente de descarga devido sua alta taxa de crescimento, essa corrente circula pelos centelhadores e resistores de by-pass com alta taxa de crescimento. Este processo é iniciado quando a tensão nos terminais do pára-raios ultrapassa o valor da tensão de disparo e a corrente circula inicialmente na parte do centelhador, onde a distância é a menor.

A Figura 1.c indica que após o surto inicial de corrente, os centelhadores encontram-se altamente ionizados e uma corrente provocada pela tensão do sistema (corrente subsequente a 60 Hz) pode fluir no pára-raios. Inicialmente esta corrente é função somente da tensão do sistema e dos resistores não-lineares. Sendo uma corrente com pequena taxa de variação, o seu caminho natural será pela bobina de sopro magnético, uma vez que nestas condições a sua indutância será de valor reduzido, deixando, portanto, de circular pelo resistor de by-pass. A passagem de corrente nesta bobina cria um forte campo magnético, com tendência a expandir a corrente através do centelhador, formando um arco elétrico alongado.

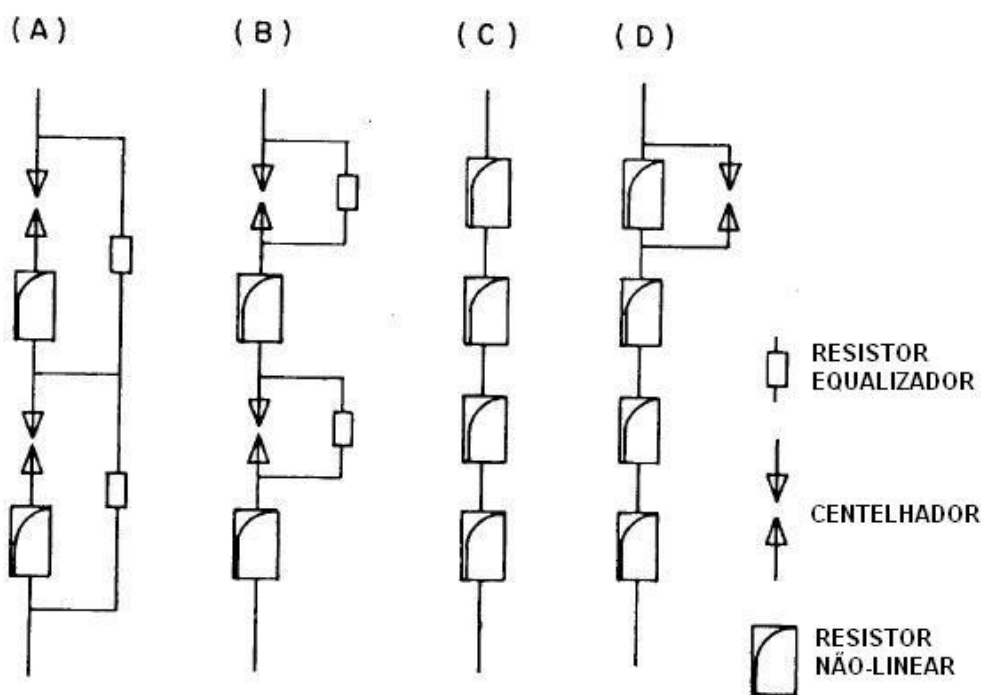
Este alongamento do arco provoca o aumento da tensão nos terminais do pára-raios, ajudando a limitar a corrente até a sua completa extinção. Após a extinção da corrente a situação é a indicada na Figura 1.d, retornando o pára-raios a sua condição normal de operação.



**FIGURA 1** - Operação de um Pára-Raios com Centelhador Ativo

Devido a sua característica não-linear superior à característica do carboneto de silício (SiC), o óxido de zinco (ZnO) é o material mais utilizado atualmente no desenvolvimento de pára-raios. A Figura 2 apresenta as diversas possibilidades para o projeto de um pára-raios, utilizando-se pastilhas de óxido de zinco, com ou sem centelhadores.

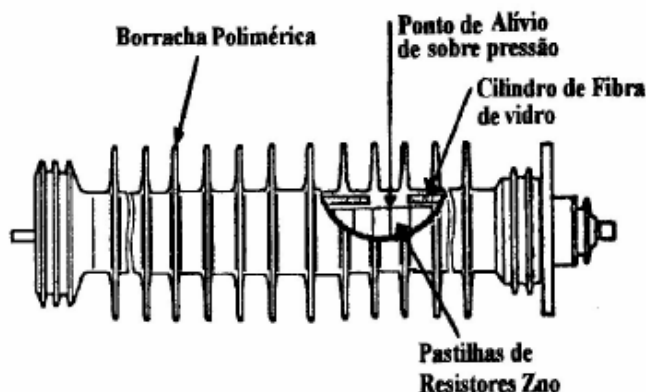
A Figura 2.a mostra um projeto de um pára-raios similar ao convencional, onde a vantagem seria a obtenção de um nível de proteção menor e uma tensão suportável maior devido a alta não-linearidade dos blocos resistivos de ZnO. A Figura 2.b apresenta um projeto com centelhadores em série com os blocos de ZnO porém em paralelo com o resistor equalizador. Somente uma pequena corrente circula pelos blocos resistivos em condições normais. Na Figura 2.c está indicado o pára-raios composto somente de pastilhas de ZnO e, na Figura 2.d, é apresentada uma alternativa com um centelhador em paralelo com uma determinada quantidade de pastilhas (entre 5% e 10%), com o objetivo de reduzir o nível de proteção para correntes de alta intensidade.



**FIGURA 2** - Alternativas de Projeto de um Pára-Raios com Pastilhas de ZnO



#### 4. PÁRA-RAIOS ZnO



**FIGURA 3** - Pára-Raios ZnO para linhas de transmissão

Os pára-raios de ZnO (Óxido de Zinco) são dispositivos de proteção contra sobretensões transitórias, já utilizados há bastante tempo, que podem ser construídos sem nenhum tipo de centelhador em série porque suas características não-lineares são apropriadas para tal finalidade. Apresentam algumas vantagens sobre os pára-raios convencionais de SiC (Carbureto de Silício), mas cuidados especiais devem ser considerados ao executar estudos de sobretensões para a obtenção das informações requeridas para sua própria especificação.

As energias absorvidas dependem de suas características não-lineares e da configuração de sistema elétrica sob estudo. Geralmente a quantidade de energia absorvida pelos pára-raios é maior para sistemas elétricos com impedâncias de surto menores e para níveis de proteção dos pára-raios mais baixos. Na ocorrência de sobretensões de manobra todos os pára-raios de ZnO instalados na mesma subestação conduzem ao mesmo tempo para compartilhar a energia total envolvida na manobra.

Devido a possíveis diferenças nas características dos pára-raios de ZnO, a divisão de energia sempre apresenta diferenças e aquele com a característica mais baixa absorverá mais energia do que os demais.

Mesmo as pequenas diferenças nas características não-lineares podem dar origem a grandes diferenças na absorção de energia entre os diversos pára-raios.

O processo de condução de corrente nos pára-raios ZnO é inteiramente diverso dos pára-raios convencionais, modificando sensivelmente o procedimento tradicional empregado nos estudos de sobretensões. O interesse nas sobretensões não está somente na identificação de elevadas amplitudes, mas principalmente nas

sobretensões de longa duração. Outro aspecto importante é que todos os pára-raios submetidos a uma determinada sobretensão conduzem simultaneamente, dividindo a absorção de energia. As principais vantagens dos pára-raios ZnO em relação aos pára-raios convencionais são as seguintes:

- Simplicidade na construção aumenta a confiabilidade;
- O nível de proteção é mais bem definido por causa da ausência de centelhadores;
- Melhor desempenho sob contaminação;
- Maior capacidade de absorção de energia;
- Possibilidade de dividir a energia entre os diversos pára-raios instalados na subestação;
- Inicia e interrompe a condução suavemente.

De qualquer forma, as diferenças principais entre um pára-raios convencional e um pára-raios ZnO são o alto expoente de ZnO em comparação com SiC e a ausência de centelhadores.

Como a aplicação de pára-raios de óxido de zinco (ZnO) tem sido cada vez mais freqüente em sistemas de alta e extra alta tensões, as empresas concessionárias de energia, instituições de pesquisa e fabricantes têm se preocupado e intensificado os estudos para aprimoramento de técnicas de manutenção preditiva que avaliam o desempenho destes pára-raios em serviço, tendo conseqüentemente um aumento da confiabilidade e diminuição dos custos de manutenção.

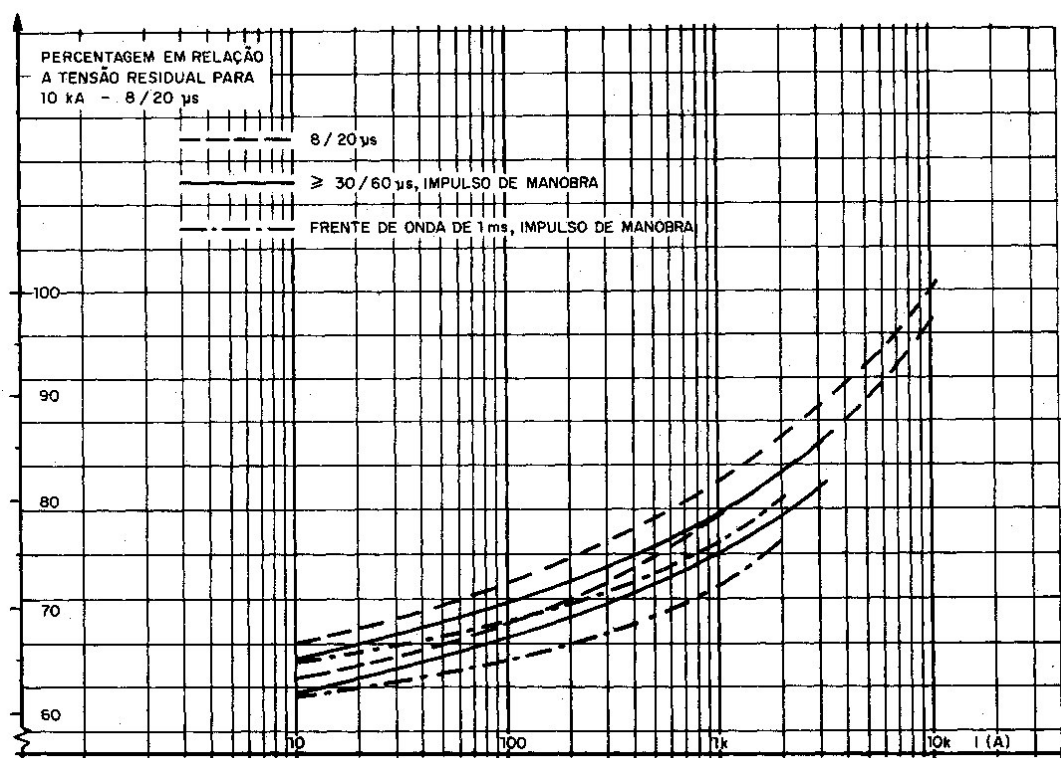
Por possuírem um melhor desempenho, os pára-raios de ZnO vêm substituindo gradualmente os pára-raios de carboneto de silício (SiC) nos últimos anos. Após a consolidação de que é realmente superior ao pára-raios de SiC, a busca pelo aprimoramento do pára-raios de ZnO gerou uma corrida por um projeto cada vez melhor. Ao mesmo tempo, as técnicas de monitoramento e diagnóstico destes equipamentos também tiveram que evoluir. Este fato pode ser observado através da grande quantidade de trabalhos sobre este assunto na literatura mundial.

## 4.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS PÁRA-RAIOS DE ZNO

### 4.1.1 NÍVEIS DE PROTEÇÃO

Os níveis de proteção para pára-raios de ZnO, sem nenhum tipo de centelhador em série, são definidos somente pelas tensões residuais que aparecem através de seus terminais durante a sobretensão transitória.

As tensões residuais dependem da forma e do valor das correntes de condução. Este tipo de informação deve ser obtida dos fabricantes e um exemplo de como esta informação normalmente é apresentada é mostrado na Figura 4.



**FIGURA 4** - Tensões residuais para diferentes formas de onda

É muito importante considerar que o fabricante indica as tensões residuais máximas e mínimas para cada corrente de condução. A diferença entre estas duas características é geralmente menor do que 5%.

Os fabricantes consideram que esta pequena variação na característica residual da tensão é inerente ao processo de fabricação. Por um determinado período de tempo a variação máxima permissível é tal como indicada na Figura 4. Entretanto, os fabricantes afirmam que, para um lote específico de fabricação, a característica residual da tensão se mantém numa determinada característica mais

definida, sendo a tolerância máxima indicada apenas à delimitação da variação máxima permissível entre diferentes lotes de fabricação.

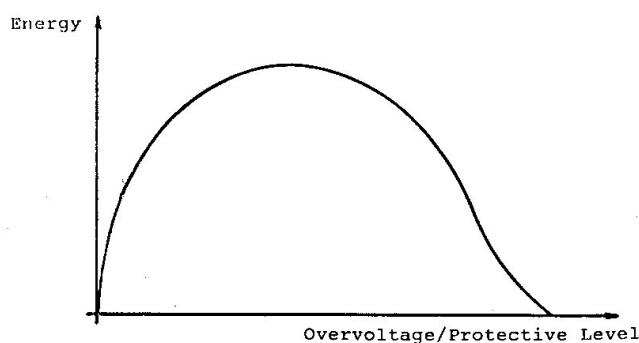
Outro aspecto importante que deve ser ressaltado é que a tensão residual também pode ser modificada pelo fabricante para projetos especiais com a finalidade de atender exigências muito específicas de determinada aplicação.

#### 4.1.2 CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA

Os pára-raios de ZnO são suscetíveis a períodos de condução mais longos e mais freqüentes durante as sobretensões do que os pára-raios convencionais por causa da ausência de centelhadores. Como estão permanentemente conectados ao sistema elétrico, estão sempre conduzindo correntes que variam de alguns mA a centenas de A, dependendo da magnitude da sobretensão transitória.

A capacidade de absorção de energia tem que ser adequadamente especificada de forma a evitar conseqüências sérias aos equipamentos do sistema elétrico, incluindo os próprios pára-raios de ZnO.

Pode-se mostrar que a relação entre a energia absorvida por pára-raios de ZnO e seu nível de proteção tem a forma indicada na Figura 5.



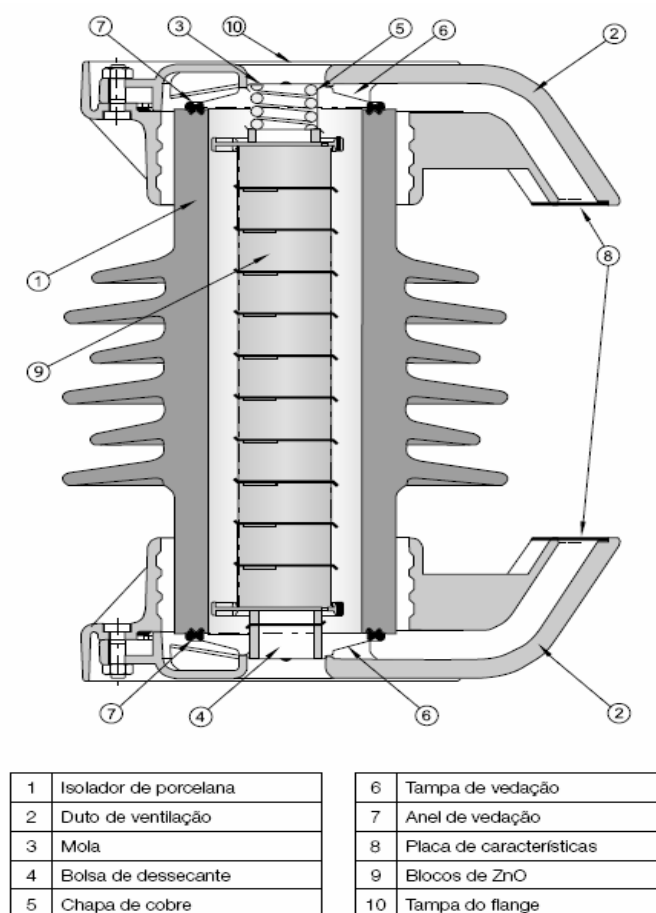
**Figura 5** - Relação entre o nível de proteção e a energia absorvida por um pára-raios de ZnO

É fácil compreender que a energia é muito baixa para níveis de proteção muito baixos e quando as sobretensões e os níveis de proteção são iguais. A energia aumenta com o aumento no nível de proteção até um ponto onde um máximo é alcançado e a energia começa a diminuir para níveis de proteção mais altos.

Os pára-raios de ZnO são aplicados geralmente na região onde a energia absorvida aumenta para níveis de proteção mais baixos porque as tensões nominais são definidas para as tensões de operação em regime do sistema. Para casos especiais, como no uso de pára-raios de ZnO para a proteção de capacitores série, de filtros de harmônicos, de filtros de onda e de terminais de neutro, a energia absorvida geralmente aumenta com o aumento no nível de proteção.

Para as instalações usuais pode-se dizer que é necessário modelar os pára-raios de ZnO considerando-se as características não-lineares mínimas informadas pelo fabricante para ondas de corrente do tipo surtos de manobra.

## 5. PÁRA-RAIOS ENCAPSULADOS EM PORCELANA



**FIGURA 6** - Estrutura do Pára-Raio encapsulado em Porcelana

Cada pára-raios é composto por uma ou mais unidades. Cada unidade é formada por um encapsulamento em porcelana contendo uma única coluna de blocos de ZnO, todos eles submetidos a testes de rotina extensivos durante a

fabricação e separados com a quantidade de separadores requerida pelo projeto elétrico do pára-raios. Por conseguinte, é necessário que as unidades sejam ligadas em série no lugar, pela ordem predeterminada marcada nas unidades.

Pára-raios longos freqüentemente exigem anéis de gradação externos para manter uma distribuição de tensões uniforme e aceitável ao longo de seu comprimento. Por isso, o funcionamento destes pára-raios sem os anéis de gradação pode levar a falhas.

Os flanges são cimentados na porcelana e encerram também o arranjo de vedação como mostra a Figura 7.



**FIGURA 7** - Apresentação dos arranjos internos projetados para minimizar a descarga parcial

Para um desempenho satisfatório, é importante que as unidades estejam hermeticamente seladas para toda a vida útil dos pára-raios. O arranjo de vedação consiste em uma placa de aço inoxidável pré-tensionada com uma gaxeta de borracha. Essa placa exerce uma pressão permanente na gaxeta contra a superfície do isolador e assegura uma vedação eficaz, mesmo que a gaxeta "assente" devido a envelhecimento. Serve também para fixar a coluna de blocos no sentido longitudinal por meio de molas. Após a fabricação, a vedação de cada unidade é verificada em testes de rotina.

A placa de vedação foi projetada também para funcionar como um sistema de alívio de sobrepressão. Quando o pára-raios é submetido a uma tensão além da capacidade de seu projeto, um arco interno é estabelecido. Os gases ionizados causam um rápido aumento da pressão interna, o que força a abertura da placa de vedação, permitindo o escapamento dos gases ionizados através dos dutos de ventilação. Como os dutos nas duas extremidades estão direcionados um contra o outro, o resultado é um arco externo; assim, produz-se um alívio de pressão que impede o estilhaçar violento do isolador.

## **6. CONCLUSÃO**

Os pára-raios, apesar de apresentarem um custo pequeno em relação aos outros equipamentos de uma subestação, têm a importante função de limitar as sobretensões que podem ocorrer no sistema de transmissão, protegendo os equipamentos e operadores das subestações e contribuindo para a confiabilidade, economia e continuidade da operação.

Os baixos índices de falha nos pára-raios novos induziram, há muito tempo, a uma despreocupação das concessionárias em relação aos registros e análise das falhas desses equipamentos. O cenário atual indica um aumento nestes índices provocado, principalmente, pelo envelhecimento, pela penetração de umidade, pela perda de estanqueidade ou pelo armazenamento inadequado. Por ser o pára-raios um equipamento selado que não permite a inspeção e avaliação de seus componentes, partiu-se para métodos que ultrapassassem esta limitação.

O desenvolvimento de resistores não-lineares, baseado no óxido de zinco (ZnO), modificou inteiramente a tecnologia de construção de pára-raios, devido a sua característica não-linear permitir a fabricação de pára-raios desprovidos de centelhadores de qualquer espécie. Atualmente, a utilização de centelhadores em série ou em paralelo é admitida somente para aplicações especiais, onde existe a necessidade de reduzir os níveis de proteção ou então de aumentar a capacidade de absorção de energia.

Os pára-raios de ZnO vêm conquistando gradativamente seu espaço, seja substituindo os pára-raios de SiC ou sendo adquiridos para novas subestações. A limitação da evolução tecnológica dos pára-raios de SiC faz com que os pára-raios de ZnO apresentem diversas vantagens em relação aos pára-raios de SiC como apresentado neste trabalho.

# **ESTUDO DA FIBRA ÓTICA: MATERIAL COM APLICAÇÃO NO SETOR ELÉTRICO**

Wagner André Geroletti

## **1. INTRODUÇÃO**

A fibra óptica é um condutor dielétrico (isolantes) em que dados são transmitidos através da reflexão total de sinais de luz, isto é, a luz transmite a informação no sistema binário, enviando pulso ou não. As fibras ópticas permitem que quantidades enormes de dados e informações possam ser enviadas a qualquer arte do mundo em um tempo e eficiência surpreendente.

Com a criação das fontes de luz sólidas (raio laser e LED) na década de sessenta, a fibra óptica, desenvolvida em 1952 por Narinder Singh Kanpany, passou a ter utilidade prática. Hoje, se mostra singular no sistema de transmissão de dados. Por representar uma revolução na forma de transmitir informações, vem sendo utilizada na transmissão de sistemas que exigem alta largura de banda, como videoconferência e sistema telefônico, podendo integrar numa mesma via vários serviços de telecomunicações.

## **2. FIBRA ÓTICA NO SETOR ELÉTRICO**

A fibra óptica tem sido empregada largamente no setor elétrico para a comunicação de dados entre as subestações. A comunicação entre a usina de Itaipu e a subestação de Furnas em Foz do Iguaçu é feita através deste meio. A fibra óptica é instalada junto às linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão. Nas linhas de transmissão de energia elétrica existe um cabo pára-raios, também chamado de cabo-guarda, a fibra óptica faz parte da alma deste cabo, de modo semelhante ao aço no cabo de alumínio (cabo com alma de aço).

## **3. FIBRA ÓTICA NAS COMUNICAÇÕES**

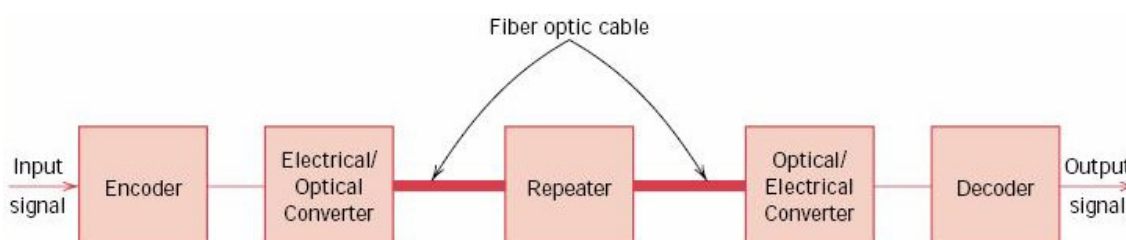
O Campo das comunicações experimentou recentemente uma revolução com o desenvolvimento da tecnologia de fibras ópticas; atualmente, virtualmente todas as



telecomunicações são transmitidas através deste meio, a não através de fios de cobre. A transmissão de sinais através de um fio condutor metálico é eletrônica (isto é, através de elétrons), enquanto quando são usadas fibras óticas transparentes, a transmissão do sinal é fotônica, isto é, utiliza fótons de radiação eletromagnética ou luminosa. O uso de sistemas de fibra ótica possui velocidade de transmissão, densidade de informação e distância de transmissão melhorada, com redução na taxa de erros; ainda mais não existe qualquer interferência eletromagnética com as fibras óticas. Em relação à velocidade, as fibras óticas podem transmitir, em um segundo, a informação equivalente a três episódios do seu programa de televisão favorito. Ou em relação à densidade de informação, duas pequenas fibras óticas podem transmitir simultaneamente o equivalente a 24.000 chamadas telefônicas. Ainda: seriam necessários 30.000kg (30 toneladas) de cobre para transmitir a mesma quantidade de informação que apenas 0,1kg de um material de fibra ótica é capaz de transmitir.

#### 4. Sistema Básico de Transmissão

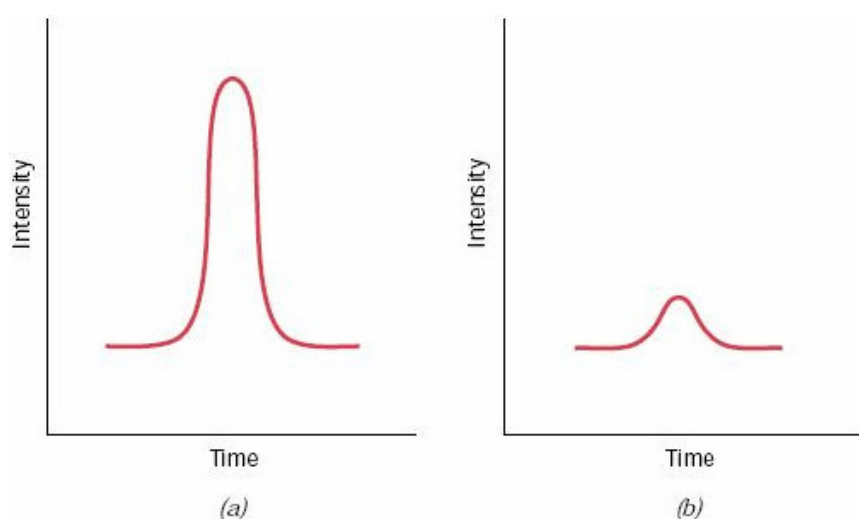
A presente abordagem se concentrará nas características das fibras óticas, entretanto, considera-se importante, em primeiro lugar, discutir sucintamente os componentes e a operação do sistema de transmissão. Um diagrama esquemático mostrando estes componentes está apresentado na figura 1.



**FIGURA 1** - Componentes de um sistema de comunicação por fibra ótica.

A informação, isto é, a conversa telefônica em formato eletrônico deve primeiro ser digitalizada em bits, isto é, em números de 1 e 0; isso é realizado no codificador. Em seguida, torna-se necessário converter esse sinal elétrico em um sinal ótico (fotônico), o que ocorre no conversor elétrico para ótico (figura 1).

Esse conversor é normalmente um laser semiconductor, como aquele que foi descrito na seção anterior, que emite luz monocromática e coerente. O comprimento de onda fica normalmente entre 0,78 e 1,6 $\mu\text{m}$ , o que está dentro da região infravermelha do espectro eletromagnético; as perdas por absorção dentro desta região de comprimentos de são pequenas. A saída desse conversor laser se dá na forma de pulsos de luz; um binário 1 é representado por um pulso de alta potência (figura 2), enquanto um 0 corresponde a um pulso de baixa potência (ou à ausência de um pulso), figura 2.



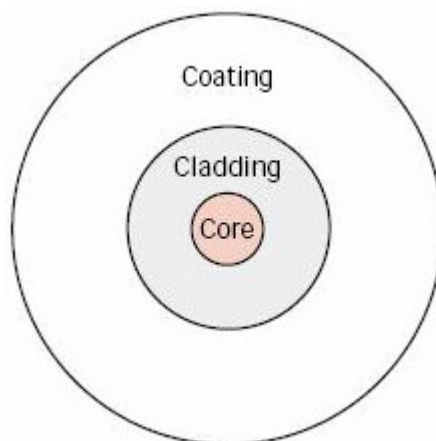
**FIGURA 2** - Esquema de codificação digital para comunicações óticas.

Esses sinais fotônicos em pulso são então alimentados e conduzidos através do cabo de fibra ótica (algumas vezes chamado de “guia de ondas”) até a extremidade receptora. No caso de transmissões de longa distância, podem ser exigidas estações repetidoras; essas estações consistem em dispositivos que amplificam e regeneram o sinal. Finalmente, na extremidade receptora, o sinal fotônico é reconvertido em sinal eletrônico, e é então decodificado (“desdigitalizado”).

## 5. CARACTERÍSTICAS DA FIBRA ÓTICA

O coração do sistema descrito na seção anterior de comunicações é a fibra ótica. Ela deve guiar esses pulsos de luz ao longo de longas distâncias sem que ocorra uma perda significativa de potência do sinal (isto é, atenuação) ou a distorção

do pulso. Os componentes da fibra são: o núcleo, o recobrimento e o revestimento; esses estão representados no perfil da seção reta de uma fibra ótica, figura 3.



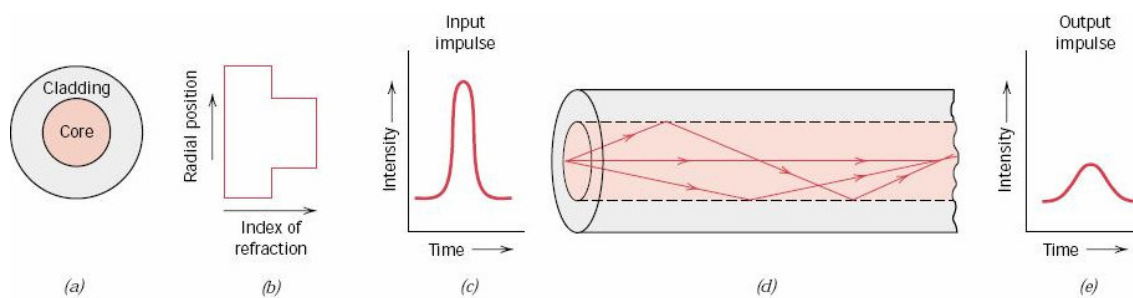
**FIGURA 3** - Seção reta esquemática de uma fibra ótica.

O sinal passa através do núcleo, enquanto o recobrimento que envolve o núcleo restringe a trajetória dos raios de luz dentro do núcleo; o revestimento externo protege o núcleo e o recobrimento contra danos que possam resultar da abrasão e de pressões externas.

Vidro de sílica de alta pureza é usado como material de fibra; os diâmetros das fibras variam normalmente entre aproximadamente 5 e 100  $\mu\text{m}$ . As fibras são relativamente isentas de defeitos e, dessa forma, significativamente fortes e resistentes; durante a produção, as fibras contínuas são testadas para assegurar que elas atendam a padrões mínimos de resistência.

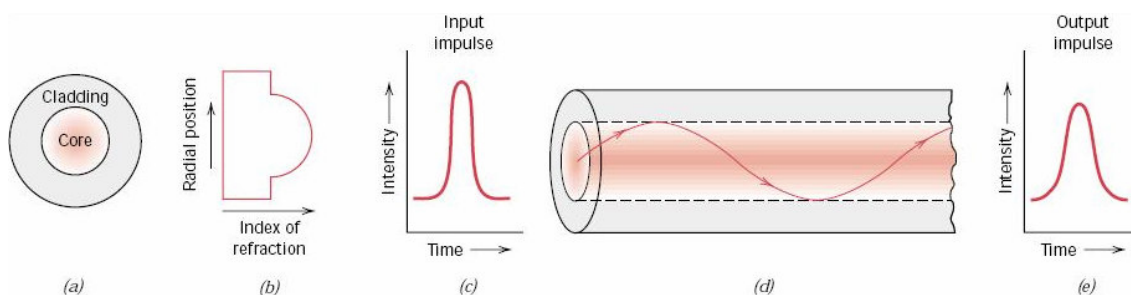
A contenção da luz no interior do núcleo da fibra é possibilitada por reflexão interna total; isto é, quaisquer raios de luz que estejam se deslocando em ângulos oblíquos ao eixo da fibra são refletidos novamente para o interior do núcleo. A reflexão é obtida variando-se o índice de refração dos materiais de vidro do núcleo e do seu recobrimento. Nesse sentido, dois tipos de concepção de projetos são empregados. Em um desses tipos (conhecido por "índice em grau"), o índice de refração do recobrimento é ligeiramente menor do que aquele do núcleo; o perfil do índice e a maneira como se procede a reflexão interna estão mostrados nas figuras 4b e 4d, respectivamente. Para essa concepção de projeto, o pulso de saída será mais largo do que o pulso de entrada (figuras 4c e 4e), um fenômeno que é indesejável, uma vez que limita a taxa de transmissão. O alargamento do pulso

ocorre porque os vários raios de luz, embora estejam sendo injetados aproximadamente ao mesmo instante, chegam na saída depois de transcorridos intervalos de diferentes; eles seguem trajetórias diferentes e, dessa forma, possuem vários comprimentos percurso.



**FIGURA 4** - Concepção de projeto de fibra óptica com índice em degrau. a) Seção reta da fibra. b) Perfil radial do índice de refração da fibra. c) Pulso de luz na entrada. d) Reflexão interna dos raios de luz. e) Pulso de luz na saída.

O alargamento dos pulsos é evitado em grande parte pela utilização da outra concepção de projeto, ou do “índice em grau”. Neste caso, impurezas, tais como o óxido de boro ( $B_2O_3$ ) ou o dióxido de germânio ( $GeO_2$ ), são adicionadas ao vidro de sílica, de modo tal que o índice de refração varia de forma parabólica ao longo da seção reta da fibra (figura 5b) essa forma, a velocidade da luz no interior do núcleo varia de acordo com a posição radial, sendo maior na periferia do que no centro. Conseqüentemente, os raios de luz que atravessam percursos mais longos através da periferia mais externa do núcleo se deslocam a uma maior velocidade no material com menor índice de refração, chegando no ponto de saída aproximadamente ao mesmo tempo em os raios não desviados que passam através da parte central do núcleo.



**FIGURA 5** - Concepção de projeto de fibra óptica com índice em grau. a) Seção reta da fibra. b) Perfil radial do índice de refração da fibra. c) Pulso de luz na entrada.

d) Reflexão interna dos raios de luz. e) Pulso de luz na saída.

Fibras excepcionalmente puras e de alta qualidade são fabricadas com o emprego de técnicas de processamento avançadas e sofisticadas. As impurezas e outros defeitos que absorvem, dispersam e, dessa forma, atenuam o feixe de luz devem ser eliminados. As presenças de cobre, ferro e vanádio são especialmente negativas; as suas concentrações são reduzidas até a ordem de algumas partes por bilhão. Da mesma forma, os teores de água e de contaminantes à base de hidroxila são extremamente pequenos. A uniformidade das dimensões de seção reta da fibra e o grau de arredondamento do núcleo são fatores críticos; são possíveis tolerâncias desses parâmetros da ordem de um micrômetro ao longo de 1 km de comprimento de fibra. Além disso, bolhas dentro do vidro e defeitos de superfície devem ser virtualmente eliminados. A atenuação da luz neste material deve ser imperceptivelmente pequena. Por exemplo, a perda de potência através de uma espessura do vidro da fibra ótica de dezesseis quilômetros deve ser equivalente à perda de potência através de uma espessura de um vidro de janelas comum de vinte e cinco milímetros.

## **6. PERDAS DE TRANSMISSÃO**

A transmissão via fibras ópticas não é completamente eficiente, sofre interferência de diversos fatores. As perdas de intensidade no sinal são denominadas atenuações.

Junto com a atenuação, a transmissão por fibras ópticas sofre interferência de outros fenômenos chamado dispersão.

Além das perdas introduzidas por tais fenômenos, há perdas causadas nas emendas e conexões entre segmentos de fibras e no acoplamento das fibras com as fontes e detectores luminosos devido às reflexões inevitáveis na interface (perdas Fresnel); má adaptação do padrão da radiação e tamanho da fonte à entrada e saída da fibra; e desalinhamento lateral e angular nas uniões (acopladores, ligadores, splices).

## **7. ATENUAÇÃO**

À medida que a luz se propaga pela fibra óptica, há diminuição da intensidade de sua energia, essa perda é denominada atenuação ou perda por transmissão.

Essa atenuação é o somatório das perdas ligadas ao material de fabricação e à estrutura das fibras e varia de acordo com o comprimento de luz utilizado.

O estudo dos mecanismos responsáveis por perdas na transmissão é de muita importância para que novas tecnologias surjam e os problemas causados possam ser minimizados.

A atenuação no sinal é característica fundamental na determinação da distância máxima entre um transmissor e um receptor óptico

Os mecanismos básicos responsáveis pela atenuação em fibras ópticas são os seguintes: absorção; espalhamento; e deformações mecânicas.

## **8. ABSORÇÃO**

Dentre os tipos de absorção, os mais comuns são a absorção extrínseca e material.

Durante o processo de fabricação, o material da fibra sofre contaminação principalmente por íons metálicos (Mn, Ni, Cr, U, Co, Fe e Cu). Atualmente, a tecnologia adotada na fabricação de fibras ópticas oferece um bom controle de impurezas, diminuindo os efeitos dos íons metálicos. O íons provocam picos de absorção em determinados comprimentos de onda.

A absorção material se refere à atenuação provocada por parte da energia transmitida ser dissipada na forma de calor.

## **9. ESPALHAMENTO**

As perdas de energia luminosa pelos vários modos de propagação (caminhos a serem percorridos pela onda) são parte do espalhamento dos sinais luminosos.

São vários os tipos de espalhamento: Rayleigh, Mie, Raman estimulado, Brillouin estimulado. O mais importante e significativo é o espalhamento de Rayleigh.

## **10. DEFORMAÇÕES MECÂNICAS**

As deformações mecânicas ocorrem quando esforços são aplicados sobre a fibra durante a confecção ou instalação do cabo.

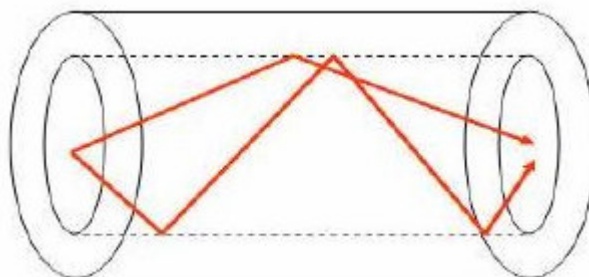
## 11. DISPERSÃO

O fenômeno da dispersão é resultado dos atrasos dos sinais ópticos que resultam num alargamento dos pulsos transmitidos causados pelos diferentes modos de propagação.

Os mecanismos básicos da dispersão são : dispersão modal ou intermodal e cromática.

### 11.1 DISPERSÃO MODAL

A dispersão modal se refere ao alargamento de sinal provocado por o sinal óptico ter vários caminhos possíveis a seguir (modos) no guia de onda (fibra ótica) como indica a Figura 6. A fibras multimodos são mais susceptíveis a esse tipo de dispersão.



**FIGURA 6** - Dispersão Modal

### 11.2 DISPERSÃO CROMÁTICA

Esse tipo de dispersão depende do comprimento de onda e divide-se em dois tipos:

a) dispersão material - ocorre tanto em fibras monomodos quanto nas multimodos. Resulta da dependência do índice de refração do material da fibra e relação ao comprimento de onda. Cada comprimento de onda enxerga um valor diferente de índice de refração num determinado ponto, a consequência imediata é ter cada comprimento de onda velocidade diferente e uma diferença de tempo de percurso;

b) dispersão de guia de onda - é mais acentuada em fibras monomodos por seu núcleo de pequeno diâmetro. Ela ocorre por variações nas dimensões do núcleo.

### 11.3 DISPERSÃO E LARGURA DE BANDA

Os atrasos causam distorção nos sinais transmitidos, pois dificulta a recepção do sinal no circuito receptor e sua decodificação.

Este alargamento limita a largura de banda da fibra óptica (MHz.km) bem como a taxa de transmissão de dados das fibras.

Para se aumentar a taxa de transmissão é necessário que mais bits sejam enviados num mesmo intervalo de tempo, como uma onda com dado  $\lambda$ , possui velocidade constante, para que haja acréscimo de bits o período de envio deve diminuir.

Depois de certa distância percorrida o pulso óptico transmitido se apresenta disperso, mas ainda é possível regenerar o sinal. Pode-se aumentar a taxa de transmissão até que chegará um momento em que o sinal não poderá ser regenerado.

## 12. CONECTORES ÓPTICOS

As terminações ópticas são basicamente constituídas de conectores que realizam a ligação entre fibras e equipamentos (figura XYZ). Podem ser a própria fonte de luz, detectores de luz ou mesmo equipamentos de medição.

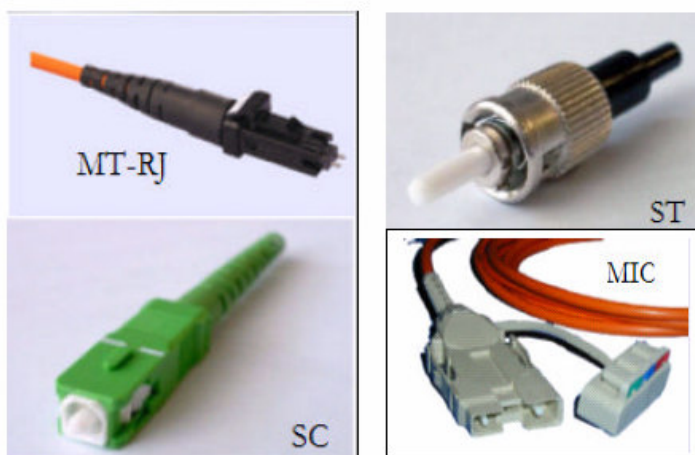


FIGURA 7 – Conectores



Perdas são comumente detectadas nas conexões, os tipos mais comuns são:

a) perda de inserção – é também chamada de atenuação, acontece quando os pulsos luminosos perdem potência na passagem pelos conectores, as causas vêm desde irregularidades no alinhamento dos conectores às intrínsecas às fibras ópticas;

b) perda de retorno – também chamada de refletância, se refere à quantidade de potência óptica refletida na conexão e retorna à fonte luminosa, apesar de não influir diretamente na atenuação total pode degradar o funcionamento da fonte e, assim, afetar a comunicação.

### **13. Conclusão**

Com o emprego da tecnologia de fibra ótica, a transmissão de informações fica livre de interferências e é rápida e intensa.

Dado que o desenvolvimento de novas tecnologias tem sofrido uma aceleração, o uso de fibras ópticas para aplicação em sistemas de transmissão de dados tem se difundido consideravelmente. Assim, se faz necessário o estudo sobre fibras ópticas, para que seja satisfatória a escolha do tipo de fibra para a aplicação desejada.

### **14. Bibliografia**

1. Callister, W. D. Jr. Materials Sc. Engineering an Introduction. J. Wiley & Sons, Inc. 1997.
2. <http://www.lucalm.hpg.ig.com.br>
3. [http://www.rnp.br/newsgen/0203/fibras\\_opticas.shtml#p35](http://www.rnp.br/newsgen/0203/fibras_opticas.shtml#p35)
4. <http://www.clubedohardware.com.br/fibras.html>
5. <http://photon.fis.unb.br/thoroh/Fibras%20opticas.pdf>