



**Grupo VIII**  
**Subestações e Equipamentos Elétricos (GSE)**

**Impactos de Novas Tecnologias na Área de Equipamentos e Subestações**

Antonio Guilherme Garcia Lima\*

Eurico Salgado Sobrinho

Gloria Suzana Gomes de Oliveira

Marcos Roitman

CEPEL

**RESUMO**

A tecnologia é fator decisivo no mundo moderno. Errar na avaliação da tecnologia a ser utilizada pode ser desastroso para qualquer ramo de negócios e, em particular, para as empresas do setor elétrico. O incentivo à competição no novo modelo demandará soluções inovadoras para a sobrevivências de todos os agentes.

O objetivo deste trabalho é apresentar novos desenvolvimentos tecnológicos e avaliar seus impactos no setor elétrico, relacionados principalmente com os equipamentos de potência.

**PALAVRAS-CHAVE**

Equipamentos, Tecnologia, Sistemas de Potência.

**1- INTRODUÇÃO**

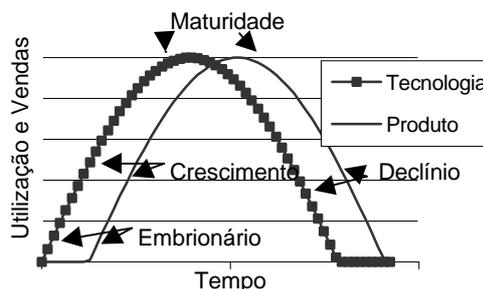
"Tudo que poderia ser inventado já foi inventado" - Charles H. Duell, Commissioner of US Office of Patents, 1899.

A energia elétrica é um negócio de 100 anos de idade e algumas pessoas são levadas a pensar, como Duell, que não existe mais nada para ser inventado nesta área. Na realidade, importantes desenvolvimentos tecnológicos estão ocorrendo em todas as áreas do conhecimento científico criando oportunidades para importantes inovações nos equipamentos utilizados em sistemas de potência. Por outro lado, por ter sido monopolista por mais de 100 anos, o setor elétrico não utiliza todas as tecnologias disponíveis como outros setores mais competitivos.

Portanto, o objetivo deste trabalho é apresentar, a partir da experiência do CEPEL com seus projetos de pesquisa, o impacto das novas tecnologias na área de equipamentos elétricos.

**2- CICLOS DE VIDA**

Assim como os seres vivos, tanto a tecnologia como os equipamentos possuem ciclos de vida conforme mostrado na Figura 1. Para identificar corretamente os desenvolvimentos tecnológicos relevantes é necessário identificar o estágio de evolução das tecnologias e dos produtos. Observa-se que o ciclo de vida da tecnologia está adiantado em relação ao ciclo dos equipamentos. Isto significa que a análise do ciclo de vida das tecnologias nos permite antecipar o ciclo de vida dos equipamentos. No entanto, a dificuldade prática consiste em identificar corretamente o estágio evolutivo das tecnologias. A Tabela 1 apresenta um critério simples para realizar esta classificação na prática.



**FIGURA 1. CICLO DE VIDA DA TECNOLOGIA E DOS PRODUTOS**

O primeiro passo consiste em identificar as tecnologias embrionárias. Para isto é fundamental uma constante monitorização tecnológica em todas as áreas de conhecimento. Uma vez identificadas as tecnologias embrionárias é possível determinar as tecnologias em

declínio. Por exemplo, a tecnologia magnética para armazenar informações encontra-se em declínio devido à tecnologia de armazenamento ótico.

De posse deste conhecimento é possível identificar os produtos maduros que entrarão em declínio em função das mudanças tecnológicas. Por exemplo, as fitas cassete estão desaparecendo em função do CD.

**TABELA 1. CLASSIFICAÇÃO DOS ESTÁGIOS DO CICLO DE VIDA**

Estágio	Tecnologia	Produto
<b>Embrionário</b>	Artigos Científicos	Protótipo de produto
<b>Crescimento</b>	Artigos de Engenharia	Comercialização crescente
<b>Maturidade</b>	Protótipos de Produtos	Produto substitutivo embrionário
<b>Declínio</b>	Outra tecnologia em crescimento	Produto substitutivo em crescimento

Por outro lado, nem todas as tecnologias embrionárias e/ou em crescimento provocarão mudanças nos produtos. Por exemplo, a supercondutividade foi descoberta no início do século XX e hoje encontra-se em declínio devido ao aparecimento da supercondutividade de alta temperatura. No entanto, produtos utilizando esta tecnologia nunca passaram do estágio embrionário. Portanto, apenas a identificação do ciclo das tecnologias não é suficiente para determinar os produtos vitoriosos no futuro.

### 3- NOVAS TECNOLOGIAS

As tecnologias, que mais afetam a indústria de equipamentos elétricos, podem ser classificadas, de acordo com Figura 2, em:

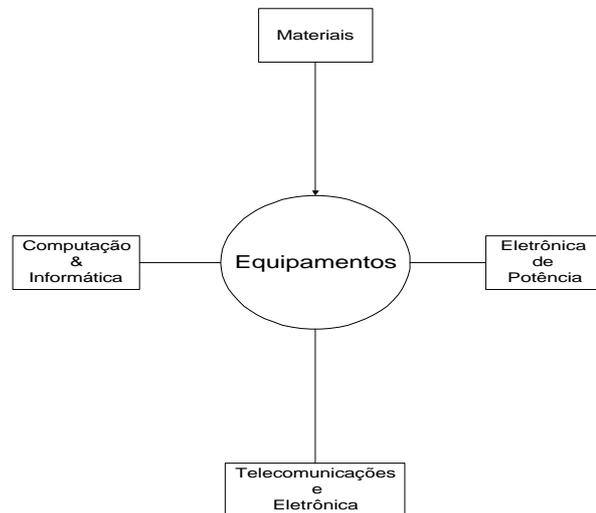
- Novos Materiais
- Eletrônica de Potência
- Telecomunicações e Eletrônica
- Computação e Informática

#### 3.1- Novos Materiais

Novos Materiais (6) são a base das inovações na área de equipamentos elétricos. Apesar de não existir uma definição precisa, podemos considerá-los como sendo materiais "recentemente desenvolvidos". Recentemente pode significar anos ou décadas mas, neste trabalho, significa materiais normalmente não utilizados pela indústria de equipamentos. A maioria das inovações foi fruto do esforço de P&D militar e hoje, com o fim da guerra fria, procuram novos mercados. Eles podem ser classificados em:

- Ligas Metálicas
- Cerâmicas

- Plásticos
- Materiais Compostos
- Supercondutores
- Semicondutores
- Materiais Optoeletrônicos
- Materiais com gradiente de composição<sup>1</sup>



**FIGURA 2. TECNOLOGIAS X EQUIPAMENTOS**

#### **3.1.1- Ligas Metálicas**

Duas ligas metálicas merecem destaque neste grupo, os Metais Amorfos e os Metais com Memória.

**Metais Amorfos [(6)(12)]** são ligas metálicas construídas especialmente sem estrutura cristalográfica. Em função disso, possuem propriedades semelhantes ao metal e ao vidro. Com relação aos equipamentos elétricos, sua principal característica são as reduzidas perdas magnéticas. Transformadores de distribuição com núcleo de metal amorfo são produtos comerciais em fase de crescimento. Em função disso, o CEPEL está desenvolvendo projeto de pesquisa para a Eletrobrás, Procel e Light com o objetivo de avaliar este produto em condições reais de funcionamento. O mercado potencial para este tipo de transformador no país é de 700.000 unidades e o grande valor desta inovação é a redução da potência de pico do sistema.

**Metais de Memória (1)** são ligas metálicas que possuem superelasticidade e capacidade de memorizar a forma. Memória de forma é um fenômeno físico que permite o restabelecimento da forma original do material através da aplicação de calor. Na realidade este fenômeno é uma mudança cristalográfica acionada pelo calor. Por sua vez, a superelasticidade é uma deformação elástica não linear reversível também pelo calor.

De acordo com (1), as aplicações para esses materiais

<sup>1</sup> Functionally gradient materials

na área de equipamentos elétricos é infundável e destacamos algumas:

- Conectores.
- Disjuntores e fusíveis.
- Proteções de sobrecorrente e temperatura.
- Controle de flexa de linhas de transmissão.

### 3.1.2- Cerâmicas

As Cerâmicas são outro importante grupo de novos materiais. Os novos supercondutores de "alta temperatura" são na verdade cerâmicas. Eles representam o mais importante resultado da pesquisa fundamental, relacionada com o setor elétrico, no final deste século. No entanto, seu impacto prático, se houver, ainda está distante porque outros problemas ainda necessitam ser resolvidos para que os produtos cresçam no mercado.

As aplicações práticas mais afetadas pelas cerâmicas são as turbinas a gás. Graças a esses materiais, turbinas mais eficientes e confiáveis estão sendo construídas.

### 3.1.3- Plásticos

Se olharmos ao redor, descobriremos que estamos cercados de plásticos por todos os lados e o mesmo está ocorrendo no setor elétrico. Plásticos estruturais, condutores, isolantes, magnéticos e semicondutores já existem e o equipamento elétrico de plástico já é viável, pelo menos do ponto de vista teórico.

Dentre todos esses polímeros, os isolantes são os mais utilizados em produtos comerciais para o setor elétrico. Os custos estão caindo e, em breve, isoladores poliméricos substituirão os isoladores de vidro e porcelana. No entanto, pesquisas ainda são necessárias e o CEPEL vem investigando o comportamento destes equipamentos nas nossas condições climáticas.

### 3.1.4- Materiais Compostos

Materiais Compostos são sistemas constituídos por dois ou mais materiais diferentes que passam a ter características peculiares. A fibra de vidro e a fibra de carbono são exemplos de materiais compostos com elevado potencial de utilização no setor elétrico. As principais vantagens são leveza, alta resistência e excelentes propriedades isolantes. Portanto, eles podem inovar nas áreas de distribuição e transmissão.

### 3.1.5- Supercondutores

Supercondutores são materiais que não possuem resistência elétrica. Isto significa que podem transportar eletricidade indefinidamente sem perdas. A supercondutividade em metais foi descoberta no início do século mas, devido às dificuldades em se obter temperaturas muito baixas ( $-269^{\circ}\text{C}$ ), poucos produtos foram lançados no mercado. No entanto, em 1986, com o anúncio da descoberta da supercondutividade de alta

temperatura ( $-173^{\circ}\text{C}$ ), a opinião pública voltou a se interessar pelo assunto. Protótipos de geradores supercondutores, utilizando esta nova tecnologia, estão sendo testados no Japão e um vasto universo de possíveis inovações está sendo explorado.

### 3.1.6- Semicondutores

*"640K deverá ser mais do que suficiente"*-Bill Gates, 1981.

Devido à importância dos semicondutores na vida moderna, a história talvez classifique nossa geração como o marco do início da "era do silício".

Os semicondutores são responsáveis pela revolução da Eletrônica, da Eletrônica de Potência, das Telecomunicações e da Computação. Ciclos de vida de dois anos são típicos na indústria de semicondutores. Novos microprocessadores e circuitos integrados são lançados ao mercado rapidamente e a preços cada vez menores. Os semicondutores de Potência também apresentaram importantes avanços. Os níveis de tensão de corrente dos tiristores continuam aumentando mas a grande surpresa da década foram os IGBTs<sup>2</sup>. Estes semicondutores viabilizaram o controle de velocidade de motores de indução em baixa tensão introduzindo inovações importantes nos eletrodomésticos.

### 3.1.7- Materiais Optoeletrônicos

A optoeletrônica surgiu em 1905 com o trabalho de Einstein sobre o efeito fotoelétrico que lhe deu o prêmio Nobel de Física em 1921. Muita pesquisa foi realizada desde então e o mundo hoje está todo interligado por fibras óticas. Apenas os EUA possuem mais de 500.000 km de cabos de fibra ótica instalados. Uma única fibra ótica tem capacidade equivalente a mais de 200.000 telefones ou mais de 100 canais de televisão.<sup>3</sup> Portanto, os sistemas de fibras óticas serão o alicerce de todos os sistemas de comunicação futuros.

Outro desenvolvimento extremamente importante foi obtido em 85. A adição de pequenas quantidades de Erbium ao vidro permitiu a construção de amplificadores inteiramente óticos. Esta descoberta foi fundamental para o desenvolvimento de sistemas óticos porque o fator limitante tem sido sempre a conversão dos sinais óticos para sinais elétricos.

### 3.1.8- Materiais com gradiente de composição

Materiais com gradiente de composição são a junção de dois materiais diferentes através de transição molecular ou atômica gradual. Estes materiais podem ser classificados em:

- metal e metal
- metal e cerâmica
- cerâmica e cerâmica

<sup>2</sup> Isolated Gate Bipolar Transistor -IGBT

<sup>3</sup> Estas capacidades são determinadas pelos equipamentos de conversão luz/eletricidade e não pela fibra.

- carbono e cerâmica
- polímero e polímero

Estes novos materiais poderão ser utilizados em inúmeras aplicações tais como: reatores nucleares, turbinas a gás, encapsulamento de semicondutores de potência e encapsulamento de pára-raios aumentando a confiabilidade dos equipamentos.

### **3.2- Eletrônica de Potência**

*“A válvula, para transmissão em corrente contínua, resfriada a água não é possível” Importante fabricante de equipamentos durante a licitação de Itaipu.*

A Eletrônica de Potência foi responsável pela maior revolução tecnológica no setor elétrico na segunda metade do século XX. Esta revolução começou em 1954 com o comissionamento do primeiro sistema de transmissão em corrente contínua no mundo, ligando a Suécia à ilha de Gotland.

No entanto, somente a partir do primeiro semicondutor de potência, o Retificador Controlado de Silício<sup>4</sup>, a revolução se espalhou pelo setor elétrico.

A década de 60 foi a época da excitatriz estática, a década de 70 foi a época dos sistemas de transmissão em corrente contínua, a década de 80 foi a época dos compensadores estáticos e a década de 90 está sendo a época dos sistemas de transmissão flexíveis<sup>5</sup>. Esta revolução foi responsável por importantes impactos na tecnologia de equipamentos.

### **3.3- Telecomunicações & Eletrônica**

*“This ‘Telephone’ has too many shortcomings to be seriously considered as means of communication. The device is inherently of no value to us.” Western Union internal memo, 1876.*

Telecomunicações e Eletrônica mudaram radicalmente nos últimos 10 anos. Fax e Celulares são exemplos de equipamentos sequer imaginados no passado que, com satélites e cabos de fibras óticas, revolucionaram o mundo das telecomunicações.

O Telefone se tornou o padrão mundial de telecomunicações mas entrou em declínio com o advento da Internet e da telefonia celular. A Internet é uma tecnologia em crescimento que, no futuro próximo, afetará todos os setores da vida moderna. No entanto, nada disso teria sido possível sem a Eletrônica. A crescente integração de circuitos eletrônicos aumentando o número de funções por circuito integrado tem permitido crescentes reduções de tamanho nos equipamentos eletrônicos.

### **3.4- Computação & Informática**

*“Não existe razão para alguém querer ter um computador em casa” Ken Olson, Presidente e Fundador da Digital Equipment Corp., 1977.*

Computação e Informática foram as novas tecnologias que mais evoluíram e afetaram a nossa sociedade nos últimos 10 anos.

O PC, computador pessoal, iniciou uma verdadeira revolução viabilizando poderosas redes de processamento distribuídas a custos incrivelmente reduzidos. Portanto, a era dos equipamentos inteligentes está começando.

Por trás da indústria de computadores surgiu uma nova indústria talvez mais poderosa ainda, a indústria de "software" que abriu uma vasta área de inovações em todas as áreas da vida moderna. Inteligência Artificial, Sistemas de Informação Geográfica, Processamento Digital de Sinais são novas ferramentas extremamente importantes na área de equipamentos elétricos.

A Inteligência Artificial (AI) é uma área de conhecimentos multidisciplinares que utiliza conhecimentos de computação, psicologia, filosofia para melhorar os algoritmos computacionais que lidam com o conhecimento aplicado.

## **4- IMPACTOS NO SETOR ELÉTRICO**

Inicialmente, o setor elétrico era um sistema eletromecânico que aos poucos se transformou em um sistema eletroeletrônico. Isto significa um sistema mais rápido e mais complexo. A Tabela 2 apresenta o relacionamento entre as tecnologias e os equipamentos elétricos.

**TABELA 2. MATRIZ DE IMPACTO TECNOLÓGICO**

Equipamentos	Tecnologia <sup>6</sup>			
	M	EP	CI	T&E
Geradores	XX	X	X	X
Transformadores	XX		X	X
Turbinas	XX		X	X
Linhas	XX		XX	X
Subestações	XX	XX	XX	XX
Uso Final	XX	XX	XX	XX

Observa-se que os novos materiais é a área de conhecimento com maior potencial de inovação nos equipamentos elétricos. Contudo, o potencial da computação e informática não devem ser desprezados. Baseado nas tecnologias disponíveis e no mercado de equipamentos, o CEPEL está desenvolvendo diversos projetos de P&D, relacionados a equipamentos elétricos, que possuem grande impacto inovador.

### **4.1- LPNE**

As linhas de transmissão são equipamentos extremamente importantes para o setor elétrico que utilizavam tecnologias maduras até o desenvolvimento

<sup>6</sup> X significa pequeno impacto

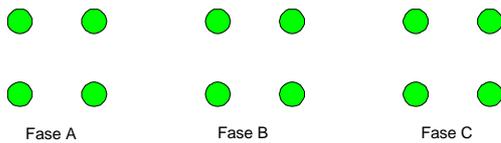
XX significa alto impacto

M são as tecnologias de materiais, P&E é eletrônica de potência, C&I é computação e informática e T&E significa telecomunicações e eletrônica.

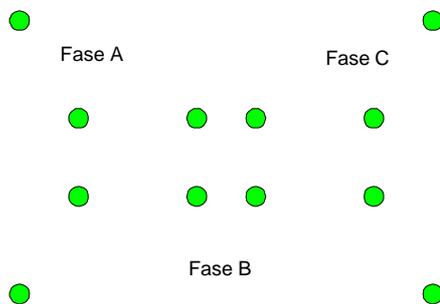
<sup>4</sup> SCR-Silicon Controlled Rectifier

<sup>5</sup> FACTS - Flexible AC Transmission Systems

do conceito de Linhas de Potência Natural Elevada - LPNE<sup>7</sup>. Linhas convencionais utilizam feixes simétricos de condutores com distâncias padronizadas. O conceito básico da LPNE é quebrar a simetria geométrica dos feixes para equalizar o campo elétrico em todos os condutores. A Figura 3 apresenta a estrutura convencional de feixes simétricos e a Figura 4 uma possível configuração utilizando tecnologia LPNE.



**FIGURA 3 . LINHA CONVENCIONAL**



**FIGURA 4. LINHA LPNE**

As vantagens desta tecnologia são:

- Aumento da potência transmitida;
- Diminuição do consumo de potência reativa na carga pesada;
- Uso mais eficiente da faixa de passagem.

Por outro lado, as desvantagens são:

- Ferragens não padronizadas;

#### **4.2- Sensores Óticos**

Temperatura, tensão e corrente são grandezas físicas fundamentais para o setor elétrico que precisam ser monitoradas continuamente.

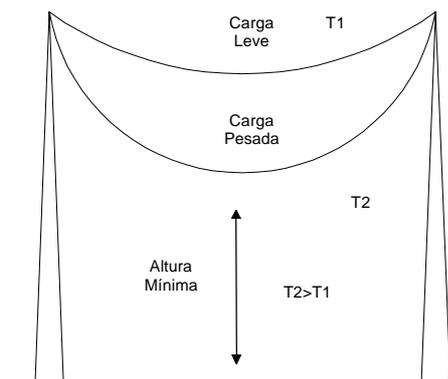
A medição de temperatura no setor elétrico sempre foi um desafio técnico porque a maioria dos sensores são sensíveis aos campos eletromagnéticos. Por isso, a medição de temperatura no interior de equipamentos elétricos nunca foi feita apesar de necessária e desejável. Além disso, os transformadores de corrente e potencial convencionais são grandes, caros e pesados.

Sensores óticos imunes aos campos eletromagnéticos são atualmente viáveis devido à evolução dos materiais optoeletrônicos. Portanto, esses equipamentos passarão a ser utilizados em larga escala no sistema com vantagens econômicas e técnicas.

#### **4.3- Limitador de Flexa**

O limite térmico das linhas tem sido um dos fatores limitantes no sistema atualmente devido à redução de investimentos no setor. Normalmente, este limite não deveria ser importante porque o carregamento das linhas deveria ser limitado por outros fatores tais como estabilidade e perdas. No entanto, durante ocasiões de emergência, este limite pode ser relevante.

O aumento de corrente nas linhas provoca um aumento de temperatura que ocasiona a dilatação dos cabos aumentando assim a flexa dos condutores conforme mostra a Figura 5. Em função disso, a probabilidade de descarga para o solo aumenta. Isto é inaceitável porque coloca em risco vidas humanas e propriedades. A prática atual consiste em estabelecer a máxima corrente de tal maneira que não exista descarga mesmo com as piores condições atmosféricas. Este procedimento é seguro mas não considera o aumento do limite no caso de condições meteorológicas favoráveis. O CEPEL tem trabalho neste problema desenvolvendo o controlador de flexa. Este equipamento que pode se basear em materiais com memória, permitiria manter a flexa constante independentemente da corrente.



**FIGURA 5. PROBLEMA DE FLEXA DAS LINHAS**

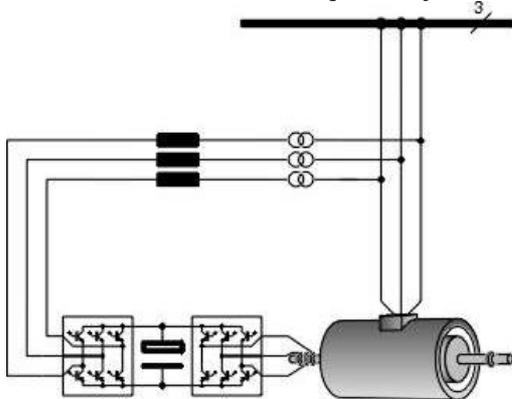
#### **4.4- Geração Hidráulica com Velocidade Ajustável**

A eficiência máxima das turbinas hidráulicas ocorre em condições específicas de altura, velocidade e vazão e a operação real não ocorre sempre nestas condições. Portanto, a eficiência operacional média é sempre inferior. Como a altura do reservatório não pode ser controlada e varia sensivelmente em função das condições hidrológicas, as únicas variáveis possíveis de serem controladas são a vazão e a velocidade.

Apenas a vazão tem sido utilizada para controlar a geração hidráulica porque a velocidade deve ser constante nos geradores síncronos. Contudo, operar a turbina com velocidade ajustável permite operar com eficiência máxima em todas as condições operacionais. A Eletrônica de Potência viabilizou a tecnologia chamada de Sistema Sherbius Estática. Este sistema,

<sup>7</sup> Detalhes técnicos sobre esta tecnologia serão apresentados em outros artigos neste seminário.

mostrado na Figura 6, consiste em uma máquina assíncrona de dupla alimentação excitada por um conversor estático de tensão e frequência ajustáveis.



**FIGURA 6. GERAÇÃO HIDRÁULICA COM VELOCIDADE AJUSTÁVEL**

Através do controle da frequência do rotor é possível manter a frequência do estator constante para diversas velocidades de rotação da turbina.

As principais vantagens deste sistema são o aumento da energia gerada, diminuição do tamanho do reservatório, redução no consumo de água para geração de energia e redução do impacto ambiental.

## **5- CONCLUSÕES**

Este artigo apresentou uma visão geral dos novos desenvolvimentos tecnológicos que deverão produzir grandes impactos no setor elétrico e, em particular, nos equipamentos. Novos Materiais, eletrônica de Potência, Informática, Eletrônica e Telecomunicações são as principais áreas de conhecimento que fornecerão as novas inovações para o setor elétrico.

## **6- AGRADECIMENTOS**

Gostaríamos de agradecer aos inúmeros colegas do CEPEL, responsáveis pelos projetos e resultados aqui apresentados.

## **7- BIBLIOGRAFIA**

- (1) BRAUNOVIC, M., "Use of Shape-Memory Materials in Distribution Power System", Report SD-294-A Hydro-Quebec, April 1984.
- (2) ELETROBRÁS, "Plano Decenal", <http://www.Embratel.net.br/infoserv/eletrobr/index.html>.
- (3) GARVIN, "Research Overview", [http://webphysics.iuoui.edu/adg/ADG\\_overview.html](http://webphysics.iuoui.edu/adg/ADG_overview.html)
- (4) GREAT QUOTES, <http://www.cen.uiuc.edu/~tfconrad/quotes.html>
- (5) [http://www.ieee.org/tab/ieee\\_new\\_technology.htm](http://www.ieee.org/tab/ieee_new_technology.htm) 1
- (6) JAPAN NEW MATERIALS REPORT, "Introduction to Engineered Materials", <http://www.isomedia.com/homes/jnmr/jnmr.htm>.
- (7) JAPAN NEW MATERIALS REPORT, "Introduction to Functionally Gradient Materials", <http://www.isomedia.com/homes/jnmr/jnmr.htm>
- (8) LIMA, A., MORAES R. and OLIVER J., "Geração Hidroelétrica com Velocidade Ajustável: Uma Nova Tecnologia para o Aumento da Eficiência da Geração", XIII SNPTEE, 1-5 de outubro, 1995.
- (9) LIMA, A.G.G, et alli, "A Revolução Tecnológica da Eletrônica de Potência Aplicada ao Setor Elétrico", XII SNPTEE, Recife, outubro, 1993.
- (10) NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, "Modern Communication: the Laser and Fiber-Optic Revolution", <http://www2.nas.edu/bsi>
- (11) OWENS CORNING, "Introduction to Composites", <http://www.owenscorning.com/owens/>
- (12) SPECIAL METALS CORPORATION, "Special Metals", <http://www.spicalmetals.com/index.html>.
- (13) SUPERCONDUCTING WEEK, "What are Superconductors?", <http://www.superconductorweek.com>.