



## “Solid State Switching”

Luis Miguel dos Santos Moreira  
LEEC 2006

3)/  
RI

84



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

**FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO**

*Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores*

*Ramo de Sistemas de Energia*

## **Solid State Switching**

Relatório Final da Disciplina de Projecto, Seminário ou Trabalho de Fim de Curso

Luís Miguel dos Santos Moreira

Porto, Junho de 2006

  
Ciência. Inovação  
2010

Programa Operacional Ciência e Inovação 2010  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, INOVAÇÃO E ENSINO SUPERIOR



União Europeia FEDER



Relatório de estágio curricular desenvolvido nas instalações da EFACEC – Aparelhagem de Média Tensão, SA. A duração do estágio foi de 6 meses, financiados pelo programa POCI.

Orientadores:

- FEUP: Prof. Fernando Maciel Barbosa
- EFACEC: Eng.º Miguel Carvalho

*Financiamento FCT/POCI*

**FCT**  
Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR



*Governo da República Portuguesa*

*Ciência, Inovação*  
**2010** Programa Operacional Ciência e Inovação 2010



*União Europeia FEDER*



621.3(043)/Leec 2006/1021

Universidade do Porto	
Faculdade de Engenharia	
Biblioteca	
Nº	105180
CDU	
Data	24 / 02 / 20 10

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho só foi possível graças à colaboração de várias pessoas.

Agradeço nomeadamente:

- Ao Eng. Miguel Carvalho, engenheiro responsável pelo departamento de I&D da EFACEC AMT, SA, pela proposta de estágio, disponibilidade e empenho revelados durante o meu estágio, assim como o apoio dado, conhecimentos transmitidos e pelos materiais dispensados que muito contribuíram para a elaboração deste trabalho.

- Ao Departamento de Engenharia de I&D da EFACEC AMT, SA, pela disponibilidade e paciência para comigo.

- Ao Prof. Fernando Maciel Barbosa, professor catedrático da FEUP, pelo interesse e disponibilidade em aceder ao meu pedido para supervisionar o estágio, assim como a dedicação e o apoio, que foram imprescindíveis à realização do meu trabalho.

- Ao POCI pelo apoio financeiro.

## SUMÁRIO

O presente relatório final da disciplina de Projecto, Seminário ou Trabalho de Fim de Curso, do 5º ano da Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Ramo de Sistemas de Energia descreve o trabalho realizado no estágio curricular, efectuado no departamento de I&D da EFACEC AMT, Aparelhagem de Média Tensão, S.A.. O estágio consistiu na avaliação do estado da técnica *Solid State Switching* e análise da sua aplicabilidade e impacto no domínio da média tensão. Foi realizada uma pesquisa exaustiva da tecnologia actual, de patentes e possíveis aplicações comerciais bem como a verificação das vantagens e inconvenientes/limitações da tecnologia no domínio da MT

Este documento está modelarmente dividido, apresentando-se inicialmente o Grupo EFACEC e as motivações para a pesquisa da tecnologia, e das suas características.

Segue-se a apresentação da tecnologia actual de corte e das suas características e limitações, bem como a sua natural evolução para a tecnologia *Solid State Switch*. Logo de seguida apresenta-se a evolução sofrida e as diferentes variantes desta tecnologia para a média tensão, bem como a sua aplicabilidade nestes sistemas, as suas características, vantagens e problemas/limitações.

Por último é apresentado o possível impacto que a produção destes novos sistemas terá nos mercados de energia já estabelecidos.



## **ABSTRACT**

This paper presents the final report of the “*Projecto, Seminário ou Trabalho de Fim de Curso*”, of 5<sup>o</sup> year of the “*Licenciatura de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Ramo de Sistemas de Energia*”.

This work was carried through in the department of R&D of “EFACEC AMT, Aparelhagem de Média Tensão, S.A.”.

In this period it was evaluated the state of the art of the *Solid State Switching technology* and analyzed its applicability and impact in the energy systems. An exhausting research of this technology was carried through, patents and possible commercial applications as well the verification of the advantages and limitations of the technology in the domain of medium voltage.

This document presents initially the EFACEC Group and the motivations for the research of this technology, and its characteristics.

It is followed by the presentation of the current circuit breakers technology, its characteristics and limitations, as well as its evolution for the Solid State Switch technology. Different variants of this technology are presented in medium voltage, as well its applicability in these systems, its characteristics, advantages and problems/limitations.

Finally is presented the possible impact that these new systems will have in the established markets of energy.



## ÍNDICE

<b>Lista de abreviaturas/Símbolos/Acrónimos.....</b>	<b>10</b>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>12</b>
1.1 Estrutura do trabalho.....	15
1.2 Bibliografia.....	15
<b>2 Grupo EFACEC.....</b>	<b>16</b>
2.1 Apresentação.....	16
2.2 Organização do Grupo EFACEC.....	17
2.3 EFACEC AMT, Aparelhagem de Média Tensão, SA. ....	17
<b>3 Disjuntores da média tensão - Tecnologia actual .....</b>	<b>18</b>
3.1 Disjuntores de sopro magnético .....	18
3.1.1 Princípio da extinção .....	18
3.1.2 Características e aplicações .....	19
3.2 Disjuntor a óleo .....	20
3.2.1 Disjuntores de grande volume de óleo (GVO) .....	20
3.2.2 Disjuntores de pequeno volume de óleo (PVO) .....	21
3.3 Disjuntores de vácuo.....	22
3.3.1 O arco voltaico no vácuo .....	22
3.3.1.1 O arco difuso.....	22
3.3.1.2 O arco contraído.....	23
3.3.2 Características/Aplicações do Disjuntor a vácuo .....	23
3.4 Disjuntores de ar comprimido.....	25
3.4.1 Princípios de extinção do arco.....	25
3.4.2 Características/Aplicações dos disjuntores de ar comprimido .....	25
3.4.3 Vantagens dos disjuntores de ar comprimido.....	26
3.4.4 Desvantagens dos disjuntores de ar comprimido .....	26
3.5 Disjuntores de SF6.....	27
3.5.1 Propriedades do SF6.....	27
3.5.2 Características/Aplicações dos disjuntores a SF6 .....	29
3.6 Comparação das diferentes técnicas de corte em disjuntores .....	29
3.6.1 O corte em SF6 .....	31
3.6.2 O corte no vácuo.....	31



<b>3.7</b>	<b>Limitações Globais da tecnologia actual.....</b>	<b>32</b>
<b>3.8</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>32</b>
<b>3.9</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>Nova Tecnologia Emergente – Interruptores estáticos .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2</b>	<b>Características Gerais da Tecnologia Solid State.....</b>	<b>34</b>
4.2.1	Características.....	35
4.2.2	Vantagens .....	35
4.2.3	Problemas .....	36
4.2.4	Semicondutores .....	37
4.2.5	Aparelhos de Comutação de Potência .....	38
4.2.5.1	Diodos de Potência .....	38
4.2.5.2	Transistor (IGBT) .....	39
4.2.5.3	Thyristors .....	40
4.2.5.4	GTO Thyristor .....	40
4.2.5.5	Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT) .....	41
4.2.5.6	Advanced Turn-Off Thyristors .....	41
4.2.6	Descrição geral da tecnologia (BIPOLAR e BIMOS): .....	42
4.2.7	Construção de Blocos .....	44
4.2.8	Propriedades fundamentais dos Semicondutores .....	45
<b>4.3</b>	<b>As Inovações Provenientes do IGCT.....</b>	<b>47</b>
4.3.1	Evolução .....	47
4.3.2	Características.....	50
4.3.3	Vantagens da tecnologia IGCT na média tensão.....	52
4.3.3.1	Baixas perdas de comutação .....	52
4.3.3.2	Redução do tamanho do equipamento .....	52
4.3.3.3	Baixo custo.....	53
4.3.3.4	Fiabilidade e disponibilidade .....	54
4.3.3.5	Aplicações da tecnologia IGCT .....	55
<b>4.4</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>55</b>
<b>4.5</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>Empacotamento de semicondutores.....</b>	<b>57</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>57</b>
<b>5.2</b>	<b>Vários Tipos de Ligações/Empacotamento .....</b>	<b>57</b>
5.2.1	Bond Wires .....	58
5.2.2	Press Pack .....	58
5.2.3	Deposited Metallization.....	59
5.2.4	Thin Pak.....	60



5.2.5	Area Array Interconnect .....	61
5.2.6	Análise entre as várias tecnologias de Ligação/Empacotamento .....	61
<b>5.3</b>	<b>Análise das Topologias e Tecnologias associadas ao Press Pack .....</b>	<b>62</b>
5.3.1	Desenho mecânico .....	63
5.3.2	Montagem/Empacotamento .....	64
5.3.3	Empacotamento em “Wafer” .....	67
5.3.4	Produtos disponíveis .....	68
5.3.5	Diodos de recuperação extra rápida para aplicações IGBT e IGCT .....	69
<b>5.4</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>70</b>
<b>5.5</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>As melhores soluções SOLID STATE para a qualidade da energia ....</b>	<b>72</b>
<b>6.1</b>	<b>Principais problemas que afectam a forma de onda .....</b>	<b>73</b>
6.1.1	Cavas de Tensão .....	73
6.1.2	Interrupções .....	73
6.1.3	Ondulações .....	73
6.1.4	Transitórios .....	73
6.1.5	Sobretensão .....	73
6.1.6	Sub Tensão .....	73
6.1.7	Harmónicos .....	74
6.1.8	Inter harmónicos .....	74
6.1.9	Ranhuras/dentes de serra .....	74
6.1.10	Flutuações de Tensão .....	74
<b>6.2</b>	<b>Possíveis Soluções .....</b>	<b>75</b>
<b>6.3</b>	<b>Exemplos de aparelhagem .....</b>	<b>77</b>
6.3.1	DVR(Dinamic Voltage Restorer) .....	77
6.3.2	DSTATCOM .....	78
6.3.3	Solid-State Transfer Switch (SSTS) .....	78
<b>6.4</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>78</b>
<b>6.5</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>79</b>
<b>7</b>	<b>Disjuntores Solid State e Limitadores de Corrente .....</b>	<b>80</b>
<b>7.1</b>	<b>Introdução: .....</b>	<b>80</b>
<b>7.2</b>	<b>Sistema de Protecção actual .....</b>	<b>81</b>
<b>7.3</b>	<b>Disjuntores Solid State e Limitadores de corrente .....</b>	<b>82</b>
7.3.1	Aplicabilidade em sistemas de distribuição de energia .....	84
<b>7.4</b>	<b>Princípios do limitador de corrente Solid State .....</b>	<b>85</b>



<b>7.5</b>	<b>Topologias Solid State Switch.....</b>	<b>88</b>
7.5.1	Semicondutores Analisados.....	88
7.5.2	Topologias de Módulo.....	90
7.5.3	Comparação das diferentes topologias .....	91
7.5.3.1	Custos das Diferentes Topologias:.....	92
7.5.3.2	Fiabilidade das diferentes topologias:.....	93
<b>7.6</b>	<b>Exemplo de um limitador de 69KV em desenvolvimento .....</b>	<b>94</b>
<b>7.7</b>	<b>Aplicações Reais(Experiência no terreno).....</b>	<b>96</b>
7.7.1	Supercondutor FCL de 10 kV demonstrado na Alemanha.....	96
7.7.2	Teste de um FCL no Japão .....	97
<b>7.8</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>98</b>
<b>7.9</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>98</b>
<b>8</b>	<b>Solid-State Transfer Switch e Mechanical Transfer Switch.....</b>	<b>100</b>
<b>8.1</b>	<b>Solid State Transfer Switch convencional .....</b>	<b>101</b>
<b>8.2</b>	<b>Topologias Solid State Transfer Switch.....</b>	<b>102</b>
8.2.1	Dispositivo Híbrido .....	102
8.2.2	Disjuntores Solid State que funcionam como SSTS .....	104
<b>8.3</b>	<b>Exemplo de um SSTS híbrido.....</b>	<b>105</b>
<b>8.4</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>107</b>
<b>8.5</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>108</b>
<b>9</b>	<b>Disjuntores Híbridos e totalmente de estado sólido(Solid State).....</b>	<b>109</b>
<b>9.1</b>	<b>Disjuntor Híbrido .....</b>	<b>109</b>
9.1.1	Introdução.....	109
9.1.2	Aplicação .....	110
9.1.2.1	Especificações do disjuntor.....	110
9.1.2.2	Requisitos e restrições para a Tensão .....	111
9.1.2.3	Restrições da corrente .....	111
9.1.3	Apresentação da solução .....	111
9.1.3.1	Módulo disjuntor.....	112
9.1.3.1.1	Módulo 1: Módulo principal de condução.....	112
9.1.3.1.2	Módulo 2a: Módulo em série que auxilia a deflexão.....	112
9.1.3.1.3	Módulo 2b: Deflexão da corrente e limitação do arco.....	113
9.1.3.1.4	Módulo 3: Módulo de limitação da corrente .....	113
9.1.3.1.5	Módulo 4: Armazenamento de energia e descarga .....	113
9.1.3.2	Sequencia básica de funcionamento do disjuntor .....	113
9.1.3.2.1	Funcionamento.....	114
9.1.3.2.1.1	Disjuntor sem impedância La .....	115
9.1.3.2.1.2	Disjuntor com indutância auxiliary .....	116



9.1.3.3	Comparação com sistemas existentes .....	117
9.1.3.3.1	Comparação com soluções electromecânicas.....	117
9.1.3.3.2	Comparação entre Híbridos e soluções estáticas .....	117
9.1.4	Conclusões.....	118
<b>9.2</b>	<b>Um Disjuntor Solid-State para redes de 13.8kV .....</b>	<b>118</b>
9.2.1	Introdução.....	119
9.2.2	Disjuntor Solid State.....	120
9.2.2.1	Características técnicas .....	120
9.2.2.2	Constituição .....	121
9.2.2.3	Disjuntor Trifásico Solid State.....	121
9.2.3	Conversores de potência.....	122
9.2.3.1	Conversores De Matriz .....	122
9.2.3.2	Conversor em Ponte.....	123
9.2.4	Facts (Sistema Flexível De Transmissão em AC).....	123
9.2.5	Conclusão .....	123
<b>9.3</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>124</b>
<b>10</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>125</b>



## Lista de abreviaturas/Símbolos/Acrónimos

$\frac{di}{dt}$  -Variação da corrente com o tempo

$\frac{dv}{dt}$  -Variação da tensão com o tempo

**ETO**-Emitter Turn-off Thyristor

**SGTO**-Super GTO

**FET**-Transístor de Efeito de Campo

**TOD**-Turn Off Device

**IGBT**-Insulated Gate Bipolar Transístor

**IGCT**-Integrated Gate Commutated Thyristor

**Mosfet**- Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors

**GTO**- Gate Turn-off-Thyristors

**STATCOM**-Compensador estático de controlo de potência

**FCL**-Fault Current Limiter

**SCR**-Silicon Controlled Rectifier

**DTI**-Diversified Technologies, Inc.

**SSTS**-Solid State Transfer Switch

**MCT**- MOS Controlled Thyristor

**Wafer**-Disco com empacotamento de semicondutores

**SiC**- Carbonato de Silício

**PWM**-Pulse Width Modulation

**VSC**-Voltage Sourced Converters

**on state**-em condução

**Snubber**- Circuito electrónico de amortecimento, limitador do aumento da corrente e tensão

**Snubberless**-sem Snubber

**MOS**- Metal Oxide Semiconductor

**MTO**- MOS Turn-off Thyristor

**SOA**- Safe Operating Area

**GCT**-Gate commuted Thyristor



**MVSTS**- Medium Voltage Solid Transfer Switch

**MVHTS**- Medium Voltage Hybrid Transfer Switch

**MOV**- Metal Oxide Variator

**DTI**- Diversified Technology Inc.

**FET**- Field Effect Transistor



## 1 Introdução

A energia eléctrica produzida em centrais termoeléctricas, hídricas, ou eólicas é transportada através de condutores eléctricos até aos lugares mais adequados para o seu aproveitamento, iluminando cidades e alimentando máquinas e motores.

O transporte da energia até aos pontos de utilização não depende apenas de cabos, postes e transformadores. Toda a rede de transporte e distribuição depende inteiramente de um sistema de protecção adequado, sem o qual não seria possível realizar o transporte de energia de modo seguro.

O sistema de protecção actual tem associado um conjunto de disjuntores para a abertura e fecho de circuitos.

O disjuntor é um equipamento com poder de corte destinado a abertura e ao fecho de circuitos nas redes eléctricas.

Os disjuntores actuais são essencialmente electromecânicos, e apesar das suas limitações, permitem, nomeadamente, um controlo seguro sobre os curto circuitos. Usando temporização nos sistemas de protecção, os disjuntores podem ser coordenados de modo a se obter um nível de protecção e selectividade adequados.

Os principais tipos de disjuntores existentes são:

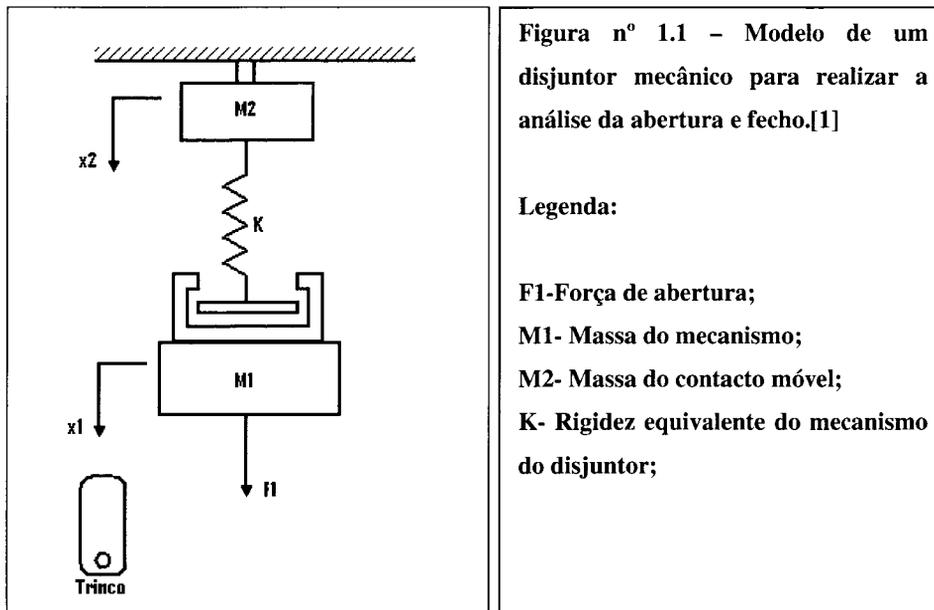
- Os disjuntores de sopro magnético;
- Os disjuntores a óleo;
- Os disjuntores de ar comprimido;
- Os disjuntores de SF<sub>6</sub>;
- Os disjuntores de vácuo;

Actualmente na média tensão, os principais disjuntores, utilizam técnicas avançadas como o vácuo ou gás SF<sub>6</sub>. Estes disjuntores estão entre os equipamentos de potência que apresentam uma maior complexidade.

A potência de corte de um disjuntor depende da força de abertura dos contactos, da intensidade de corrente e do meio onde se dá a abertura dos contactos.

A força requerida para efectuar a abertura dos contactos é função da intensidade de corrente e pode ser representada pela expressão:  $F = C_1 \times I^{1.45}$ , em que  $C_1 = 5,3 \times 10^{-5}$  [1].

O sistema mecânico de um disjuntor pode ser descrito como um sistema massa-mola, figura nº 1.1, em que a força de abertura deve ser capaz de superar sempre a força resistiva dos contactos, que varia segundo a amplitude da corrente.



Este sistema mecânico pode ser descrito através de varias equações de movimento, em três intervalos principais. Estas deduções e análise de equações encontram-se fora do âmbito deste trabalho, encontrando-se descritos em[1].

A descrição dos vários estados do sistema que representa o disjuntor mecânico engloba uma análise e um difícil tratamento de várias equações. Com um disjuntor *Solid State*, a comutação entre o estado de condução e bloqueio, dá-se de modo instantâneo e de forma ideal e sem estados intermédios. Deixa de existir assim toda a complicação associada às partes mecânicas móveis.

O disjuntor *Solid State* (disjuntor de estado sólido) é a próxima evolução dos disjuntores. O seu aparecimento diminuirá a complexidade dos seus antecessores, facilitando o estudo da interrupção de circuitos.

Desde a invenção do transístor, que se tem procurado desenvolver o *Solid State Power Switch* “ideal”, um dispositivo que funcione como interruptor ideal, figura nº 1.2, que seja rápido, com perdas baixas, e com valores nominais altos para tensão e corrente

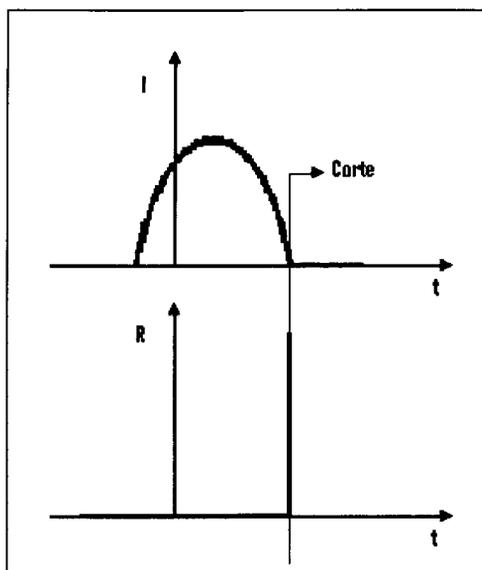


Figura nº 1.2 -Interruptor ideal

O interruptor ideal deve:

- Ser capaz de cortar a corrente instantaneamente;**
- Absorver toda a energia electromagnética armazenada no circuito antes do corte;**
- Restabelecer imediatamente a rigidez dieléctrica após a passagem da corrente por zero;**

Esta nova etapa na evolução da tecnologia de corte, traz potencialidades enormes. O potencial é tal que a tecnologia pode tornar-se dominante numa grande parte das aplicações nos sistemas eléctricos de energia da média tensão.

A evolução dos vários semicondutores existentes e o seu empacotamento num disco permitiu o aumento da sua fiabilidade, robustez e o aumento dos valores nominais da corrente. É assim possível a sua aplicação em diferentes aparelhagens para a média tensão, não só como disjuntores mas também como limitadores de corrente, aparelhagens híbridas e de comutação instantânea.

Com este tipo de aparelhagens, o funcionamento da rede de distribuição melhorará, o que resultará na redução do número de clientes afectados por problemas, e na facilidade de detecção de avarias, reduzindo-se tempos de interrupção e melhorando a qualidade de serviço.

As principais vantagens deste tipo de aparelhagem *Solid State* são:

- Ausência de manutenção e custos de exploração mais baixos;
- Ausência de partes moveis e *drives* mecânicas complexas;
- Podem ser utilizadas em qualquer posição de montagem e não possuem restrições a nível ambiental;
- Melhoramento da qualidade de energia;
- Extinção em qualquer ponto da corrente (não apenas na sua passagem por zero) e independente do meio onde se dá o arco;



O plano de trabalho definido inicialmente prevê as seguintes etapas:

1. Pesquisa exaustiva de tecnologia actual, de eventuais patentes e Benchmarking de possíveis aplicações comerciais;
2. Enumeração de vantagens e inconvenientes/limitações da tecnologia no domínio da MT;
3. Análise do impacto do desenvolvimento da mesma nos mercados e negócios de energia estabelecidos;

### 1.1 Estrutura do trabalho

No capítulo 2 é realizada uma pequena apresentação do Grupo EFACEC, e da secção onde foi realizado este estágio. No capítulo 3 é apresentada a tecnologia actual de disjuntores para a média tensão, as respectivas características e limitações. No capítulo 4 é apresentada a tecnologia emergente *Solid State Switching*, as suas características, vantagens e limitações, bem como os principais semicondutores envolvidos.

No capítulo 5 é apresentado os principais tipos de empacotamento de semicondutores, dando relevância a tecnologia *Press pack*. No capítulo 6 é apresentado os principais problemas que afectam a forma de onda, e as melhores soluções em termos de aparelhagens *Solid State* destinadas a melhorar a qualidade de energia.

No capítulo 7 é apresentado o princípio de funcionamento, as características e aplicações dos limitadores da corrente de defeito, sendo dado exemplos reais. São também apresentadas as características e as principais topologias dos disjuntores *Solid State*.

No capítulo 8 são dados exemplos de *Solid State Transfer Switchs* e *Mechanical Transfer Switchs*, bem como as respectivas características e topologias.

No capítulo 9 é apresentado um disjuntor híbrido e o seu funcionamento integrado numa rede eléctrica. È também apresentado disjuntor totalmente *Solid State* integrado em uma rede de 13,8KV

### 1.2 Bibliografia

[1] Allan GeenWood, “Vacuum Switchgear”, The Institution of electrical Engineers, IEE Power Series 18, 1994

## 2 Grupo EFACEC

### 2.1 Apresentação

Constituído em 1948, o Grupo EFACEC é o maior grupo nacional de capitais portugueses, nos domínios da electrónica e da electromecânica.

É formado por várias sociedades cujas actividades abrangem a concepção e produção de equipamentos, o design de sistemas e a concepção das soluções nas áreas Energia, Transportes, Telecomunicações, Logística, Ambiente, Indústria, Edifícios e Serviços.

A actividade do Grupo estende-se por todos os continentes, fazendo-se representar por unidades fabris, filiais, joint-ventures com empresas locais e representantes comerciais.

De entre os mais de 1800 colaboradores efectivos, dos quais 35% têm formação superior, a EFACEC conta com técnicos altamente qualificados que asseguram elevados padrões de qualidade e assistência aos seus clientes.[[www.efacec.pt](http://www.efacec.pt)]



Figura nº 2.1 – EFACEC no mundo



## 2.2 Organização do Grupo EFACEC

A organização do Grupo EFACEC é apresentada na figura nº2.1.

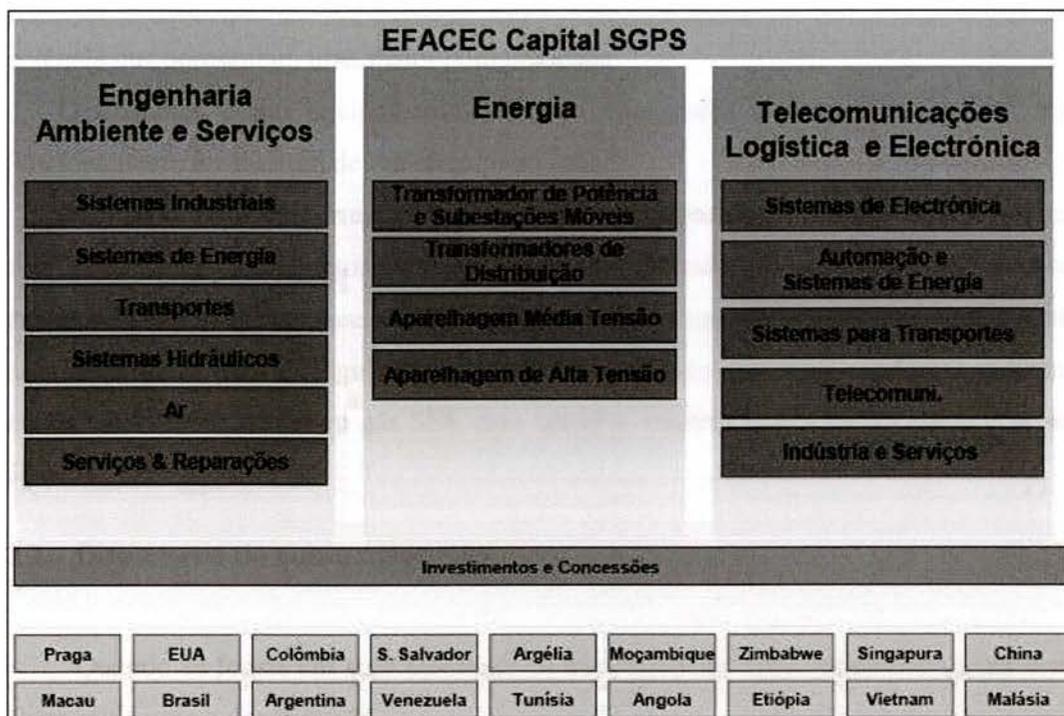


Figura nº 2.1 – Organização do Grupo EFACEC

## 2.3 EFACEC AMT, Aparelhagem de Média Tensão, SA.

A EFACEC AMT é uma empresa do Grupo EFACEC, integrada na área de Energia, especialista no desenvolvimento e fabricação de equipamentos e de novas soluções no domínio da Média Tensão. A inovação tecnológica e organizacional permitiu criar equipamentos e sistemas que respondem às necessidades mais exigentes. A mais avançada tecnologia em meios de Desenvolvimento e Fabricação permitiram criar soluções flexíveis adaptadas à nova realidade do mercado da energia eléctrica, minimizar a manutenção e os trabalhos de instalação, automatizar as redes de distribuição e melhorar a qualidade da energia fornecida.

Para além das tecnologias de corte e protecção em SF6 e vácuo, dispõe de uma gama completa de quadros isolados a Ar e em SF6 destinada á Produção e Distribuição de Energia Eléctrica, Indústria e Infra-estruturas.[[www.amt.efacec.pt](http://www.amt.efacec.pt)]



### 3 Disjuntores da média tensão - Tecnologia actual

Os disjuntores na média tensão estão entre os equipamentos dos sistemas de potência que apresentam uma maior complexidade.

O disjuntor é um equipamento de corte para redes eléctricas que baseia seu funcionamento na abertura de um circuito eléctrico.

Quando o valor da corrente supera o limite estabelecido para a abertura, a bobina atrai os contactos do disjuntor para abrir o circuito. Quando o circuito é aberto forma-se um arco eléctrico que precisa de ser extinto. Os diferentes disjuntores existentes usam diferentes meios para extinguir esse arco voltaico. As técnicas mais modernas utilizam meios tais como o vácuo ou gás SF<sub>6</sub>, mas também existem outros meios como o ar ou óleo.

#### 3.1 Disjuntores de sopro magnético

Quando se forma um arco eléctrico, os disjuntores de sopro magnético usam o ar como meio para a sua extinção.

##### 3.1.1 Princípio da extinção

Neste tipo de disjuntor os contactos abrem-se no ar, empurrando o arco voltaico para dentro das câmaras de extinção, onde ocorre a interrupção, devido a um aumento na resistência do arco e consequentemente na sua tensão.

Este aumento na resistência do arco é conseguido através:

- Do aumento do comprimento do arco;
- Da fragmentação do arco em vários arcos menores, em série, nas várias fendas da câmara de excitação;
- Do arrefecimento do arco em contacto com as múltiplas paredes da câmara.

As forças que impelem o arco para dentro das fendas da câmara são produzidas pelo campo magnético da própria corrente, passando por uma ou mais bobinas (daí o nome de sopro magnético) e, eventualmente, por um sopro pneumático auxiliar produzido pelo mecanismo de accionamento. Este sopro pneumático é muito importante

no caso de interrupção de pequenas correntes, cujo campo magnético é insuficiente para impelir o arco para dentro da câmara, o que ocasionaria tempos de arco muito longos.

A figura nº3.1 ilustra uma câmara de extinção de um disjuntor de sopro magnético com o circuito magnético dentro da própria câmara.

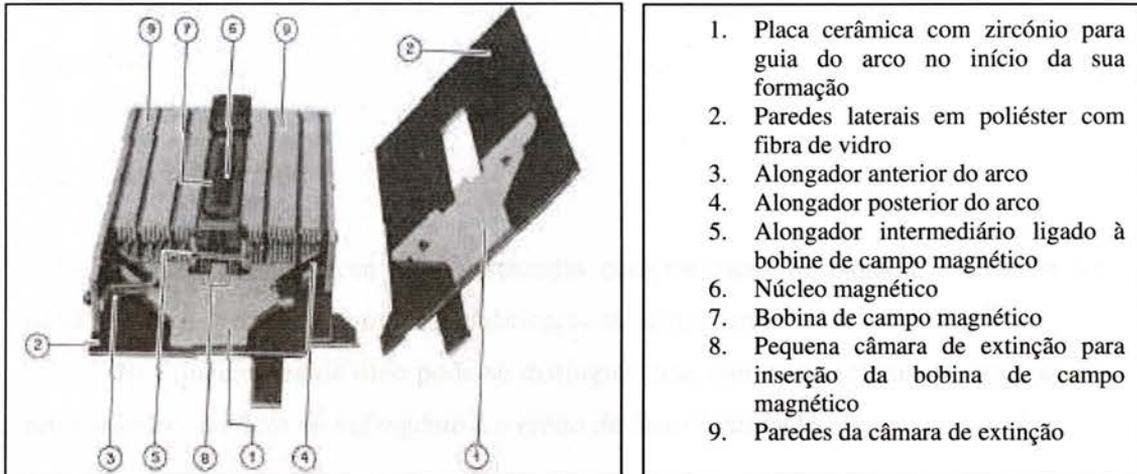


Figura nº 3.1 –Câmara de extinção e legenda de um disjuntor de sopro magnético[1]

### 3.1.2 Características e aplicações

Uma das principais características dos disjuntores a sopro magnético, figura nº3.2, é a grande resistência do arco voltaico. Esta alta resistência irá interagir com o circuito, modificando o ângulo de fase do mesmo, tornando-o mais resistivo e diminuindo o valor instantâneo da tensão de restabelecimento após a interrupção.

Pode-se dizer, portanto, que de uma maneira geral, os disjuntores a sopro magnético não produzem grandes surtos de manobra. Os disjuntores a sopro magnético são usados em média tensão até 24kV, principalmente montados em células. O facto de não possuírem meio extintor inflamável como o óleo, torna-os seguros e aptos para certos tipos de aplicações específicas.

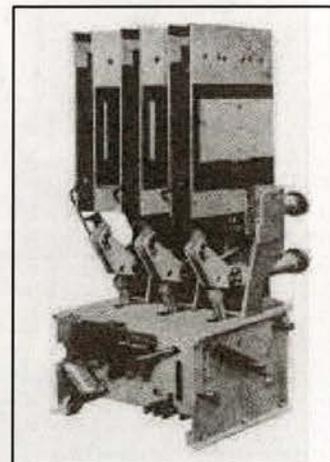


Figura nº 3.2 –Disjuntor de sopro magnético



### **Desvantagens:**

O facto de queimarem o arco no ar, provoca rápida oxidação nos contactos exigindo uma manutenção mais frequente.

Quando operam produzem grande ruído, o que pode também, em certos casos, limitar o seu uso. A figura nº 3.2 mostra uma vista completa de um disjuntor a sopro magnético.

## **3.2 Disjuntor a óleo**

O óleo mineral com suas destacadas características de isolante e extintor foi usado desde os primeiros tempos na fabricação de disjuntores.

Nos disjuntores de óleo pode-se distinguir dois efeitos principais de extinção do arco voltaico: *o efeito de hidrogénio e o efeito de fluxo liquido*[1].

### **3.2.1 Disjuntores de grande volume de óleo (GVO)**

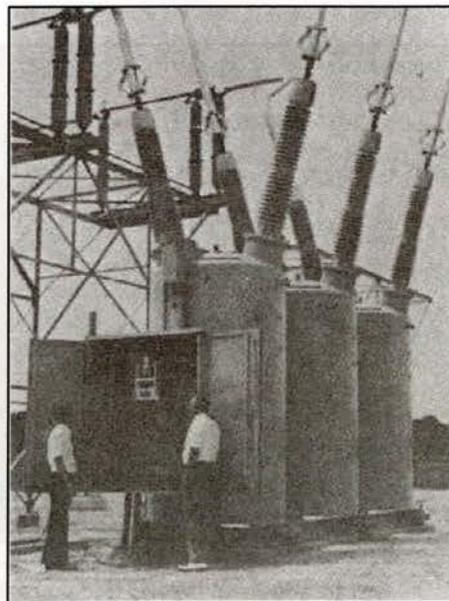
É o tipo mais antigo de disjuntores a óleo. No passado consistia apenas em um recipiente metálico com os contactos simplesmente imersos no óleo sem nenhuma câmara de extinção. Hoje, os disjuntores GVO possuem câmaras de extinção onde se força o fluxo de óleo sobre o arco.

Os disjuntores GVO são usados em **média e alta tensão até 230kV.**

A característica principal dos disjuntores GVO é a sua grande capacidade de ruptura em curto – circuito.

São disjuntores que apresentavam limitações e desvantagens, e actualmente já

não são produzidos, sendo substituídos pelos disjuntores de pequeno volume de óleo. A EFACEC produziu disjuntores de pequeno volume de óleo de 1960 a 1985. A partir



**Figura nº 3.3 –Disjuntor de Grande Volume de Óleo [1]**

desta data passou a produzir disjuntores de SF<sub>6</sub> até 1995, data que iniciou a produção de disjuntores de vácuo.

### **Desvantagens dos disjuntores de grande volume de óleo**

As limitações desta tecnologia são a segurança e a degradação resultantes dos cortes repetidos. A segurança de utilização desta tecnologia está dependente de um bom estado de conservação, o qual requer uma manutenção longa e minuciosa, pouco viável nas redes modernas, nas quais é requerida uma continuidade de serviço elevada. Os cortes repetidos provocam a degradação dos contactos e a decomposição do óleo, provocando, por um lado, a libertação do hidrogénio e, por outro, a libertação de carbono, que em suspensão no óleo provoca uma progressiva diminuição das qualidades isolantes do mesmo.

Apesar de perigosa e de apresentar alguns inconvenientes, esta técnica de corte, até cerca de 1930, liderou o mercado da alta tensão.

#### **3.2.2 Disjuntores de pequeno volume de óleo (PVO)**

Representam o desenvolvimento natural dos antigos disjuntores GVO, na medida em que se procura projectar uma câmara de extinção com fluxo forçado de óleo sobre o arco aumentando-se a eficiência do processo de interrupção da corrente e diminuindo-se drasticamente o volume de óleo no disjuntor.

A figura nº 3.4 mostra dois disjuntores de PVO para a média tensão. Os disjuntores PVO cobrem na média tensão, praticamente, toda a gama de capacidades de ruptura de 63kA. No nível de 138kV a sua capacidade de ruptura por câmara está limitada a um máximo de 20kA.



**Figura nº 3.4 –Disjuntores de Pequeno Volume de Óleo[1]**



A sua produção também foi abandonada, por volta dos anos 80, substituída pelos disjuntores de SF6. A sua substituição deveu-se principalmente as desvantagens do uso de óleo.

### 3.3 Disjuntores de vácuo

Devido a dificuldades técnicas a introdução destes disjuntores foi retardada para o início da década de 60, sendo que a sua produção em grandes volumes para média tensão começou realmente no início dos anos 70.

#### 3.3.1 O arco voltaico no vácuo

Esta expressão, a princípio, pode parecer contraditória, pois a existência de um arco voltaico pressupõe a existência de iões positivos e electrões que, por assim dizer, lhe sirvam de veículo; e no vácuo não existe, em princípio, a possibilidade de se encontrar estas partículas. No caso dos disjuntores a vácuo, os iões positivos e electrões são fornecidos pela nuvem de partículas metálicas provenientes da evaporação dos contactos formando o substrato para o arco voltaico, figura nº 3.5.

Após a interrupção de corrente, estas partículas depositam-se rapidamente na superfície dos contactos recuperando, assim, a rigidez dieléctrica entre os mesmos. Esta recuperação da rigidez dieléctrica é muito rápida nos disjuntores a vácuo, o que permite altas capacidades de ruptura em câmaras relativamente pequenas (alguns centímetros). O arco voltaico no vácuo pode ser de dois tipos: difuso ou contraído.

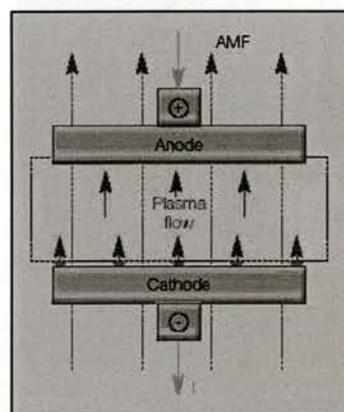


Figura nº3.5 – Fluxo do plasma entre os dois contactos do disjuntor a vácuo[2]

##### 3.3.1.1 O arco difuso

Quando se interrompem pequenas correntes, até aproximadamente 10kA, tem-se a formação do arco difuso, ou seja um arco distribuído por toda a superfície dos contactos.

### 3.3.1.2 O arco contraído

A partir de um certo valor de corrente (aproximadamente 10kA) o arco voltaico contrai-se, tornando-se possível localizar um foco de emissão iónica sobre os contactos de alguns milímetros de diâmetro. A transição do arco difuso para o arco contraído é provocada pelo aumento do campo magnético dos vários arcos paralelos com o aumento de corrente, cujas forças de atracção começam a superar as forças termodinâmicas do plasma que sustentavam estes arcos. Com isto, os focos de emissão iónica vão-se deslocando e juntam-se, formando um foco único, contraíndo o arco.

### 3.3.2 Características/Aplicações do Disjuntor a vácuo

- Grande segurança de operação, pois não necessitam de suprimento de gases ou líquidos e não emitem chamas ou gases;
- Praticamente não requerem manutenção, possuindo uma vida extremamente longa em termos de números de operações a plena carga e em curto – circuito;
- A relação capacidade de ruptura/volume é bastante grande, tornando estes disjuntores bem apropriados para o uso em células;
- Devido à ausência de meio extintor gasoso ou líquido, podem fazer religamentos automáticos múltiplos

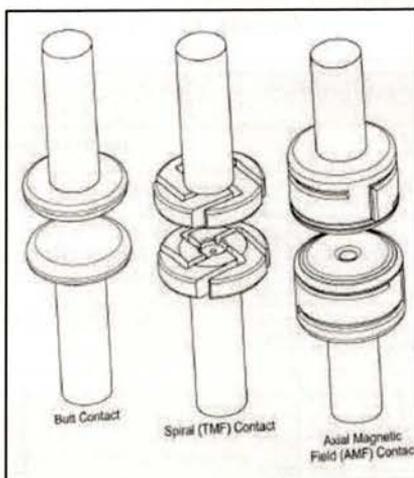
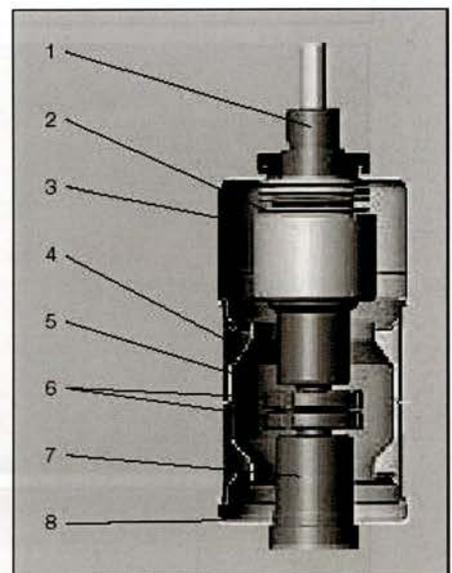


Figura nº3.7 – Diferentes contactos do disjuntor de vácuo[3]



1. Terminal
2. Metal
3. Tampa superior
4. Isolador cerâmico
5. Escudo
6. Contacto
7. Haste
8. Tampa inferior

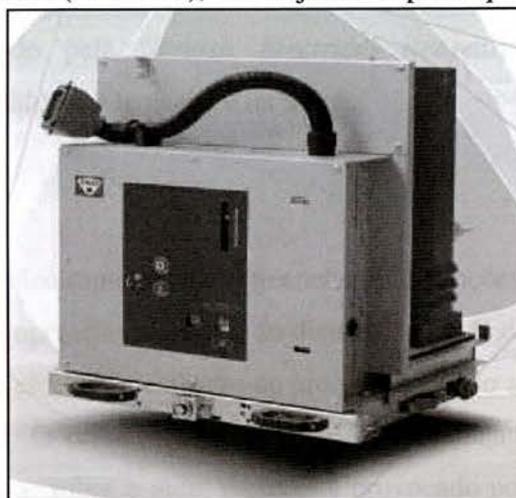
Figura nº3.6 – Componentes e respectiva legenda de um disjuntor de Vácuo[2]

A figura nº 3.6 mostra uma câmara de interrupção de um disjuntor de vácuo e a figura nº 3.7 os diferentes tipos de contacto existentes.

Na figura nº 3.8 está representado o Divac (EFACEC), um disjuntor tripolar que utiliza tecnologia de corte no vácuo. Na figura nº 3.9 podemos observar o mesmo disjuntor com uma disposição longitudinal, e as respectivas características eléctricas na tabela nº 3.1 .

**Características do Divac:**

- Seguro e fiável;
- Design compacto;
- Ideal para todas as aplicações em Média Tensão;
- Excelentes propriedades dieléctricas e de extinção do arco eléctrico;
- Fácil instalação;
- Facilidade de manobra;
- Vida eléctrica e mecânica acrescidas;
- Sem manutenção;
- Diversos equipamentos opcionais disponíveis;



**Figura nº 3.8 – Disjuntor Divac (EFACEC) de 24 kV [4]**



**Figura nº 3.9 – Disjuntor Longitudinal Divac (EFACEC) de 24kV[4]**

**Características eléctricas dos disjuntores Diflue (EFACEC)**

<b>Tensão nominal</b>		kV	12	17.5	24
<b>Nível de isolamento</b>	<b>Ao choque</b>	kV pico	28	38	50
	<b>À frequência industrial</b>	kV eficaz r.m.s.	75	95	125
<b>Corrente nominal</b>		A	630 até 1250	630 até 1250	630 até 1250
<b>Poder de corte</b>		kA	16 até 25	16 até 25	16 até 25
<b>Poder de fecho (pico)</b>		kA pico	2.5 vezes o poder de corte para toda a gama		
<b>Corrente de curta duração admissível</b>			Igual a corrente de corte durante 1 ou 3 segundos		

**Tabela nº 3.1 - Características eléctricas do Disjuntor Divac (EFACEC) longitudinal.[4]**

### 3.4 Disjuntores de ar comprimido

Os disjuntores de ar comprimido apareceram em 1926, foram uma das invenções de Whitney e Wedmore. Foi desenvolvido pela “*British Electrical Research Association*” e o primeiro protótipo foi produzido na Alemanha e na Suíça.

#### 3.4.1 Princípios de extinção do arco

Neste tipo de disjuntor, o mecanismo electropneumático preenche duas funções, simultaneamente; ou seja, a de proporcionar a operação mecânica do disjuntor através da abertura e fecho dos contactos e também a de efectuar a extinção do arco, fornecendo ar na quantidade e pressão necessárias para tal. O princípio da extinção é, basicamente simples, consistindo em criar-se um fluxo de ar sobre o arco, fluxo este provocado por um diferencial de pressão, quase sempre descarregando-se o ar comprimido após a extinção para a atmosfera.

A figura nº 3.10 ilustra a Unidade interruptora de um disjuntor a ar comprimido.

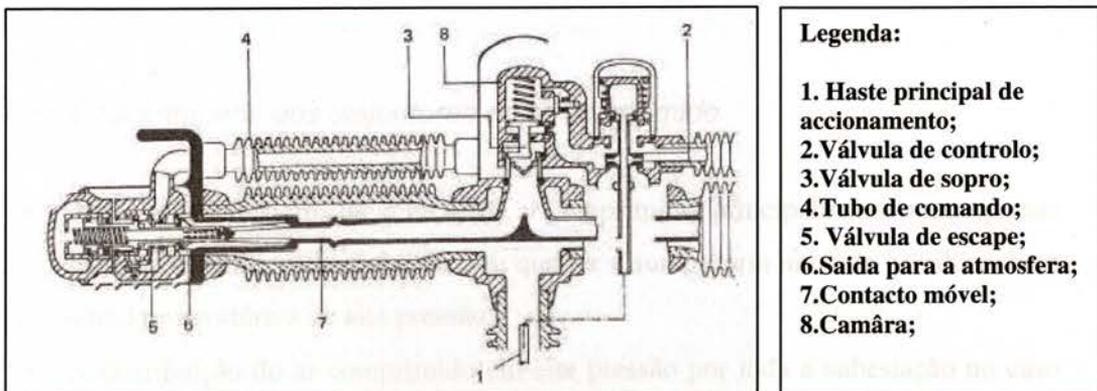


Figura nº3.10 – Vista interior de um Disjuntor de ar comprimido e respectiva Legenda [1]

#### 3.4.2 Características/Aplicações dos disjuntores de ar comprimido

- Embora possam ser usados em toda a gama de tensões, os disjuntores de ar comprimido encontram a sua gama de aplicação na alta e na muito alta tensão, ou seja, acima de 245kV.



- As suas características de rapidez de operação (abertura e fecho) aliadas às boas propriedades extintoras e isolantes do ar comprimido, bem como a segurança de um meio extintor não inflamável, quando comparado com o óleo, garantem uma posição de destaque a estes disjuntores nos níveis extremos de tensão.

#### 3.4.3 *Vantagens dos disjuntores de ar comprimido*

- Disponibilidade total do meio extintor;
- A alta disponibilidade do meio extintor permite que ele seja canalizado para accionar contactos principais, à abertura e ao fecho, com mecanismos relativamente leves, o que torna estes disjuntores bastante rápidos e, portanto, aptos a actuar em muito alta tensão;
- Pode-se ajustar a capacidade de interrupção, variando-se a pressão de operação;
- A compressibilidade do meio extintor que, ao contrário do óleo, permite que as estruturas estejam isentas das ondas de choque transitórias, geradas pelo arco voltaico;

#### 3.4.4 *Desvantagens dos disjuntores de ar comprimido*

- Alto custo do sistema de geração de ar comprimido, principalmente em pequenas instalações onde cada disjuntor tem que ter a sua própria unidade geradora, bem como reservatórios de alta pressão;
- A distribuição do ar comprimido em alta pressão por toda a subestação no caso de unidades centrais de geração, além de ter um alto custo, requer uma constante manutenção;
- No caso de operação junto a áreas residenciais onde existem limitações de nível e ruído, é obrigatório o uso de silenciadores para estes disjuntores;

### 3.5 Disjuntores de SF6

Nos disjuntores de SF6, o arco eléctrico que se forma durante o movimento de abertura é extinto através de uma sopragem de gás. Na última geração destes disjuntores, a pressão necessária para extinção é gerada numa câmara de pressão pela própria energia do arco eléctrico.

#### 3.5.1 Propriedades do SF6

Este gás possui uma série de propriedades físicas e químicas que o torna um meio isolante e extintor, por excelência. O SF6 é um gás incombustível, não venenoso, incolor, inodoro. Devido à sua estrutura molecular simétrica é extremamente estável e inerte até cerca de 5000°C, comportando-se, portanto, como um gás nobre. O SF6 encontra-se num sistema fechado e praticamente isento de humidade por toda a vida útil do equipamento. Além disso existe a presença de filtros com elementos desumidificadores para qualquer eventualidade, de maneira que, o problema da humidade e das suas consequências seja praticamente inexistente.

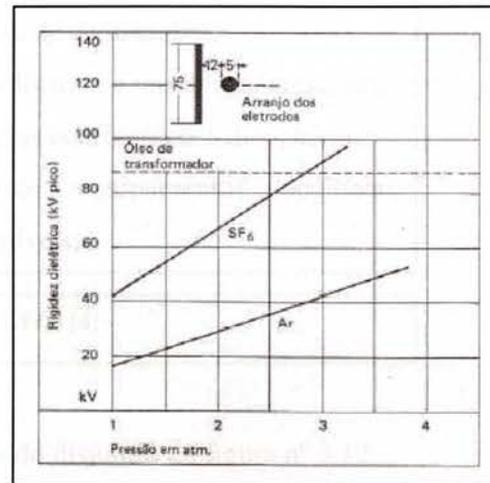


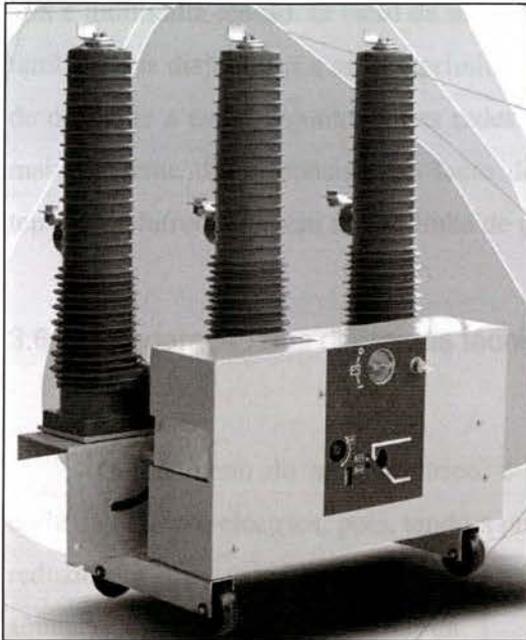
Figura nº3.11 – Comparação entre a rigidez dielétrica do ar e do SF6 [1]

Com um peso específico de 6,14g/l é 5 vezes mais pesado que o ar. As características isolantes do SF6 variam em função da pressão (na realidade em função da densidade) e são bastante superior às dos meios isolantes mais comuns usados em disjuntores que são o óleo mineral e o ar comprimido. A figura 3.11 mostra uma comparação de rigidez dielétrica entre esses meios isolantes.

Os disjuntores em SF6 dividem-se em:

- Disjuntores a SF6 de dupla pressão;
- Disjuntores a SF6 de pressão única;
- Disjuntores a SF6 de dois ciclos;

Na figura nº 3.12 está representado um disjuntor de SF6 *DILUE* (EFACEC), é um disjuntor tripolar que utiliza o princípio autopneumático de duplo corte em SF6.



**Características:**

- Seguro e fiável;
- Ideal para todas as aplicações em Média Tensão;
- Excelentes propriedades dieléctricas e de extinção do arco eléctrico;
- Fácil instalação;
- Facilidade de manobra;
- Vida eléctrica e mecânica acrescidas;
- Diversas configurações disponíveis;
- Diversos equipamentos opcionais disponíveis;

Figura nº 3.12 - Disjuntor Dilue de SF6 para 36KV (EFACEC) [4]

Na tabela nº 3.2 estão apresentadas as características do disjuntor da figura nº 3.12.

<i>Características eléctricas dos disjuntores DIFLUE (EFACEC)</i>						
<b>Tensão nominal</b>		kV	12	17.5	24	36
<b>Nível de isolamento</b>	<b>Ao choque</b>	kV	75	95	125	170
	<b>À frequência industrial</b>	kV	28	38	50	70
<b>Corrente nominal</b>		A	630 até 2500	630 até 2500	630 até 2500	630 até 2500
<b>Poder de corte</b>		kA	16 até 25	16 até 25	16 até 25	16 até 25
<b>Poder de fecho (pico)</b>		kA	2.5 vezes o poder de corte para toda a gama			
<b>Corrente de curta duração admissível</b>			Igual a corrente de corte durante 1 ou 3 segundos			

Tabela nº 3.2 - Características eléctricas do Disjuntor Dilue (EFACEC) [4]

### 3.5.2 Características/Aplicações dos disjuntores a SF6

Os disjuntores a SF6 representam, sem dúvida, a tendência actual nas áreas de alta e muito alta tensão. O facto da técnica de ar comprimido ser bem anterior ao SF6, e também dos disjuntores a ar comprimido serem, por natureza rápidos, deu uma posição de destaque a estes disjuntores nas redes de muito alta tensão (MAT). A comprovação mais evidente disso, consiste no facto de todos os fabricantes de disjuntores de alta tensão, incluírem também na sua linha de produtos os disjuntores a SF6.

### 3.6 Comparação das diferentes técnicas de corte em disjuntores

O fenómeno do arco eléctrico, é em todas as tecnologias, o responsável pelo corte da corrente eléctrica, pois, tendo a propriedade de passar de um valor de resistência reduzido a um valor considerável aquando da passagem do valor da corrente eléctrica por zero, é este que efectua o corte.

Sendo este um fenómeno físico que não tem um modelo matemático exacto, não existe uma solução óptima que abranja todas as aplicações possíveis. Logo, de todas as técnicas de corte, não existe nenhuma que seja capaz de superar as outras em todos os seus aspectos.

A tecnologia de corte moderna é o vácuo, pois tem vindo a evoluir ao longo dos tempos em dois sentidos. Para além de ter um poder de corte cada vez maior, podendo chegar aos 40kA, o tamanho dos aparelhos têm vindo a decrescer

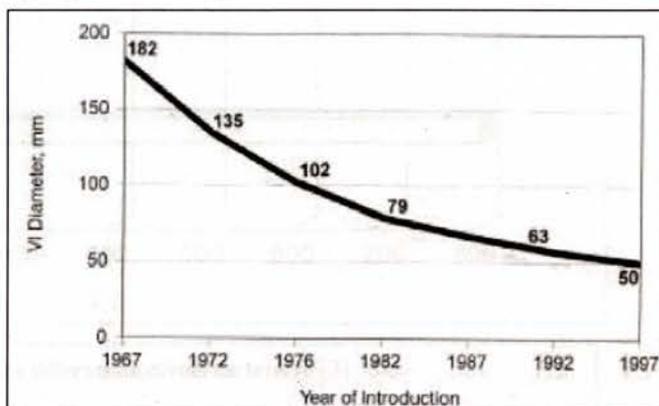


Figura nº3.13 – Redução do tamanho de 1 disjuntor de vácuo de 15KV e 12 KA [3]

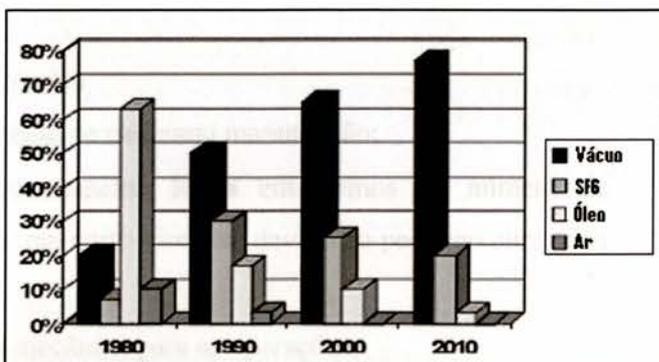


Figura nº3.14 – Evolução das diferentes tecnologias ao longo dos tempos [3]

substancialmente, figura nº 3.13, fazendo com que o vácuo seja hoje em dia a técnica de corte mais utilizada, figura nº 3.14.

Para a média tensão (até 72,5kV), as tecnologias de corte em SF6 e em vácuo são de certa forma equivalentes. Na alta tensão, o SF6 é preferencialmente utilizado uma vez que existem limitações do corte da corrente no vácuo para valores mais elevados de tensões, figura nº 3.15, isto porque a rigidez dielétrica do vácuo não aumenta com a distância entre os contactos a partir de valores de tensão de 200kV. Podem, no entanto, ser usados disjuntores de vácuo em série, o que permite usar esta tecnologia para valores mais elevados de tensão.

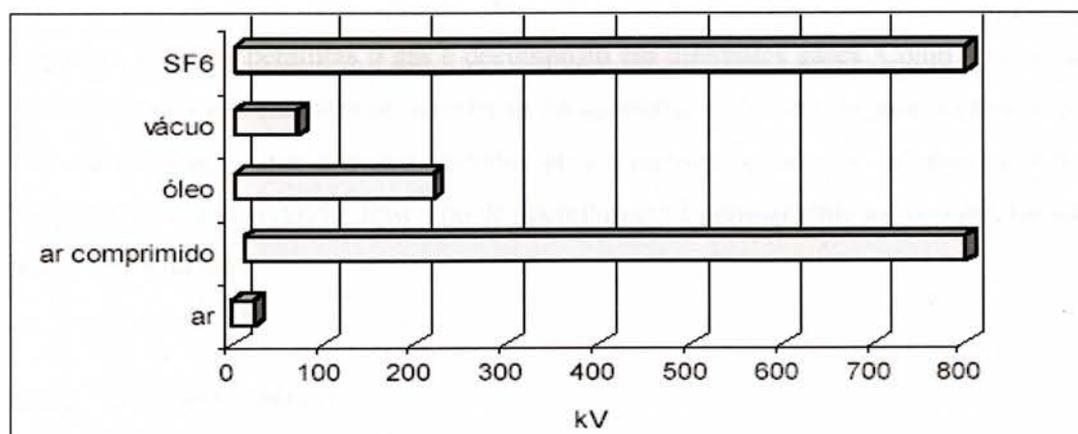


Figura nº3.15 –Tecnologias a aplicar para os diferentes níveis de tensão [3]

Apesar de na média tensão poderem ser utilizadas as duas tecnologias, o vácuo apresenta certas vantagens face ao SF6. Como vantagens dos disjuntores de vácuo, é de referir:

- Grande segurança de operação;
- Não necessitam praticamente de nenhuma manutenção;
- Possuem uma vida extremamente longa em termos de número de operações a plena carga e em curto-circuito, devido ao pequeno curso dos contactos;
- Requerem pouca energia mecânica para as operações;
- Accionamentos mais leves, duráveis e silenciosos;
- Relação tensão de ruptura/volume bastante grande;



- Podem fazer religamentos automáticos, devido a não possuírem meio extintor gasoso;
- Apresentam uma performance superior e em termos ambientais é mais seguro;

Estas tecnologias, que evoluíram desde os anos 60, dominam actualmente o mercado dos disjuntores, tendo ultrapassado as tecnologias de corte ao ar e corte em óleo.

### 3.6.1 O corte em SF<sub>6</sub>

Quanto à segurança, o SF<sub>6</sub> não é directamente perigoso, mas é um gás que tem influência no efeito de estufa quando libertado na atmosfera, não é inflamável e quando exposto a altas temperaturas o gás é decomposto em diferentes gases. Como no caso da aparelhagem, o gás encontra-se no interior da aparelhagem só saindo para o exterior em caso de acidente, o que é pouco provável pois a pressão no interior da aparelhagem é muito baixa. A manutenção deste tipo de aparelhagem é praticamente inexistente durante toda a sua vida útil.

### 3.6.2 O corte no vácuo

Na prática não é possível realizar o vácuo perfeito, por exemplo devido aos materiais usados nos contactos, que poderão não ser totalmente desoxidados. Conseguem-se no entanto valores de rigidez dieléctrica bastante bons. Por exemplo, um centímetro no vácuo, mesmo não sendo perfeito, é capaz de suportar uma tensão de pico com valores acima de 150kV. Apesar da elevada rigidez dieléctrica, a partir de 200kV não cresce com a distância entre eléctrodos, limitando os valores de tensão à qual esta técnica pode ser aplicada.

O mecanismo de manobra dos disjuntores de vácuo exige que as acções de abertura e fecho dos contactos sejam simples, sendo para isso necessário ter em conta vários factores no projecto desse mesmo mecanismo de forma a serem atingidas elevadas performances.



As acções de abertura e fecho devem ser de tal forma independentes de modo a não interferirem uma com a outra. No caso do disjuntor ser chamado a operar, deve ser capaz de abrir os contactos e eliminar a avaria, dado que os disjuntores estão a maior parte do tempo no estado de fechado a conduzir corrente, este requisito é de extrema importância.

Ao contrário de outras tecnologias de corte, o corte no vácuo tem a particularidade de necessitar de contactos que apenas permitam o contacto superficial, evitando assim, aquando da passagem de grandes correntes a soldadura dos contactos, o que poderia impossibilitar a abertura do circuito.

### 3.7 Limitações Globais da tecnologia actual

Se a tecnologia actual é uma boa tecnologia e lida com os curto-circuitos de modo seguro, porque se continua à procura de novas soluções? Porque mudar?

A procura de novas soluções, de novas tecnologias de corte e limitação de correntes, é essencial para a evolução nos disjuntores. Entre outras são apresentados alguns tópicos sobre as soluções procuradas para substituir a tecnologia actual.

- É procurada uma tecnologia sem manutenção e com custos de exploração mais baixos;
- Tecnologia mais Barata, mais Fiável e mais Robusta;
- Ausência de partes moveis, e ausência de drives mecânicas complexas para efectuar o controlo da abertura;
- Extinção em qualquer ponto da corrente e não apenas na sua passagem por zero;
- Extinção independente do meio onde se dá o arco

### 3.8 Conclusões

Os disjuntores sofreram uma evolução ao longo do tempo, figura nº3.16, são agora aparelhos mais pequenos, mais fiáveis e mais robustos. O aperfeiçoamento das características dos disjuntores conduziu a um aumento da sua complexidade e dos sistemas auxiliares. Tornou-se assim mais complicado estudar o seu funcionamento e os efeitos associados ao arco e à sua interrupção.

A evolução natural dos disjuntores, vai provocar o aparecimento de um novo disjuntor que elimine as limitações actuais dos disjuntores e a sua complexidade. Este disjuntor será o disjuntor de estado sólido, o *Solid State Switch*.

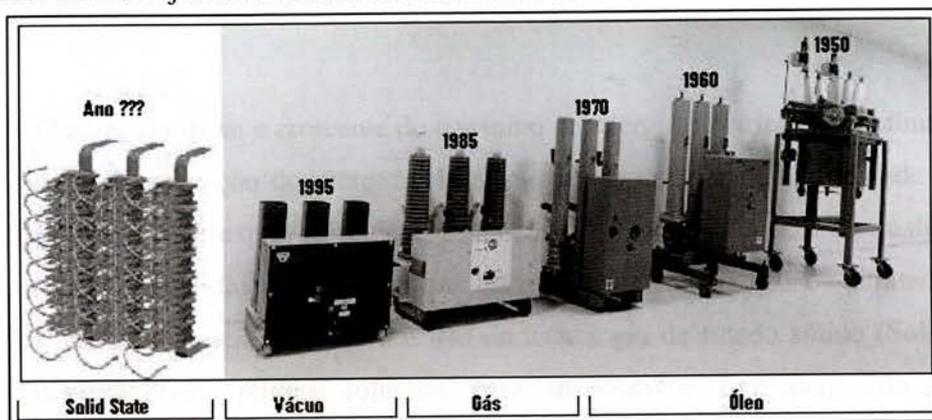


Figura nº3.16 –Evolução dos Disjuntores da média tensão ao longo do tempo [4]

### 3.9 Bibliografia

- [1] R. Colombo, “Disjuntores de alta tensão”, Nobel, 1ª Edição 1988;
- [2] Ingmar Kleberg, Wenkai Shang, “Understanding arcing, Simulation of High-current vacuum arcs”, ABB Review Janeiro 2004;
- [3] Dr. Paul G. Slade, D R. Kirland Smith, “The application of the Cutler-Hammer vacuum interruptor to switch, control and protect the world’s distribution circuits”, Cutler-Hammer, EATON 1999;
- [4] <http://www.amt.efacec.pt/pt/index.htm> (Visitado em 2006);



## 4 Nova Tecnologia Emergente – Interruptores estáticos

### 4.1 Introdução

O aumento firme e crescente do consumo de energia eléctrica e a continuação do processo de liberalização do mercado da electricidade aumenta a necessidade de uma redução de custos de exploração, de um aumento de funcionalidade e da qualidade da energia. Uma possibilidade para realizar estas exigências é o uso de limitadores de defeitos provocados pela corrente e o uso da tecnologia de estado sólido (**Solid State Switching**). Embora muitas soluções para dispositivos limitadores de defeitos provocados pela corrente para níveis de média e alta tensão terem sido apresentados em diversas literaturas, a utilização destes limitadores é restringida a instalações particulares devido a não praticabilidade económica. No caso da tecnologia de estado sólido, esta tem sofrido nos últimos anos avanços tecnológicos significativos, e possui potencial para se tornar a tecnologia dominante em aplicações em todos os sistemas eléctricos de energia.

Os disjuntores usados actualmente na Média Tensão são essencialmente electromecânicos. Apesar das suas limitações, permitem um controlo seguro sobre os curto-circuitos, e usando temporização podem ser coordenados de modo a se obter um nível de protecção adequado, mas originando por vezes, cavas de tensão, harmónicos, etc.), o que se revela de enorme importância quando se encontram cargas sensíveis na rede.

Um disjuntor que usa SEMICONDUTORES é capaz de uma comutação suficientemente rápida, de modo a manter a Tensão dentro de Limites aceitáveis. A tecnologia *Solid State* oferece significativas vantagens quando comparada com as soluções actuais dos sistemas de energia de Media Tensão. Para tal é fundamental a optimização das topologias dos disjuntores electrónicos.

### 4.2 Características Gerais da Tecnologia Solid State

Neste trabalho vai se analisar e comparar diferentes semicondutores, e a sua aplicabilidade em variadas tecnologias. Tendo em consideração a tecnologia actual, o



estudo destas tecnologias emergentes, será efectuado comparado aspectos técnicos e económicos.

A eliminação de defeitos é actualmente baseada num sistema de protecção de máximo de intensidade, o que tipicamente consiste em relés de máximo intensidade e disjuntores, podendo incluir reengate.

Desde a invenção do transistor, que se tem procurado desenvolver o **Solid State Power Switch** “ideal”, um aparelho rápido com perdas baixas, com valores nominais altos para a tensão e corrente.

#### 4.2.1 Características

É necessário ter a consciência que apesar das potencialidades da tecnologia, apresenta características únicas de funcionamento, que têm elevado impacto no projecto de um disjuntor totalmente *Solid State* para aplicação na média tensão. Algumas características gerais de elevada importância para o dimensionamento e funcionamento desta tecnologia são apresentadas nos seguintes tópicos:

- Funcionamento em corrente contínua ou em corrente alternada;
- Tempo relativamente curto de suporte da corrente de curto-circuito;
- Corrente máxima admissível para realizar o *Turn off*;
- Tensões máximas de bloqueio;
- Valores para a dissipação de potência, em que entram as seguintes perdas:
  - Perdas de bloqueio (situação de aberto);
  - Perdas durante a comutação para off;
  - Perdas durante a comutação para on;

#### 4.2.2 Vantagens

Como já foi referido, esta nova tecnologia emergente traz com ela enormes vantagens, e potencialidades associadas à sua utilização num disjuntor *Solid State*. Entre outros são referidos alguns destes possíveis benefícios:

- Alta fiabilidade;



- Ausência de partes moveis;
- Desenho único;
- Redução de massas nas aplicações derivadas deste tipo de aparelhos;
- Poder de dissipação em condução mais elevado do que os disjuntores de vácuo;
- Possibilidade de melhorar a qualidade da energia;
- Possibilidade dos disjuntores electrónicos poderem ser usados em qualquer posição de montagem;
- Não possuírem qualquer restrição a nível ambiental;

#### 4.2.3 Problemas

È importante ter em atenção as limitações desta nova tecnologia. Possui características de operação únicas, e não podem substituir directamente os contactos eléctricos nas câmaras de arco que têm sido usadas para a protecção de circuitos na distribuição até hoje.

No caso do uso de disjuntores *Solid State*, fornecem uma excelente resposta em termos de velocidade de actuação, mas a sua aplicação na média tensão tem sido considerada impraticável, devido à necessidade do uso de demasiadas unidades *Solid State* em série.

Alguns dos problemas gerais da tecnologia *Solid State* são:

- Limitações com as propriedades fundamentais dos materiais;
- Dificuldades no preenchimento das lacunas e transporte de electrões;
- Problemas com a mobilidade de transporte;
- A capacidade de reter altas tensões faz com que diminua a capacidade de lidar com densidades de corrente elevadas;
- Problemas nas conexões Série/Paralelo, o que pode diminuir a fiabilidade;
- Estabilidade de *Cosmic-Ray*, ou seja a base n- dos semicondutores tem de possuir uma determinada espessura mínima, de modo a assegurar a estabilidade dos mesmos;
- Os requerimentos da corrente para o *turn-on* e *turn-off* das drives actuais, devido ao seu valor, as perdas não só são importantes em relação as perdas totais, mas



também para o custo dos circuitos da drive e fonte de alimentação, que atingem valores iguais ao custo do próprio aparelho.

Para se compreender melhor todos os conceitos, e problemas relacionados com os diferentes semicondutores, será realizado no ponto seguinte uma breve descrição da tecnologia base dos semicondutores e uma pequena abordagem dos vários semicondutores existentes na actualidade.

#### 4.2.4 Semicondutores

Os Semicondutores são cristalinos sólidos com uma condutividade eléctrica variável, condução ou isolante. Os elementos semicondutores podem ser tratados quimicamente para se transmitir e controlar uma corrente eléctrica.

O seu emprego é importante na fabricação de componentes electrónicos tais como diodos, transístores e outros de diversos graus de complexidade tecnológica, microprocessadores e nano circuitos usados em nano tecnologia. Portanto actualmente o elemento semiconductor é primordial na indústria electrónica e na confecção dos seus componentes.

Os diferentes tipos de semicondutores assentam sobre três grupos básicos:

- Grupo I. **Diodos** os quais conduzem ou bloqueiam de acordo com as condições dos circuitos
- Grupo II. **Thyristors** (Thyristors bi-direccionais, Triacs, Thyristors de comutação rápida, etc.) os quais conduzem quando é dado um sinal de disparo (trigger), mas bloqueiam de acordo com as condições dos circuitos
- Grupo III. **Turn-Off Devices** (TODs: Darlingtons, MOSFETS, IGBTs, GTOs, IGCTs) os quais podem ser ligados ou desligados quando se deseja.

Em princípio, os dispositivos do grupo III preenchem todas as funções dos pertencentes ao grupo I e II e podem substitui-los, sendo mais eficientes mas com custos adicionais associados.



Os *High Power Thyristors* são actualmente usados predominantemente em aplicações para comutação de linhas, mas a sua incapacidade de desligar antes da comutação natural da linha, resulta em distorções harmónicas, fraca controlabilidade e fraco factor de potência.

A tabela nº3.1 apresenta um pequeno resumo do ponto actual dos semicondutores:

<b>Parâmetros críticos da Tecnologia</b>	Taxa máxima de crescimento da corrente (di/dt) Tensão máxima admissível Corrente em uma <i>Wafer</i> Área de uma <i>Waffer</i> Corrente do Modulo Multi-chip @Comutação a 13KHz	> 5,000 A/ns > 3,500 V > 1,000 A > 70 mm > 150 A
<b>Materiais Críticos</b>	Alta pureza da zona de condução do Silício; Tecnologia Thin-Pak e Press-Pack ; Inter-conexões flexíveis.	
<b>Testes, produção e inspecção do equipamento</b>	Tecnologia Surface-mount ; Processos de electro-deposição; Empacotamento Press-Pack ; Wire-Bonds; Alto Volume de produção de substratos;	
<b>Maiores aplicações comerciais</b>	Aparelhos de qualidade de Potência, Sistemas de Transmissão Flexíveis AC (FACTS); Propulsão comercial para a marinha; Armazenamento de energia em baterias; UPSs; Carros Híbridos; Conversores para células de combustível; Geração de energia eólica; Drives para tracção de comboios; Drives industriais para a manufacturação e automação; Disjuntores estáticos; Fontes de energia para radares; Amplificadores;	
<b>Assuntos de aplicação/exportação comercial</b>	Aplicações comerciais são essenciais para suportar uma produção em série, para se obter menores custos de produção.	

Tabela nº 3.1 – Resumo sobre os semicondutores e a sua tecnologia crítica [1]

#### 4.2.5 Aparelhos de Comutação de Potência

Os semicondutores de potência consistem numa variedade de díodos, transístores, e Thyristors. Os díodos são uma família de aparelhos de duas *Layers*, os Transístores são uma família de aparelhos de três *Layers*, e os Thyristors são uma família de aparelhos de 4 *Layers*.

##### 4.2.5.1 Diodos de Potência

Os Diodos de Potência simplesmente conduzem numa direcção e bloqueiam na outra. Rectificadores baseados em díodos são usados normalmente em conversores AC/DC. Nos VSC, voltage-sourced-converters, os díodos são necessários para a



condução *reverse*. Após uma condução *forward*, a aplicação inicial da tensão *reverse* resulta no aparecimento de uma corrente *reverse* de curta duração. Nos VSC este diodo é importante devido ao seu alto impacto na capacidade de corrente *Turn on* e nas perdas dos principais componentes. Melhoramentos na tecnologia dos diodos poderão ter um impacto significativo no custo dos conversores. Desenvolvimentos futuros irão impor o uso de diodos SiC com uma corrente *reverse/recovery* insignificante - mesmo com custos significativos mais altos destes diodos.

#### 4.2.5.2 Transístor (IGBT)

Um transístor conduz na direcção *forward* com um sinal na gate e desliga quando o sinal da gate é removido. Os Transístores têm um *turn-on* controlado, quando o sinal é menor do que o necessário para o *turn-on* completo, conduzirá enquanto existir uma tensão parcial ânodo-cátodo. Esta característica de limitador de corrente é importante para os transístores na aquisição de tempo de alguns microsegundos suficiente para propósitos de protecção e selectividade.

Outro tipo de transístor conhecido como IGBT substituiu o GTO numa gama significativa de aplicações na baixa e média tensão para vários Megawatts e mesmo competindo para algumas centenas de Megawatts. Os IGBTs são aparelhos altamente integrados, possuem uma porta MOS que é integrada com o cátodo numa geometria precisa de alguns micros. Esta integração de uma porta MOS resulta num requerimento de um sinal na gate de alguns volts para *turn-on* e *turn-off*.

Deste modo, apresenta uma capacidade de comutação rápida e um aumento da corrente como tempo controlado durante o *turn on*. Estas são as maiores vantagens para conversores de tamanho pequeno/médio e mesmo conversores de alta potência.

Os IGBTs devido a sua estrutura altamente integrada, são construídos em tamanhos pequenos (1 a 2 cm<sup>2</sup>) em *Wafers* largas. Como abordagem preferida para conversores de potência até alguns Megawatts, os IGBTs e díodos de potência são empacotados num módulo. Esta tecnologia de módulo, tipicamente permite apenas um dos lados ser arrefecido, o que limita a transferência de calor. Para potências acima de alguns Megawatts, a tecnologia *press pack* (capítulo 5), mais dispendiosa, é preferida para excluir falhas de circuito aberto e permitir conexões em série com conceitos de redundância.



A tecnologia IGBT é claramente preferida para aplicações na baixa tensão (até 800V). Para níveis de tensão mais elevados, a tecnologia IGBT possui perdas elevadas de condução no estado em condução (*on state*) quando comparada com os Thyristors (GTOs), geralmente necessita de conexões em série de IGBTs para se obter tensões de funcionamento elevadas, mas resultam perdas maiores.

#### 4.2.5.3 Thyristors

Com um impulso *turn on* na gate, o thyristor entra em condução total com uma queda de tensão baixa na sua direcção *forward* e não desligará com a remoção do impulso na gate. O *turn off* requer um impulso negativo na gate. Os Thyristors convencionais, usados em *line-commutated converters* e *cyclo-converters*, são desenhados sem a sua própria capacidade de *turn-off*. Neste caso, o thyristor recupera do seu estado de condução total para um estado de não condução apenas quando a corrente é trazida para zero por outros meios. Esta aproximação leva a uma alta eficiência, a um aparelho com valores nominais mais elevados. Estes conversores têm contudo um factor de potência lento, harmónicos altos e uma *drive* não adequada para propulsão durante um binário baixo.

Existem várias versões de Thyristors com capacidade de *turn-off*, alguns dos quais são relevantes para aplicações em alta potência.

#### 4.2.5.4 GTO Thyristor

Como um thyristor convencional o GTO *turn-on* num modo de condução total com uma queda de tensão baixa e com um impulso *turn-on*, e desliga quando um impulso *turn off* é aplicado na gate na direcção reverse. O GTO tem sido usado extensamente para muitas aplicações de potência elevada. Devido às suas drives da gate volumosas, altas perdas de comutação, e *snubbers* dispendiosos, têm sido usado para conversores não *PWM*. Contudo, no futuro, poderá ser substituído por IGBTs ou aparelhos GTO mais avançados.

#### 4.2.5.5 Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT)

IGCT é basicamente um GTO com um difícil *turn off*. Este difícil *turn off* é conseguido através da minimização da indutância entre a gate e o cátodo, o qual, em combinação com outros avanços no empacotamento e no circuito drive gate, efectua um rápido *turn-off* e tem baixas perdas de comutação de *turn off* quando comparado com o GTO.

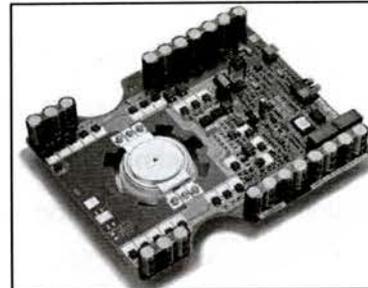


Figura nº 3.1 –Exemplo de um IGCT de Potência (cortesia da ABB)

Estes aparelhos têm sido introduzidos comercialmente e tem o potencial para drives de propulsão e outras grandes aplicações em conversores *PWM*.

O IGCT é um exemplo do caminho da integração de um circuito *gate drive* com o próprio aparelho. A partir desta altura, a sua performance é bastante superior quando comparada com o GTO. Com a vantagem de baixas perdas em condução e ausência de *snubber*, o IGCT tem-se tornado actualmente um digno competidor para o IGBT para aplicações superiores a 10MW. Contudo, IGCT contem um alto requerimento de energia na gate e é apropriado para aplicações com *PWM* até 2 KHz.

#### 4.2.5.6 Advanced Turn-Off Thyristors

Um **MOS Turn-off Thyristor (MTO)** usa transístores para fazer o *bypass gate-catodo* para ajudar no *turn-off*. Quando comparado com IGCT, contem uma *gate drive* mais pequena, poucas perdas na *gate drive* e realiza um rápido *turn off* com baixas perdas (perdas *turn off*). O MTO é um exemplo da futura integração da *gate drive* com o aparelho. Embora o MTO não tenha sido introduzido comercialmente, tem o potencial para uso em aplicações na média e alta potência.

O **Emitter Turn-Off Thyristor (ETO)** é outra variação do GTO. Incorpora um transístor de baixa tensão (um MOSFET) em série com GTO de alta tensão para fazer o *bypass gate-catodo*. Este aparelho também possui um rápido *turn off* e baixas perdas de comutação *turn off*. Este aparelho está numa etapa de investigação e ainda não foi introduzido no mercado.



O **Super GTO (SGTO)** é outro aparelho GTO. Similar ao IGBT, tem uma estrutura altamente integrada *gate-cathode* e como o IGBT, é construído em tamanhos pequenos (1 to 2 cm<sup>2</sup>) em *Wafers* largas. Para alta potência, vários SGTOs são ligados num pacote de Si. Têm perdas de condução forward baixas e características de comutação rápidas. Estes aparelhos têm sido introduzidos comercialmente na baixa tensão em *Transfer Switches* e tem o potencial para valores nominais de alta potência no futuro.

Os **Solidtrons** são aparelhos *turn-on* controlados em tensão ou corrente baseados em MCTs e SGTOs. Solidtrons substituem tubos e *spark gaps* para aplicações de disparo e *pulsed applications*. Estes aparelhos têm características extremamente rápidas de *turn on*. A versão MCT está a substituir os tubos de vácuo e *spark gaps* para aplicações de disparo em munições inteligentes. A versão SGTO tem sido usada comercialmente em armas de pressão e outras aplicações de impulso.

#### 4.2.6 Descrição geral da tecnologia (BIPOLAR e BIMOS):

Basicamente apenas duas tecnologias estão disponíveis actualmente para os **Solid State Switches**, a tecnologia **BIPOLAR** e a **BIMOS**.

A escolha entre as duas tecnologias é um processo complicado, é necessário realizar distinções entre diferentes categorias de aplicações, tais como:

- Amplitude de frequências de funcionamento dos semicondutores;
- Corrente nominal a que vai ser sujeito o semiconductor;
- Desenho do disco e tamanho do disco;
- Situações em que é necessário realizar a comutação ON e OFF, e aquelas que apenas é necessário a (ON), existência ou não de capacidade de corte;
- Quantidade de repetição de impulsos para efectuar o controlo na gate;
- Tensão nominal a que vai ser sujeito o aparelho;

A tecnologia BIPOLAR foi a tecnologia precursora dos circuitos digitais, pode ser vantajosa em termos de velocidade face às tecnologias baseadas em transístores MOS. No entanto, é uma solução mais cara, mais complexa, pior em termos de consumo de potência e não permite a implementação de sistemas de larga escala devido à área que

uma porta lógica ocupa. As principais variantes actuais da tecnologia bipolar são as famílias TTL e ECL. A tecnologia BIMOS combina as vantagens dos circuitos bipolares e CMOS mas partilha também algumas das desvantagens da tecnologia bipolar, nomeadamente o custo e área e o seu campo de utilização é bastante limitado.

As limitações da Tecnologia BIPOLAR são essencialmente a amplitude de frequências, onde o IGBT tem a sua limitação dominante na capacidade de condução de corrente. A figura nº 3.2 mostra 3 tipos de *wafers* de IGBTs:

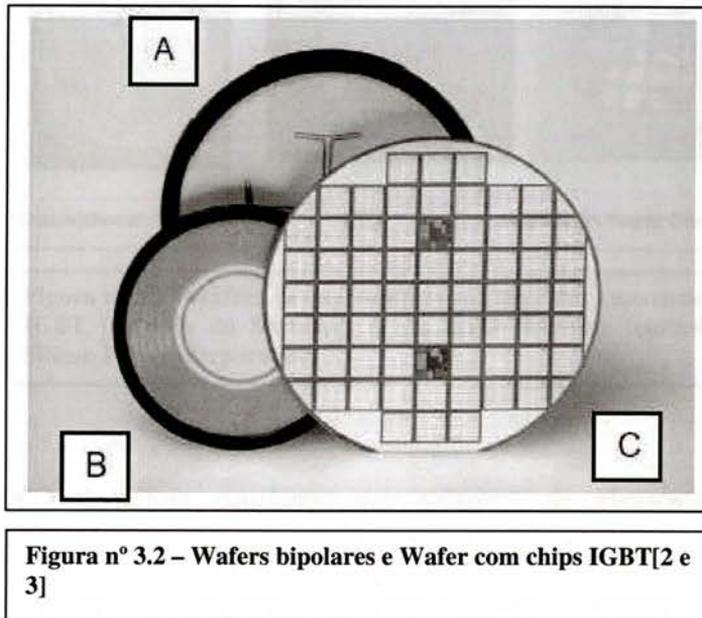


Figura nº 3.2 – Wafers bipolares e Wafer com chips IGBT[2 e 3]

**Thyristor (A):** è capaz de lidar com 8KV e vários KA, mas apresenta limitações ao nível da taxa de aumento da corrente com o tempo  $di/dt$  e com a capacidade de taxa de repetição[2 e 3].

**Disco Inter digitado (B):** Consegue lidar com 4KV e vários KA, e com alto  $di/dt$ , possui um diodo roda livre, mas possui uma taxa de repetição limitada, apenas de algumas centenas de Hzs[2 e 3].

**Pequenos Chips IGBT (C):** Operam a altas frequências e são capazes de ligar e desligar, mas possuem limitações ao nível da corrente e da tensão que suportam.

Vários destes chips são ligados em paralelo para atingir uma taxa de corrente suficiente para determinadas aplicações[2 e 3].

Para lidar com 2KV, basta apenas 1 LOPAK IGBT, para tensões mais elevadas é necessário conexões em série (módulos).

#### 4.2.7 Construção de Blocos

A figura nº 3.3 apresenta imagens de semicondutores de potência empilhados num pacote. O thyristor convencional é construído numa *Wafer* simples e larga, o GTO thyristor é também construído numa *Wafer* simples e larga mas com um número elevado de ilhas cátodo para permitir o *turn off*, o IGBT de potência é construído por vários IGBTs mais pequenos empilhados num pacote largo.

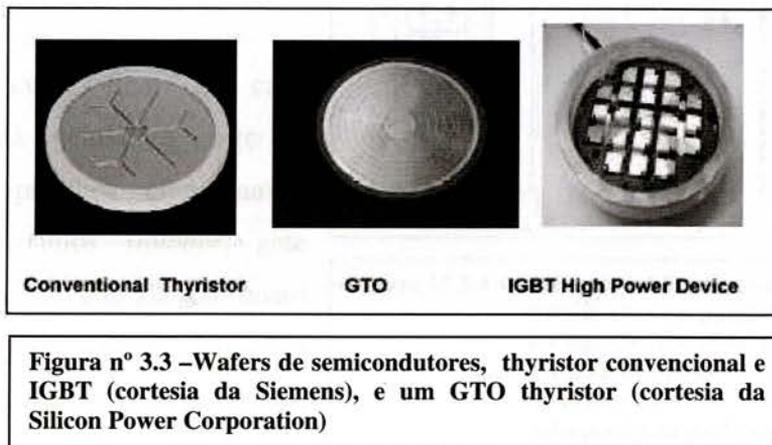
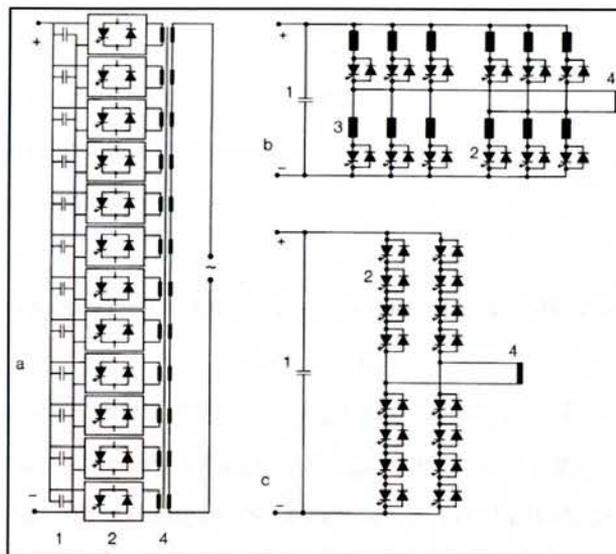


Figura nº 3.3 –Wafers de semicondutores, thyristor convencional e IGBT (cortesia da Siemens), e um GTO thyristor (cortesia da Silicon Power Corporation)

Os GTO thyristors consistem em milhares de elementos individuais de comutação fabricados numa *Wafer* de silício, As Perdas ocorrem nas quatro condições de operação (Condução, Bloqueio, Comutação para condução, Comutação para bloqueio). Na média tensão, os GTOs exibem perdas muitas baixas no estado on-state e perdas baixas de ressonância no estado off. Contudo, devido á comutação ser não homogénea, um circuito externo *snubber* é necessário para operação de comutação. Este circuito *snubber* constitui mais de metade do volume do equipamento final e acarreta com ele um aumento de complexidade, custos e perdas. Consequentemente, os IGBTs têm comparativamente maiores perdas mas comutação homogénea, ex. não necessitam de *snubber*. Contudo, não estão ainda disponíveis para aplicação directa nos níveis de média tensão. Para contornar esta limitação, é necessário ligar vários IGBTs em série, figura nº3.4 c), o que aumenta a complexidade, as perdas e reduz a fiabilidade do sistema.

Os valores nominais do aparelho, as suas características e a construção do bloco de empacotamento dos aparelhos de potência têm uma alta influência no custo, no peso e nas perdas do equipamento electrónico (Ver capítulo 5).

No custo final de cada aparelho está incluído o custo de todos os aparelhos circundantes, incluindo circuitos *snubber*, gate drives, fonte de energia on board para a gate drive, circuitos magnéticos, condensadores, filtros, equipamento de arrefecimento, etc.. Por consequência, o desenho de equipamento electrónico de potência deve ser baseado em componentes com as melhores características disponíveis, mesmo a altos preços.



**Figura nº 3.4 –** a) Interconexões de conversores; [4]  
 b) Conexões em paralelo; [4]  
 c) Conexões em série; [4]  
 1) Condensadores;  
 2) GTOs;  
 3) Impedância partilhada;  
 4) Carga;

#### 4.2.8 Propriedades fundamentais dos Semicondutores

Os dispositivos baseados em silício apresentam limitações associadas com as propriedades fundamentais dos materiais em questão, tal como energy band gap (preenchimento das lacunas/bandas de energia), mobilidade transportadora de electrões, etc..

Investigadores realizaram uma simulação com vários materiais [8 e 9], em que consideraram defeitos profundos, uma vez que estes podem introduzir níveis de energia perto do mid-gap, e podem funcionar como armadilhas para o portador e centros de dispersão.

Na simulação realizada através de inversores entre dois materiais, o SiC e Si, retiraram-se as seguintes conclusões[8 e 9]:



- O inversor SiC tem:
  - Menor temperatura de junção
  - Muito menores perdas de energia de energia/Potência
  - Aumento significativo da eficiência energética
  - Redução dramática do tamanho do *cooler*

O que demonstra a fiabilidade e os benefícios dos inversores baseados no SiC em relação aos Si.

Carbonato de Silício (SiC) é um semiconductor com uma grande “bandgap”. Tem muitas propriedades apelativas, tal como a já referida bandgap larga, um grande campo eléctrico de *breakdown*, velocidade alta de saturação de electrões e condutividade térmica alta. Estas vantagens podem resultar em performances excelentes debaixo de condições como, alta potência, alta-frequência, alta temperatura, para dispositivos baseados nestes semicondutores.

Este material (SiC) pode ser a futura escolha para a próxima geração de semicondutores.

O Carbonato de Silício (SiC) existe como diversos “PolyTypes” que têm sequência de empilhamento diferente de layers duplas de átomos de silício e carbono o que resulta em propriedades diferentes. A tabela nº 3.2 mostra as propriedades materiais e eléctricas de três “PolyTypes”, nomeadamente 4H-SiC , 6H-SiC , 3C-SiC. Entre estes três “PolyTypes” o 4H-SiC é particularmente apropriado para aparelhos de potência verticais, devido a sua alta mobilidade vertical.

Também devido à sua alta “bandgap” é esperado uma temperatura de funcionamento mais alta e uma mais alta rigidez de radiação que os outros dispositivos.

Propriedades	Si	4H-SiC	6H-SiC	3C-SiC
Bandgap, $E_g$ (eV)	1.11	3.26	2.86	2.2
Campo Eléctrico de bloqueio, $E_c$ (kV/cm)	300	2200	2500	1200
Constante dieléctrica relativa $\epsilon_r$	11.8	10.1	9.7	9.66
Mobilidade de electrões, $\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /V·s)	1350	950 800	500 80	900
Velocidade de saturação de electrões, $v_{sat}$ (cm/s)	$1 \times 10^7$	$2 \times 10^7$	$2 \times 10^7$	$2.5 \times 10^7$
Condutividade térmica, $R_{th}$ (W/cm <sup>2</sup> ·K)	1.5	4.9	4.9	4.9

Tabela nº3.2 - Propriedades eléctricas e materiais do Si e do SiC [8 e 9]



### 4.3 As Inovações Provenientes do IGCT

A tecnologia actual em uso é o interruptor de potência Gate Turn-Off (GTO) Thyristor. O GTO é fiável e barato mas requer uma capacidade "snubber" para o proteger durante o processo de *turn off*. O *snubber* usa ele próprio uma quantidade de energia significativa, aumentando assim o seu tamanho, e consequentemente o tamanho do interruptor e a complexidade dos circuitos de recuperação de energia. Adicionado a este problema ainda vem o desenho complicado da Gate, o que atrasa o processo de on-off.

O insulated gate bipolar transistor (IGBT), que não necessita de *snubber*, foi desenvolvido no início dos anos 90.

Recentemente um novo tipo de interruptores de potência surgiu, com uma nova arquitectura, combinando as melhores características dos Insulated Gate Bipolar Transistor e dos Gate Turn-Off thyristor, é chamado o Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT). Este novo *solid state switch* tem aplicabilidade na média tensão desde 2 a 6.9KV, com uma taxa máxima de 4000 A[4 e 5].

Este novo dispositivo que comuta com a velocidade de um IGBT e conduz como um GTO Thyristor. Com tal dispositivo, *drives* e inversores podem ser manufacturados a um custo mais baixo e de forma mais eficiente, também como controlos para motores em aplicações na média tensão.

O IGCT pode competir com o IGBT para baixas frequências. Para as frequências mais baixas de utilização, o IGCT mostra mais robustez debaixo de condições de alta carga eléctrica.

#### 4.3.1 Evolução

Nestes 30 anos, após a sua introdução, os interruptores de potência de silício têm aumentado com regularidade a sua complexidade e capacidade. O primeiro *silicon-controlled rectifiers* podia desligar a energia apenas no fim de um ciclo AC. Progressos chegaram com o GTO thyristor, o qual podia comutar em qualquer ponto do ciclo. A introdução do IGBT trouxe comutação rápida, mas actualmente as suas perdas apenas

são aceitáveis em níveis de baixa tensão. A tendência dos últimos anos é a concentração principalmente na própria potência de comutação.

O investimento contínuo no desenvolvimento e produção de GTO thyristors e IGBT's tem como resultado o aumento da performance dos dois aparelhos, que têm melhorado com regularidade (figura nº3.5). Nos últimos anos, uma série de inovações no sector tem criado uma plataforma para o projecto e produção de um disjuntor de silício de potência, com o qual se obtêm performances mais elevadas do que as

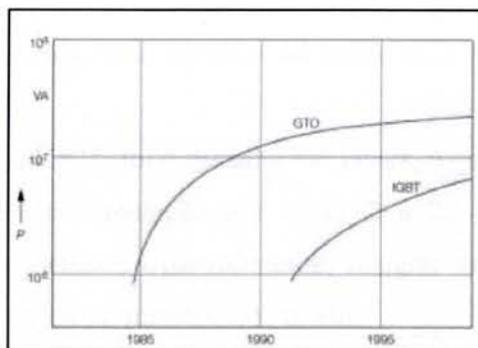


Figura nº 3.5 – Evolução em Potência ao longo dos anos do IGBT e do GTO [1]

do IGBT e do GTO. Conhecido como IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor), pode comutar mais rapidamente e tem menores perdas do que ambos (GTO thyristor ou IGBT). Mais importante, tem características que permitem aos engenheiros de sistemas eléctricos de energia diminuir o tamanho e o custo dos sistemas de média tensão enquanto reforçam a sua eficiência e fiabilidade.

A Figura nº 3.6 mostra um Integrated Gate-Commutated Thyristor de 4 KA e 4.5kV contendo uma *Wafer* como a da figura nº 3.7 e com a correspondente drive de baixa indutância.

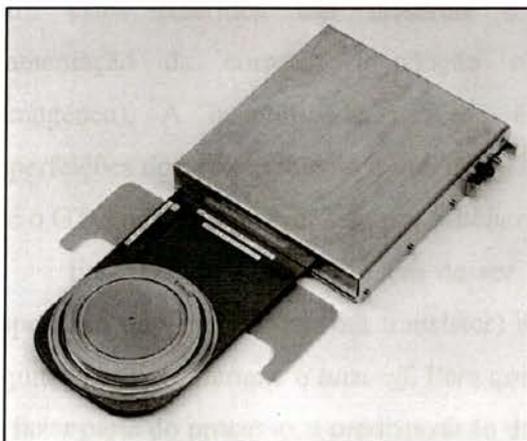


Figura nº 3.6 - Exemplo de um IGCT com a Wafer e respectiva drive [4 e 5]

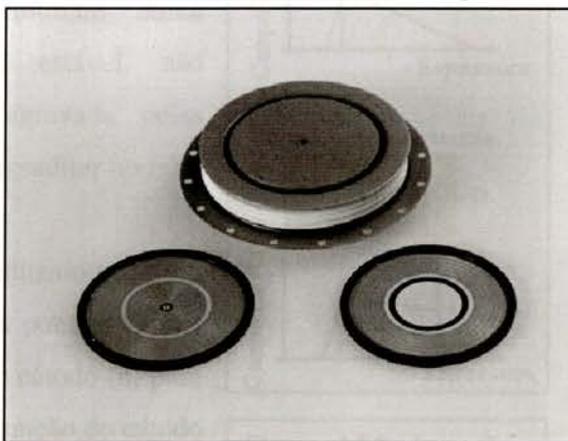


Figura nº 3.7 Exemplo do empacotamento de GCT e das wafers [4 e 5]

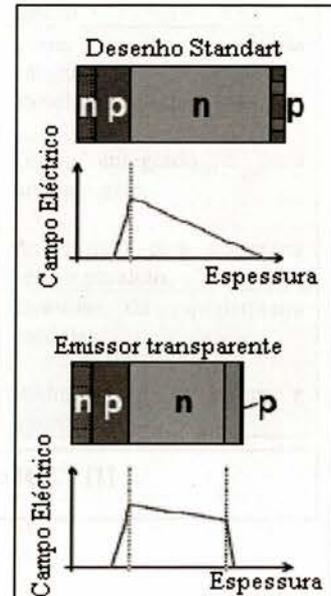
A evolução da tecnologia IGCT, deve-se à combinação de projectos inovadores e permitiu a combinação de milhares de estruturas de interruptores individuais de potência num GTO modificado para comutar rapidamente e simultaneamente. Aqui o que é importante é a obtenção de baixas perdas, e as características inerentes ao estado on e off do thyristor são mantidas.

A primeira de duas inovações chave para o IGCT, foi o desenho das layers, o que permitiu a redução das perdas de condução e de comutação por factor 2 a 2,5 e realização de um desenho do GTO e do díodo óptimos. Anteriormente, integrar um díodo com um GTO resultava na degradação severa da performance do díodo.

Num GTO convencional esta função é realizada por um ânodo curto, o que fornece um caminho para os electrões fluírem. Contudo, a combinação de ânodos curtos e as layers, trazem problemas ao nível de disparos extremamente altos e de correntes. Para resolver este problema o ânodo curto foi omitido. O ânodo passa a ser construído transparente, ou seja, permeável aos electrões, com o resultado que o disparo de correntes é reduzido para uma ordem de magnitude aproximada a um GTO convencional.

A segunda inovação diz respeito ao controlo da gate. Os GTOs e os thyristors são dispositivos de quatro layers (npnp), figura nº 3.8. Como tal, têm apenas dois pontos estáveis nas suas características - 'on' e 'off', Todos os estados entre estes referidos são instáveis e resultam numa filamentação da corrente (condução não estável, não homogénea). A instabilidade inerente é agravada pelas imperfeições do processamento o que levou a acreditar no mito que o GTO não pode operar sem um *snubber*.

Essencialmente, o GTO tem de ser reduzido para um dispositivo pnp estável (ex. um transístor) nos poucos micros segundos críticos durante o *turn-off*. Para que o cátodo (n) pare de fazer parte do processo, a predisposição da junção do cátodo n-p tem de ser revertida antes da tensão começar a aumentar na junção principal. Isto dá origem a comutação de toda a corrente de carga do cátodo (n) para a gate (p) dentro de aproximadamente um micro segundo. A filamentação da corrente é assim totalmente suprimida e as ondas referentes ao processo



**Figura nº 3.8 – Inovação para o IGCT, construção do emissor transparente [6 e 7]**



de *turn off* e a área de operação segura (SOA) são idênticas àquelas que apresenta o transístor (ex. um IGBT). Os GTOs podem agora comutar de modo instantâneo e sem actuações precipitadas. A partir deste ponto as conexões em série deixam de ser um desafio.

O interruptor ideal de potência tem de comutar como um IGBT e conduzir como um GTO thyristor, e tem de ter custos de fabricação baixos e altas produções como o GTO thyristor. Isto é exactamente o que o IGCT consegue, tabela nº 3.3.

<b>Tecnologia IGCT combina as vantagens do GTO thyristor e do IGBT</b>			
	<i>GTO thyristor</i>	<i>IGBT- Alta Tensão</i>	<i>Vantagens do IGCT</i>
<b>Tecnologia de comutação</b>	Disponível para a maioria dos níveis de Media Tensão;  Baixas perdas no estado ligado( on-state)	Comuta a altas-frequências;  Baixas perdas de comutação;  Não necessita de <i>Snubber</i> ( <i>Snubberless</i> );  Drive da Gate Integrada	Comuta a altas-frequências;  Baixas perdas de comutação;  Não necessita de <i>Snubber</i> ( <i>Snubberless</i> );  Disponível para a maior parte dos níveis de media tensão
<b>Circuito de Potência</b>	Livre de falhas catastróficas;	Apropriado para conexões série e paralelo para a baixa tensão;	Livre de falhas catastróficas; Revela-se fiável;  Diodo integrado e uma unidade gate;  Apropriado para conexões série e paralelo;
<b>Desenho/Projecto do equipamento</b>	Revela-se fiável;  Compacto;	Desenho Modular;	Desenho de equipamento modular ;  Redução de cablagem e interconexões;

**Tabela nº 3.3 – Resumo sobre o GTO, IGBT e as vantagens associadas ao IGCT [1]**

#### 4.3.2 Características

A tecnologia IGCT é o resultado da colaboração intensa entre desenhadors de dispositivos e desenhadors de sistemas industriais. De facto, o desenvolvimento de

silício de potência, e do empacotamento de circuitos adicionais necessários para realizar o interruptor de potência, é que tornaram o IGCT apropriado para aplicações industriais.

A tecnologia IGCT junta o dispositivo GCT com o dispositivo de controlo de circuitos (diodo de roda livre e uma *gate driver*) num pacote integrado (figura nº3.11). Oferece assim quatro níveis de empacotamento e integração de componentes, permitindo simultaneamente melhoramentos em quatro áreas: baixas perdas de comutação e condução na média tensão, circuitos simplificados para operação de semicondutores de potência, custos reduzidos em sistemas de potência, realçando a fiabilidade e a validade/prazo de utilização. Também, por fornecer módulos de comutação pré-fabricados. A tecnologia IGCT permite aos projectistas de equipamento de média tensão desenvolverem os seus produtos rapidamente.

Na figura nº 3.9 podemos ver a secção de um GTO thyristor (lado esquerdo), de um díodo (no centro) e de um GCT (lado direito). A figura mostra como o emissor transparente e a *layer* do *buffer* do GCT permite uma *layer* fina base n-. Isto permite a integração de um díodo roda livre na mesma estrutura, dando origem a uma operação sem a necessidade de um *snubber* (*snubberless*) e a obtenção de um pacote total com baixa indutância.

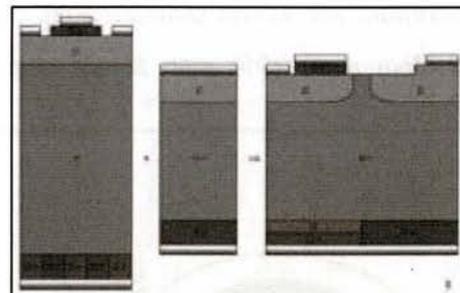


Figura nº 3.9 – Corte transversal do semiconductor [1]

Na figura nº 3.10 podemos ver a secção de um único IGBT (esquerda) e um díodo (direita), e comparar com a secção total da figura nº3.9. Um chip completo IGBT consiste em muitas dessas células em paralelo. A Tecnologia MOS limita o tamanho do chip IGBT cerca de 1 a 2 centímetros quadrados, como consequência, vários chips tem de ser ligados / empacotados em paralelo (Ver capítulo 5). Como os IGBTs ainda não possuem capacidade de bloquear os níveis de tensão dos GCTs, eles tem de ser ligados em série para obter tal capacidade.

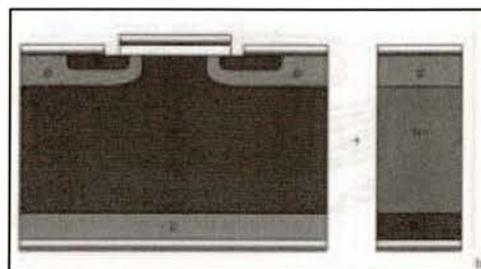


Figura nº 3.10 – Corte transversal de um IGBT+Diodo [1]

### 4.3.3 Vantagens da tecnologia IGCT na média tensão

A tecnologia IGCT apresenta várias vantagens para aplicação na média tensão, tais como, baixas perdas de comutação, redução do tamanho de equipamento, baixo custo, fiabilidade e disponibilidade.

#### 4.3.3.1 Baixas perdas de comutação

Uma vantagem das baixas perdas de comutação é a que permite aos designers de equipamentos escolherem a taxa de comutação que melhor se adequa aos requerimentos finais das aplicações. Os aparelhos de potência antecedentes possuíam uma operação limitada a 250Hz á taxa de corrente máxima. A tecnologia IGCT pode operar até quatro vezes essa velocidade. Nos sistemas drives dos motores, por exemplo, o projectista pode escolher comutação rápida para obter uma melhor eficiência do sistema. Alternativamente, a eficiência dos sistemas inversores é melhorado e as suas perdas reduzidas pela selecção de uma taxa de comutação lenta para um IGCT.

#### 4.3.3.2 Redução do tamanho do equipamento

As características únicas do GCT permitem uma operação *snubberless* (sem *snubber*), com importantes benefícios. A figura nº 6 demonstra isto claramente. Os projectos inversores com *snubber* são maiores e mais complexos, enquanto os inversores *snubberless*, são menos complexos, mais pequenos e além disso possuem baixas perdas, são compactos e são constituídos por menos componentes. Como resultado a fiabilidade é melhor.

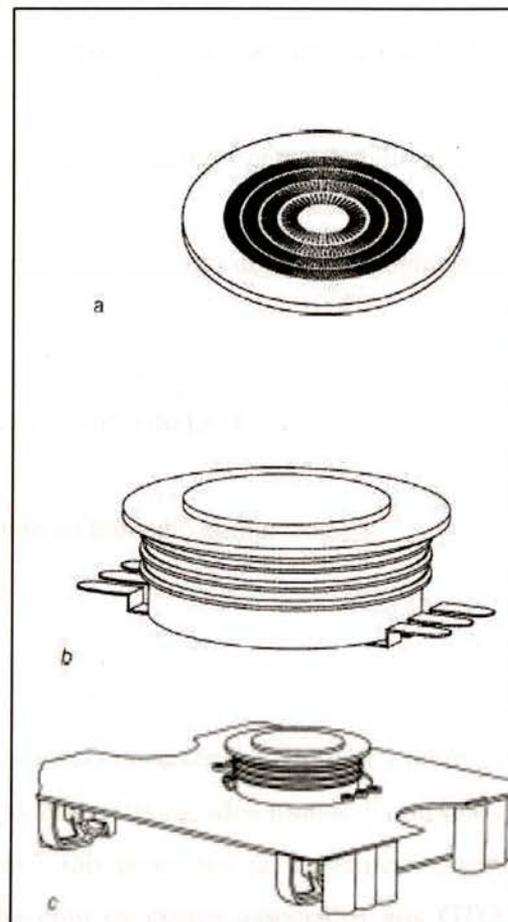


Figura nº 3.11 – Exemplo das varias partes de um GCT [1]



A figura nº3.11 a) representa uma *Wafer* de um “Thyristor Gate commutated” (GCT), e tem como características:

- O “Gate commutated thyristor” e o diódo estão integrados na mesma *Wafer*;
- O desenho do ânodo permite á carga fluir num sentido ou no outro rapidamente;
- A espessura reduzida do silício limita carga acumulada e permite a fabricação de um diódo e um interruptor na mesma *Wafer*;
- O silício fino produz baixas perdas no estado de condução;
- Todos os elementos estão integrados, o que provoca a omissão do *snubber*,

A figura nº 3.11 b) mostra o empacotamento do GCT. Este empacotamento permite:

- Uma baixa indutância derivada do empacotamento o que permite as correntes na gate fluírem num sentido ou no outro rapidamente;
- Liberdade de movimentos, evitando falhas por fadiga durante vários ciclos térmicos;
- Ao desenho *Press-pack* opor-se ao stress térmico e contribuir para a fiabilidade;

A figura nº 3.11 c) mostra a *drive* da *gate* integrada com circuito de baixa indutância, o que permite:

- Um controlo rápido do sentido do fluxo das correntes do GCT;
- Redução da indutância parasita;
- O desenho de novos equipamentos atendendo ao tamanho compacto;

#### 4.3.3.3 Baixo custo

O custo do equipamento de controlo de potência pode ser reduzido 30% ou mais através do uso da tecnologia IGCT. Os GCTs podem ser fabricados usando os mesmos processos de produção dos GTOs, uma vez que são processos já existentes e bem compreendidos, os custos GCT estão em linha com os custos associados aos GTO thyristors. Comparando com IGBTs, os GCTs são menos sensíveis a variações durante o



processo de fabricação, uma vez que não afectam a sua performance de *turn-off*. Consequentemente, o rendimento (quantidade produtos) é maior e os custos são menores.

Alem do processo de fabrico, o desenho do GCT é mais simples, reduzindo assim custos e aumentando a velocidade do desenvolvimento de sistemas.

A tecnologia GCT simplifica circuitos de potência o que provoca a redução do número de componentes mais do que 50%, isto devido a integração de díodos no GCT e a redução na cablagem e interconexões. Estas simplificações fizeram com que fosse possível uma maior frequência de operação, o que permite alguns componentes serem mais pequenos. Em adição o circuito de potência da *gate drive* é substancialmente reduzido, permitindo o uso de componentes com um custo mais baixo.

Equipamentos baseados em IGCTs possuem alta eficiência quando comparados com outras tecnologias usadas, as perdas nos circuitos de potência e nos circuitos associados são baixas, o que se traduz num equipamento de arrefecimento mais compacto, permitindo uma redução futura de custos.

#### 4.3.3.4 Fiabilidade e disponibilidade

Num contexto mais alargado, e pensando nas aplicações destes IGCTs, o custo destes equipamentos é pequeno quando comparado com o custo dos processos no qual ele está inserido e opera. A disponibilidade e fiabilidade do equipamento são um assunto supremo. A tecnologia IGCT foi concebida especificamente para o uso em níveis na média tensão e assegura uma fiabilidade óptima do equipamento através:

- Comutação Homogénea;
- Robusto, tecnologia de empacotamento (sem *wire bonds*);
- Unidades de controlo da *Gate* simplificadas;
- Redução do numero de partes;

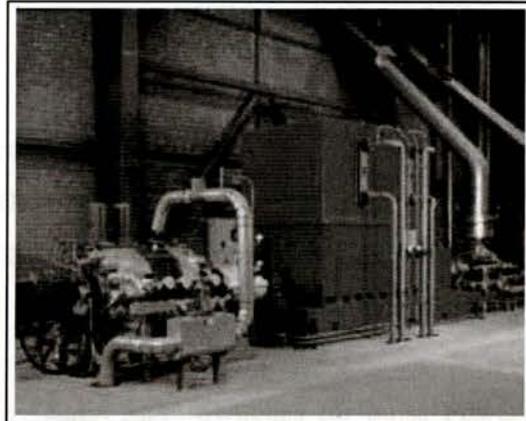
Apesar de ser improvável o acontecimento de uma falha, a tecnologia IGCT está construída de modo a que a substituição dos componentes de potência de realize de



forma simples e rapidamente. Isto reduz uma grande parte dos custos de manutenção e mantém os processos on-line.

#### 4.3.3.5 Aplicações da tecnologia IGCT

A grande vantagem da performance dos IGCTs é a sua capacidade de desligar em 2 micro segundos e conduzir como um thyristor. Por consequência a tecnologia IGCT permite um desenho simples com metade das perdas das tecnologias alternativas. Graças aos IGCTs, as topologias de circuitos que eram impraticáveis até 100MW e que requeriam conexões em série de vários dispositivos, podem ser agora realizadas. Equipamentos de media tensão baseados nesta tecnologia exibem uma fiabilidade muito alta. Isto



**Figura nº 3.12 Aplicação de IGCTs numa drive para uma bomba de alimentação de uma caldeira. [1]**

permite aos projectistas trabalharem com IGCTs para construir de modo mais barato, mais fiável e mais compacto sistemas de controlo de potência, que incluem entre outros:

- Sistemas para produção de altos binários de arranque;
- Drives para a média tensão, para fornos de indução e para locomotivas AC;
- Conversores de Frequência da fonte de alimentação de caminhos-de-ferro;
- STATCOMs (compensadores estáticos controlo de potência);
- Drives de bombas de água e barcos completamente eléctricos;
- Disjuntores Estáticos para a Média Tensão ( $< 10$  kV)
- Aparelhagem com altas-frequências de operação ( $> 20$  KHz), altas taxas de crescimento da tensão ( $dv/dt > 3$  kV/us) e da corrente ( $di/dt > 3$  kA/us) e com picos de corrente elevados ( $> 5$  kA);

#### 4.4 Conclusões

A constante procura de novas soluções, teve como resultado o aparecimento de novas propostas para disjuntores, não só disjuntores híbridos como totalmente *solid*



*state*. Estes aparelhos tem como base os semicondutores e a sua aplicabilidade aos níveis da média tensão depende fortemente do desenvolvimento destes, do seu melhoramento em termos eléctricos, tamanho, fiabilidade, etc.

#### 4.5 Bibliografia

- [1] Harold M. Stillman, “IGCTs-megawatt power switches for medium-voltage applications”, ABB corporate Technology, ABB review 1997;
- [2] A Welleman, J Waldmeyer, E Ramezani, “Semiconductor components & Solid State Switches for Power modulator Applications”, ABB Switzerland Ltd, Semiconductors, Julho 2002;
- [3] A. Welleman, J Waldmeyer, E Ramezani, “Solid State Switches for pulse Power modulators”, ABB Switzerland Ltd, Semiconductors, 2002;
- [4] Anton Schweizer, Eric Carrol, “Application Aspects”, Secção 5, ABB Semiconductors AG, Fevereiro 2005;
- [5] P.K. Steimer, E. Carrol e outros, “ IGCT- a New emerging technology for High Power, Low Cost inverters” ABB Industrie AG, Outubro 1997;
- [6] Horst E. Grüning, “Design and Manufacturing of Application Specific High Power Converters” ABB Industrie AG, 1999;
- [7] Leslie Langrau, “The next stage in power Semiconductors”, Power Transmitter Design, Outubro 1997;
- [8] Qiong Shui, Xianyue Gu e outros, “Simulations of a high Power 4H-SiC VJFET and its GaAs CounterPart”, Department of electrical Engineering-Electro physics, University of Southern California, 2003;
- [9] Hui Zhang, Leon R. Tolbert e outros, “Power Losses and Thermal Modeling of a 4H-SiC VJFET Inverter”, The University of Tennessee Knoxville; Oak Ridge National Laboratory Knoxville;



## 5 Empacotamento de semicondutores

### 5.1 Introdução

Os módulos de electrónica de potência são componentes chave nos sistemas actuais para a conversão, armazenamento e tratamento de energia.

Os progressos realizados ao longo dos últimos anos no que diz respeito aos materiais e processos de ligação de interruptores únicos e módulos *multichip* de potência, provocaram um aumento consequente da fiabilidade deste tipo de aparelhos. Uma das razões foi a introdução de uma placa de molibdeno, soldada no topo do silício como uma *layer* para amortecimento, onde são ligados fios de alumínio directamente à placa, para obtenção de uma alta durabilidade.

Outro exemplo de um avanço significativo foi a eliminação de fios de ligação de modo a eliminar a indutância parasita.

A existência de pacotes de semicondutores fornece uma protecção extra (mecânica, química e electromagnética), uma dissipação de calor apropriada e uma distribuição correcta de todos os componentes, interligações e distribuição de sinais.

As interligações desempenham um papel vital na viabilidade ou não de pacotes de semicondutores, porque é necessária uma interface correcta entre os vários componentes, não só electricamente, mas também mecanicamente e termicamente.

De seguida serão referidos os principais tipos de empacotamento e ligações entre os semicondutores actuais, sendo analisado com mais atenção a tecnologia Press-Pack.

### 5.2 Vários Tipos de Ligações/Empacotamento

Existem vários tipos de tecnologia de empacotamento de semicondutores e ligações, tais como:

- Wire bond;
- Press Pack;
- Deposited metallization;
- Thin Pak;
- Area Array Solder Bumping;

### 5.2.1 Bond Wires

È a tecnologia mais comum de interligação dos semicondutores de potência. Esta tecnologia é capaz de facilmente realizar mudanças no desenho do pacote com o mínimo de modificações e custos por conexão.

Esta flexibilidade e o baixo custo combinado com um esforço contínuo para melhorar a fiabilidade, dão indicações que o *Wire Bonding* vai continuar a ser o método predominante para realizar as interconexões entre chips.

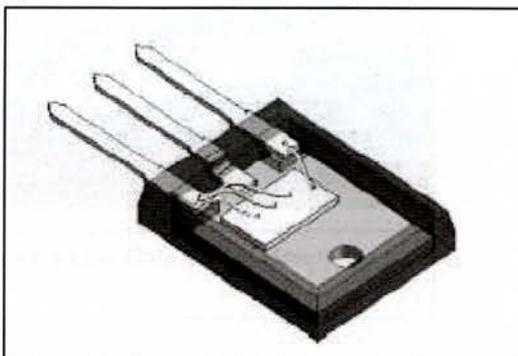


Figura nº 5.1 – Vista Interior de um MOSFET [7]

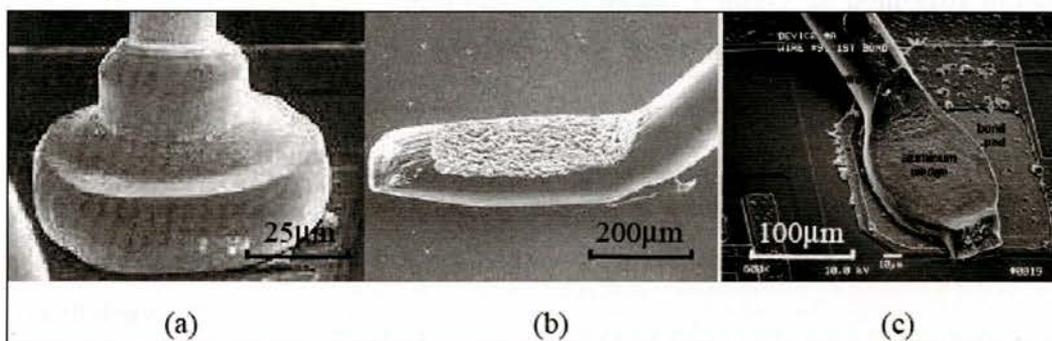


Figura nº 5.2 – Vista ao microscópio de ligações Wire bond; (a)- Ball bond; (b)-Wedge bond; (c)- diminuição da vista b) [7]

### 5.2.2 Press Pack

A estrutura *Pressure Pack* é construída através do empacotamento de varias partes em conjunto. A tecnologia de interligação foi desenvolvida inicialmente pela Fuji, Toshiba e ABB. Esta tecnologia/nova estrutura foi aplicada a aparelhos de potência como diodos, thyristors, GTOs, etc., obtendo-se uma alta fiabilidade para aplicações como sistemas de transporte e *drives* de motores.

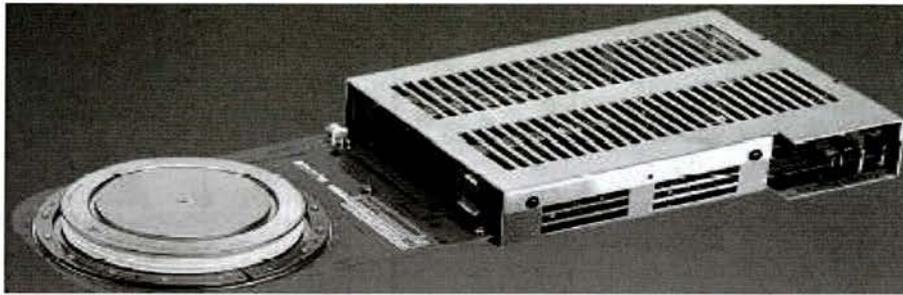


Figura nº 5.3 – IGBT completamente Press Pack com Gate drive e circuito de controlo.

### 5.2.3 Deposited Metallization

È outra abordagem para empacotamentos de semicondutores sem usar *Bond Wires*. As interconexões são construídas com metais e *layers* de polímeros formadas directamente nos eléctrodos do aparelho. Este *layer* de metal serve de ligação de potência e sinais entre os aparelhos do resto do circuito, e é formado através de deposição física e química.

Os esquemas de empacotamento usando a tecnologia *deposited metallization* incluem a General Electrics Power Overlay (POL) Technology e o Embedded Power Technology.

A POL Technology elimina os Wire Bonding através do uso de cobre metalizado para obter interconexões de controlo e de potência.

A tecnologia Embedded Power representa outro esquema de interconexões por metalização depositada, uma estrutura *multilayer* que usa substratos de cerâmica, materiais dieléctricos impressos e solda para juntar dispositivos de potência.

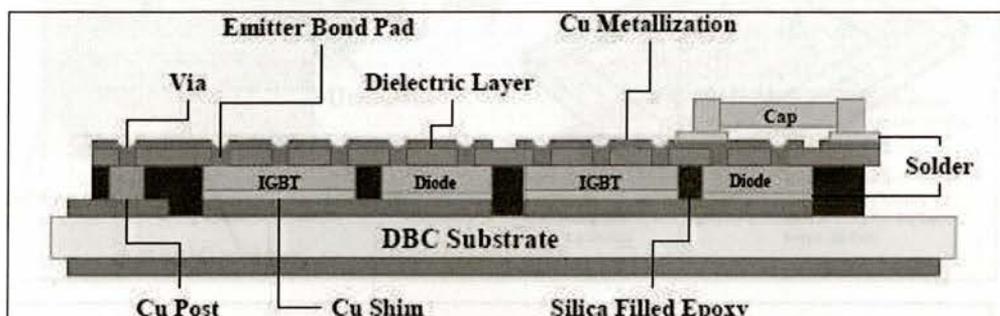


Figura nº 5.4 – Vista de uma secção da estrutura GE POL[7]

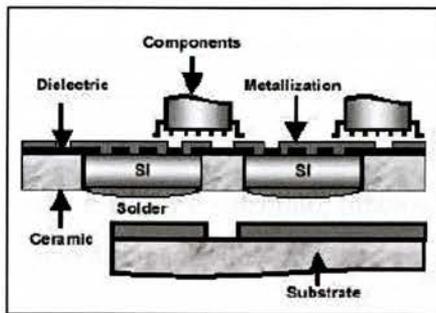


Figura nº 5.5 –Esquemático da Embedded Power Technology [7]

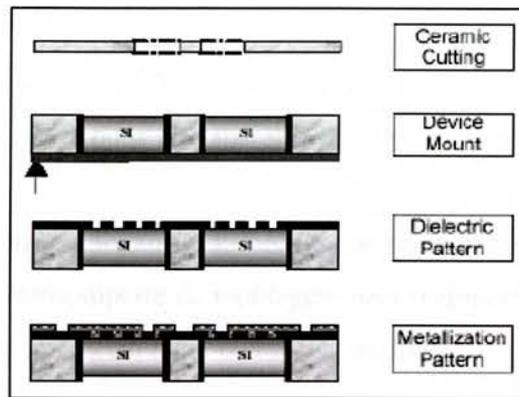


Figura nº 5.6 – Etapas de Embedded technology[7]

### 5.2.4 Thin Pak

The Silicone Power Corporation (SPCO), desenvolveu a tecnologia Thin Pak. Nesta tecnologia uma cobertura de cerâmica com orifícios, é ligada ao chip através de um fluxo de solda (figura 5.12). Uma chanfradura pode ser realizada na cerâmica intervindo na ligação dos eléctrodos dos chips aos circuitos. Esta técnica foi utilizada para aumentar a produção dos módulos de potência até perto de 100%. Esta cobertura fina de cerâmica não só diminui o volume do pacote e a resistência térmica, como também serve como base para a integração de outros componentes de circuitos.

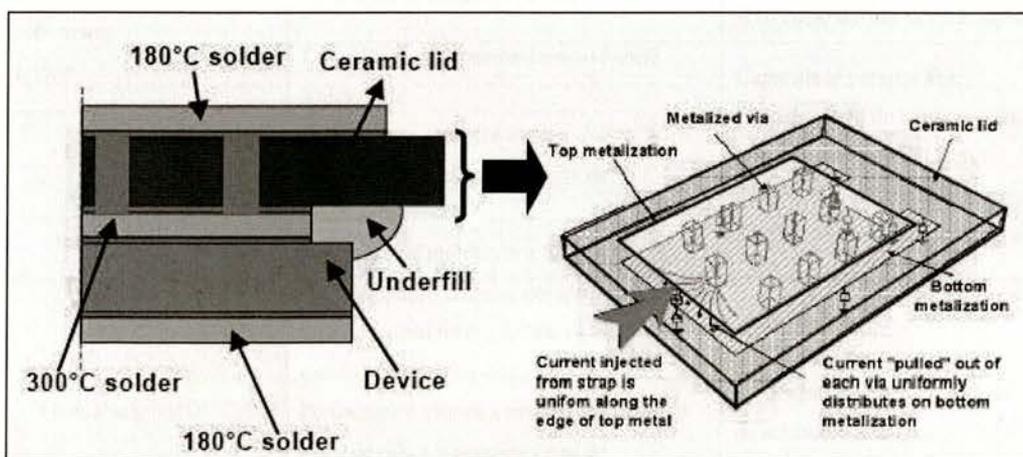


Figura nº 5.7 – Esquemático de uma secção do Thin Pak com uma vista a 3D [7]

### 5.2.5 Area Array Interconnect

Uma fila de área de amortecimento soldada usa polímeros condutores para formar conexões permanentes entre os eléctrodos dos aparelhos, e definir a metalização do substrato.

Os “amortecedores” também proporcionam a dissipação de calor, transferência entre o chip e o substrato, funcionam como suporte de montagem para o chip, e também como dissipador de forças de stress que aparecem entre o chip e o módulo.

### 5.2.6 Analise entre as várias tecnologias de Ligação/Empacotamento

<i>Tecnologias</i>		<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<b>Wire Bond</b> (IGBT;MOSFET)		Alta flexibilidade para se adaptar a vários aparelhos; Sem requisitos especiais no processamento das <i>Wafers</i> ; Baixo custo por conexão; Fiabilidade melhorada;	Baixo Throughput devido ao processo sequencial de bonding; Altos ruídos parasita devido a interligações longas; Fracá gestão térmica; Inaplicabilidade em 3D;
<b>Press Pack</b> (GTO;IGCT;IGBT)		Melhor fiabilidade devido á não existência de estrutura de fadiga; Livre de explosões; Impedância térmica baixa, arrefecimento realizado nos dois lados do semiconductor;	Esquema especial de arrefecimento; Isolamento especial; Vedação hermética; Alto custo de empacotamento;
<b>Reposition metallization</b> (IGBT; MOSFET)	<b>GE POL</b>	Performance eléctrica melhor que os Wire bond devido a trajectória curta de interligação; Aplicação de multilayer a 3D;	Capacidade parasita alta; Falta de alívio do stress mecânico entre a interconexão Silício/Cobre; Processamento complexo; Alto custo devido as perfurações;
	<b>Embedded Power</b>	Compatível com processamento hybrid Thick-film; Performance eléctrica melhor que os Wire bond devido a trajectória curta de interligação; Aplicação de multilayer a 3D;	Capacidade parasita alta; Falta de alívio do stress mecânico entre a interconexão Silício/Cobre; Processamento complexo; Alto custo devido as perfurações;
<b>Thin Pack MCT</b>		Boa dissipação de calor devido á grande área de soldadura em ambos os lados e ao uso de cerâmica líquida; Performance eléctrica melhor que os Wire bond devido a trajectória curta de interligação; Aplicação de multilayer a 3D;	Preocupações na fiabilidade devido a área de soldadura alta;



<p><b>Area Array Solder Bumping</b> (IGBT; MOSFET)</p>	<p>Alta densidade de empacotamento;          Performance eléctrica melhor que os Wire bond devido a trajectória curta de interligação;          Aplicação de multilayer a 3D;          Custo mais reduzido que a deposit metallization,          ThinPak ou PressPack;          Boa Fiabilidade</p>	<p>Requer processamentos adicionais devido as <i>Wafers</i>;          Alto custo para baixos volumes de empacotamento;          Fadiga das ligas soldadas;</p>
--	---	--

**Tabela nº 5.1 – Resumo das características das várias tecnologias**

### 5.3 Análise das Topologias e Tecnologias associadas ao Press Pack

Semicondutores de potência *press pack* são componentes muito poderosos no controlo de energia eléctrica. Um projecto para o desenho das várias peças deve ser realizado com o devido cuidado, para utilizar todo o seu potencial. A integração de componentes num único pacote tem vários problemas. Não esquecer que além de termos os semicondutores *press pack* de potência, temos ainda a estrutura completa de apoio, dissipadores de calor, barramentos, etc.

A interface entre os vários semicondutores é da maior importância. O *cooler* ou dissipador de calor deve ser projectado de modo a possuir propriedades de condução excelentes, qualidades que devem ter preocupações superiores, mesmo, ao tempo de vida útil do aparelho. Isto é conseguido criando um número suficiente de conexões metal-metal estáveis, as quais podem conduzir a corrente de modo eficiente desde o semiconductor através do *cooler* até ao barramento.

Estes pontos de contacto devem-se manter inalterados mesmo debaixo de condições extremas como condições ambientais adversas, vibrações, contaminações químicas, etc. Para se obter tais características é necessário uma escolha correcta dos materiais e componentes a utilizar.

Nos *coolers* em que o arrefecimento é realizado pela água, devem ser o mais homogéneos possíveis no contacto com o aparelho a proteger. Normalmente é necessário mais do que um canal para realizar um arrefecimento correcto em peças sujeitas a grandes potências.

Estes *coolers* devem obedecer a requisitos impostos, tais como: Robustez adequada para suportar compressões até 135KN sem deformação[1]. A deformação pode causar a não homogeneidade da distribuição de pressão.

O desenho mecânico e o modo de empilhamento são cruciais para a performance e fiabilidade dos semicondutores de potência *press-pack*. A distribuição não homogénea causada por má montagem é uma causa normal para a falha dos aparelhos.



Figura nº 5.8 – Dissipador de calor que utiliza água como líquido de arrefecimento [1 e 5]

Mas como se pode obter um empilhamento realmente fiável?

Um empilhamento fiável pode ser conseguido através de um desenho mecânico correcto, uma empilhamento/montagem bem efectuada.

### 5.3.1 Desenho mecânico

A estrutura para realizar a base e aperto deve ser desenhada com extremo cuidado. Para assegurar que os aparelhos são fixos com a pressão adequada, é necessária a existência de uma distribuição uniforme da pressão sobre todos os contactos dos aparelhos.

O ideal é que a força de montagem seja aplicada num único ponto, no centro do aparelho, para se obter uma boa distribuição da pressão considerando uma “força cónica de 90°”[2].

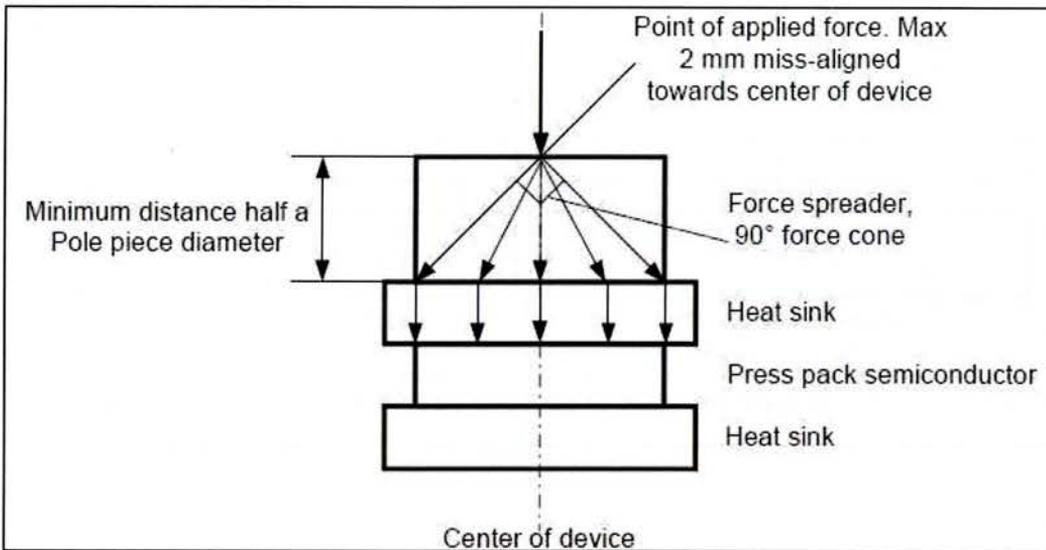


Figura nº 5.9 – Distribuição correcta da pressão sobre o aparelho[1 e 5]

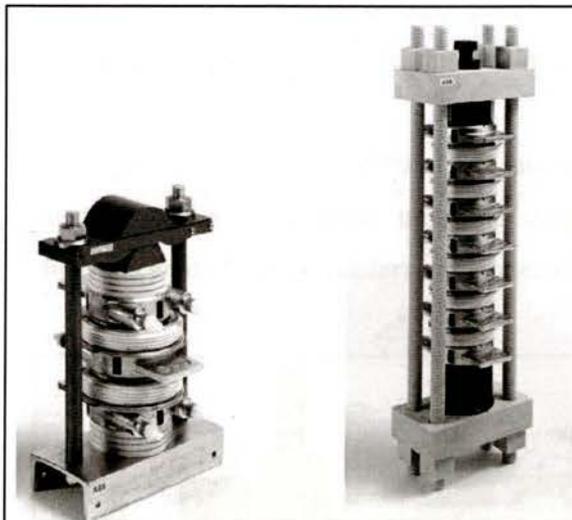


Figura nº 5.10 – Exemplo de empacotamento de módulos[1]

### 5.3.2 Montagem/Empacotamento

O empacotamento de semicondutores de potência em paralelo, ou em Anti-paralelo, deve ser sempre realizado separando os pontos de encaixe. O aperto deve ser realizado como é demonstrado na figura nº5.11, excepto se forem empilhados uns em cima dos outros como na figura nº 5.10.

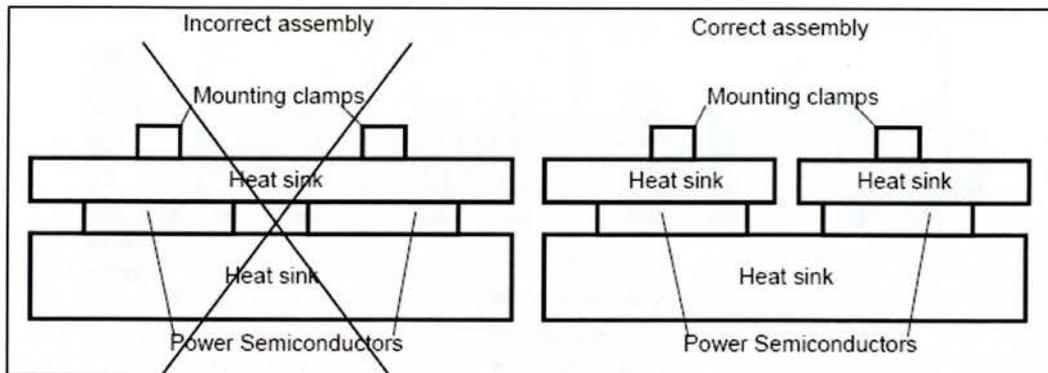


Figura nº 5.11 – A aparelhagem deve ser montadas de modo individual [2]

Quando vários aparelhos são montados em conjunto na mesma estrutura, todos os aparelhos devem ter a mesma força de montagem, para evitar situações de stress ou falhas de pressão nos aparelhos do empacotamento. Também é aconselhável usar peças com o mesmo tamanho de encaixe para o dissipador para facilitar o desenho do cooler e conseguir uma distribuição de pressão uniforme em todos os aparelhos[2].

Na figura nº 5.12 é mostrado um bom exemplo de empacotamento, e logo de seguida podemos observar um mau empacotamento, figura nº5.13, com uma má distribuição de forças e coolers em número insuficiente.

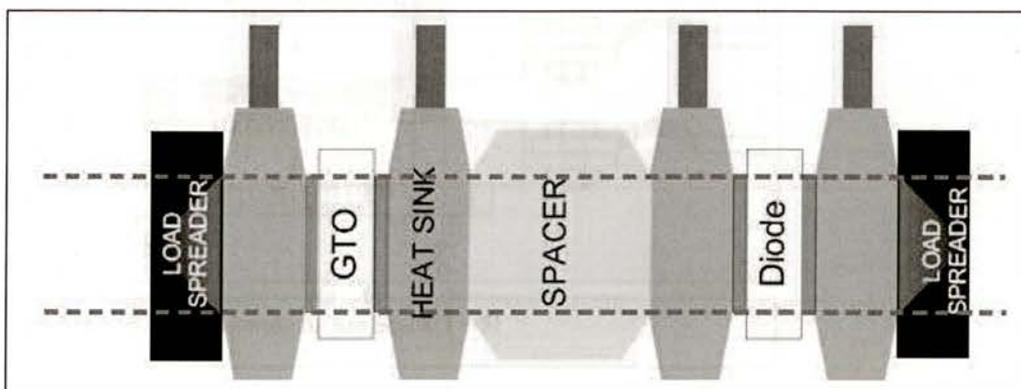


Figura nº 5. 12 – Exemplo de uma boa distribuição [1 e 5]

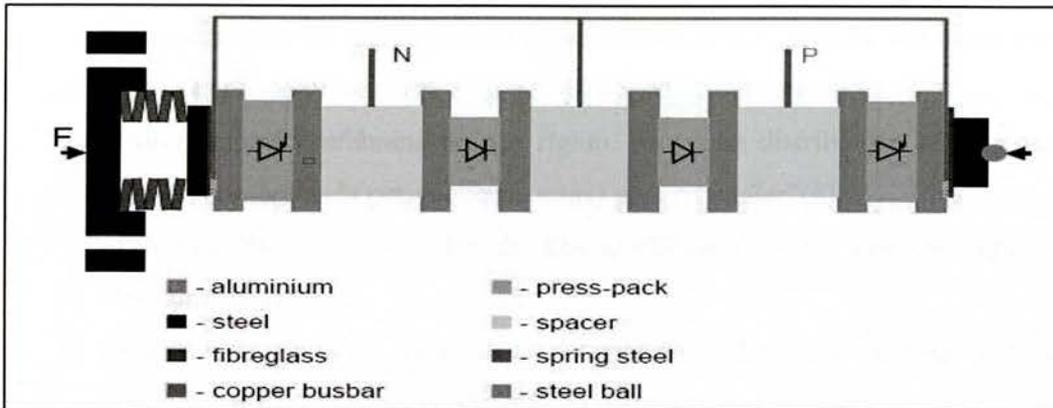


Figura nº 5.13 – Exemplo de uma má distribuição [1 e 5]

Os barramentos e as suas ligações ao *press-pack* devem possuir uma parte flexível para evitar o stress mecânico.

A figura nº 4.14 mostra um exemplo de um empacotamento GTO.

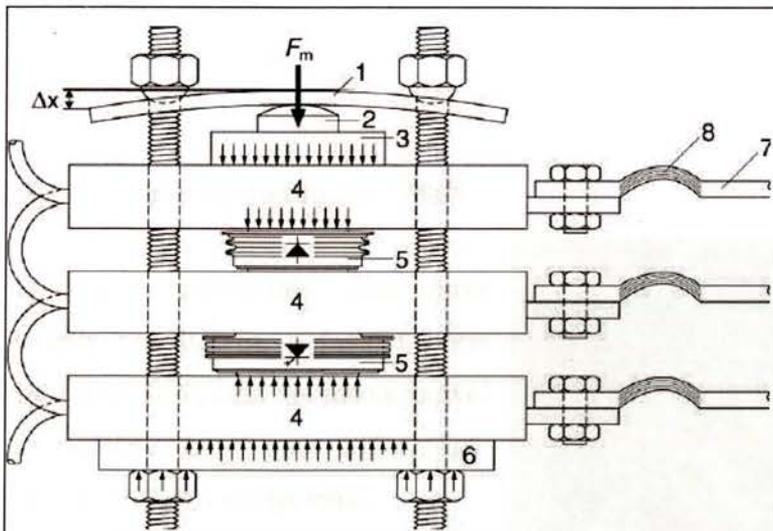


Figura nº 5.14 – Exemplo de um Stack[1 e 5]

Conjunto de regras para um bom empacotamento:

1. A curvatura da mola de lâminas  $\Delta x$  deve ser grande em comparação com a expansão térmica das partes do *Stack* de modo a manter  $F_m$  constante ao longo do tempo e de variações de temperatura

2. Devem-se usar partes arredondadas para assegurar que a força  $F_m$  é transferida simetricamente ao empilhamento de semicondutores e permite aos componentes do empacotamento se adaptarem aos não-paralelismos inerentes.
3. Utilizar uma folha/lâmina de aço rígido, para uma distribuição homogénea da pressão (simbolizada por pequenas setas) para o “cooler”(4).
4. Usar um dissipador de calor de alta qualidade (cooler), com as superfícies devidamente tratadas.
5. O semicondutor *press pack*: deve ter superfícies limpas e cobertas com uma pequena camada de óleo de silício antes da montagem.
6. Utilizar juntas/uniões fortes para assegurar uma distribuição homogénea da pressão no “cooler”(4).
7. Os barramentos devem ser ligados aos *coolers*(4) através de ligações flexíveis(8) para evitar que forças descontroladas afectem a distribuição homogénea de pressão no *stack*.
8. Antes do empacotamento todas as superfícies devem ser limpas com álcool e lubrificadas com um óleo de silício para ajudar a transferência de calor e contacto térmico, e para prevenir oxidação de partes sujeitas a agentes agressivos. [4]

### 5.3.3 Empacotamento em “Wafer”

Foi introduzida uma nova família nos IGBTs, a família *press pack* de 4.5KV, com um incomparável empacotamento e uma SOA (*Safe Operating Area*) excepcional.

O desenho deste sistema, deste novo molde, figura nº 5.15, trouxe uma robustez ao produto introduzindo alta fiabilidade.

A figura nº 5.15 mostra uma vista interna de um aparelho de 5.2KV

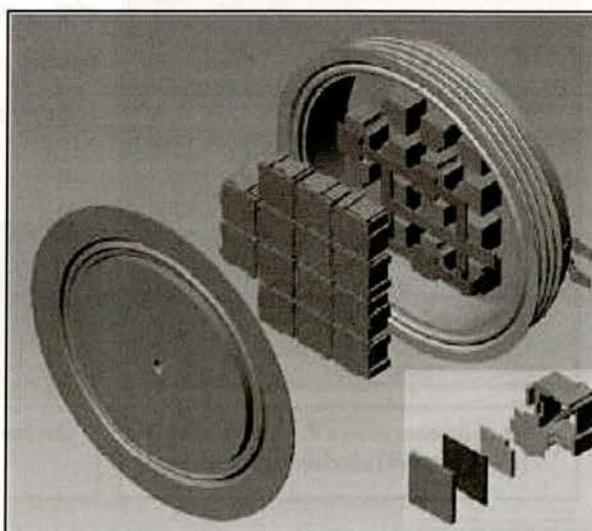


Figura nº 5.15 – Construção da “Waffer” IGBT (Westcode)[3]

de 900A.

Este dispositivo contém 14 IGBTs separados de modo correcto. O contacto com a *Gate*, tal como o do emissor e o do colector, é realizado através de apenas 1 contacto de pressão. O aparelho não contém soldas nem juntas com fios de ligação.

A ligação da *Gate* é realizado através de um amortecedor no canto, via pinos individuais providos de molas, montados no molde transportador. Estes pinos contactam um quadro de distribuição revestido a cobre, o qual está ligado ao terminal

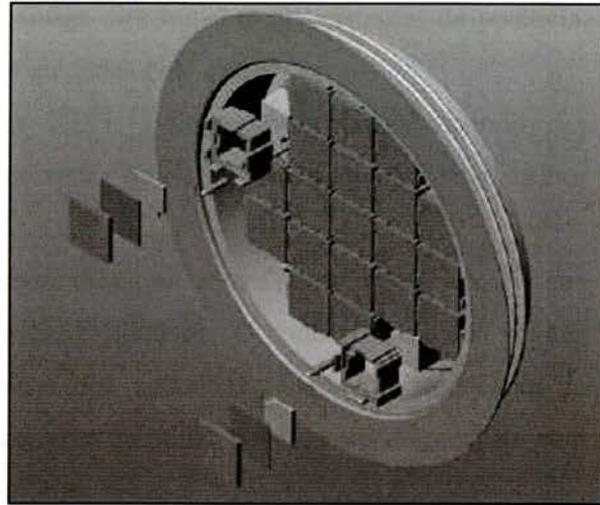


Figura nº 5.16 – Configuração interna (Westcode)[3]

externo da *gate*. Cada um destes novos aparelhos é constituído totalmente por IGBTs, neste caso, aparelho de 1200 A com 85mm de face, figura nº 5.16.

### 5.3.4 Produtos disponíveis

A tabela 5.1, apresenta 6 aparelhos que estão disponíveis actualmente, em três tamanhos de empacotamento, com e sem diodos integrados. Três destes aparelhos são ilustrados na figura nº5.17 [4].

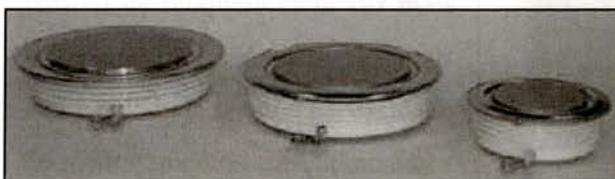
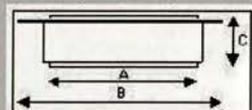


Figura nº 5.17 – Três Waffers Press-Pack disponíveis para 4.5KV (Westcode)[3]

Part #	$I_c$	Anti parallel diode	Outline
T0160NA45A	160A	✓	A
T0240NA45E	240A	x	A
T0600TA45A	600A	✓	B
T0800TA45E	800A	x	B
T0900EA45A	900A	✓	C
T1200EA45E	1200A	x	C

A	47mm	75mm	85mm
B	74mm	112mm	124mm
C	27mm	26mm	26mm

Tabela nº 5.2 – Valores nominais de aparelhos disponíveis (Westcode)[3]

A tecnologia *press pack* IGBT oferece a oportunidade para realizar o *upgrade* dos projectos existentes sem alterar o desenho mecânico base. Além disto, pode ser

usada para reduzir o tamanho de equipamentos existentes e também para realizar novos projectos.

Esta tecnologia pode substituir a antiga directamente nos sistemas de potência, sendo apenas necessária a substituição das unidades *gate drive*.

O comportamento do interruptor IGBT é compatível com a maioria das configurações do *snubber*, e podem ser deixados iguais ou reduzidos para uma melhor optimização do tamanho total do sistema.

Em termos gerais as características de destaque desta família *press pack*, é a sua robustez natural e as características eléctricas exploráveis. O conhecimento dos valores do estado estável e das perdas dinâmicas dos aparelhos indicam a frequência de operação pratica de 1KHz á taxa da corrente nominal debaixo de comutação com *snubber*.

### 5.3.5 Diodos de recuperação extra rápida para aplicações IGBT e IGCT

Uma nova classe de diodos de potência com uma recuperação extra rápida, optimizados para aplicações com IGBTs e IGCTs foi apresentada. Estes diodos incorporam uma nova estrutura “p-emissor” e um controlo optimizado para oferecer melhoramentos reais na performance dinâmica combinado com melhoramentos na *Safe Operating Area* e alta fiabilidade.

À medida que melhoramentos eram realizados nos semicondutores, tais como IGBTs IEGTs e IGCTs com tensões de bloqueio cada vez mais altas, uma pressão cada vez mais alta é realizada sobre a necessidade de melhoramentos complementares nos diodos de roda livre.



Figura nº 5.18 – Diodo de recuperação rápida-High Power Sonic-FRD Westcode [4]

Esta nova classe de diodos, aparece com o intuito de ultrapassar dificuldade ao nível da topologia, tamanho, peso, eficiência, fiabilidade e custo. Esta nova classe oferece assim novas possibilidades aos projectistas.



Vários produtos estão a ser lançados no mercado, por exemplo a nova série de 2.5KV, 4.5V, 5.2 KV encapsulados num pacote press pack como a da figura nº 5.18.

Estes aparelhos cobrem a maioria de aplicações para os IGBTs e IGCTs disponíveis em Press-Pack.

Estes diodos básicos possuem uma tecnologia que oferece um potencial enorme em variadas aplicações onde os diodos convencionais ou de recuperação rápida são usados, tais como *choppers* de propulsão para locomotivas, inversores para aquecimento por indução e soldadura a alta-frequência. A tabela nº5.3 mostra o potencial deste produto[4].

	24 mm	34 mm	47 mm	63 mm	75 mm
<b>1.7 KV</b>	Planeado	-	Desenv.	-	-
<b>2.5 KV</b>	Desenv.	-	1500 A	Desenv.	-
<b>3.3 KV</b>	Planeado	-	Planeado	-	-
<b>4.5 KV</b>	300 A	-	900 A	1500 A	Planeado
<b>5.2 KV</b>	300 A	-	900 A	1500 A	-
<b>6.5 KV</b>	Planeado	-	Desenv.	Planeado	Planeado

Tabela nº 5.3 – Material existente em mercado e em desenvolvimento (Westcode) [4]

#### 5.4 Conclusões

A evolução nas interligações em semicondutores trouxe a possibilidade de construir semicondutores com valores nominais cada vez mais altos, características eléctricas melhores e tamanhos cada vez menores.

O empacotamento de semicondutores em *Wafer* permitiu a incorporação de dezenas de semicondutores apenas num disco. A tecnologia *Press-Pack* permitiu a interligação destas *Wafers* (“monte”), sendo conseguido assim, aparelhos com altos valores nominais e com aplicabilidade na média tensão.



## 5.5 Bibliografia

- [1] Björn Backlund e Toni Schweizer, “Recommendations regarding mechanical clamping of press pack high power semiconductors”, ABB Switzerland Ltd Semiconductors, Novembro 2002;
- [2] Björn Backlund e Evgens Tsyplakon, “Instructions for ABB StakPaks”, ABB Switzerland Ltd Semiconductors, Maio 2004;
- [3] F.Wakeman,G.Li,A.Golland “New family of 4.5KV Press-Pack IGBTs”, Westcode Semiconductores Ltd, Junho 2005;
- [4] A.Golland, F.J. Wakeman, G. Li “New 5.2 KV Extra Fast Recovery Diode for IGBT and IGCT Applications ”, Westcode Semiconductors Ltd, Junho 2005;
- [5] Björn Backlund e Toni Schweizer, “Recommendations regarding mechanical clamping of press pack high power seniconductors”, ABB Switzerland Ltd Semiconductors, Abril 2004;
- [6] Oliver Humbel, “Application-Specific Improvements on fast Recovery 4.5KV Press-Pack Rectifiers”, dissertation 2000;
- [7][http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08162002-233352/unrestricted/Chapter\\_1.pdf](http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08162002-233352/unrestricted/Chapter_1.pdf) (visitado em 2006)



## 6 As melhores soluções SOLID STATE para a qualidade da energia

Os novos desenvolvimentos nos dispositivos electrónicos de potência fazem com que sejam agora empregados em soluções para a qualidade da energia, um destes casos, são os IGCTs, que unem os benefícios dos Gate Turn-off (GTO) Thyristors com a robustez dos Insulated Gate Bipolar Transistors(IGBT). Estes dispositivos asseguram uma alta fiabilidade, eficiência e segurança inerente, mesmo debaixo das piores condições.

Avanços na inovação das soluções baseadas em dispositivos mecânicos, estão também a fornecer boas alternativas (eficiência/custo), aos equipamentos *Solid State* quando os requerimentos em termos de performance não são elevados.

A integração dos componentes distintos num único pacote, não só terá influência nos custos, como também no aumento da fiabilidade através da redução dos problemas relacionados com a *interface* e permitindo ainda que o aparelho seja completamente testado na fábrica.

Com várias soluções disponíveis para melhorar a qualidade da energia, a questão óbvia que se põe para o consumidor ou empresa face a um problema particular na qualidade de energia é: Qual o equipamento que fornece uma melhor solução? Um procedimento de escolha é apresentado no seguinte texto, secção 6.2, dando importância à aparelhagem derivada da tecnologia *Solid State*.

Para os consumidores, assuntos referentes a qualidade de energia é um tema que se vai tornar um factor cada vez mais importante na escolha de um fornecedor e que consequentemente se torna um parâmetro de elevada importância na condução da economia global. Para as indústrias de fornecimento de energia, a qualidade da energia entregue. E um factor de distinção que assegura a satisfação do cliente.

A inovação da tecnologia fornece a chave para o aumento de soluções efectivas/custos para a qualidade de energia de modo a satisfazer todas as necessidades dos consumidores de energia, melhorando a produtividade sem redução da qualidade de energia relacionada com paragem de processos e falhas dos fornecimentos de energia, e tentando maximizar lucros de operação enquanto se mantêm os clientes satisfeitos.



## 6.1 Principais problemas que afectam a forma de onda

### 6.1.1 *Cavas de Tensão*

Uma diminuição do valor eficaz da tensão á frequência industrial para durações entre meio ciclo a 1 minuto. Uma cava de tensão de 10% significa que a tensão na linha é reduzida em 10% do seu valor nominal.

### 6.1.2 *Interrupções*

A perda completa da tensão (abaixo 0.1 pu) em um ou mais condutores de fase durante um certo período de tempo. Interrupções momentâneas são definidas até 3s, interrupções temporárias estão definidas entre 3s e 60s, e interrupções contínuas duram mais do que 60s[1].

### 6.1.3 *Ondulações*

Um aumento temporário no valor eficaz da tensão ou corrente de mais de 10% do valor nominal á frequência industrial, a qual se mantêm entre meio ciclo a 1 minuto. Valores eficazes típicos de ondulações vão de 1.1 a 1.8 pu[1].

### 6.1.4 *Transitórios*

Designa um fenómeno entre dois estados estáveis consecutivos durante um intervalo de tempo que é curto comparado com o tempo de escala de interesse. Um transitório pode ser impulso, ou uma onda oscilatória amortecida, em que o primeiro pico pode ocorrer em ambas as polaridades[1].

### 6.1.5 *Sobretensão*

Quando usada para descrever um tipo específico de variação de longa duração, refere-se a uma tensão que tem um valor maior que o nominal por um período de tempo mais que um minuto. Tipicamente valores entre 1.1 to 1.2 pu[1].

### 6.1.6 *Sub Tensão*

Refere-se a uma tensão cujo valor é menor que o valor da tensão nominal por um período de tempo maior que um minuto. Tipicamente valores entre 0.8 to 0.9 pu[1].



### 6.1.7 Harmónicos

A distorção Harmónica é a forma do ruído eléctrico. Harmónicos são sinais com múltiplas frequências em relação à frequência fundamental da energia eléctrica. As correntes harmónicas causam o aquecimento de transformadores, que por sua vez provocam o aquecimento do condutor neutro que pode causar um disparo intempestivo dos disjuntores e o mau funcionamento de outros equipamentos. A distorção na forma de onda da tensão criada pelas cargas não lineares pode criar distorção da tensão alem do sistema de transporte[1].

### 6.1.8 Inter harmónicos

Tensões e correntes que têm frequências que não são múltiplas da frequência fundamental. Inter harmónicos são principalmente causados por conversores estáticos de frequência, ciclo conversores, motores de indução e aparelhos de arco, e podem induzir o efeito de *flicker* e provocar o mau funcionamento em unidades de *display*. Sinais transmitidos nas linhas de energia também são considerados Interharmónicos[1].

### 6.1.9 Ranhuras/dentes de serra

Alterações periódicas da tensão que duram menos de meio ciclo. São causados principalmente por aparelhos de electrónica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra durante o curto-circuito momentâneo entre as duas fases. As componentes da frequência associadas a este problema podem ser muito altas, e medi-las com equipamento de análise de harmónicos pode ser difícil[1].

### 6.1.10 Flutuações de Tensão

Flutuações de tensão são variações sistemáticas na formas de onda, ou uma série de tensões em que a magnitude varia, mas não excede normalmente os valores entre 0.9 e 1.1 pu. Tais variações de tensão são muitas vezes referidas como efeito de flicker. O termo *flicker* é derivado do impacto visível das flutuações da tensão nas lâmpadas. Entre as maiores causas do efeito de *flicker* nos sistemas de transmissão e distribuição são os fornos de arco[1].

A figura nº6.1 mostra alguns exemplos dos problemas referidos:

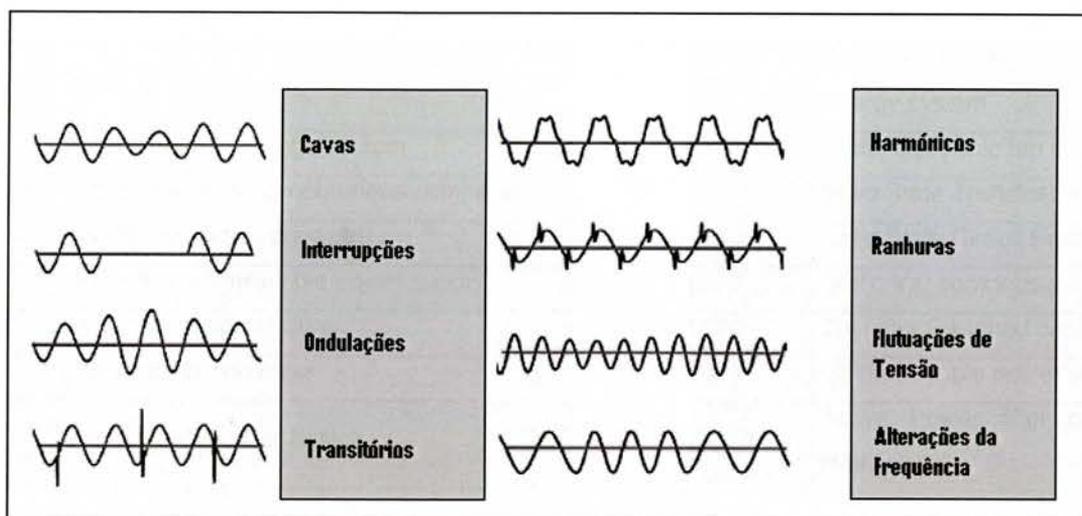


Figura nº 6.1-Problemas associados a qualidade da forma de onda [2]

## 6.2 Possíveis Soluções

Na tabela nº 6.1 são apresentadas algumas possíveis soluções para resolver os problemas especificados referentes à qualidade de energia.

Aparelhos	Cavas	Interrupções	Ondulações	Transitórios	Sobre tensão	Sub Voltagem	Harmónicos	Ranhuras	Flutuações de Tensão
SA				√					
BESS	√	√	√	√	√	√			√
DSTATCOM				√	√	√			√
DSC						√			√
DUPS	√	√	√	√	√	√			√
DVR	√		√	√					√
PFC					√	√	√		
SMES	√	√	√	√	√	√			√
SETC	√		√		√	√			
SSTS/MTS	√	√	√						
SSCB		√							
SVC	√		√		√	√			√
TSC				√		√			
UPS	√	√	√		√	√			
APF(TF)				√			√	√	

**Legenda:**

<b>SA</b>	Surge Arrester	<b>SMES</b>	Superconducting magnetic energy system
<b>BESS</b>	Battery energy storage system	<b>SETC</b>	Static electronic tap changer
<b>DSTATCOM</b>	Distribution static synchronous compensator	<b>SSTS</b>	Solid State Transfer Switch
<b>DSC</b>	Distribution series capacitor	<b>SSCB</b>	Solid State Circuit Breaker
<b>DUPS</b>	Dynamic uninterruptible power supply	<b>SVC</b>	Static Var compensator
<b>DVR</b>	Dynamic voltage restorer	<b>TSC</b>	Thyristor Switched capacitor
<b>PFC</b>	Power factor controller	<b>UPS</b>	Uninterruptible power supply
<b>MTS</b>	Mechanical transfer Switch	<b>APF(TF)</b>	Active Power filter or tuned filter

**Tabela nº 6.1- Soluções para melhorar a qualidade da forma de onda da energia e respectiva legenda[2]**

Na tabela nº 6.2 são apresentados alguns processos com actividades críticas, ou seja, os principais interessados e possíveis clientes destas tecnologias:

<i>Segmentos de industria</i>	<i>Processos industriais</i>
<b>Maquinaria de precisão</b>	Manufatura de partes de automóveis; Fabricas de construção/forjamento de grandes bombas
<b>Processos contínuos</b>	Fabricas de papel fibra e têxteis, moldes e plásticos
<b>Produtos de alta tecnologia e desenvolvimento</b>	Manufatura de semicondutores; Centros de pesquisa
<b>Informação tecnológica</b>	Centros de processamento de informação; Bancos; Telecomunicações; Radiodifusão
<b>Dispositivos de segurança</b>	Processos Perigosos; Processos químicos; Hospitais e centros médicos; Instalações militares; Grandes subestações de transmissão

**Tabela nº 6.2- Clientes com processos críticos [2]**

### 6.3 Exemplos de aparelhagem

Alguns exemplos muito gerais de aparelhos/dispositivos referidos para resolução de problemas da forma de onda vão ser apresentados de forma muito geral apenas para se ficar com uma ideia sobre o modo de actuação. A aparelhagem apresentada será aparelhagem que utiliza a tecnologia *Solid State*.

#### 6.3.1 DVR(Dinamic Voltage Restorer)

Na figura nº 6.2, está representado esquematicamente o funcionamento de um DVR, e na figura nº 6.3 está apresentado um DVR baseado em IGCTs, montado em cima de um banco de condensadores.

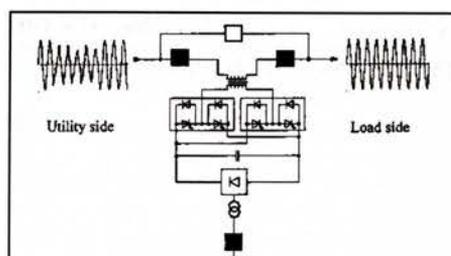


Figura nº 6.2- Princípio de funcionamento do DVR [2]

Quando uma queda, ou uma ondulação ocorre do lado do “serviço”, o *DVR* responde injectando uma tensão AC em série, compensando a diferença entre o defeito detectado e a forma da tensão desejada[3].

Uma DUPS(Dynamic uninterruptible power supply), é usada para evitar interrupções de alimentação e pode ser usada em conjunto com o DVR.[4 e 6]

Em Agosto de 2000, foi instalado em Israel o maior DVR actual, dois sistemas de 22.5 MVA, destinados a proteger uma instalação de fabrico de semicondutores[5].

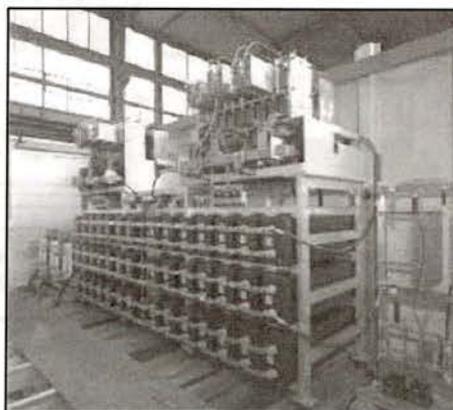


Figura nº 6.3- Exemplo de um DVR baseada em IGCTs, montado em cima de um banco de condensadores,[6]

### 6.3.2 DSTATCOM

A **DSTATCOM**, figura nº 6.4 pode ser usada para controlo da tensão e da Potência Reactiva. É um aparelho ligado em shunt, baseado em conversores de Tensão PWM. Sob condições normais de fornecimento de energia, pode funcionar como fonte de energia reactiva, e no caso de flutuações de tensão, a DSTATCOM responde injectando correntes com a apropriada amplitude e ângulo de fase. A atenuação do efeito de flicker pode ser descrito na utilização destes dispositivos nos fornos de arco.

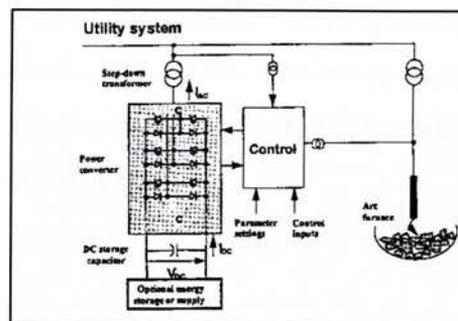


Figura nº 6.4- Esquema de uma DSTATCOM[2]

### 6.3.3 Solid-State Transfer Switch (SSTS)

Outro dispositivo é o **solid-state transfer switch (SSTS)**, o qual vem substituir o equipamento convencional “autotranfer”, que comuta as cargas de uma alimentação para outra. A transferência pode ocorrer em alguns milissegundos e sem qualquer efeito adverso sobre as cargas. Isto é particularmente interessante para imunizar cargas muito sensíveis e cargas de alta importância. Claro que é necessário uma alimentação secundária com capacidade suficiente para alimentar as cargas.

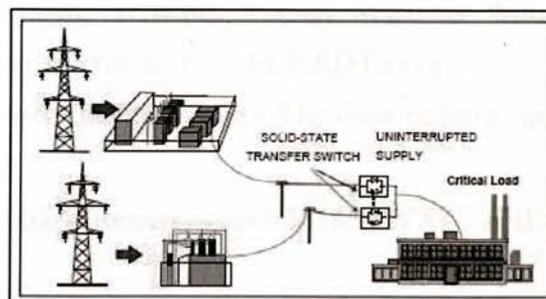


Figura nº 6.5 –Esquema do sistema global Solid State Transfer Switch[2]

Este aparelho será analisado com mais atenção no capítulo seguinte. Serão analisadas topologias e modos de funcionamento, bem como a constituição base.

## 6.4 Conclusões

A tecnologia *Solid State* utiliza as potencialidades dos semicondutores de modo a que as aparelhagens da média tensão possam evoluir, tornando-se mais adequadas para a



resolução dos vários problemas referentes à forma de onda, que afectam os processos críticos.

A evolução destas aparelhagens torna agora possível um controlo e correcção deste tipo de problemas de modo mais eficaz. Estas aparelhagens devido a tecnologia *solid state* são agora mais rápidas, mais robustas, mais fiáveis, o que vai de encontro com as necessidades cada vez mais exigentes dos consumidores de energia.

## 6.5 Bibliografia

- [1] L.A.Schienbein, J.G.Desteese, “Distributes Energy Resources, Power Quality and Reliability-Background”, Pacific NorthWest National Laboratory, Janeiro 2002;
- [2] K.Chan, A.Kara,P.Daehler e outros, “Innovative System solutions for Power Quality Enhancement” ABB High Voltage Techonologies Ltd & ABB Industrie AG & ABB Secheron SA, Fevereiro 1999;
- [3] Y.H.Chung, G.H.Kwon, T.B.Park, K.Y. Lim, “Dynamic Voltage Regulator With Solid State Switched Tap Changer” LG Industrial Systems Co. Ltd, R&D Center;
- [4] Power electronics systems by ABB, “Power Quality Systems-The tools to bring up productivity”1998;
- [5] Power electronics systems,”Dynamic Voltage Restorer-Israel(2x22.5MVA)”, ABB Automation, Janeiro 2001;
- [6] W. Raithmayr, P. Daehler, M. Eichler, G. Lochner “Customer reliability improvement with a DVR or a DUPS”,ABB Industrie AG, Novembro 1998;



## 7 Disjuntores Solid State e Limitadores de Corrente

### 7.1 Introdução:

Na sociedade moderna são necessárias fontes de energia de alta fiabilidade. Falhas de energia causam vários problemas e as UPS não são uma solução viável para todos os problemas.

A tecnologia actual para eliminar curto circuitos é baseada num sistema de protecção de máximo de intensidade e disjuntores, que podem incluir reengate.

Os disjuntores na média tensão permitem um controlo seguro sobre os curtos circuitos e, usando temporização, os disjuntores podem ser coordenados de modo a obter um nível alto de selectividade e de protecção.

Este sistema de protecção permite uma alta disponibilidade da rede. Durante um curto-circuito, uma cava de tensão pode ser notada localmente na rede de media tensão, o que provoca a falha de cargas sensíveis, mesmo que a tensão volte ao seu valor normal em poucos segundos.

Como mencionado, as soluções que actualmente se usam para fazer a protecção contra os curtos circuitos ou sobrecargas são essencialmente disjuntores mecânicos. O seu funcionamento é baseado na detecção do curto-circuito ou de uma situação de uma sobrecarga por um relé. Após a detecção o interruptor abre mecanicamente para eliminar o defeito, consequentemente um arco ocorre. Como a corrente apenas pode ser cortada na sua passagem natural por zero, e assumindo que o plasma é significativamente arrefecido para evitar reignição (ver capítulo 3), temos como resultado que eliminar um curto-circuito leva pelo menos 100 ms (sem tempo de detecção), ou seja vários períodos.

## 7.2 Sistema de Protecção actual

Uma subestação típica de distribuição está representada na figura nº 7.1. As características de operação de um OCR (*over current relay*) devem ser tais, de modo a que o sistema de protecção do consumidor possa ser representado como o da figura nº 7.2. O tempo instantâneo de actuação de um OCR é normalmente entre 0.2 a 0.5 segundos. Quando o curto-circuito ocorre numa linha do sistema de distribuição de energia, o disjuntor que está ligado na linha em que ocorreu o defeito, interrompe a corrente de defeito após o tempo de actuação do relé. Após um tempo pequeno predeterminado, os disjuntores que abriram provocando a perda de tensão da linha, fecham novamente (reengate), para restabelecer o fornecimento de energia. Se o curto-circuito ainda se mantém, a corrente de curto-circuito flui novamente, provocando o disparo do disjuntor uma vez mais (figura nº7.3).

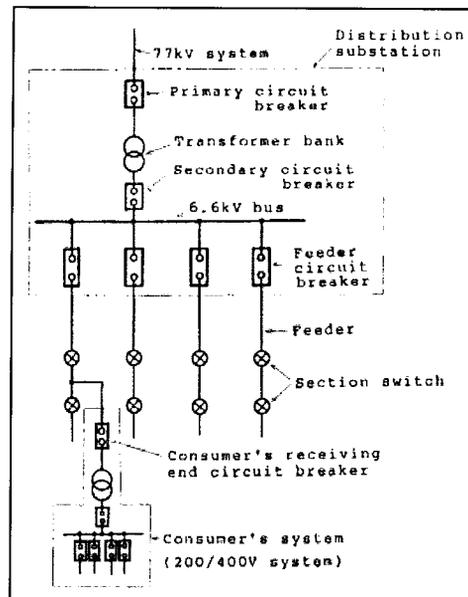


Figura nº7.1- Sistema típico de distribuição de energia[1]

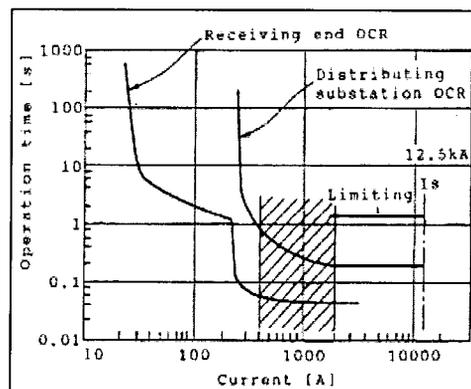


Figura nº7.2 – Curvas Características de actuação de relés de max. intensidade[1]

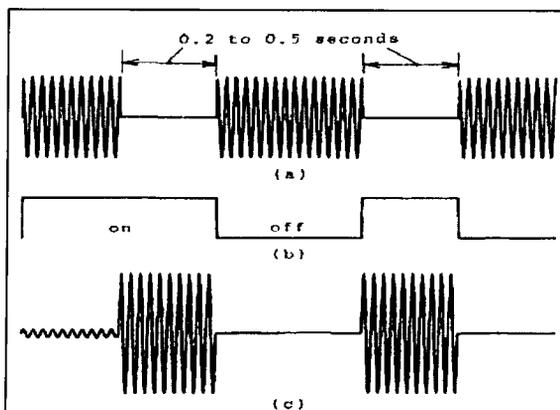


Figura nº7.3 – Formas de ondas das grandezas envolvidas num curto-circuito[1].  
 (a) – Forma de onda da tensão;  
 (b) – Forma de onda da operação do disjuntor da linha de alimentação;  
 (c) – Forma de onda da corrente de defeito;



### 7.3 Disjuntores Solid State e Limitadores de corrente

Um disjuntor *Solid State* baseado em semicondutores de alta potência, oferece enormes vantagens quando comparado com as soluções convencionais, uma vez que é capaz de comutar em poucos  $\mu\text{s}$ , uma comutação suficientemente rápida, de modo a manter a tensão dentro de limites aceitáveis. Assim, a corrente máxima, nunca irá atingir os valores normais de curto-circuito e a distorção da tensão apenas durará à volta de 100 $\mu\text{s}$ [2].

Um disjuntor *Solid State* fornece uma excelente resposta em termos de velocidade, mas tem sido considerado como impraticável devido à necessidade do uso de demasiadas unidades *Solid State* em série, pois cada unidade individual possui uma tensão nominal baixa.

Elementos *Solid State* de tensões mais elevadas e alta capacidade de comutação, foram desenvolvidos nos últimos anos (Capítulo 4), e a sua aplicabilidade em disjuntores para a média tensão é uma realidade cada vez mais próxima, mas para isso é fundamental a selecção e optimização de topologias de disjuntores electrónicos.

Vários tipos de limitadores de corrente já foram propostos, mas a maioria deles não foi comercializada devido à sua fiabilidade baixa, alto preço ou tamanho elevado.

O problema do aumento das correntes de curto-circuito tornou-se um problema importante para os operadores dos sistemas de potência. Existem agora indicações seguras do aumento do interesse neste tipo de tecnologias capazes de limitarem a corrente.

O aumento da produção de energia e as interligações de redes, leva a correntes de defeito mais altas. O uso de FCL (*Fault Current Limiter* - Limitador da corrente de defeito) permite que os equipamentos permaneçam em serviço mesmo em casos que a corrente de defeito exceda os valores pré determinados das correntes máximas admissíveis.

Os limitadores de corrente estão divididos em duas categorias. Uma utiliza as características não lineares do material limitador da corrente, quando uma corrente de valor elevado se estabelece a resistência torna-se mais alta e limita a corrente.

A outra usa um interruptor rápido, se uma falha ocorre, o interruptor comuta a corrente para um conjunto de resistências em paralelo, que limitam a corrente.



A distinção entre os diferentes tipos de FCLs também pode ser realizada comparando medidas activas/passivas do limitador da corrente de defeito (Tabela nº7.1).

Os FCL Activos podem ser caracterizados e divididos mediante as seguintes características:

- Capacidade apenas para limitar a corrente;
- Capacidade de limitação da corrente e interrupção;
- Existência de disparo próprio (*trigger*);
- Disparo é realizado por aparelhagem de controlo externa;

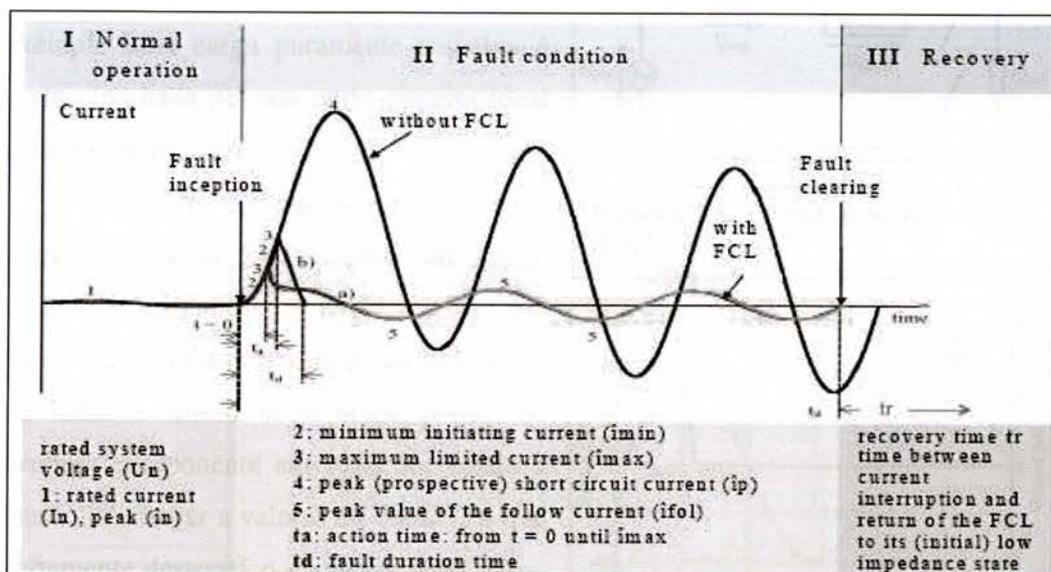
Passivas Aumenta a impedância debaixo de condições normais e de defeito		Activas Baixa impedância para a carga nominal e rápido aumento da impedância para defeitos	
Separação de redes; Divisão de barramentos; Introdução de níveis de tensão mais elevados;	Transformadores com correntes de curto-circuito altas; Limitação da corrente de defeito para motores;	Limitadores de corrente para fusíveis de alta tensão; Limitadores da corrente de serviço;	<b>Novas introduções:</b> SCFCL; PTC; FCL solid state; FCL Híbrido, etc.
<i>Medidas Topológicas</i>		<i>Medidas aplicadas a aparelhagens</i>	

**Tabela nº 7.1 – Vista global das medidas para limitadores de corrente de defeito**

Deve ser notado que ao invés de usar FCL, os problemas associados com o aumento do nível das correntes de defeitos podem ser contornados com medidas como:

- O aumento dos valores nominais de aparelhos de comutação e outros equipamentos;
- A realização de mudanças na topologia da rede, ex.: divisão de redes ou barramentos;
- A introdução de níveis mais altos de tensão;
- O uso de estratégias complexas de controlo, como sequências rápidas;

Na figura temos a forma de onda típica de uma corrente de defeito ilimitada e também a influência nesta forma de onda de aparelhos FCL com e sem capacidade de interrupção de corrente de defeito aplicados ao sistema.



**Figura nº7.4 –Forma de onda típica da corrente de defeito e características**  
 (a) FCL sem interrupção da corrente de defeito  
 (b) FCL com interrupção da corrente de defeito

### 7.3.1 Aplicabilidade em sistemas de distribuição de energia

Neste texto serão analisados e comparados diferentes semicondutores, considerando os requerimentos de um disjuntor *Solid State* integrado numa rede de MT de 20KV. Baseado nas características destes semicondutores, varias topologias de interruptores são abordadas, as quais serão comparadas em aspectos técnicos e económicos.

As soluções clássicas, são desenhadas para fornecer segurança e alta disponibilidade. Neste trabalho mostrar-se que um disjuntor *Solid State* pode aumentar significativamente a qualidade de energia e que é capaz de interromper defeitos em redes de média tensão com várias fontes de energia. É demonstrado que um disjuntor *Solid State* oferece significativas vantagens quando comparado com as soluções actuais e que pode ser usado actualmente nos sistemas de energia de MT.

Para se compreender o comportamento fundamental do interruptor (semicondutor), utilizamos um circuito equivalente de 1 fase, figura nº 7.5.

A rede é representada pela fonte de tensão e pela indutância da linha. Neste exemplo uma carga puramente resistiva é curto circuitada por um curto-circuito ideal com resistência zero.

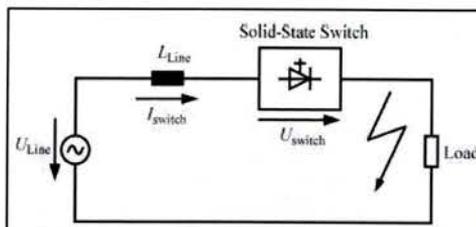


Figura nº7.5 - Circuito equivalente de 1 fase [2 e 3]

Aos 5 ms o curto-circuito ocorre e a corrente aumenta muito rápido, até que o circuito é desligado.

Devido à energia armazenada na indutância da linha a tensão sobe nesse ponto. Se nenhum componente adicional for usado a tensão irá chegar a valores de 100KV, o que certamente destruirá o disjuntor *Solid State*. Para reduzir o pico de tensão, têm de ser ligados circuitos de limitação da tensão em paralelo com o semicondutor (por exemplo: *high energy Varistores*).

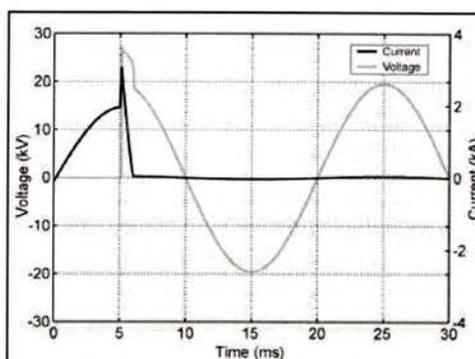


Figura nº7.6 – Formas de onda da tensão e corrente durante o disparo (turn off) [2 e 3]

Devido a esta medida, a amplitude da tensão durante o disparo (*turn-off*) é limitada, pelo que o disjuntor não é danificado, consequentemente a indutância da linha fica desmagnetizada, resultando no decréscimo da corrente até zero.

#### 7.4 Princípios do limitador de corrente Solid State

Para prevenir a queda da tensão num sistema de distribuição de energia, é necessário que os disjuntores actuem mal o defeito ocorra. Tendo em conta a selectividade, isto não acontece, os disjuntores são temporizados para que os que estão mais perto do defeito actuem primeiro. Se a corrente de defeito for reduzida, a queda de tensão pode ser ignorada, uma vez que a amplitude da tensão é derivada da corrente de defeito e da impedância da rede. Neste ponto de vista os limitadores da corrente estáticos

(*Solid State Current Limiter*) podem ser muito úteis para prevenir fenómenos de queda de tensão.

A constituição base de um limitador de corrente é:

- Um interruptor rápido *Solid State*;
- Impedâncias limitadoras de corrente;
- Um elemento limitador da tensão;
- Um interruptor mecânico em série;
- Um detector máximo de intensidade;
- Um dispositivo de controlo;

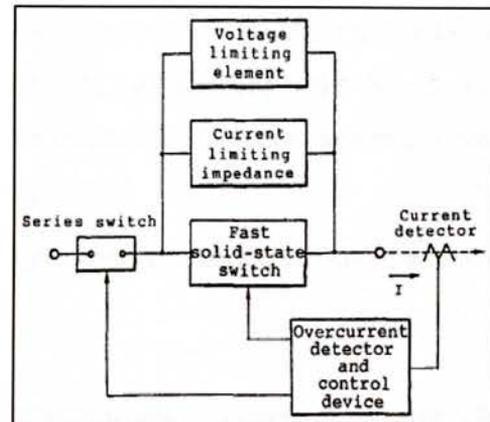


Figura nº7.7 – Constituição básica de um Limitador de Corrente [1]

A impedância limitadora da corrente é ligada em paralelo com o interruptor rápido *Solid State* para que a corrente continue a fluir num nível limitado após o *solid state switch* interromper a corrente de defeito. Os GTO Thyristors são usados como disjuntores *solid state* rápidos, pois conseguem interromper a corrente instantaneamente após receberem o sinal *turn off*. Uma súbita interrupção da corrente tende a causar uma tensão demasiado elevada no circuito, e o elemento limitador de tensão previne isso.

O interruptor mecânico em série é usado para comutação de cargas e isolamento. O detector de máximo de corrente e dispositivo de controlo detecta um defeito e produz sinais *turn off* e *turn on* para o controlo do GTO Thyristor.

Em resumo, os vários passos do funcionamento são descritos como:

- Deteção do defeito;
- Comutação da corrente de

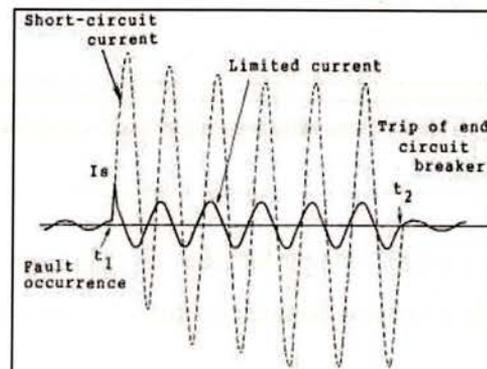


Figura nº7.8 – Ilustração da variação da corrente de curto circuito no limitador de corrente Solid State[1].  
— Corrente Limitada  
-----Corrente de defeito em perspectiva

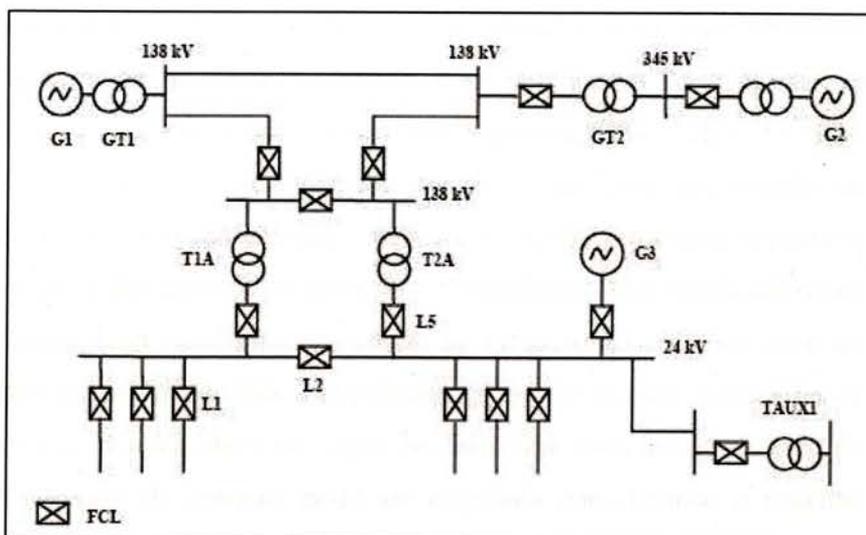
defeito;

- Limitação da corrente;
- Operação de reset automático;
- Operação de comutação série;

Todos estes componentes juntos são vistos como uma unidade. O limitador de corrente, foi construído pela ligação de aparelhos de potência em série. No mesmo sentido o número em série pode ser variado com a respectiva tensão da subestação, mas num futuro próximo será utilizando apenas um dispositivo.

Recentemente um limitador de 15KV foi proposto usando GTO(Gate Turn Off) Thyristor e uma impedância em paralelo[6].

Dependendo da técnica de limitação de corrente usada, os conceitos de protecção têm de ser sempre adaptados para se assegurar uma selectividade na rede. A relação entre limitadores da corrente de defeito (FCL) e esquemas de protecção deve



**Figura nº 7.9 – Rede típica transporte de energia com diferentes níveis de tensão**

ser realizada tendo em conta a protecção e a topologia da rede, tal como o impacto de diferentes tecnologias e novos conceitos de protecção com os actuais, selectividade e inovações na configuração da rede.

O objectivo é analisar as principais dificuldades da aplicação dos FCLs numa rede eléctrica baseada numa rede típica de distribuição (Figura 7.9), em termos de localização, nível de fiabilidade e coordenação do tempo de eliminação de defeitos.



O aparelho de protecção, neste exemplo relé de distância, recebe um sinal de corrente e tensão do fim da linha de transmissão e envia o sinal de disparo para os disjuntores dos extremos da linha.

Sem um FCL presente, o relé dá ordem de disparo aos disjuntores se existirem falhas dentro dos primeiros 80% da linha, contudo, se um FCL é introduzido entre o PT e a linha, se um defeito ocorre o relé interpreta a impedância do FCL como fazendo parte da impedância da linha, e é enganado pela impedância medida (fora da zona de protecção) e não dá ordem de abertura aos disjuntores.

Se o PT é colocado entre o FCL e a linha o relé é capaz de determinar correctamente a impedância de defeito da linha, e dar ordem de abertura aos disjuntores.

## 7.5 Topologias Solid State Switch

O disjuntor consiste em vários módulos, o que permite obter uma adaptação flexível para diferentes níveis de tensão e corrente. Por exemplo, em Portugal existem vários níveis diferentes na rede de media tensão, nomeadamente 7KV, 12KV, 17.5KV, 24KV e 36KV. Outra vantagem da utilização de vários módulos em relação ao funcionamento de um simples modulo é que é menos caro mudar um único dispositivo do que o interruptor completo, além de permitir obter redundância, logo fiabilidade mais alta (capítulo 5). Como já foi mencionado, a tensão de bloqueio do disjuntor deve ser mais alta do que a tensão máxima da rede. Foi provado [8] que um disjuntor nas redes de 20KV com redundância incluída, deve ser capaz de lidar com uma tensão de pico de pelo menos 30KV. A taxa da corrente pode ser calculada considerando a máxima potência do transformador de média tensão.

### 7.5.1 Semicondutores Analisados

Como já mencionado a tensão nominal atinge valores bastante mais altos que os valores nominais da máxima capacidade de bloqueio dos semicondutores actuais.

Consequentemente, vários semicondutores têm sido ligados em série, e como a fiabilidade é um aspecto da maior importância, aparelhos redundantes devem ser integrados. Deve ser notado que dispositivos em *press-pack* (capítulo 5) são preferidos



pois garantem um estado de curto-circuito em caso de avaria(ver capítulo 5). Consequentemente é assumido que o interruptor continua operacional mesmo se um dos semicondutores falhar.

Actualmente existem 3 Semicondutores que são capazes de preencher estes requerimentos, o IGBT, o GCT e o GTO.

Em contraste com as aplicações em inversores, as perdas de comutação nestes dispositivos são um assunto de importância reduzida. Aqui, o comportamento e perdas em condução são essenciais. Como resultado o IGBT está em desvantagem nas aplicações como interruptor de circuitos. Especialmente, as perdas em condução do IGBT são significativamente mais altas que as perdas do thyristor (mais do que três vezes por aparelho). Contudo, o IGBT tem a vantagem de como transístor limitar a corrente automaticamente. A partir desta altura, a corrente não pode exceder um certo valor. Em contraste com isto, a corrente não é limitada nos aparelhos tipo Thyristor e a capacidade de *turn-off* é limitada.

Deste modo, o tempo de detecção tem de ser curto de modo a assegurar um *turn-off* seguro. Na figura nº 7.10, estão representadas as perdas relativas ao estado on-state dos diferentes semicondutores, o GCT especial(4.5 kV) com perdas extra - baixas no estado *on state*, o GCT normal de 4.5KV, o GCT de 6KV, o GTO, e o IGBT. Como os aparelhos de 6KV necessitam de poucos semicondutores colocados em série, as perdas do interruptor são escaladas relativamente ao número de semicondutores necessários.

Torna-se óbvio que o thyristor baseado em semicondutores, tais como GCT e GTO, são uma escolha muito melhor para um *Solid State switch* devido às suas perdas mais baixas no estado *on-state*. Em complemento é necessário um *snubber* para o *turn-on*, para o GTO e GCT sempre que a indutância parasita da alimentação do transformador não for elevada o suficiente para assegurar um baixo crescimento  $di/dt$ .

Quando apenas se tem em atenção as perdas, apenas o GCT especial(3kW a 2 kA) será escolhido para o interruptor de circuitos. No entanto apesar das perdas do GTO serem

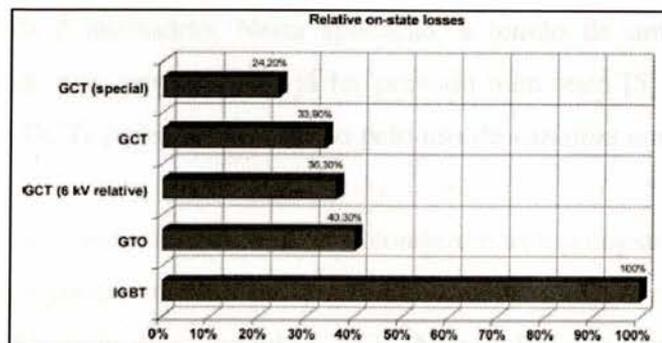


Figura nº7.10 – Perdas em condução relativamente ao IGBT[2 e 3]



mais altas, os custos de material são mais baixos, então para o projecto do *Solid State Switch*, o GTO também deve ser considerado. Todos os aparelhos comparados são semicondutores de 4.5KV, no entanto semicondutores de 6-kV e 9-kV já estão disponíveis. A razão para escolher estes dispositivos de 4.5-kV foi baseada nas perdas. Como mostra a figura nº7.10, o GCT de 6-kV disponível tem perdas elevada quando comparado com o especial de 4.5KV. Note-se que os GTOs de 4.5-KV e GTOs de 6-kV oferece perdas similares.

### 7.5.2 Topologias de Módulo

A maioria dos semicondutores disponíveis actualmente são assimétricos, devido as perdas on state dos semicondutores simétricos existentes serem altas. Consequentemente, diodos adicionais tem de ser ligados em série. Como não são necessários diodos de recuperação rápida, devem ser usados diodos rectificadores que oferecem perdas de condução mais baixas.

Para reduzir o número de aparelhos e com isso aumentar a fiabilidade, semicondutores activos de 4,5KV são combinados com diodos de 9KV. Assim um módulo é constituído por dois GCTs ou GTOs com um diodo rectificador.

Já foi verificado que *varistors* adicionais[5] são necessários para limitar a tensão durante o *turn-off*. Dado de que o GTO não é capaz de desligar (*turn-off*) sem um circuito auxiliar, a capacidade e a resistência tem de ser ligadas na formação em paralelo. Em geral, este circuito *snubber* é também necessário para as conexões série dos GCTs para assegurar uma distribuição da tensão simétrica entre os semicondutores. No entanto, para apenas um GCT não é necessário. Nesta aplicação, a tensão de um dispositivo pode ser limitada apenas pelo *varistor*, isto já foi provado num teste [5]. Como consequência o *snubber* dos GCTs pode ser substituído pelo uso de *varistors* em paralelo com cada semicondutor.

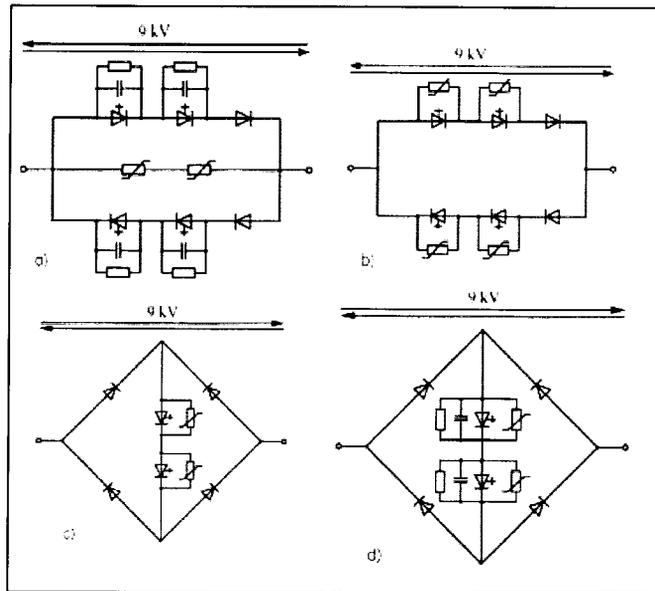
As especificações técnicas e o principal alvo dos custos conduzem as topologias das figuras nº 7.11(a) e (b). A topologia (a) consiste em quatro GTOs com *snubbers* e dois diodos. A máxima tensão de bloqueio deste modulo é 9KV. Na topologia (b) do GCT os *snubbers* foram substituídos por dois adicionais *varistors*. Nas topologias apresentadas, cada semi-onda da corrente na rede flui através da parte superior ou da

parte inferior do circuito. Uma terceira topologia foi desenvolvida, na qual se reduz ainda mais o numero de semicondutores numa tentativa de reduzir os custos.

Esta topologia usa um rectificador de diodos para reduzir o número de dispositivos activos, como mostrado para a solução de GCT na figura nº 7.11(c).

Para o GTO, a topologia (d) é muito similar, como é mostrado na figura nº 7.11 (d). Comparado ao circuito de GCT, um circuito *snubber* é adicionado de modo similar a topologia (a).

O numero total de semicondutores é constante em



**Figura nº7.11 – Soluções de topologias série e rectificadas para o GTO e GCT [3 e 4]**

todas as topologias, mas na topologia (c) e topologia (d) dois semicondutores activos são substituídos por dois diodos, levando a redução de custos em material. Contudo, estas topologias tem aumentado as perdas on-state.

O disjuntor completo consiste em três módulos para garantir bloqueio completo da tensão, mas para assegurar alta fiabilidade, redundância deve ser também integrada no disjuntor *solid state*.

Para este propósito, um módulo adicional é usado. Consequentemente, o disjuntor requer quatro módulos em série para a rede de media tensão de 20KV.

### 7.5.3 Comparação das diferentes topologias

A maior distinção entre as topologias pode ser encontrada nas diferenças entre os custos e perdas *on-state*. Para assegurar a integração de interruptores de electrónica de potência nos sistemas existentes, é essencial considerar os custos das diferentes soluções.

Nesta secção, as diferentes tecnologias são primeiro comparadas excluindo o aspecto da fiabilidade, o que é avaliado logo de seguida.

### 7.5.3.1 Custos das Diferentes Topologias:

Todas as topologias apresentadas são comparadas considerando os custos para o próprio disjuntor e os custos durante o funcionamento, causados pelas perdas.

Embora o módulo do rectificador [Figura nº 7.11 (c) e (d)] consistir no mesmo numero de semicondutores, consiste em poucos aparelhos activos e então a primeira vista é a solução mais barata. Contudo, as perdas de condução são maiores, devido ao diodo adicional que foi usado e que produz perdas adicionais em cada meio período da corrente da linha.

Em geral, as perdas do semiconductor podem ser estimadas por:

$$P_V = I_{rms}^2 * r_t + \bar{I} * V_{TO}$$

(com  $r$  como resistência,  $V_{TO}$  como tensão de entrada, e  $I$  como o valor de pico da corrente sinusoidal a 50HZ)

$$I_{rms,series} = \frac{\hat{I}}{2}; \bar{I}_{series} = \frac{\hat{I}}{\pi}$$

$$I_{rms,rectifier} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}; \bar{I}_{rectifier} = \frac{2}{\pi} * \hat{I}$$

Relativamente ao rectificador e a topologia série, deve ser notado que a corrente rms e a corrente semiconductor activo diferem. Este afastamento ocorre apenas durante meio período devido as conexões série.

Usando estas equações para um interruptor de 36KV (4 módulos), as perdas para as três fases são representadas nas equações seguintes. Neste caso, a resistência e a tensão de entrada do GCT são usadas. Para o GTO estes valores têm de ser adaptados.

$$P_{V,Tot,a,b} = 3 \left( 2 * \hat{I}^2 * (2 * r_{t,GCT} + r_{t,D}) + \frac{8}{\pi} \hat{I} * (2 * V_{TO,GCT} + V_{TO,D}) \right)$$



$$P_{V,Tot,c,d} = 3 \left( 4 * \hat{I}^2 * (r_{t,GCT} + r_{t,D}) + \frac{16}{\pi} \hat{I} * (*V_{TO,GCT} + V_{TO,D}) \right)$$

### 7.5.3.2 Fiabilidade das diferentes topologias:

Actualmente a fiabilidade é da maior importância em todos os campos técnicos, especialmente quando falamos na electrónica de potência. Na seguinte subsecção, as diferentes fiabilidades das topologias serão analisadas. Contudo, não se ira entrar em detalhes, focando apenas a disponibilidade do disjuntor e os custos efectivos.

Se um módulo do disjuntor redundante falha, o interruptor continua operacional mas para assuntos de segurança este módulo deve ser substituído, consequentemente custos adicionais de investimento devem ser considerados.

A fiabilidade dos aparelhos é medida em falhas por tempo(FIT) ou tempo entre falhas(MTBF), valores dados pelos fabricantes.

No nosso caso, a falha de um aparelho resulta no mau funcionamento de um módulo. O disjuntor continua a funcionar mas como já mencionado acima este módulo deve ser substituído. Na tabela 7.2 o FIT e o MTBF das diferentes topologias são demonstrados para um disjuntor trifásico.

Topologia	FIT	MTBF
(a) GTO (série)	9840	11.6 Anos
(b) GCT (série)	5040	22.6 Anos
(a) GCT (rectifier)	2880	39.6 Anos
(a) GTO (rectifier)	5280	21.6 Anos

Tabela nº7.2 -Estatísticas da fiabilidade das topologias[3]

As topologias GTO apresentam taxas de falha mais altas devido as capacidades adicionais do *snubber*. Para o próprio semiconductor, os valores entre eles são bastantes similares, contudo as capacidades tem uma baixa fiabilidade e se uma delas falha o módulo será destruído na próxima sequência de *turn off*.

## 7.6 Exemplo de um limitador de 69KV em desenvolvimento



Figura nº7.12 – Limitador de Corrente para 69KV (EPRI) [8]

Tecnologia em desenvolvimento pelo **EPRI (Electric Power Research Institute)** [8]

A figura representa um *Solid State Current Limiter* de 69 KV, contem os seus módulos de potência dentro de um tanque de óleo. Esta nova tecnologia faz com que este tipo de aparelhos apenas apresente metade do peso do que os seus antecessores.

Níveis associados a corrente de defeito estão sempre a aumentar, o que pode ser dramático quando a geração da energia é realizado perto de uma subestação.

O *Solid State Current Limiter* pode proteger uma grande quantidade de disjuntores existentes, permitindo o seu uso, evitando a aquisição de novos equipamentos/instalações com valores nominais mais altos.

A flexibilidade de controlo dos SSCL permite suavizar a severidade dos transitórios associados as operações de fecho e de reengate. Evitando assim a danificação de transformadores, de DSTs, e protegendo equipamentos e pessoas no local do defeito.

A classe de SSCL irá fornecer uma (*Sub-Cycle*) limitação de corrente instantânea, aliviando as condições de curto-circuito nos dispositivos e limitando as correntes de defeito das fontes. Antes de interromper a corrente de defeito, o SSCL insere rapidamente uma resistência para absorver a energia.

O SSCL pode também limitar a corrente súbita (capacidade *soft-start*), mesmo em cargas capacitivas, através da colocação gradual da corrente em fase. A capacidade de limitação da corrente melhora o isolamento do defeito e a protecção da rede.

Esta capacidade também ajuda a resolver situações críticas que de outra maneira causam cavas de tensão, ondulações e mesmo falhas completas de energia. Ao mesmo tempo o fecho pode ser temporizado de modo a minimizar os transitórios.

A utilização de FCL, permite uma rápida integração de novos pontos de geração na rede.

O SSCL é baseado numa tecnologia que usa um condensador de comutação para desligar a corrente de defeito.

Avanços recentes em aparelhos relativamente a taxa de *turn-off* da corrente, tornou possível o uso de um circuito simples, que elimina a necessidade da capacidade de comutação. Isto reduz o tamanho e o peso do equipamento por um factor de 2 e uma redução de custos associada.

Qual a melhor tecnologia que melhor se adapta para o uso num SSCL de 69KV?

A pesquisa inclui o Super GTO e o ETO (figura nº 7.13). Ambos os dispositivos são baseados em thyristors mas com aparelhos electrónicos adicionados para funções de controlo para obter tempos de *turn-on* e *turn-off* mais rápidos, dispositivos mais eficiente e que requererem menor energia na gate.

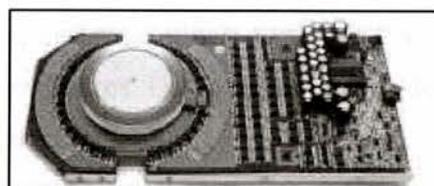


Figura nº7.13 – ETO[10]

Uma vez que estes dispositivos estão situados nos 6KV cada[10], é necessário usar módulos que contem ligações em série para obter os 69KV. As características mais importantes a obter são uma corrente estável de 3KA e com uma corrente de defeito em perspectiva de 80KA Rms simétrica.

Benefícios que SSCL oferece:

- Uma rápida solução para a corrente de defeito: SSCLs ajudam as empresas a suavizar o aumento da incerteza de uma nova construção de uma unidade geradora de energia;
- Uma limitação da corrente de defeito; uma redução do aumento abrupto da corrente de arranque (soft-start), mesmo para cargas capacitivas[11];
- Um aumento da qualidade de energia e redução de saídas de serviço.
- A capacidade de melhorar o isolamento do defeito, e controlar a rede de modo a evitar cavas, ondulações e falhas de energia;
- Uma minimização do impacto ambiental: minimização da necessidade de disjuntores SF6, aparelhos SSCL iram ajudar a diminuir o impacto ambiental do gás que provoca efeito de estufa.

## 7.7 Aplicações Reais(Experiência no terreno)

### 7.7.1 Supercondutor FCL de 10 kV demonstrado na Alemanha

Em Março de 2004 o supercondutor FCL de 10KV (CURL 10) foi instalado numa subestação de 10KV na Alemanha[12]. O limitador de corrente é acoplamento ao barramento. A corrente que passa no barramento pode chegar até 600A. A corrente de curto circuito depende dos transformadores envolvidos, mas pode atingir o valor de  $2 \times 7 \text{ kA} = 14 \text{ kA}$ , no caso de o defeito se dar perto dos barramentos. Devido a introdução do FCL a corrente pode ser limitada até cerca de 8KA(Valor de pico)[12].

Este protótipo entrou em serviço em Abril de 2004, a performance do *cooler* no início foi insuficiente, mas após um processo de optimização obteve-se os resultados esperados[12]. Contudo, até agora não ocorreu nenhum curto-circuito que requeresse o processo de limitação.

O equipamento trifásico consiste numa ligação série de 30 módulos de tubos de material supercondutor BSCCO 2212 por fase[12]. Na figura 7.14 estão representadas as principais dimensões, as propriedades dos materiais e o layout fundamental. Os tubos longos de 30cm são formados por condutores em espiral de 5,4m cada. O tubo supercondutor é mecanicamente estabilizado por um tubo isolador de fibra, reforçado com material *epoxy*. No supercondutor é soldado um *shunt* de uma liga de material CuNi. As lacunas entre as espirais são preenchidas com material isolante.

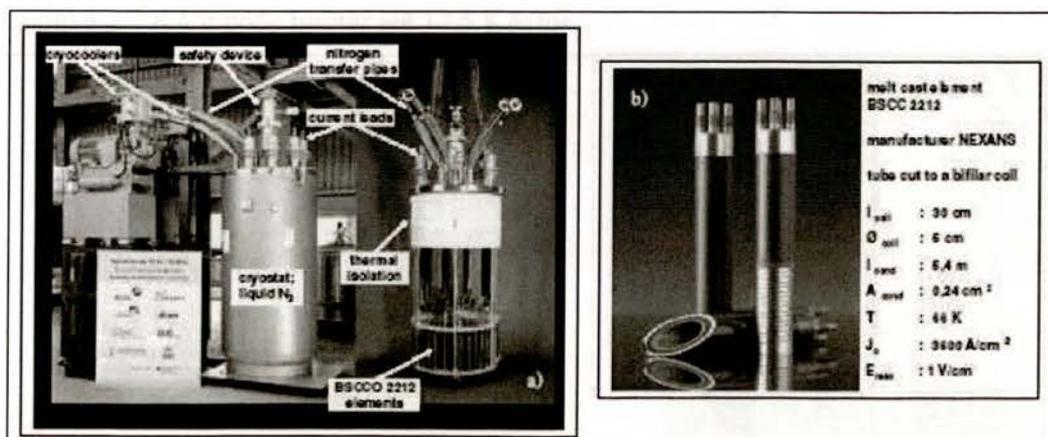


Figura nº7.14 – a) Equipamento completo de um supercondutor FCL  
 b) Propriedades do material e layout de um tubo supercondutor

Os módulos limitadores de corrente são montados em pratos de material isolante. A unidade completa fora do recipiente de alojamento é mostrada no lado direito da figura 7.14a). Os módulos limitadores de corrente são fixados a armadura (recipiente de alojamento) na qual os casquilhos da corrente e o chumbo para o nitrogénio líquido são também montados. O equipamento completo é instalado dentro do recipiente (armadura/cuba) com nitrogénio líquido semi arrefecido a uma temperatura de  $T=66K$  (Figura 7.14a), lado esquerdo).

O desenho dieléctrico do sistema corresponde para uma frequência nominal a 28KV e uma tensão para descargas atmosféricas de 75kV entre uma fase e a armadura ligada a terra[12]. A armadura foi desenhada para uma pressão máxima de 10 bar, sendo equipada com uma válvula de alívio de pressão.

### 7.7.2 Teste de um FCL no Japão

Um condutor de arco do tipo FCL, figura 7.15a)[12], foi desenvolvido pela CRIEPI. Foi testado numa central de distribuição Tohoku Electric Power Co. O teste no terreno foi realizado por 2 anos e 4 meses desde Dezembro de 98. Antes do teste no terreno, foram realizados durante um mês, testes de interrupção de tensão, testes de operação em ambientes de baixa temperatura, e todos os outros de rotina de modo a assegurar a performance e a funcionalidade do FCL.

Os níveis de limitação da corrente de defeito foram fixados de modo a harmonizar os relés de protecção existentes. O FCL começa a limitar a corrente de defeito a 2.7 KA e pode limitar até 12.5 KArms.

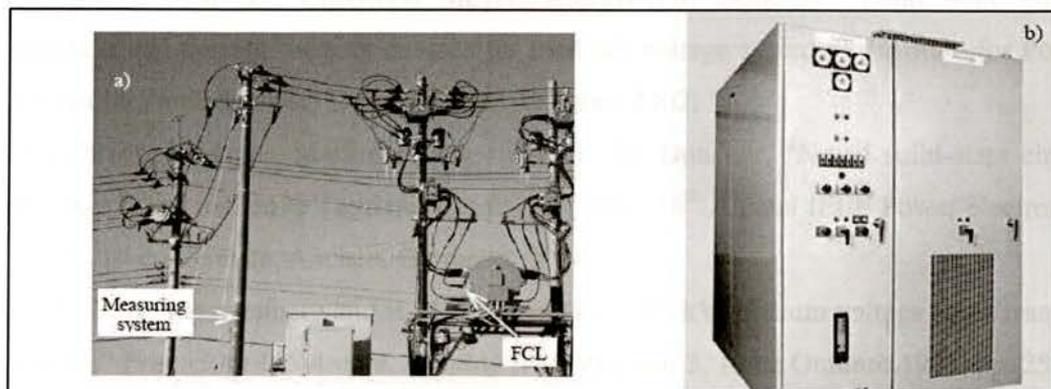


Figura nº7.15 – a) Teste no terreno de um FCL de 6.6KV  
b)Rectificador do tipo FCL de 6.6KV



A Figura 7.14b) mostra um rectificador do tipo FLC de 6.6 kV , o qual foi desenvolvido e foi usado para proteger cargas sensíveis no sistema de distribuição de energia, de quedas de tensão ou ondulações.

## 7.8 Conclusões

Trabalhos na área dos limitadores de corrente já deram frutos, com aplicações concretas em redes de distribuição e aplicações industriais. Tanto os limitadores de corrente como os disjuntores *Solid State* apresentam muitíssimas vantagens, mas ainda lhes falta a afirmação em termos de mercado, como são tecnologias recentes, necessitam de se afirmar como realmente fiáveis para a sua comercialização tomar proporções elevadas.

## 7.9 Bibliografia

- [1] T. Veda, M. Morita, H. Arita, J. Kida, Y. Kurosawa, “Solid state current limiter for power distribution system”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 8, nº4, Outubro 1993;
- [2] Christoph Meyer, Stefan schröder, RIK W. De Doncker, “Solid-state circuit Breakers and current Limiters for medium-voltage Systems Having Distributed Power Systems”, IEEE Transactions on Power electronics, Vol 19, nº5, Setembro 2004;
- [3] Christoph Meyer, Stefan schröder, RIK W. De Doncker, “Design of solid-state circuit Breaker for medium voltage systems”, IEEE 0-7803-8110, 2003;
- [4] Stefan Schroder, Christoph Meyer, RinKW DE Doncker, “Solid State circuit breakers and current-limiting devices for medium voltage systems”, Institute for Power Electronics and electrical Drives (ISEA), Outubro 2002;
- [5] Christoph Meyer, Markus Höing, Rik W. De Doncker, “Novel solid-state circuit Breaker based on active Thyristor topologies” 2004 35<sup>th</sup> Annual IEEE Power electronics Specialist conference, Anchen, Germany, 2004;
- [6] J. W. Schwartzenberg and R. W. De Doncker, “15 kV medium voltage static transfer switch,” *Proc. 30th IAS Annu. Meeting (IAS'95)*, vol. 3, 12 de Outubro 1995, pp. 2515–2520;



- [7] L. Klingbeil, W. Kalkner e C. Heinrich, “Fast Acting Solid-State Circuit Breaker Using State-of-the-Art Power-Electronics Devices”, Graz, Austria: EPE, 2001;
- [8] Electric Power Research Institute, “Development of a 69 KV solid State Current Limiter(SSCL)”, EPRI, Setembro 2005;
- [9] EPRI, “Development of a solid state current limiting circuit breaker”, EPRI, Junho 2001;
- [10] Bin Zhang, Alex Q. Huang, “Performance of the New Generation Emitter Turn-off (ETO) Thyristor”, Center for Power Electronics Systems department of electrical & Computer Engineering Virginia Polytechnic Institute & State University Blacksburg, Junho 2002;
- [11] Ben Damsky, Vitaly Celman, John Frederick, “A Solid State Current Limiter”, EPRI, Powell Industries, Janeiro 2003;
- [12] H. Schmitt, J. Amon, D. Braun, G. Damstra e outros ,” Fault current limiters-Application, principles and experience ”, Cigré, Joint Colloquium in Tokyo, 2005;

## 8 Solid-State Transfer Switch e Mechanical Transfer Switch

O **Solid-State Transfer Switch** (SSTS) ou o novo sistema integrado **Mechanical Transfer Switch** (MTS), foram desenhados para substituir os convencionais equipamentos mecânicos de transferência, actualmente usados pelas grandes indústrias e instalações comerciais, para trocar de uma alimentação para a outra – um processo que tipicamente demora entre 0.5 a vários segundos. Estas novas soluções podem também fornecer uma solução viável para um sistema UPS (uninterruptible power supply) financeiramente viável para instalações domésticas.

Uma vantagem típica de um *solid-state transfer switch* é o benefício obtido em termos de soluções para a qualidade de energia. Um consumidor “sensível” é alimentado via linha radial do sistema de distribuição público, na eventualidade de perturbações na rede de alimentação, uma tentativa é realizada para eliminar a avaria através do reengate.

No entanto, uma breve interrupção da alimentação de energia pode ser suficiente para provocar uma falha no equipamento do consumidor. Se uma secundária e independente alimentação com uma capacidade suficiente está disponível em paralelo com a linha primária, o reengate é iniciado na rede de média tensão, e o sistema irá imediatamente transferir a carga sensível para a segunda fonte.

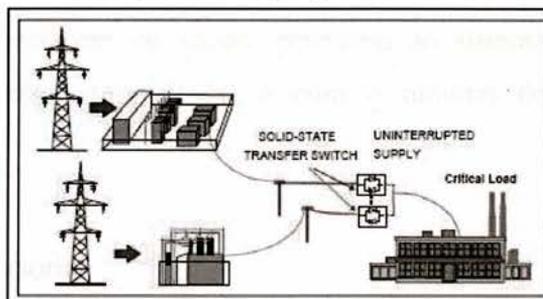


Figura nº 8.1 –Esquema do sistema global Solid State Transfer Switch[1]

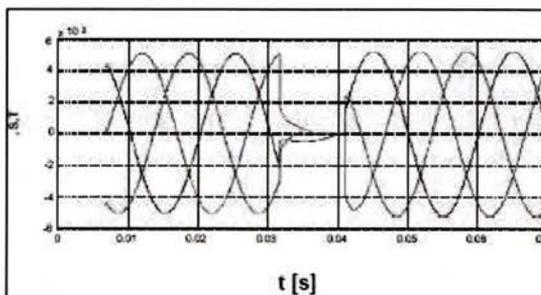
Durante a operação normal, o interruptor ligado à fonte primária é mantido fechado e o interruptor da fonte secundária é mantido aberto. Se uma perturbação tal como cava de tensão, um curto-circuito ou um período de interrupção de fornecimento de energia ocorre na linha primária, a carga é transferida para a alimentação secundária em milissegundos.

De modo aos *Transfer Switches* serem eficazes, os sistemas de distribuição têm de obedecer a alguns requisitos:

- Duas alimentações de diferentes subestações

- Extra capacidade de distribuição na fonte de *backup*
- Extra capacidade de distribuição da subestação
- Transmissão fiável com uma boa qualidade de energia

Curvas obtidas com simulação computacional do SSTS [1] mostram as tensões do lado da carga antes, durante e depois da carga ser transferida da alimentação primária para a secundária. A transferência da carga da fonte em defeito para a fonte secundária ocorre em milissegundos e sem efeitos adversos na carga.



**Figura nº 8.2 – Formas de onda durante a transferência de carga[1]**

Se o tempo de transferência da carga é menos crítico, 25-30 ms, a solução integrada MTS é uma alternativa de menor custo ao SSTS. O uso de uma unidade de controlo inteligente, de rápidos actuadores magnéticos, de sensores modernos e interruptores de vácuo, permitem ao sistema adquirir uma enorme performance económica sem perdas e com o mínimo de manutenção.

## 8.1 Solid State Transfer Switch convencional

Em muitos casos o uso de *solid state transfer switch* (SSTS) pode ser a melhor solução para variados tipos de problemas na rede, como por exemplo, cavas, interrupções, ondulações, etc.

Os *Solid state transfer switch* mais conhecidos consistem essencialmente num par de Thyristors, que permitem transferir a energia de uma fonte primária para uma fonte alternativa de modo a evitar a interrupção de serviço e consequentemente a diminuição da qualidade de serviço.

O thyristor como não é um puro condutor, levanta alguns problemas em termos de:

- Perdas
- Gastos

- Consumo
- Refrigeração

Num STSS convencional a corrente nas linhas flúi continuamente nos thyristors, causando uma grande quantidade de perdas/consumos e aquecimentos de elementos durante a operação normal. Como resultado, uma quantidade de equipamento para efectuar o arrefecimento é necessária, o que impõe custos adicionais de operação de modo a manter o thyristor frio. Como resultado é reduzida a eficiência e a fiabilidade do dispositivo. Para resolver estes problemas optou-se por novas soluções, baseadas em novas topologias e nos avanços tecnológicos de novos semicondutores.

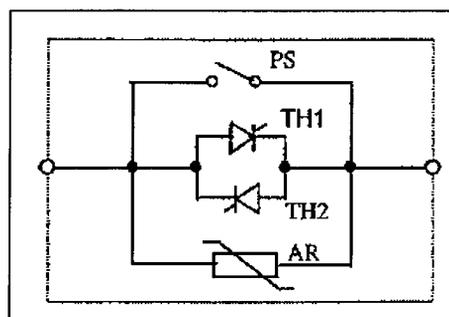
## 8.2 Topologias Solid State Transfer Switch

O principal aspecto que determina a escolha de uma determinada topologia para os SSTS, é a selecção da tecnologia a empregar. Neste trabalho vão ser apresentadas duas topologias para o aparelho em questão. As topologias escolhidas são as mais representativas dos *Solid State Transfer Switch*. Uma é a implementação de um aparelho *Solid State* em paralelo com um interruptor mecânico (Mitsubishi [2]), e a outra com dois aparelhos *Solid State* em paralelo (Westinghouse [2]).

### 8.2.1 Dispositivo Híbrido

Este dispositivo é baseado numa configuração híbrida, mecânica/eléctrica, que consiste essencialmente na incorporação de um interruptor e na eliminação do equipamento de refrigeração. O SSTS é assim construído como um sistema extremamente compacto, de pouco peso, e altamente fiável.

A figura nº 8.3 mostra o esquema básico do dispositivo híbrido. A tabela nº 8.1 mostra as suas características principais. O aparelho híbrido consiste essencialmente num par de



**Figura nº 8.3 – Esquema básico do interruptor híbrido [2 e 3]**

**Legenda:**

**PS:** Interruptor em paralelo  
**TH 1, TH2** Interruptor Thyristor  
**AR:** Zkc Oxide Surge Arrester (DST)

Thyristors, numa ligação *back-to-back* e um interruptor mecânico em paralelo de alta velocidade, o qual tem uma capacidade de abertura inferior a 1 milissegundo.

Debaixo das condições normais a corrente da linha é conduzida pelo interruptor

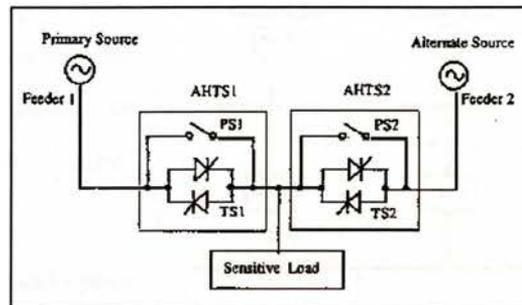
mecânico (PS), enquanto os Thyristors (TH) estão desligados. Após um defeito ser detectado, a operação de abertura é requerida, o PS é aberto de imediato e o TH é ligado simultaneamente, começando a conduzir a corrente da linha, que será

<b>Tensão nominal</b>	15KV
<b>Corrente nominal</b>	600 A / 1200 A
<b>Corrente de interrupção</b>	12.5 KA / 25 KA
<b>BIL</b>	95 KA
<b>Método de arrefecimento</b>	Arrefecimento Natural
<b>Eficiência Geral</b>	Maior que 99.99%

**Tabela nº 8.1 - Características gerais do dispositivo híbrido[2 e 3]**

bloqueada na sua primeira passagem por zero.

Na figura nº 8.4 está representado o esquema geral de um SSTS. Durante a operação normal, a corrente da linha é conduzida pelo interruptor em paralelo (PS1). Quando a operação de transferência for requerida, o PS1 é aberto e o TS1 é ligado simultaneamente. Consequentemente, a corrente é comutada imediatamente para



**Figura nº 8.4 –Esquema geral do SSTS [3]**

TS1 e bloqueada na primeira passagem da corrente por zero. Logo após ter terminado a interrupção da corrente, o thyristor do lado oposto (TS2) começa a conduzir a corrente para a carga pela fonte alternativa. O interruptor em paralelo (PS2) é fechado e transfere a condução da corrente para ele, abrindo logo de seguida o thyristor(TS2). O consumo dos dispositivos é assim desprezável, uma vez que os thyristors conduzem apenas durante alguns milissegundos na operação de transferência.

Uma vista externa do sistema SSTS de 15kV e 1200A, é representada na figura nº 8.5. A figura 8.6 mostra um exemplo das formas de onda dos resultados de um teste[2 e 3]. Após a detecção da cava de tensão, a operação de transferência é realizada em menos de 4 milissegundos.

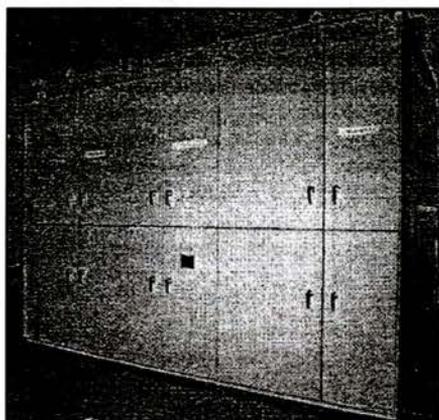


Figura nº 8.5 –Vista externa do SSTS de 15KV, 1200A [3]

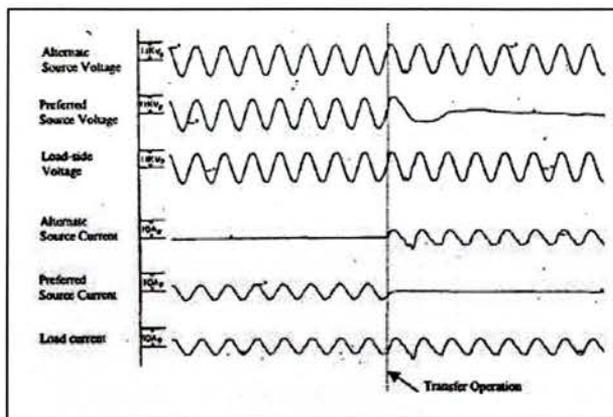


Figura nº 8.6 –Resultados do teste de transferência de uma carga com o SSTS [3]

### 8.2.2 Disjuntores Solid State que funcionam como SSTS

A Westinghouse desenvolveu em cooperação com o instituto de pesquisa e desenvolvimento de electrónica de potência (EPRI), um SSTS baseado na interligação de comando de dois disjuntores *solid state*, figura nº 8.7.

Neste SSTS, um interruptor GTO é usado para se obter uma rápida interrupção da corrente. Um interruptor SCR é colocado em paralelo com o GTO para se obter uma maior capacidade em relação às correntes de defeito e uma melhor coordenação de protecção, figura nº 8.8.

Uma unidade para 13,8 KV foi construída usando grupos de 6 GTO por fase, cada um para 3000A e 4500V[2].

Apesar dos GTO poderem interromper a corrente em 30µs, o tempo de interrupção actual é mais baixo (1/4 de ciclo) devido aos dispositivos auxiliares

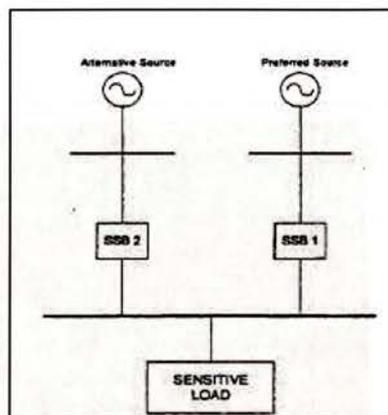


Figura nº 8.7 – Disjuntores Solid State a funcionar como SSTS[2]

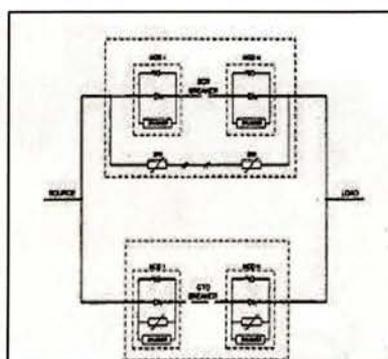


Figura nº 8.8 – Esquema básico do SSTS[2]

(*snubber*, ZNOs, etc.). Os GTOs vão abrir o circuito antes da corrente atingir o máximo valor admissível (3000A)[2].

A tabela nº 8.2, apresenta os valores referentes às características dos GTOs e SRCs.

GTO		SRC	
Tensão nominal	13.8KV	Tensão nominal	13.8KV
Corrente nominal	630 A rms	Corrente máxima	8KA(2 segundos)
Corrente de interrupção	3000 A	Corrente de interrupção	15 KA
Short time current	3000A	Short time current	15KA
Tempo de Abertura	¼ de ciclo	Método de arrefecimento	Arrefecimento Natural

Tabela nº 8.2 - Características gerais dos GTOs e dos SRCs [2]

### 8.3 Exemplo de um SSTS híbrido

O *Transfer Switch* Híbrido é construído por interruptores *Solid State* e interruptores mecânicos ultra rápidos em paralelo. Pode ser ligado e desligado em qualquer instante, para minimizar o tempo de transferência debaixo de qualquer perturbação na linha.

Os interruptores *Solid State*, apenas conduzem durante a operação de transferência,

o que evita a utilização de aparelhagem de arrefecimento para os *Solid State*.

O equipamento foi projectado e construído com um interruptor *solid state* de valores nominais 11KVrms / 125 A[4], composto por 20 módulos em série, em que cada contem 5 IGBTs em paralelo, estão representados nas figuras nº 8.9 e 8.10.

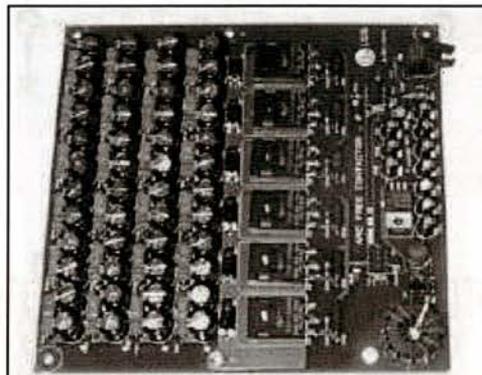


Figura nº 8.9 – Módulo de 5 IGBTs[4]

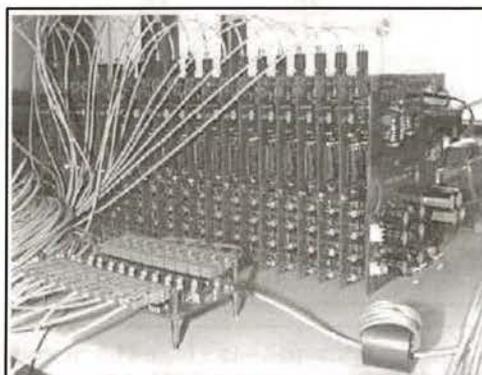


Figura nº 8.10 – Série de 20 módulos IGBT em série [4]

Os MVSTS ou MVHTS cobrem os casos de perturbações como cavas de tensão, com um tempo de transferência menor que meio ciclo da frequência da linha.

Uma sobretensão durante meio ciclo pode causar sérios problemas, pelo que é necessário reduzir ainda mais o tempo de transferência para proteger o sistema de perturbações específicas. A solução é substituir os Thyristors dos aparelhos convencionais por aparelhos *Gate Turn Off*, como os IGBTs, IGCT ou GTO.

A figura nº 8.11, representa um diagrama simples do HTS proposto, onde se vêem os interruptores *Solid State* e os mecânicos em paralelo.

Nesta topologia os interruptores mecânicos ( $S_A$  e  $S_B$ ) conduzem durante as condições normais, enquanto os interruptores *Solid State* ( $Q_{A1}$  até  $Q_{A2}$ ) apenas conduzem durante a transferência.

Este HTS não necessita de aparelhagem de arrefecimento e também não apresenta problemas como o arco. Não existe arco produzido entre os contactos dos interruptores mecânicos devido ao emprego de interruptores *Solid State* que efectua a condução da corrente durante a abertura e fecho dos interruptores mecânicos. Isto implica que os interruptores podem ser abertos mais rapidamente, uma vez que não existe problemas com o arco.

Para simplificar, o circuito de amortecimento para o IGBT não é

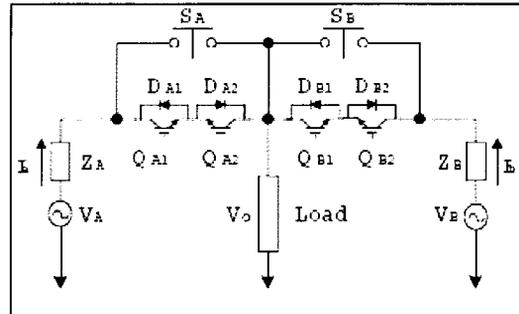


Figura nº 8.11 – Representação simples do HTS [4]

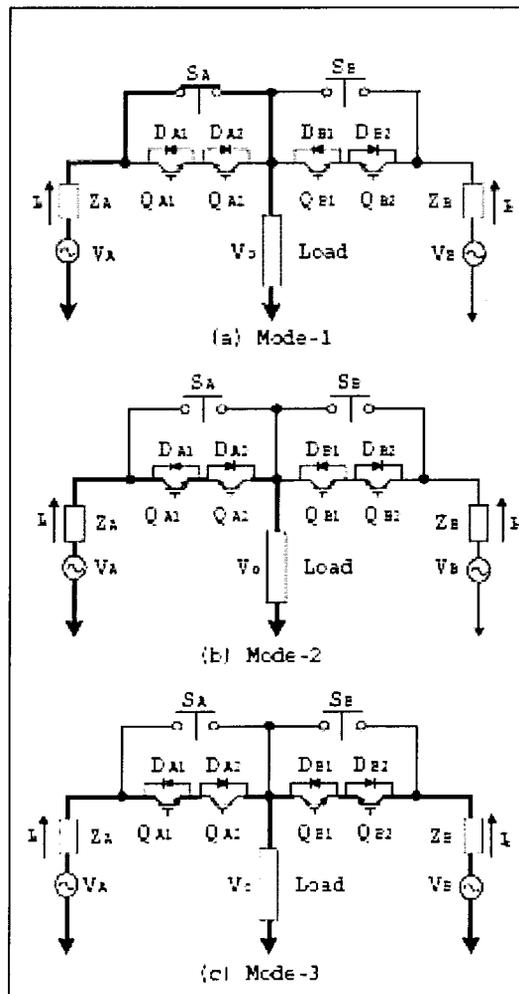
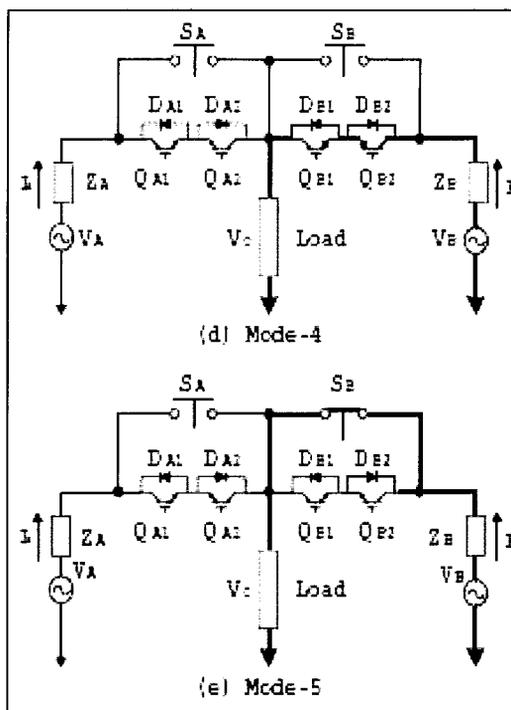


Figura nº 8.12 a),b) e c) – Sequencia operacional do HTS[4]

desenhado, e é assumido que as fontes de energia  $V_a$  e  $V_b$  são ideais, e possuem uma impedância  $Z_a$  e  $Z_b$ .

Dois IGBTs com diodos em paralelo são ligados numa configuração *back-to-back* para funcionarem como um AC *solid state switch*. Os disjuntores mecânicos ( $S_a$  e  $S_b$ ) podem ser de vácuo ou equivalentes;  $V_a$  será a fonte primária e  $V_b$  a fonte alternativa ou secundária.

A figura nº 8.12 representa a sequência de funcionamento do HTS. No modo 1, a fonte  $V_a$  alimenta a carga através do interruptor mecânico ( $S_a$ ), figura nº8.12a). Se é detectada perturbações do lado da fonte primária, é necessário efectuar a transferência de  $V_a$  para  $V_b$ . O modo 2 inicia-se então com o *turn-on* dos IGBTs ( $Q_{a1}$  e  $Q_{a2}$ ), e com a abertura do interruptor mecânico ( $S_a$ ), figura nº 8.12 b). A abertura



**Figura nº 8.12 d), e) – Sequencia operacional do HTS[4]**

do interruptor  $S_a$  não provoca arco pois os IGBTs conduzem a corrente totalmente. O modo 2 demora tipicamente 1ms.

A figura nº8.12 c) mostra o início do modo 3, os IGBTs ( $Q_{b1}$  e  $Q_{b2}$ ) são ligados, e as duas fontes ficam ligadas simultaneamente á carga, acabando o modo com o *turn off* dos IGBTs ( $Q_{a1}$  e  $Q_{a2}$ ).

O modo 4 é representado na figura nº 8.12 d), onde a carga é alimentada totalmente pela fonte  $V_b$  através dos IGBTs ( $Q_{b1}$  e  $Q_{b2}$ ). Finalmente o modo 5 inicia-se pelo fecho do interruptor  $S_b$ . Durante este modo, os ( $Q_{b1}$  e  $Q_{b2}$ ) são desligados quando o  $S_b$  se encontra totalmente fechado.

## 8.4 Conclusões

Nas indústrias com processos críticos, uma falha de energia provoca uma quebra no sistema de produção, o que pode causar prejuízos elevadíssimos. Os *Solid State Transfer Switches* proporcionam uma garantia de qualidade de serviço para esses



processos críticos. As novas topologias desenvolvidas de SSTS, são mais fiáveis e mais rápidas, consequentemente mais eficazes.

## 8.5 Bibliografia

[1] K. Chan, A. Kara, P. Daehler, J. Guay, R. Tinggren, “Innovative system solutions for power quality enhancement”, ABB High Voltage Technologies Ltd, ABB Industrie AG, ABB Secheron SA, Fevereiro 1999;

[2] C. Alvarez, J Alamar e outros, “Solid State Devices for protection in Distribution Systems. A new Proposal for Solid State Transfer Switch (SSTS)” Artigos IEEE 2000;

[3] Gregory F. Reed, Masatoshi Takeda, Isao Iyoda, Ph.D. e outros, “Improved power quality solutions using advanced solid state switching and static compensation technologies”, Artigos IEEE 1999;

[4] Yong-Ho Chung ,“Medium voltage Hybrid Transfer Switch”, Artigos IEEE 2002;

### **Patentes para consulta:**

“Hybrid Solid State Switch” US Patent nº 5,770,897, 23 Junho 1998

“Fault Tolerant AC Transfer Switch” US Patent nº 6653751, 25 Novembro 2003

## 9 Disjuntores Híbridos e totalmente de estado sólido(Solid State)

### 9.1 Disjuntor Híbrido

A Areva desenvolveu uma nova topologia de um disjuntor híbrido, baseada no uso de um conjunto de semicondutores em série ou em paralelo, o que permite aumentar a tensão de entrada e a corrente nominal sem a formação de arco e beneficiar da função limitadora da corrente. Uma aplicação concreta, foi realizada na marinha, com interruptores de **6.6KV AC**, e tem sido estudada e simulada pela DGA (French defence procurement agency). Este novo disjuntor mostra performances interessantes e novas funcionalidades que devem ser capazes de dar margens adicionais em novos projectos, para a sua aplicação em redes de transporte e distribuição de energia.

#### 9.1.1 Introdução

Actualmente os disjuntores na média tensão são essencialmente aparelhos electromecânicos. Em tais sistemas, a interrupção do circuito é realizada com a abertura do disjuntor e a consequente extinção do arco eléctrico.

Os últimos progressos na electrónica de potência permitiram realizar a substituição da parte mecânica do disjuntor por semicondutores, para obter sistemas mais rápidos e de duração mais elevada.

Tais disjuntores foram testados[1], mas uma das maiores desvantagens são as perdas térmicas devido às quedas de tensão. Disjuntores híbridos baseados em disjuntores mecânicos rápidos e semicondutores ligados em paralelo foram também estudados[1], para obter todas as vantagens dos semicondutores e evitar as desvantagens das perdas na condução dos semicondutores.

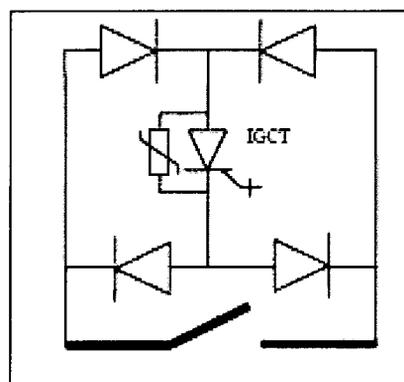


Figura nº 9.1 – Topologia básica do disjuntor híbrido[1]

Quando o disjuntor abre, um pequeno arco surge desviando a corrente para o ramo dos semicondutores que finalmente interrompem a corrente de defeito.

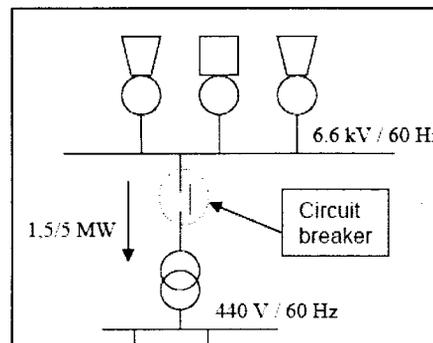
O IGCT (*integrated gate turn off thyristor*) tem sido usado com sucesso em aplicações na média tensão. Limitações para bloquear a tensão no estado *off* (interrupção) e os níveis de corrente são factores sempre problemáticos nos componentes estáticos.

A solução actual baseada em células de séries de IGCT e comutação assistida com um módulo de thyristors em paralelo, permite o uso de soluções híbridas em novos campos de aplicações. Graças a estes módulos é possível atingir níveis de potência e de tensão mais elevados em aplicações de interrupção em potência.

### 9.1.2 Aplicação

O objectivo final deste disjuntor é ser integrado numa rede trifásica da marinha para níveis de 6.6kV/60 Hz[1].

A sua maior função é proteger um transformador de 6.6KV/440V com uma carga de 1.5MW até 5MW. As fontes de energia na rede são turbo-geradores e geradores a diesel que funcionam em paralelo.



**Figura nº 9.2 – Topologia da rede onde o disjuntor híbrido será integrado[1]**

#### 9.1.2.1 Especificações do disjuntor

- A energia do arco deve ser mínima ou nula de modo a obter uma vida mais longa e sem manutenção.
- Em condições de defeito, o interruptor deve ser capaz de eliminar o defeito com uma temporização, de modo a obter selectividade na protecção da instalação.
- Perdas térmicas no interruptor devem ser minimizadas, os sistemas de arrefecimento devem ser leves e fiáveis.
- A parte mecânica deve ser simples, devido as condições envolventes serem duras/severas.



### 9.1.2.2 Requisitos e restrições para a Tensão

A tensão nominal é 6.6 kV, mas a variação normal da tensão nesta rede isolada deve ser considerada(+16%). Como resultado, a restrição global da tensão é:  $U_{ppmax} = 12.5 \text{ kV}$ .

### 9.1.2.3 Restrições da corrente

A carga protegida vai de 1.5 a 5 MW, logo as restrições para a corrente são:

<i>Características</i>	
<b>Sem carga</b>	0.7 A
<b>Carga a 1.5 MW</b>	150 A
<b>Carga a 5 MW</b>	500 A
<b>Curto-circuito do lado de BT</b>	2340 A
<b>Curto-circuito do lado de MT</b>	100 kA

**Tabela nº 9.1- Características da corrente do disjuntor híbrido [1]**

O máximo crescimento de corrente com o tempo( $di/dt$ ) é 20 kA/ms e ocorre em casos de curto circuitos médios. Se considerarmos a topologia clássica de um disjuntor híbrido AC(figura nº9.1) e as propriedades actuais dos semicondutores, o número necessário de IGCT em série é de 4. Eles são necessários para se oporem/resistirem a tensão de fecho(*turn off voltage*) de 12.5KV já com margens de segurança. A tensão do arco usada para desviar/deflectir a corrente deve ser maior que 16V e deve ser alcançada num período de tempo pequeno, de modo a minimizar a energia do arco.

### 9.1.3 Apresentação da solução

Uma nova topologia é proposta de modo a ultrapassar as restrições da tensão e da corrente. A ideia principal é partilhar a tensão entre os disjuntores rápidos mecânicos e a série de células de semicondutores. O objectivo é não obter qualquer arco, usar um

interruptor mecânico simples e rápido, permitindo perdas térmicas mínimas durante a condução. Esta topologia é construída seguindo uma aproximação modular e funcional.

### 9.1.3.1 Módulo disjuntor

As principais diferenças funcionais deste novo disjuntor híbrido é mostrado na figura nº 9.3, é composto por 5 blocos, que serão descritos de seguida.

#### 9.1.3.1.1 Módulo 1: Módulo principal de condução

Tem de conduzir a corrente sem perdas. Após a interrupção, tem de resistir por completo à fonte de tensão 6.6KV. Este módulo é baseado num rápido contacto mecânico.

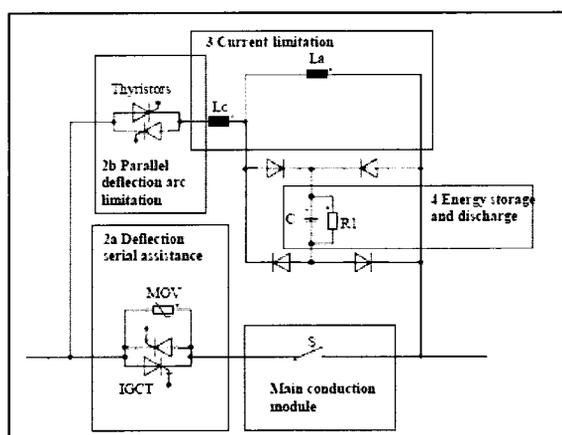


Figura nº 9.3 – Nova topologia do disjuntor [1]

#### 9.1.3.1.2 Módulo 2a: Módulo em série que auxilia a deflexão

Este bloco é desenhado de modo a aumentar a tensão no ramal principal e possibilitar o desvio/deflexão da corrente para o ramal em paralelo.

Este módulo é composto por duas células IGCT colocadas numa posição Anti-paralelo (*back-to-back*). Estas células são versões modernas de células GTO. É actualmente o melhor dispositivo para esta aplicação porque é capaz de conduzir altas correntes (>4000A) com uma queda de tensão de cerca de 1V, e de bloquear uma tensão elevada (4500V) no estado fechado (off State).

Em paralelo com estas células de IGCT, um *Metal Oxyde Variator* (MOV) foi acrescentado. A tensão de entrada do MOV é mais baixa do que o valor da tensão fornecida (2.8 kV). Quando os semicondutores são desligados, o MOV fornece uma tensão, e a corrente começa a desviar-se para o ramal em paralelo. Com este módulo, não é necessário usar uma tensão de arco para desviar a corrente.



### **9.1.3.1.3 Módulo 2b: Deflexão da corrente e limitação do arco**

O módulo 2a desvia/deflecte a corrente para o ramal em paralelo através do trajecto do módulo 2b. Este módulo conduz a corrente e permite ao módulo 1 desligar-se sem a formação de arco eléctrico (quando a corrente é nula). É composto por 2 células anti - paralelas de 3 thyristors em série de 8.2KV. Estes thyristors são finalmente usados para cortar a corrente.

### **9.1.3.1.4 Módulo 3: Módulo de limitação da corrente**

Este módulo é usado para limitar a corrente e cortá-la depois da corrente estar a passar pelo módulo 2b. É composto por impedâncias indutivas. Estas indutâncias são necessárias para proteger o circuito do disjuntor durante a circulação da corrente de curto-circuito no ramal em paralelo, especialmente se é necessário temporização no disparo do disjuntor.

### **9.1.3.1.5 Módulo 4: Armazenamento de energia e descarga**

A energia indutiva do curto-circuito é armazenada no módulo da capacidade, antes de ser descarregada na resistência em paralelo. A capacidade escolhida pode ser uma capacidade com uma película metalizada para descarga de impulsos. Estas capacidades têm uma densidade de energia muito alta (Até 1KJ/L), mas infelizmente são unidireccionais na tensão, conseqüentemente uma ponte *Graetz* é usada para manter uma tensão positiva na capacidade.

### **9.1.3.2 Sequencia básica de funcionamento do disjuntor**

Quando o disjuntor está ligado, a corrente flui através do condutor principal do módulo 1, quando o IGCT está ligado. Se um defeito ocorre, os IGCTs são desligados (*turn off*) e a tensão de 2.8KV aparece no ramal principal entre os terminais do MOV. O thyristor do ramal em paralelo é então ligado, e a corrente é desviada do circuito principal para o circuito em paralelo. Então o disjuntor mecânico abre sem corrente, logo sem arco.



A capacidade  $C$  (módulo 4-figura nº 9.3) é usada para armazenar a energia indutiva da rede eléctrica, as indutâncias associadas com a capacidade representam um circuito oscilatório, que cria uma corrente pulsatoria permitindo obter um nulo de corrente rápido e desligar os Thyristors.

Após a interrupção, a capacidade descarrega através da resistência. Duas variantes para as topologias são possíveis:

- **Sem indutância auxiliar  $L_a$**  (módulo3) – Para uma imediata comutação de interrupção. Neste circuito, a corrente é cortada após meio período do sinal de onda, que possui uma alta-frequência de pulsação, num curto período de tempo e debaixo de corrente limitada

- **Com indutância auxiliar  $L_a$**  (módulo3) – Para se obter uma temporização para a comutação, com limitação de corrente. Com este circuito, uma indutância auxiliar é colocada entre a célula dos thyristors e os terminais do interruptor final, a ideia é ser capaz de manter durante vários períodos da onda de sinal uma corrente sem ultrapassar o limite de tensão da capacidade. Isto é possível se a corrente for limitada pela impedância auxiliar ( $L_a$ ).

#### **9.1.3.2.1 Funcionamento**

Os resultados obtidos são baseados em simulações numéricas e cálculos analíticos de um circuito completo realizados pela Areva[1]. A indutância variável da rede foi escolhida para o pior caso ( $L_d=280\mu H$ ).

A seguinte sequência para desligar (*switch off*) é baseada na simulação de um curto-circuito na média tensão a 6.6KV nos terminais de um transformador, figura nº 9.4.

### 9.1.3.2.1.1 Disjuntor sem impedância $L_a$

#### Sequencia para desligar:

Quando a corrente de curto-circuito medida chega aos 1500A, uma ordem é enviada para o disjuntor para a sua abertura. Isto leva cerca de 100  $\mu$ s antes da abertura efectiva (atraso mecânico). A célula IGCT é desligada durante este atraso mas não demasiado cedo de modo a limitar o crescimento da tensão no condensador. Então a corrente no ramo principal, flui através do MOV, o qual satura e aplica uma tensão ao ramo dos thyristors, esta tensão permite ao próprio thyristor ser ligado. A

corrente é então deflectida para o ramo em paralelo, e o disjuntor abre enquanto a corrente no ramo principal é zero. A indutância  $L_c$  (modulo3, figura nº9.3), limita o crescimento da corrente no thyristor para o proteger durante o *turn on*. A corrente é nula, após meio período do circuito de ressonância. Neste caso particular, leva 600 $\mu$ s. Quando a corrente é nula nas células dos thyristors, estes são desligados. O máximo valor da corrente é menor que 3800 A.

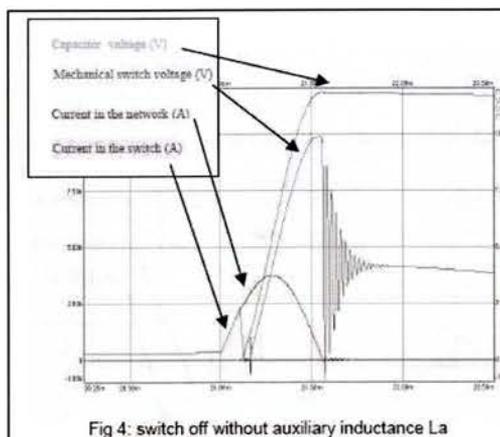


Fig 4: switch off without auxiliary inductance  $L_a$

**Figura nº 9.4 – Operação para desligar sem impedância auxiliar [1]**

#### Sequencia de ligação

O MOV do módulo 2a liga quando a sua tensão é maior que o limite de  $U_{vo}$ . Este limite é mais baixo que a tensão de alimentação. Consequentemente, o contacto mecânico é ligado (*switched on*) quando a tensão de alimentação é menor que  $U_{vo}$ , para que nenhuma corrente passe através do

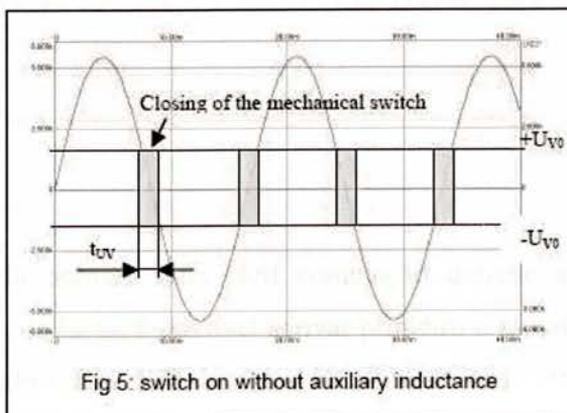


Fig 5: switch on without auxiliary inductance

**Figura nº 9.5 – Operação de ligação sem indutância auxiliar [1]**

contacto enquanto ele se encontra fechado, e nenhum arco ser produzido. Então este disjuntor pode comutar a energia durante o período de  $T_{UV}$  em cada meio período da onda de sinal como é mostrado na figura nº 9.5.

#### 9.1.3.2.1.2 Disjuntor com indutância auxiliar

*Sequencia para desligar:*

Com a ajuda da indutância auxiliar, o aumento da corrente é obrigatório e o tempo antes da comutação dos thyristors pode ser longo. De facto, a tensão do condensador não atinge o mesmo valor que no caso anterior. Se a indutância auxiliar é alta ( $>1.5\text{mH}$ ), A frequência oscilatória LC é menor e a corrente

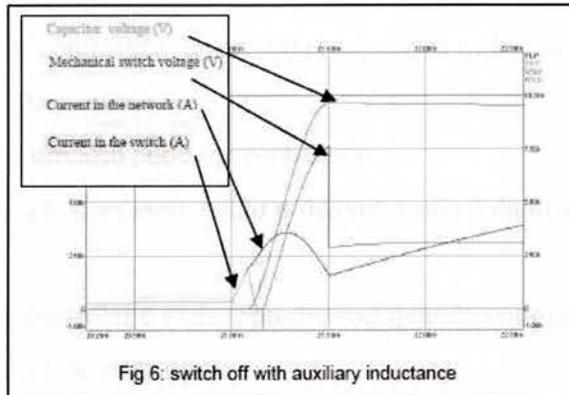


Fig 6: switch off with auxiliary inductance

**Figura nº 9.6 – Operação para desligar com indutância auxiliar [1]**

passa por zero após um período completo de tensão de alimentação. A corrente limitada pode ser mantida no ramal em paralelo durante vários períodos.

O primeiro interesse, é a possibilidade de um tempo de atraso no *turn off* do disjuntor que permite usar este tempo para obter selectividade no plano de protecção da rede. A segunda vantagem é ser capaz de limitar a corrente de defeito para cerca de 10 kA a 60 Hz no ramal em paralelo em vez de 100 kA que era o valor normal para a corrente de curto-circuito.

*Sequencia para ligar:*

A limitação da corrente na célula permite uma fácil comutação durante a passagem do estado desligado para ligado, de facto, é possível activar primeiro o ramal em paralelo pelo uso de um atraso de ângulo variável do thyristor. Esta função pode ser usada ainda para permitir a magnetização da carga do transformador, com uma adequada diminuição do ângulo. Quando o ângulo mínimo é atingido, a tensão do disjuntor do circuito é nula, e o contacto mecânico pode ser fechado.



### 9.1.3.3 Comparação com sistemas existentes

Podem-se realizar agora comparações com os sistemas actuais em uso, ou com os sistemas estáticos.

#### 9.1.3.3.1 Comparação com soluções electromecânicas

- O tempo de *turn off* pode ser controlado desde 600us até vários milisegundos de acordo com a selectividade pretendida.
- O valor da corrente de curto-circuito pode ser controlado.
- Como a interrupção é realizada sem arco, então o disjuntor não é danificado em cada sequência.
- O fenómeno é mais fácil de controlar e mais reproduzível quando comparado com o fenómeno numa câmara de interrupção.
- O conceito de funcionalidade modular permite a optimização de acordo com aplicações e arquitectura da rede.
- Novas funções podem ser adicionadas no mesmo equipamento, como a limitação da corrente transitória, permitindo por exemplo um arranque suave de um motor.

#### 9.1.3.3.2 Comparação entre Híbridos e soluções estáticas

- A tensão de alimentação é aumentada para 6.6KV com um interruptor mecânico rápido.
- Durante o curto-circuito de potência, o valor da corrente pode atingir os 100kA. Com topologias estáticas, isto irá levar a um número enorme de semicondutores em série para resistir a tal corrente.
- As perdas térmicas são reduzidas comparadas com soluções estáticas.
- É possível obter um tempo de atraso de comutação para obtenção de selectividade.
- Funções de limitação de corrente estão disponíveis.



#### 9.1.4 Conclusões

O disjuntor deve ser capaz de interromper correntes de defeito sem arco. O uso de dispositivos IGCT em série permitem diminuir a complexidade e a velocidade das partes mecânicas do sistema.

Novas funções da limitação da corrente estão disponíveis para o uso de diferentes topologias que integram uma indutância auxiliar. Tais funções podem ser capazes de dar novas margens na definição do equipamento das redes.

A simulação numérica forneceu resultados relativos ao tempo de interrupção e capacidade de limitação de corrente. Este novo conceito de topologia para *disjuntores* tem sido testado com sucesso na simulação. Esta topologia ira ser brevemente testada num protótipo que está a ser desenvolvido[1].

## 9.2 Um Disjuntor Solid-State para redes de 13.8kV

Existiu ao longo do tempo uma enorme progressão da tecnologia em relação á interrupção de circuitos, desde a baixa tensão á alta tensão. A evolução deu-se desde o aparecimento dos disjuntores a óleo aos disjuntores de vácuo, e finalmente, à comutação sólida dos semicondutores.

Para tensões reduzidas todos os sistemas electrónicos usam a comutação de estado sólido para efectuar o controlo de energia, obtendo assim excelentes resultados (por exemplo os computadores).

Os disjuntores mecânicos, tal como os disjuntores de vácuo são os mais comuns nas indústrias e nas empresas que efectuam a distribuição de energia, e representam a grande maioria de aparelhos utilizados para as interrupções na média tensão. Os *Solid State Switchs* simples (SCRs / GTOs, etc.) foram introduzidos em aplicações na média tensão e alta tensão, para realizarem comutações, como

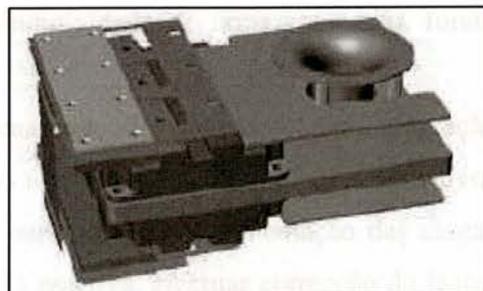


Figura nº9.7 – Par de IGBTs de 800A e 4.5KV, numa configuração Back-to-Back [2]

nas ligações em ATDC. Mas em nenhum dos casos, média Tensão ( $\gg 1$  kV), potência elevada (1-20 MVA) e alta velocidade ( $\gg 60$  hertz), a tecnologia do *Solid State*



demonstrou resultados que permitam chegar a um estado universal, para que esta seja utilizada de modo prático e barato.

A *Diversified Technologies, Inc. of Bedford MA* desenvolveu um interruptor *solid-state* de alta tensão, permitindo assim uma conversão a alta-frequência para tensões superiores a 13.8kV. O projecto do disjuntor permite conversão de potência AC-DC, AC-AC, DC-AC e DC-DC á um baixo custo e uma eficiência elevada.

### 9.2.1 Introdução

O aumento do consumo de energia eléctrica tem aumentado nos últimos anos em cada indústria e em cada casa, o que têm destacado a fragilidade da rede de distribuição de energia existente em alguns países.

Na resposta à ameaça económica das falhas de energia na rede, muitas companhias estão a investir em fontes de energia suplementares para cargas críticas. A razão por trás destes investimentos é muito simples, a probabilidade de acontecer falhas de abastecimento de energia esta a aumentar, e o custo, mesmo que elevado dos sistemas suplementares é mais baixo do que os custos causados pelas faltas de alimentação.

Tipicamente, uma fonte suplementar consiste em uma segunda e independente alimentação da rede, uma fonte de alimentação sem interrupção (UPS) ou sistema de armazenamento de energia que pode ser comutado rapidamente ao serviço quando necessário.

Tecnologias múltiplas, desde baterias aos geradores a diesel, pilhas de combustível e sistemas magnéticos de supercondutividade de armazenamento, foram introduzidos para servir estas exigências.

No capítulo nº6 foram apresentadas algumas soluções potenciais, para integração no sistema de distribuição de energia. Muitas das topologias tem como base dispositivos *Solid State*, numa variedade de configurações, para comutar a alimentação das cargas para outra linha, realizar compensação de energia reactiva, efectuar correcção do factor de potencia, compensar cavas de tensão, etc.

A maioria deste tipo de aparelhagem já se encontra disponível para a baixa tensão. A sua aplicação na média tensão traz problemas, não é possível adoptar estas topologias *Solid State* da baixa tensão sem modificações significativas, tanto nas topologias da aparelhagem como também nas redes de distribuição.



A resposta para este problema é simples, um disjuntor de média tensão, fiável e que permita o uso de topologias de conversores de comutação muito rápida na média tensão.

### 9.2.2 Disjuntor Solid State

A DTI (*Diversified Technologies, Inc*) desenvolveu um disjuntor *solid state* para aplicação em sistemas de 13.8kV AC. Este disjuntor utiliza IGBTs bi-direccionais de alta potência, figura nº 9.7, com um controlo, protecção e diagnostico por fibra óptica. O disjuntor é constituído por vários destes dispositivos *Solid State* ligados em série através da tecnologia patenteada DTI.

Na tabela nº 9.2, estão apresentadas as características desejadas para um disjuntor *solid state*.

<b>Características desejadas para o disjuntor Solid State</b>	
Muito rápido (capaz de uma abertura e fecho em microsegundos, de modo controlado, e uma operação continua a alta frequência);	Altamente fiável;
Bi-direcional (Comutação em ambas as polaridades, positiva e negativa, para AC)	Compatível com a rede de distribuição existente;
	Alta eficiência (>98%);
	Capaz de comutação em alta potência (1-20MVA)
	Baixo custo;

**Tabela nº9.2 - Características desejadas para o disjuntor Solid State**

#### 9.2.2.1 Características técnicas

A tecnologia patenteada DTI é baseada numa série de string de IGBTs de potência ou de transístores de efeito de campo (FETs), os quais se abrem e se fecham simultaneamente. Embora possa ser construído com centenas de semicondutores, quando utilizado desta maneira, o disjuntor inteiro funciona como um único componente. Ao contrário de um *Silicone Controlled Rectifier* (SCR), os *insulated gate bipolar transístores* (IGBT) podem ser ligados e desligados arbitrariamente a alta velocidade. Os SCRs têm sido usados por muito tempo na alta potência e nas grandes fontes de

alimentação onde o tempo de *turn-on* é controlado, mas durante defeitos numa linha tem de aguentar frequentemente enormes picos de corrente até ao próximo cruzamento da tensão por zero.

### 9.2.2.2 Constituição

Os sistemas de DTI podem usar até 200 IGBTs, ligados em combinações série/paralelo, para comutar alta potência na média tensão. Esta tecnologia foi aplicada em primeiro lugar a moduladores DTI *Solid State*, que não usam circuitos ressonância. Cada impulso pode ser arbitrariamente construído pela abertura e fecho do disjuntor constituído pela pilha de IGBT, permitindo obter uma grande flexibilidade na largura do impulso, 1  $\mu$ S. Esta

flexibilidade de controlo do impulso é a chave para uma conversão muito rápida, altamente controlada.

Esta tecnologia tem progredido bastante, até que agora está no ponto onde se encontra extensível a aplicações para a média tensão e alta tensão, tais como a geração de energia, controlo e distribuição para tensões mais elevadas que 13,8kV AC.



Figura nº9.8 - Interruptor com oito pares de IGBTs, de 20kV e de 600A, com arrefecimento líquido.[2]

### 9.2.2.3 Disjuntor Trifásico Solid State

A DTI desenvolveu um disjuntor para 15kVAC, 600 A, que pode interromper correntes de defeito muito elevadas em menos de um microsegundo, e opera em frequências de comutação até 10kHz. Isto faz com que a tecnologia deste novo disjuntor seja ideal para o controlo PWM e circuitos de conversão de potência.

O par de IGBTs de 4.5kV, e de 800A representado na figura nº 9.7, pode ser usado para construir disjuntores *solid-state*, figura nº9.8, de



Figura nº9.9- Projecto de um disjuntor solid state para 13.8KV AC, de 20 MVA[2]

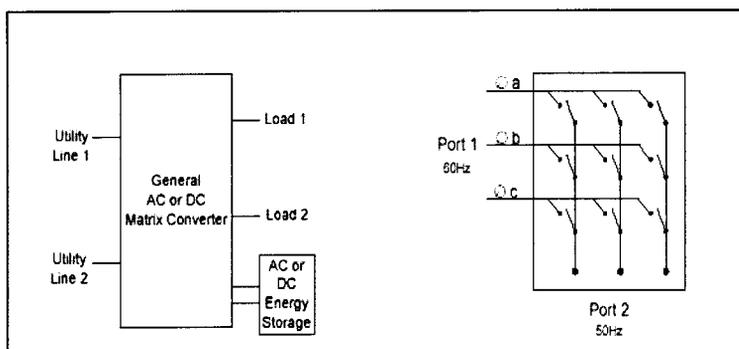
velocidade de actuação elevada, com valores nominais de 20 kV e 600 A. A Figura nº 9.9 mostra uma vista simplificada de um projecto de um disjuntor trifásico, bidirecional, isolado ao ar, e que utiliza uma pilha de oito pares de IGBT em série por cada fase. O tamanho total do disjuntor é mais pequeno do que um conjunto de fusíveis de 15kV.

### 9.2.3 Conversores de potência

Existem duas topologias básicas para conversores de potência, os conversores de matriz e conversores em ponte, que usam interruptores múltiplos e podem ser usados para a conversão de potência na média tensão.

#### 9.2.3.1 Conversores de Matriz

O conversor de matriz, figura nº9.10, comuta simplesmente entre um ou mais conjunto de entradas e de saídas. Neste tipo de conversor, as entradas e as saídas são simplesmente interconectadas em pré-configurações



**Figura nº 9.10 – Conversor de Matriz (C. A. - C. A., C. A. - C.C., C.C. - C.C., ou C.C. - C. A.) [2]**

programadas dependendo da aplicação pretendida. Quando utilizado alta-freqüência para a comutação ( $\gg 60$  hertz), o conversor de matriz pode executar uma variedade das funções além da simples transferência de energia, tal como: arranque suave; conversão de freqüência, correcção do factor de potência, correcção de potência reactiva e harmónicos, compensação para cavas de tensão. Mesmo conceitos avançados tais como a fase de uma linha e o equilibrio de correntes em linhas duplas são possíveis com um controlo correcto do conversor de matriz.

### 9.2.3.2 Conversor em Ponte

O Conversor em ponte, figura nº9.10, é um conversor simplificado que usa interruptores unipolares para transferir energia de AC para DC (Rectificadores Activos) ou de DC para AC (Inversores). Com interruptores de alta velocidade, estes conversores podem dar origem a saídas AC e DC altamente reguladas e flexíveis.

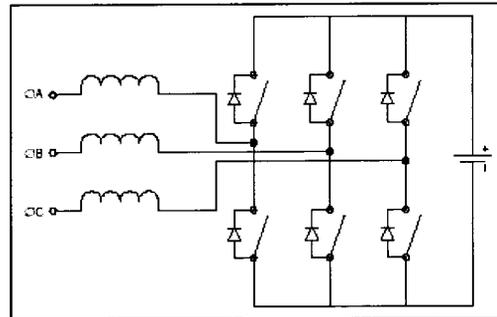


Figura nº 9.10 – Conversor em ponte [2]

### 9.2.4 Facts (Sistema Flexível De Transmissão em AC)

Os controladores actuais estão muito longe do chamado estado ideal, pois são comparativamente lentos, complexos e muito caros. A capacidade da tecnologia DTI's de comutar em média tensão a alta velocidade pode significativamente aumentar as potencialidades destes circuitos de correcção da tensão a um custo muito mais baixo.

A tecnologia DTI de alta velocidade de comutação pode ser utilizada para efectuar a compensação de potência reactiva, desequilíbrios na linha, e cavas nos sistemas de distribuição.

### 9.2.5 Conclusão

Os principais benefícios deste tipo de sistema são verificados durante a ruptura de uma linha ou de uma carga. Por exemplo, se na entrada aparece uma cava de tensão, o rectificador activo pode compensar esta queda da tensão.

O factor chave para a fiabilidade dos sistemas DTI é o uso de IGBTs extra para a redundância. A redundância é conseguida porque a falha nos IGBTs é sempre um curto-circuito, e mesmo a falha de três dispositivos não danifica adversamente a operação da pilha de semicondutores.

Os sistemas baseados nesta tecnologia, para aplicação na média tensão, podem ser construídos de modo rentável para uma grande quantidade de produção.



### 9.3 Bibliografia

- [1] Ronan Besrest, Pierre Sellier, Claudio Zimmerman, “New hybrid circuit breaker/corrent limiter with serial and parallel commutation assistance”, Capsim, Groupe Areva, EPFL, 2004
- [2] Marcel Gaudreau, Michael A. Kempkes, “A solid-state Switch for 13,8 Power distribution”, Diversified Techonologies, Inc Bedford, MAUSA, Julho 2001

#### **Patentes para consulta:**

- “Compact High Voltage Solid State Switch”, US 2002/0149414A1, 17 Outubro 2002;
- “Fast acting Solid State AC circuit Breaker”, Patent nº CA1264369, 9 Janeiro 1990;
- “Solid-State Switch driven by Thermovoltaiic Generator”, US Patent nº 6,013,935, 11 Janeiro 2000
- “Solid State AC Switch”, US 2005/0052798A1, 10 Março 2005



## 10 Conclusões

O fabrico de disjuntores *Solid State* de alta velocidade para a média tensão, destinados, as redes de distribuição de energia eléctrica, ao controlo da energia gerada para os consumidores na média tensão/alta potência, e capaz de suportar as altas exigências para a estabilidade, qualidade, e fiabilidade é uma realidade cada vez mais próxima.

Esta tecnologia representa a maior solução, para dar uma resposta ao crescimento cada vez mais rápido, e a maior exigência da população de clientes das redes de distribuição. Estes necessitam de cada vez mais energia, e com uma qualidade e fiabilidade cada vez mais altas, do mesmo modo as cargas sensíveis e processos críticos nas redes de distribuição apresentam um crescimento exponencial.

Os potenciais benefícios são enormes. Isto não é um exagero apenas para comparar os aparelhos disponíveis para a média tensão, com os dispositivos *Solid State* de alta velocidade. Os interruptores de estado sólido (*Solid State Switches*), baseados no desenvolvimento dos circuitos integrados (IC) – possuem o potencial para revolucionar o mundo dos sistemas eléctricos de energia. Em termos gerais, os benefícios desta tecnologia inclui:

- A eliminação de distúrbios / harmónicos para a maioria das instalações de sistemas eléctricos de energia.
- Transição instantânea entre fontes de energia.
- Tamanho reduzido dos aparelhos de controlo de potência.
- Fácil integração de varias fontes de geração de energia.
- Fontes Altamente fiáveis (Sem-interrupção).
- Energia altamente regulada sem qualquer influencia do fornecedor e do tipo de cargas alimentar.
- Comutação instantânea (interruptor ideal)
- Ausência de partes móveis, o que provoca o desaparecimento de toda a complicação associada ao movimento das partes móveis e das equações referentes ao arco.
- Limitação da corrente de defeito para uma fácil eliminação do arco.



Apesar de todas estas vantagens, os *Solid State Switchs* apresentam um problema de segurança, considerados por muitos a maior limitação desta tecnologia, uma vez que não existe nenhum circuito aberto visível, toda a comutação é electrónica.

O mercado de aparelhagem para a média tensão é um mercado com características únicas, e é restringido a uma dezena de grandes fabricantes mundiais. Além disso é um mercado muito fechado, em termos de clientes, nenhum fabricante quer ser o primeiro a apostar numa nova tecnologia, o que acaba por ser compreensível, uma vez que, a grande parte dos processos na média tensão são processos nos quais cada avaria tem um custo associado de muitos e muitos milhões de euros.

Quando se pensa em tecnologia de ponta, existe uma associação natural á NASA. O que normalmente não se sabe é que a tecnologia que é enviada para o espaço, é tecnologia que já tem anos de aplicações, é tecnologia com provas dadas de que é realmente fiável. O mesmo se passa um pouco com os disjuntores *Solid State*. Nos mercados actuais ainda existe a ideia de “o que é mecânico é que é bom”. Se a tecnologia actual é fiável e interrompe de modo seguro os curtos circuitos porque mudar e apostar na tecnologia de estado sólido?

Para fundamentar esta ideia podemos referir que a tecnologia de corte no vácuo, apareceu nos anos 60, mas só começou a ser realmente utilizada e comercializada em larga escala nas últimas duas décadas, tornando-se actualmente a tecnologia dominante. Esta tecnologia demorou a implementar-se no mercado, devido à ideia conservadora e devido ao modo como funciona o mercado.

A aplicação da tecnologia *Solid State* exige uma ponderação muito cuidada da razão custo/segurança. Se a aplicação de um novo tipo de produto baseada no *solid state switching* na rede é efectuada, no caso de esta falhar, uma grande parte da rede falha o que provoca consequentes custos, que podem chegar a valores elevados. Mas, se a tecnologia é realmente fiável, até que ponto é compensada a sua aplicação sem olhar a custos? São dois pontos que reflectem a necessidade de se efectuar um estudo de custo/segurança antes de se optar pela sua aplicação.

O risco económico pode ser associado à quantidade de energia não distribuída (segundo os índices da EDP, a energia não distribuída é dada por  $END = \frac{ED}{T} \times TIEPI$ , e apresenta actualmente valores entre duas a quatro dezenas de milhares de MWh).



O colapso de uma parte da rede eléctrica tem efeitos económicos devastadores. O valor da energia não fornecida cresce de modo exponencial, o que tem custos associados, não só em termos de compensações avultadas para os consumidores, mas também para o arranque de geradores que possam ter desligado.

Devido a estes possíveis cenários, as empresas de distribuição de energia apresentam sempre uma atitude muito cautelosa.

A tecnologia *Solid State*, em termos de aplicações no “mundo real”, não apresenta uma grande dimensão, tem poucas provas dadas de que é realmente fiável, e a maior parte das tecnologias ainda nem sequer saiu do laboratório. Ainda é uma tecnologia muito “verde”. Devido a este aspecto pode-se afirmar que esta tecnologia apenas será dominante daqui a 20 ou 30 anos.

No que diz respeito ao *Solid State Switch*, a produção desta tecnologia em grande escala, traz um enorme problema para a grande parte das empresas dominadoras do mercado actual. É que esta tecnologia irá substituir uma grande parte da tecnologia existente, o que implica a substituição de fábricas, de *layouts*, centros de produção, etc..

Os produtores actuais de semicondutores são, á primeira vista, os principais beneficiados com esta tecnologia. Na sua emergência eles serão os próximos fornecedores de matéria-prima para aparelhagens de média tensão.

A tecnologia *Solid-State* oferece alta performance em termos de durabilidade de produto e redução no consumo de energia. Os *Solid State Switch* são produtos tecnológicos, vendidos através de redes de distribuição especializadas, as quais podem conhecer as necessidades emergentes dos clientes para um maior conforto e maior fiabilidade.

O negócio *Solid State Switch* tem um potencial significativo, graças ao seu dinamismo (o mercado cresce em média mais de 5% ao ano), é uma estratégia que vai de encontro com as operações existentes nas empresas de distribuição.





Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto PORTUGAL  
[www.fe.up.pt](http://www.fe.up.pt)



FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000105180