



## **Disjuntor Rápido Auxiliado por Semicondutores**

**Gonçalo José Afonso Alves Pinto**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientador: Professor José Fernando Alves da Silva

### **Júri**

Presidente: Professor Rui Manuel Gameiro de Castro

Orientador: Professor José Fernando Alves da Silva

Vogal: Miguel Cabral Ferreira Chaves

**Novembro 2018**



## **Declaração**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.



## **Agradecimentos**

Gostava de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Fernando Silva, pelo apoio prestado e conhecimento partilhado tornando assim possível a realização desta dissertação.

Quero aproveitar também esta oportunidade para agradecer ao Engenheiro Mário Raposo e ao Engenheiro Humberto Rocha pela flexibilidade permitida no meu horário de trabalho, que sem a qual seria impossível terminar o meu mestrado. Agradeço ainda a todos os meus amigos e familiares pelo apoio prestado ao longo do meu percurso académico.



## Resumo

Nos dias que correm a estabilidade de uma rede elétrica é algo fundamental para o bom funcionamento de um país e como tal está em constante inovação dos seus processos e produtos para assim diminuir cada vez mais a sua indisponibilidade.

Nesta dissertação abordou-se o comportamento de uma rede de média tensão de 30 kV comparando a duração de cava de tensão numa rede com um disjuntor típico de mercado face a uma rede com um modelo de disjuntor rápido assistido por semicondutores desenvolvido ao longo desta tese.

Para fazer esta análise foram desenvolvidos modelos da rede e os respetivos mecanismos de controlo associados aos disjuntores. Foi ainda desenvolvido um modelo (em Matlab/Simulink) do arco elétrico e do circuito de driver do disjuntor para assim ter-se uma análise mais pormenorizada do fenómeno de abertura e fecho do disjuntor em estudo.

Por fim, compararam-se os resultados e tiraram-se conclusões acerca da implementação de um disjuntor deste tipo numa rede de 30kV face aos existentes.

**Palavras chave:** Disjuntor, Driver, Arco Elétrico, Cava de Tensão





## Abstract

Nowadays the stability of a power grid is fundamental for the proper functioning of a country and as such, it is in constant innovation of its processes and products to thereby diminish its unavailability.

In this dissertation, the behavior of a 30 kV medium voltage network was studied by comparing the duration of voltage sags in a network with a typical circuit breaker against a network with a fast circuit breaker assisted by semiconductors model developed throughout this thesis.

To carry out this analysis, network models and their associated control mechanisms were developed for circuit breakers. A model (in Matlab / Simulink) of the electric arc and the driver circuit of the circuit breaker was also developed to allow for a more detailed analysis of the phenomenon of opening and closing of the circuit breaker under study.

Lastly, the results were compared, and conclusions were drawn about the implementation of a circuit breaker of this type in a 30 kV network compared against existing ones.

**Keywords:** Circuit Breaker, Driver, Electric Arc, Voltage Sag

## Índice

1.	Introdução .....	14
1.1	- Qualidade de Energia .....	14
1.2	- Objetivo da Tese.....	16
1.3	- Estrutura .....	16
2.	Disjuntores Existentes.....	17
2.1	- Disjuntores em Baixa Tensão( $V < 1\text{kV}$ ):.....	17
	Disjuntores térmicos.....	17
	Disjuntores magnéticos.....	17
	Disjuntores magnetotérmicos.....	17
2.2	- Disjuntores em Media Tensão ( $60\text{kV} > V > 1\text{kV}$ ) e Alta Tensão( $V \geq 60\text{kV}$ ).....	19
	Tipos de isoladores: .....	20
	Tipo de utilização: .....	25
	Tipos de Atuadores .....	26
2.3	- Disjuntor escolhido.....	28
3.	Modelos Desenvolvidos .....	29
3.1	- Rede.....	29
	Fonte .....	30
	Linha.....	31
	Consumidor 1 .....	31
	Consumidor 2 .....	32
	Disjuntor .....	33
3.2	- Atuador .....	34
3.3	- Arco Elétrico.....	37
	Tipos de Modelos .....	39
	Modelo do arco elétrico usado .....	40
3.4	- Disjuntor em Simulink .....	41
3.5	- Disjuntor Rápido auxiliado por semicondutores .....	43
	Cálculo dos Semicondutores .....	43
	Snubber do IGBT .....	44
	Snubber de Amortecimento .....	46
	Descarregador de Sobretensões .....	47
4.	Resultados da Simulação .....	48
	Disjuntor típico.....	49
	Disjuntor rápido auxiliado por semicondutores .....	52
5.	.....	55
5.1	- Conclusões .....	55

5.2 - Trabalhos Futuros.....	55
6. Bibliografia.....	56
7. ANEXOS .....	59
Semicondutor Usado: CM600HG-130H – Datasheet [13].....	59

## Lista de figuras

Figura 1.1: Curva CBEMA ITIC [14].....	15
Figura 2.1: Corte de um disjuntor [15] .....	18
Figura 2.2: Disjuntor MW116 - 1P 16A C 3kA 1M - características técnicas [16] .....	18
Figura 2.3: Gráfico do tempo de corte de um disjuntor para as várias curvas [17].....	19
Figura 2.4: Disjuntor a Óleo [18] .....	20
Figura 2.5: Disjuntor a Ar (sopro de ar) [19] .....	21
Figura 2.6: Disjuntor a Ar (natural) [20].....	22
Figura 2.7: Vantagens e Desvantagens dos Disjuntores a Ar .....	22
Figura 2.8: Disjuntor a vácuo [21] .....	23
Figura 2.9: Disjuntor a SF6 [22] .....	24
Figura 2.10: Disjuntor extraível de Média Tensão [23] .....	25
Figura 2.11: Cela de Média Tensão [24].....	25
Figura 2.12: Disjuntor de Alta Tensão [25] .....	25
Figura 2.13: Mecanismo de Mola [2].....	26
Figura 2.14: Mecanismo Magnético [10].....	27
Figura 2.15: Mecanismo Hidráulico [2] .....	27
Figura 2.16: Mecanismo Pneumático [2] .....	28
Figura 3.1: Esquema Geral do Modelo Desenvolvido .....	29
Figura 3.2: Fonte de Tensão.....	30
Figura 3.3: Impedância da Linha .....	31
Figura 3.4: Impedância do Consumidor 1 .....	31
Figura 3.5: Impedância do Consumidor 2.....	32
Figura 3.6: Diagrama Geral da Arquitetura do Disjuntor .....	33
Figura 3.7: Esquema do Atuador .....	34
Figura 3.8: Modelo do Atuador.....	35
Figura 3.9: Gráfico da distância entre os contactos do Disjuntor nas 3 fases.....	37
Figura 3.10: Exemplo de um Arco Elétrico [26] .....	37
Figura 3.11: Gráfico da TTR vs Recuperação Dielétrica [2] .....	38
Figura 3.12: Tempo de extinção de um defeito de acordo com IEC e IEE [2] .....	39
Figura 3.13: Descrição Geométrica do Arco [8].....	40
Figura 3.14: Fonte de Tensão usada no modelo do disjuntor .....	41
Figura 3.15: Exemplo clássico de uma malha algébrica .....	42
Figura 3.16: Atraso e Limitador de Rampa usado no modelo .....	42
Figura 3.17: Modelo do disjuntor rápido auxiliado por semicondutores .....	43
Figura 3.18: Snubber de Amortecimento .....	46
Figura 3.19: Modelo dos DST's usado.....	47
Figura 4.1: Esquema Geral do Modelo .....	48
Figura 4.2: Diagrama Temporal da Simulação .....	48
Figura 4.3: Corrente na Linha .....	49
Figura 4.4: Corrente nos Disjuntores .....	49
Figura 4.5: Condutância.....	50
Figura 4.6: Tensão do Arco.....	50
Figura 4.7: Tensão no Consumidor 1 .....	51
Figura 4.8: Corrente na Linha .....	52
Figura 4.9: Corrente nos Disjuntores .....	52
Figura 4.10: Corrente nos Semicondutores.....	53
Figura 4.11: Condutância.....	53
Figura 4.12: Tensão do Arco.....	54
Figura 4.13: Tensão no Consumidor 1 .....	54

## Lista de abreviaturas e símbolos

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
CBEMA	Computer & Business Equipment Manufacturers Association
ITIC	Information Technology Industry Council
$P_{cava}$	Profundidade da Cava de Tensão
TTR	Tensão Transitória de Restabelecimento
TI	Transformador de Corrente
TT	Transformador de Tensão
DST	Descarregador de Sobretensões
$E_{on}$	Energia necessária para passar o semicondutor à condução
$E_{off}$	Energia necessária para passar o semicondutor ao corte
$t_{on}$	Tempo necessário para passar o semicondutor à condução
$t_{off}$	Tempo necessário para passar o semicondutor ao corte
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
$V_{ce}$	Tensão Coletor-Emissor do IGBT
$I_c$	Corrente de Coletor do IGBT
$C_S$	Capacidade de Amortecimento do Snubber do IGBT
$R_S$	Resistência de Amortecimento do Snubber do IGBT
$C_A$	Capacidade de Amortecimento do Snubber do Sistema
$R_A$	Resistência de Amortecimento do Snubber do Sistema

# 1. Introdução

## 1.1 - Qualidade de Energia

A noção de qualidade no nosso dia-a-dia é geralmente relacionada com o facto de um certo bem ou serviço satisfazer ou não os nossos desejos e expectativas. A qualidade de energia de uma rede elétrica é normalmente associada à qualidade da forma de onda de tensão, à sua disponibilidade e à qualidade do serviço [4].

Relativamente ao primeiro tópico referido, a qualidade da forma de onda de tensão, existem muitos pormenores a ter em conta, nomeadamente: se a onda tem uma forma sinusoidal pura sem distorções, se o valor eficaz que se encontra nos quadros dos consumidores é de facto exatamente o valor estipulado (230V em instalações de baixa tensão monofásicas), se a frequência da onda é exatamente o valor nominal (50hz) ou se as 3 fases são simétricas e balanceadas conforme é suposto no sistema atual.

O segundo tópico, a disponibilidade do serviço, é algo de extrema importância, como se sabe, porque interrupções no fornecimento de energia mesmo de curta duração podem ter prejuízos enormes para certos consumidores. Neste tópico estão ainda incluídos a fiabilidade do serviço, a ausência de interrupções e o tempo das interrupções ocorridas.

No que diz respeito ao terceiro tópico, a qualidade do serviço, trata-se da avaliação do serviço prestado. Ou seja, a informação dada aos consumidores (preços, tarifas, faturas, etc) e o serviço de apoio ao cliente (se a empresa dispõe de um número de apoio, se possui apoio pela internet ou atendimento presencial).

Nesta dissertação vai haver um foco no primeiro tópico, mais precisamente no ponto relativo ao valor do módulo da tensão visto que a solução apresentada incide sobre a diminuição do tempo das cavas de tensão.

Existem vários tipos de distúrbios dentro deste tópico, nomeadamente:

- Cavas de tensão – ocorrem quando a tensão eficaz é menor que a tensão nominal por 10% a 90% durante meio ciclo (10ms nos 50Hz) a 1 minuto.
- Sobretensões momentâneas – ocorrem quando a tensão eficaz excede a tensão nominal por 10 a 80% durante meio ciclo a 1 minuto.
- Fenómenos de Flickering ou tremulações – estes fenómenos ocorrem quando existem variações de 90 a 110% na tensão nominal, é bastante notável pelas oscilações de luminosidade nas lâmpadas.

Dentro deste tópico da qualidade da forma da onda de tensão é de notar a existência da curva CBEMA modificada; atual ITIC/IEEE 1100 (fig.1.1) e da NP50160. Norma esta que descreve as

características principais, no ponto de entrega ao cliente, da tensão de alimentação por uma rede de distribuição pública em baixa ou média tensão, em condições normais de exploração.

A curva CBEMA estabelece os limites admissíveis de tensão para os quais os equipamentos informáticos e de escritório devem funcionar de forma adequada.

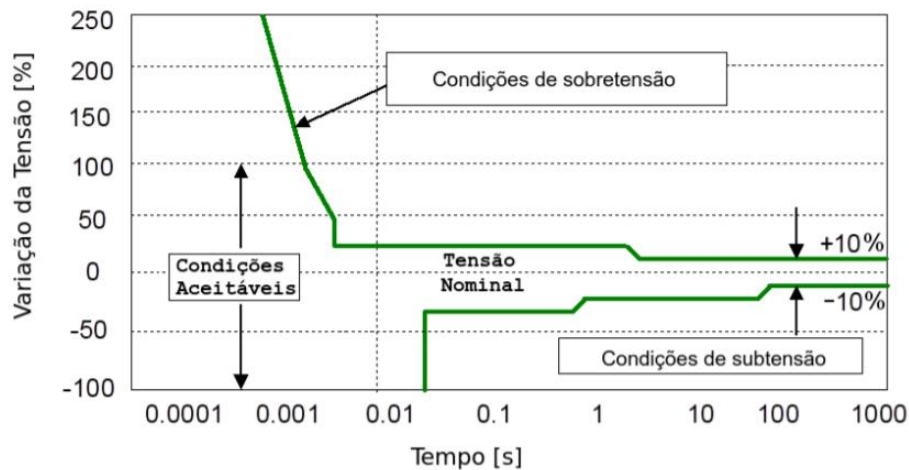


Figura 1.1: Curva CBEMA ITIC [14]

Antes de procedermos à análise da figura é importante definir o que se entende por profundidade de uma cava de tensão. A profundidade de uma cava de tensão define-se como sendo a diferença entre a tensão mínima existente durante uma cava face à tensão nominal:

$$P_{cava} [\%] = \frac{V_N - V_C}{V_N} 100 \quad (1)$$

Analisando agora a figura 1.1 com maior detalhe pode-se definir 3 zonas principais: a zona proibida de alta perigosidade, a zona proibida de baixa perigosidade e a zona de segura operação.

Relativamente à zona proibida de alta perigosidade, ou seja, a zona das sobretensões que os aparelhos não conseguem tolerar, trata-se da região acima da linha verde superior.

A zona proibida de baixa perigosidade (zona das subtensões que os aparelhos não conseguem suportar) refere-se à região abaixo da linha verde inferior.

A zona de segura operação é a zona entre as duas curvas verdes. Seguindo a curva verde superior consegue-se aferir que os aparelhos têm que tolerar sobretensões acima dos 250% nas gamas dos microssegundos, a partir dos milissegundos são supostos tolerar sobretensões abaixo dos +100% até que chegando à gama dos segundos as sobretensões toleráveis descem para cerca de +20/+10%.

Seguindo a curva verde inferior observa-se que os aparelhos são capazes de suportar ausência total de tensão até cerca de 20 milissegundos, a partir dessa gama de tempo até à região dos segundos suportam até cerca de -30/-40%. Entrando na gama das dezenas de segundos apenas conseguem tolerar cavas com cerca de -10 a -20% de profundidade.

Estes limites têm elevado interesse para esta dissertação pois irão servir de guia para o estudo da mitigação das cavas de tensão prejudiciais para estes equipamentos.

## 1.2 - Objetivo da Tese

O objetivo da tese é o de reduzir o tempo de duração das cavas de tensão numa rede elétrica de média tensão.

Vai-se procurar obter essa diminuição de tempo através do dimensionamento de um sistema de semicondutores de potência em parceria com disjuntores convencionais usados atualmente em subestações e postos de corte.

O funcionamento deste sistema baseia-se na redução da corrente que o disjuntor tem que cortar diminuindo assim o tempo que a corrente leva a extinguir-se. Ao fazermos isto, vamos diminuir o tempo de duração da cava de tensão nos ramos circundantes, conforme desejado.

## 1.3 - Estrutura

Esta tese está estruturada em 5 módulos base:

1. Introdução – dá-se uma ideia geral do que vai ser abordado ao longo da tese, mostrando alguns conceitos básicos sobre cavas de tensão.
2. Disjuntores Existentes – neste capítulo mostra-se os vários tipos de disjuntores existentes no mercado para as várias gamas de tensão.
3. Modelos Desenvolvidos – Explicação detalhada dos vários modelos dinâmicos elaborados nesta tese, bem como do disjuntor proposto.
4. Resultados da Simulação – Demonstração dos resultados e respetiva explicação.
5. Conclusões – Conclusões tiradas do trabalho desta dissertação.



## 2. Disjuntores Existentes

Um disjuntor é um aparelho eletromecânico que permite a proteção de circuitos elétricos contra sobrecargas e curto-circuitos, interrompendo correntes anormalmente elevadas ou de curto-circuito.

O fabrico e o funcionamento de cada disjuntor está fortemente dependente do nível de tensão a que vai trabalhar. Sendo importante para esta dissertação perceber o funcionamento deste tão importante aparelho, dedicar-se-á este capítulo a explicar de forma sucinta os vários tipos de disjuntores e respetivas gamas.

### 2.1 - Disjuntores em Baixa Tensão( $V < 1\text{kV}$ ):

Nesta gama são da maior importância os disjuntores térmicos, magnéticos e magnetotérmicos (sendo este último a combinação dos dois anteriores).

#### Disjuntores térmicos

Operam sob o princípio básico da deformação de placas bimetálicas causada pelo seu aquecimento. A abertura de contactos causada pela deformação destas placas constitui a função de proteger os circuitos contra sobrecargas prolongadas. Apesar de ser um sistema simples e robusto é lento e não muito preciso.

#### Disjuntores magnéticos

Funcionam por efeito de um campo magnético criado pela passagem da corrente, ou seja, existe um campo magnético criado pela corrente que percorre várias espiras. O campo magnético por sua vez faz mover o núcleo de ferro que vai deslocar mecanicamente os contactos do circuito. A principal função deste disjuntor é a de proteger as instalações elétricas contra curto-circuitos.

É um sistema preciso que dispara (abre o disjuntor) conforme uma curva temporal previamente escolhida.

#### Disjuntores magnetotérmicos

Estes disjuntores são normalmente instalados nos quadros elétricos residenciais, funcionando com a combinação dos efeitos térmicos e magnéticos. Protegem assim contra sobrecargas e curto-circuitos.

A figura 2.1 e a figura 2.2 representam um exemplo dum disjuntor magnetotérmico tipo para a proteção de um circuito de tomadas numa residência.

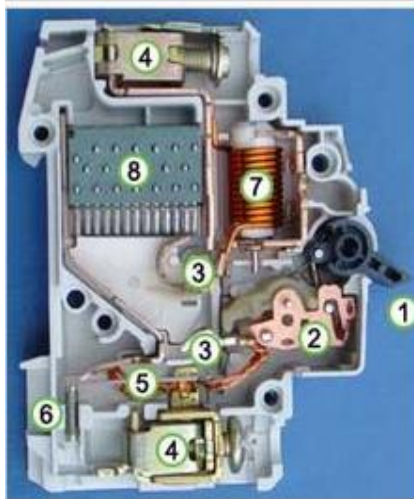


Figura 2.1: Corte de um disjuntor [15]

#### LEGENDA:

1. Manopla: Utilizada para fazer o fecho ou abertura manual
2. Mecanismo atuador: Junta ou separa o sistema da rede elétrica
3. Contatos: Permitem que a corrente flua quando o disjuntor está ligado e seja interrompida quando desligado
4. Terminais
5. Disparo Bimetálico
6. Parafuso calibrador: Permite que o fabricante ajuste precisamente a corrente de disparo do dispositivo após montagem
7. Solenoide ou bobina
8. Câmara de extinção do arco

MW116



Propriedades técnicas	
Intensidade nominal	16 A
Poder de corte estipulado	3 kA
Curva	C
Tensão alternada estipulada de utilização	230/400 V
Frequência de funcionamento	50/60 Hz
Poder de corte de serviço conforme EN60898	3 kA
Nº de módulos	1
Nº de pólos	1 P
Temperatura de funcionamento	-25 a 60 °C

Figura 2.2: Disjuntor MW116 - 1P 16A C 3kA 1M - características técnicas [16]

Este quadro de características técnicas indica que este disjuntor consegue cortar correntes até 3000 A de acordo com uma curva C. Cada disjuntor tem uma curva de atuação específica, que

indica o comportamento do equipamento em função dos níveis da corrente. Existem 3 tipos de curvas básicas(fig.2.3):

**-Curva B** indicada para cargas resistivas com pequena corrente no transitório de ligação, como é o caso de aquecedores elétricos, fornos elétricos e lâmpadas incandescentes.

**-Curva C** indicada para cargas de média corrente no transitório de ligação, como motores elétricos, lâmpadas fluorescentes e máquinas de lavar roupa.

**-Curva D** indicada para cargas com grande corrente no transitório de ligação, a exemplo de transformadores BT/BT (baixa tensão).

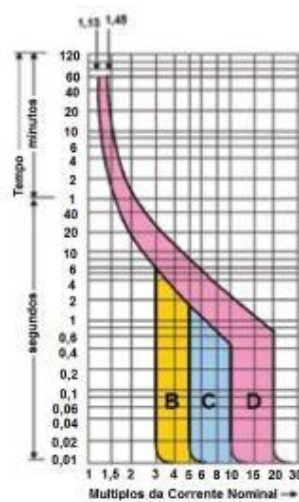


Figura 2.3: Gráfico do tempo de corte de um disjuntor para as várias curvas [17]

## 2.2 - Disjuntores em Media Tensão ( $60\text{kV} > V > 1\text{kV}$ ) e Alta Tensão ( $V \geq 60\text{kV}$ )

Nesta gama os disjuntores funcionam de maneira totalmente diferente. Funcionam em conjunto com uma Proteção/Relé que é responsável pela parte de comando, ao contrário dos de baixa tensão em que é um único aparelho responsável pelo comando e atuação. Estas proteções recebem informações dos transformadores de corrente (TI) e dos transformadores de tensão (TT) e, de acordo com os parâmetros ajustados, enviam as ordens de abertura e de fecho para o respetivo disjuntor.

Esta diferença deve-se obviamente ao nível de grandeza das correntes e das tensões em jogo nesta gama. Nos dias de hoje os disjuntores diferenciam-se por [2][3]:

## Tipos de isoladores:

### Óleo

Os disjuntores a óleo foram dos primeiros a surgir e foram largamente usados durante todo o século XX devido ao seu baixo custo e ao facto do óleo ter melhores propriedades dielétricas que o ar.

Existem 2 tipos principais de disjuntores a óleo:

- Do tipo “dead tank”
- Do tipo “live tank”

Tal como o nome sugere a diferença principal entre estes tipos de disjuntores baseia-se no aterramento ou não do encapsulamento do tanque de óleo, ou seja, os do tipo “dead tank” possuem encapsulamento metálico e aterrado enquanto que os do tipo “live tank” não[2] [3].

De notar que o contacto fixo e o contacto móvel neste tipo de disjuntores estão emergidos em óleo (fig. 2.4) e na altura da separação dos contactos o arco eléctrico é iniciado vaporizando o óleo e decompondo-o em gás de hidrogénio aumentando a quantidade de gás comprimido em volta do arco o que vai ajudar no processo de desionização e arrefecimento do meio.

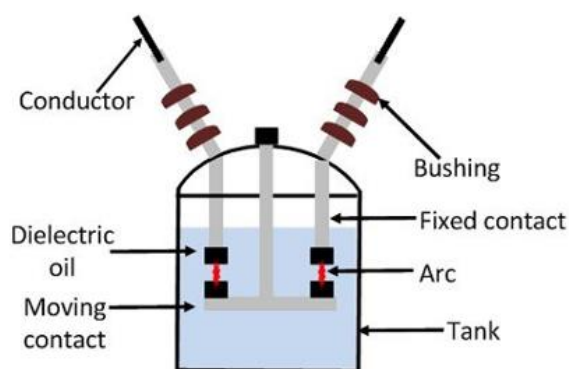


Figura 2.4: Disjuntor a Óleo [18]

Vantagens:

- O óleo é melhor isolador dielétrico que o ar
- Baixo custo

Desvantagens:

- Possibilidade de explosão e incêndio.
- Óleo sofre deterioração das suas propriedades

## Ar

Dentro deste tipo de isolamento, existem dois tipos básicos de eliminação de arco:

- Ar “natural”
- Sopros de Ar

Os de sopros de ar (fig. 2.5) são usados para gamas de Alta tensão, tipicamente a partir dos 150kV. Tal como o nome indica o princípio básico de eliminação do arco baseia-se no envio de ar pressurizado quando é formado o arco.

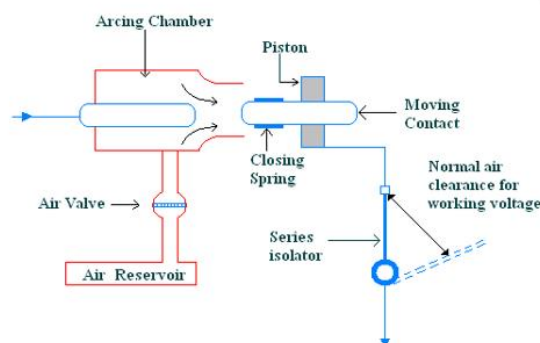


Figura 2.5: Disjuntor a Ar (sopro de ar) [19]

Os disjuntores de ar “natural” (fig. 2.6) são usados para gamas mais baixas de tensão. O princípio básico de eliminação do arco baseia-se no reencaminhamento do arco elétrico para uma câmara de extinção semelhante às câmaras de extinção usadas em baixa tensão, mas neste caso dimensionadas para gamas de tensão mais altas. De notar as vantagens e desvantagens destes dois tipos de disjuntores (fig. 2.7).

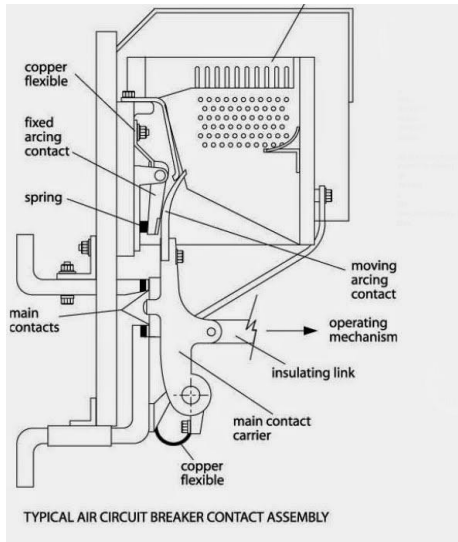


Figura 2.6: Disjuntor a Ar (natural) [20]

	Sopro de ar	Ar natural
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Menor risco de incêndio que os disjuntores a óleo</li> <li>-Utilizado em gamas altas de tensão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Menor risco de incêndio que os disjuntores a óleo</li> <li>-Pouca manutenção</li> </ul>
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Para manobras frequentes precisamos de um compressor com boa capacidade</li> <li>-Manutenção frequente do compressor</li> <li>-Perdas de pressão de ar no circuito pneumático</li> <li>-Economicamente menos viável que os concorrentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Não é utilizado em gamas altas de tensão</li> </ul>

Figura 2.7: Vantagens e Desvantagens dos Disjuntores a Ar

## Vácuo

Disjuntores de vácuo (fig. 2.8) são largamente usados nos dias de hoje especialmente na gama da média tensão [6]. Estes disjuntores são compactos e de longa duração, ou seja, executam muitas manobras até necessitarem de manutenção, o que reforça a preferência nesta gama.

De notar que na ampola de vácuo quando existe a separação dos contactos, o arco elétrico é produzido na mesma devido à ionização dos vapores de metal dos respetivos contactos. No entanto a recuperação dielétrica é bastante rápida devido à condensação rápida destes gases.

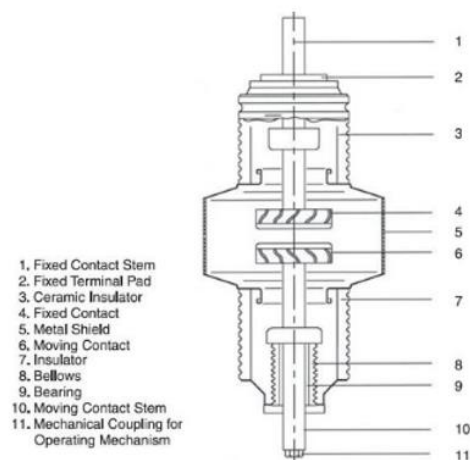


Figura 2.8: Disjuntor a vácuo [21]

### Vantagens

- Compactos e de pouca manutenção
- Risco de Incêndio é mínimo

### Desvantagens

- Reparações no terreno ao nível das ampolas são complicadas ou inexistentes, requerem o envio de novas de fábrica.

## SF6 (hexafluoreto de enxofre)

Esta tecnologia é relativamente recente comparativamente com as outras no mercado. As primeiras aplicações no terreno datam do início da década de 50.

Neste tipo de disjuntores (fig. 2.9) os contactos estão envoltos em SF6(hexafluoreto de enxofre), gás este que possui grande capacidade dielétrica e grande eletronegatividade, ou seja, é um gás com grande capacidade de captura de eletrões livres.

Em teoria o SF6 é cerca de 100 vezes mais eficiente na eliminação do arco elétrico do que os disjuntores a ar natural. É usado maioritariamente nas gamas mais altas da média tensão e em toda a gama da alta tensão.

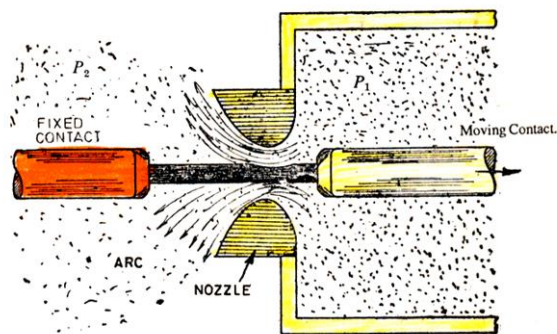


Figura 2.9: Disjuntor a SF6 [22]

Vantagens:

- Melhor dielétrico do mercado
- Grande gama de atuação (chega às gamas mais altas da alta tensão)
- O gás tem boas propriedades de transferência de calor devido à baixa viscosidade

Desvantagens:

- Alguns dos compostos produzidos na reação do gás sob altas temperaturas podem ser tóxicos para o ser humano e meio ambiente.



## Tipo de utilização:

### *Indoor*

Os disjuntores deste tipo (fig. 2.10) possuem tensões de trabalho até cerca de 36kV devido às distâncias de isolamento possíveis nas celas de Média Tensão (fig. 2.11).



Figura 2.10: Disjuntor extraível de Média Tensão [23]

Figura 2.11: Cella de Média Tensão [24]

### *Outdoor*

Os disjuntores do tipo outdoor (fig. 2.12) possuem tensões de serviço acima dos 36kV anterior devido às distâncias de isolamento possíveis num parque exterior.



Figura 2.12: Disjuntor de Alta Tensão [25]

## Tipos de Atuadores

### Mola

Os Disjuntores mais utilizados atualmente são os atuados por mola (fig. 2.13). Um motor elétrico carrega a mola e quando é dada ordem de disparo pela proteção, a bobine de abertura é energizada, destravando a mola que por sua vez se encontra acoplada mecanicamente ao veio de deslocamento dos contactos principais do disjuntor.

De notar que estes mecanismos têm sistemas de segurança, como é o exemplo do alarme de mola frouxa e só permitem o fecho quando a abertura é garantida. Por vezes possuem 2 bobines de abertura (por segurança) e 1 bobine de fecho.

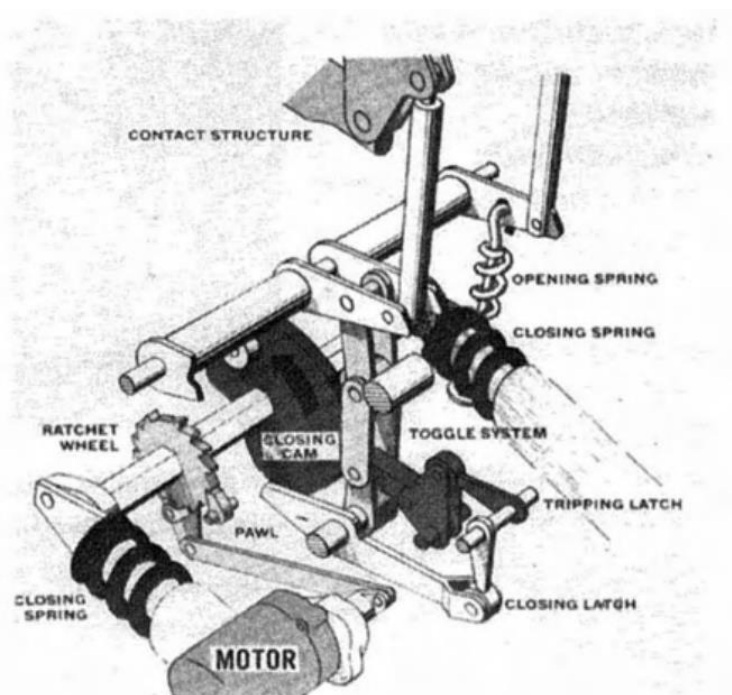


Figura 2.13: Mecanismo de Mola [2]

### Magnético

O atuador magnético (fig. 2.14) atua pelo princípio da movimentação de um veio comum através de força magnética que é transmitida mecanicamente aos contactos principais do disjuntor. Nas posições de limite, a armadura é mantida no lugar magneticamente pelos campos dos dois ímans permanentes.

A mudança da posição do disjuntor é realizada excitando uma das duas bobinas de eletroímã (abrir ou fechar) até que a força de bloqueio dos ímans permanentes seja excedida e a armadura do ímã seja deslocada para cima ou para baixo dependendo da operação.

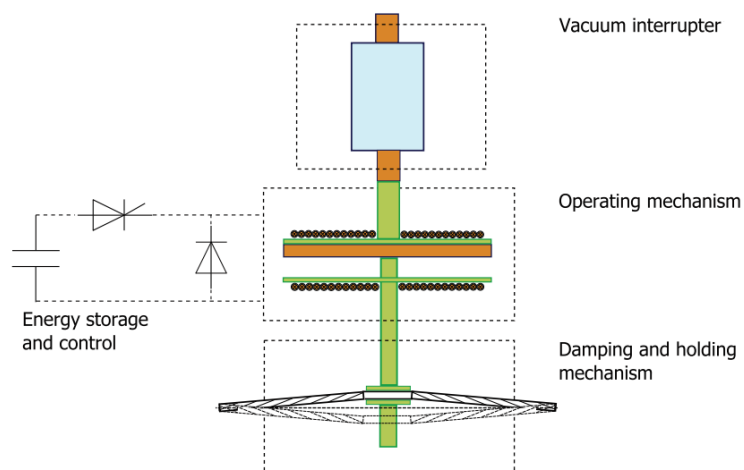


Figura 2.14: Mecanismo Magnético [10]

### Hidráulico

Pode-se observar um exemplo de um atuador hidráulico (fig. 2.15).

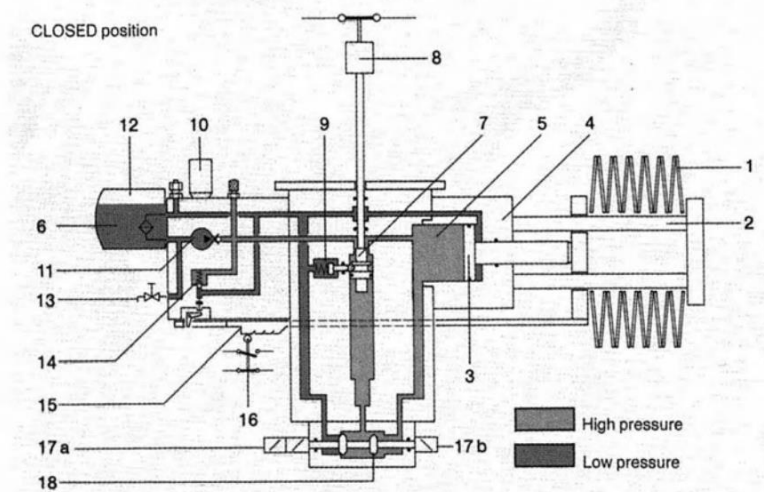


Figura 2.15: Mecanismo Hidráulico [2]

Existem 2 circuitos principais, o de baixa pressão e o de alta pressão. O reservatório de óleo a baixa pressão (6) e bomba de óleo (11) são os responsáveis por estes dois circuitos.

O princípio básico de funcionamento consiste na movimentação do pistão (7) que se encontra agregado por um veio aos contactos do disjuntor. Esta movimentação ocorre quando é energizado a bobine de abertura (17a) ou a bobine de fecho (17b).

A energização de uma destas bobines faz a comutação de óleo a baixa ou a alta pressão para a parte inferior do pistão causando o seu deslocamento e por sua vez a comutação do estado do contacto principal do disjuntor.

### Pneumático

Estes tipos de mecanismos (fig. 2.16) funcionam de maneira muito similar aos disjuntores hidráulicos, sendo a diferença óbvia o fluido em causa, que neste caso é o ar pressurizado.

De notar que este mecanismo está normalmente associado a disjuntores de sopro de ar visto já existir ar pressurizado para a extinção do arco elétrico nas câmaras. No entanto, também podem ser usados para operar outro tipo de disjuntores como os de SF6 e a óleo visto que já se conhecem situações onde operam com este mecanismo.

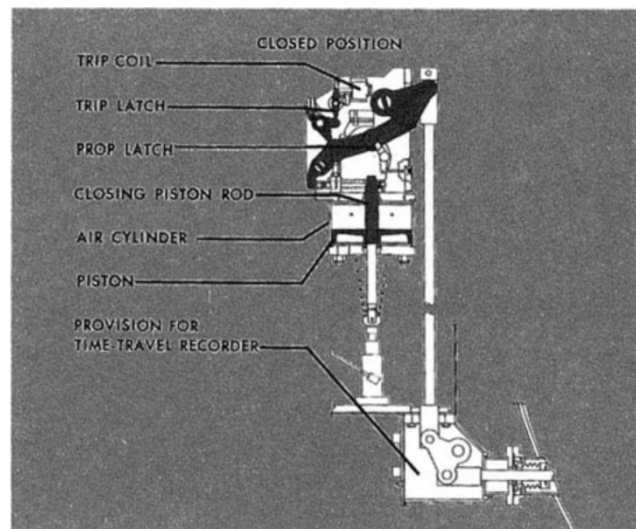


Figura 2.16: Mecanismo Pneumático [2]

### 2.3- Disjuntor escolhido

O disjuntor escolhido foi um disjuntor a vácuo de atuação magnética com as seguintes características:

- Tensão Nominal: 36 kV
- Corrente Nominal: 630 A
- Frequência: 50/60 Hz
- Corrente de curto-circuito de curta duração: 12,5 kA (3s)
- Nível de isolamento ao choque(1,2/50us): 150kV
- Poder de fecho sob curto-circuito: 31,5 kAp
- Poder de corte: 12,5 kA

### 3. Modelos Desenvolvidos

#### 3.1 - Rede

Como se pode observar na figura 3.1 o modelo geral é um sistema trifásico composto por uma fonte, 2 consumidores e um disjuntor.

Existem ainda as respectivas resistências e indutâncias das linhas de 30 kV.

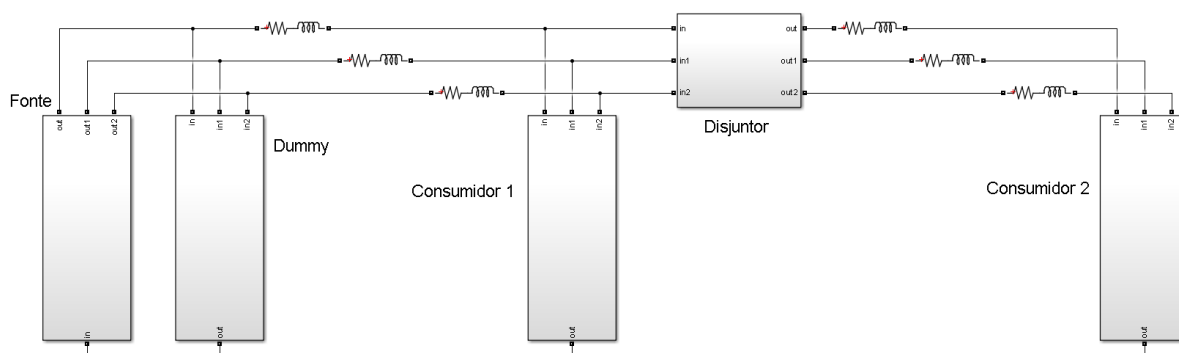


Figura 3.1: Esquema Geral do Modelo Desenvolvido

## Fonte

Bloco composto por fontes de tensão AC trifásicas com respectiva resistência e indutância interna (fig. 3.2).

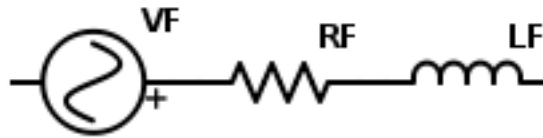


Figura 3.2: Fonte de Tensão

$$V_F = V_{F_{\text{rms}}} e^{j\theta_i} \quad (2)$$

$$V_{F_{\text{rms}}} = 17,341 \text{ kV}$$

$$\theta_1 = 0^\circ; \theta_2 = -120^\circ; \theta_3 = 120^\circ$$

$$Z_F = R_F + j\omega L_F \quad (3)$$

$$R_F = 0,1 \Omega$$

$$L_F = 0,1 \text{ mH}$$

## Linha

Para modelar a linha da rede elétrica considerou-se o modelo da linha curta visto ser adequado para linhas aéreas até 80 km [1].

Este modelo despreza a admitância transversal da linha sendo unicamente modelada pela impedância longitudinal (fig. 3.3).



Figura 3.3: Impedância da Linha

$$Z_{linha} = R_L + j\omega L_L \quad (4)$$

$$R_L = 5 \Omega$$

$$L_L = 1 \text{ mH}$$

## Consumidor 1

Bloco composto por 3 cargas idênticas (fig.3.4).

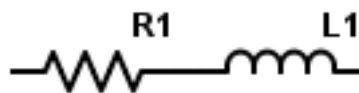


Figura 3.4: Impedância do Consumidor 1

$$Z_{consumidor_1} = R_1 + j\omega L_1 \quad (5)$$

$$R_1 = 100 \Omega$$

$$L_1 = 1 \text{ mH}$$

## Consumidor 2

Bloco composto por 3 cargas equivalentes (fig.3.5) com 2 cenários possíveis.

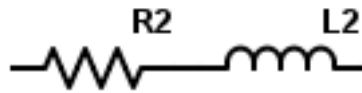


Figura 3.5: Impedância do Consumidor 2

Cenário 1 (funcionamento normal):

$$Z_{consumidor_2} = R_2 + j\omega L_2 \quad (6)$$

$$R_2 = 100 \Omega$$

$$L_2 = 1 \text{ mH}$$

Cenário 2 (curto-circuito):

$$Z_{consumidor_2} = R_2 + j\omega L_2 \quad (7)$$

$$R_2 = 1 \Omega$$

$$L_2 = 1 \text{ mH}$$



## Disjuntor

O módulo descrito como disjuntor no esquema geral compreende vários submodelos (fig. 3.6), nomeadamente:

- Atuador
- Modelo do Arco
- IGBTs
- Snubber
- DST (descarregador de sobretensões)

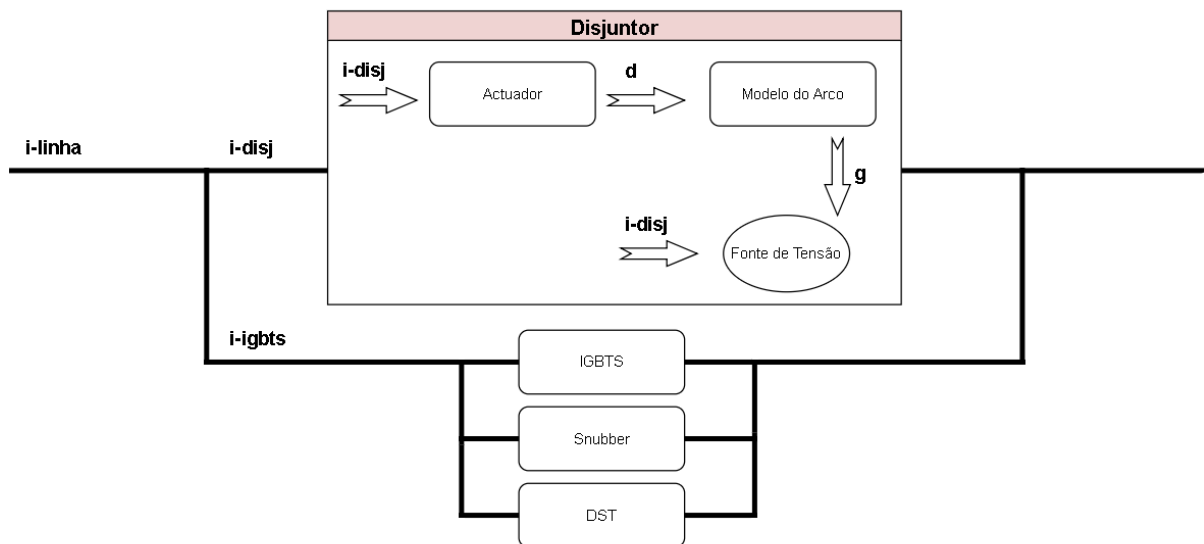


Figura 3.6: Diagrama Geral da Arquitetura do Disjuntor

Este diagrama demonstra a arquitetura do sistema do disjuntor de forma sucinta. Todos estes módulos irão ser explicados ao pormenor nos tópicos seguintes.

## 3.2 - Atuador

Circuito do driver do eletroímã responsável pela abertura dos contactos do disjuntor (fig. 3.7).

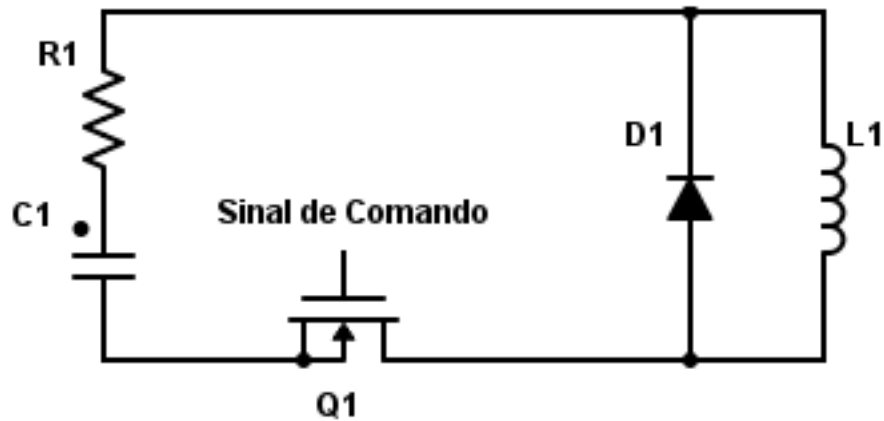


Figura 3.7: Esquema do Atuador

Em que:

C1: Condensador de armazenamento de energia

R1: Resistência interna do condensador C1

Q1: Semicondutor responsável pelo comando do circuito

D1: Díodo de roda livre para proteção

L1: Eletroímã

Para a simulação desta parte tem-se em consideração dados de drivers usados em disjuntores atuais de grandes empresas do ramo da Energia.

### Funcionamento:

Medindo a corrente na linha e tendo fixado um determinado valor de corrente como “threshold”, para abrir o disjuntor é dada ordem de condução ao semiconductor Q1 que por sua vez vai fazer com que o circuito se feche energizando assim a bobine através da descarga do condensador, começando assim o processo de abertura.

O modelo simulink usado encontra-se representado na figura 3.8.

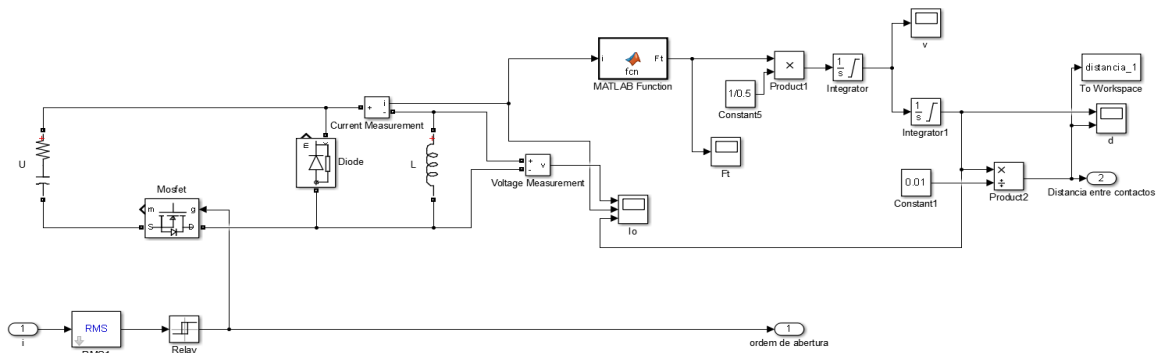


Figura 3.8: Modelo do Atuador

Como podemos observar o controlo do semiconductor é feito pela medição do valor eficaz da corrente que passa na linha e caso esta ultrapasse o valor estipulado dá ordem de condução ao semiconductor Q1 energizando assim o eletroímã.

Através dá medição da corrente que passa pelo solenoide explicada acima conseguimos calcular a  $F_{em}$  exercida pela bobine, subtraindo a  $F_{iman}$  obtemos a  $F_{total}$ .

Este Íman é responsável pelo “latching” nas posições limite de aberto e fechado dos contactos do disjuntor [10].

$$F_{em} = F_m^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{A}{2d^2} \quad (8)$$

$$F_m = Ni \quad (9)$$

$$F_{total} = F_{em} - F_{iman} \quad (10)$$

Em que:

$F_{em}$ : Força eletromagnética [N]

$F_m$ : Força magnetomotriz

$\mu_0$ : Permeabilidade magnética do vázio =  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

A: Área do elemento móvel =  $0,01 \text{ m}^2$

d: Distância entre o solenoide e a parte metálica =  $0,01 \text{ m}$

N: Número de espiras = 50

I: Corrente que atravessa o eletroíman

$F_{íman}$  : Força do íman = 110 N

Através da força total, usando a 2ª Lei de Newton para o movimento, obtemos o valor da aceleração. A integração sucessiva da aceleração leva ao valor da posição.

$$F_{total} = m \cdot a \quad (11)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (12)$$

Em que:

m: Massa = 0,5kg

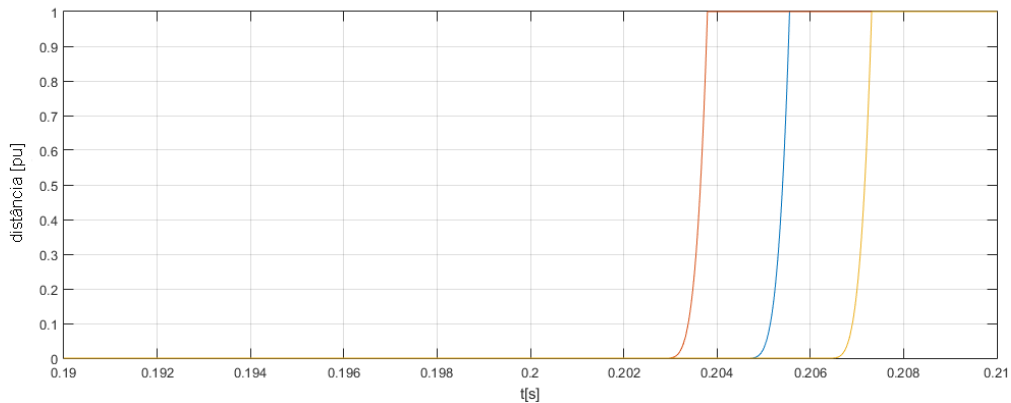
a: Aceleração

v: Velocidade

t: Tempo

x: Posição

Posição esta que é interpretada como a distância entre os contatos metálicos do disjuntor.



**Figura 3.9: Gráfico da distância entre os contactos do Disjuntor nas 3 fases**

O Gráfico da figura 3.9 é representativo da evolução da distância entre os contactos do disjuntor nas 3 fases providenciado pelo modelo do atuador apresentado anteriormente para um defeito aos 0,2s.

De notar que a distância entre os contactos se encontra normalizada em que 0 é a posição de fechado e 1 é a posição de aberto.

### 3.3 - Arco Elétrico

O arco elétrico (fig. 3.10) é um fenómeno que se baseia na passagem de corrente elétrica através de um meio isolante devido à sua rutura dielétrica e consequente produção de plasma (gás ionizado).



**Figura 3.10: Exemplo de um Arco Elétrico [26]**

Apesar de serem mais frequentemente observado arcos elétricos no ar, o fenómeno pode acontecer em diversos tipos de gases e vapores a diversas pressões. Estes gases e vapores que servem de condutores no meio dielétrico são originados em parte pelos próprios contactos e em parte pelo meio envolvente.

Fundamentalmente o arco comporta-se como uma resistência não linear exibindo uma baixa queda de tensão [3]. Posto isto, deve então discutir-se o processo da sua extinção.

A ideia básica da extinção do arco foca-se em forçar a corrente a zero. Como se tem um sistema alternado sinusoidal a corrente anula-se (passa por zero) em cada meio período.

No caso de um arco elétrico estabilizado assim que a corrente do arco sobe, a sua resistência diminui devido ao aumento de temperatura que aumenta o processo de ionização do meio e quando a corrente diminui a sua resistência aumenta. De notar que perto da passagem natural por zero da corrente, o arco extingue-se por breves instantes até que volta a ser formado no sentido oposto caso haja condições para tal. Ou seja, a condição é a de se impedir a reignição do arco nas passagens por zero da corrente e por isso o processo de desionização do arco depois da passagem por zero é de extrema importância. Para existir sucesso na extinção a capacidade dielétrica do material tem de resistir à tensão que está a ser imposta em torno do dielétrico pelo circuito (Tensão Transitória de Restabelecimento - TTR) (fig. 3.11) numa tentativa de restabelecimento da corrente, esta tensão é função das constantes do circuito.

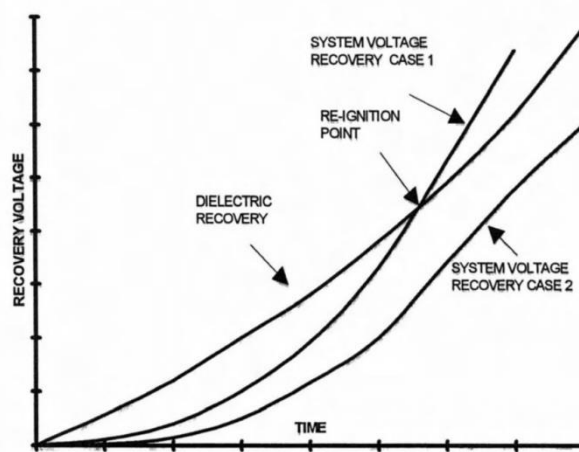


Figura 3.11: Gráfico da TTR vs Recuperação Dielétrica [2]

Na figura 3.11 temos dois exemplos distintos de tensões transitórias de restabelecimento. Pode-se reparar que o caso 2 não vai provocar o restabelecimento da corrente no circuito.

De notar que a parte do arco elétrico é a componente maioritária no tempo de extinção de um defeito. Pode-se observar a figura 3.12 que esclarece a definição do tempo de extinção de um defeito de acordo com a IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) e a IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrónicos).

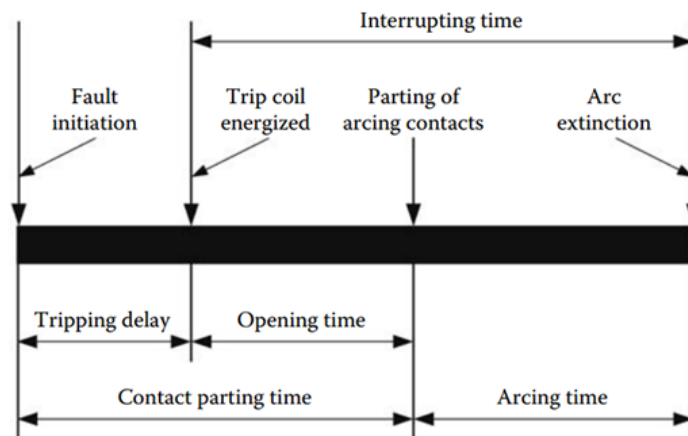


Figura 3.12: Tempo de extinção de um defeito de acordo com IEC e IEE [2]

### Tipos de Modelos

Existem várias maneiras de caracterizar o arco elétrico, a maior parte envolve complexas equações diferenciais [9]. Os 3 tipos de modelos mais usados atualmente são [5][12]:

#### Os Modelos Físicos

- Descrevem os fenómenos físicos
- Usados no projecto de aparelhos
- Matematicamente exigentes

#### Os Modelos de Parâmetros entrada-saída

- Modelos “Black Box”, mas mais precisos
- Parâmetros são obtidos a partir de funções e tabelas complexas

#### Modelos do tipo “Black Box”

- Descrevem o comportamento aproximado do arco
- Usado para simulação da interação do arco e do circuito
- Providencia a relação entre a condutância do arco e as variáveis do circuito
- Não é usado para o design de aparelhos

## Modelo do arco elétrico usado

Para a elaboração do modelo de arco optou-se por usar um modelo do tipo “black box”, mais concretamente o modelo elaborado por Cassie.

Este modelo, apresentado por Cassie em 1939, foi dos primeiros modelos (dinâmicos) a descrever o comportamento dinâmico do arco elétrico [5][7][12]. Na figura 3.13 pode-se observar uma descrição da geometria do arco elétrico e respetivo fluxo de cargas [8].

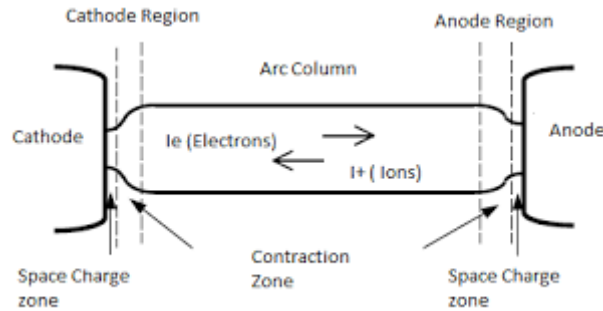


Figura 3.13: Descrição Geométrica do Arco [8]

Este modelo assenta nas seguintes premissas base [11]:

- Temperatura do arco constante
- Densidade de corrente constante
- Campo elétrico constante
- Diâmetro do arco variável com a corrente e com o tempo.
- Convecção térmica como maior responsável pelas perdas de energia do processo

$$\frac{d}{dt} \ln g = \frac{1}{\tau_c} \left( \frac{U_{arc}^2}{U^2} - 1 \right) \quad (13)$$

$$g = e^{\frac{1}{\tau_c} \int_0^T \left( \frac{U_{arc}^2}{U^2} - 1 \right) dt} + g_0 \quad (14)$$

$$U = Ed \quad (15)$$

Em que:

$g$ : Condutância do arco [S]

$\tau_c$ : Constante de tempo do arco = 8 ms (retirado dos dados do fabricante) [s]

$U_{arc}$ : Tensão do arco (medida aos terminais do disjuntor) [V]

$U$ : Tensão estática do arco [V]

$T$ : Período [s]

$g_0$ : Condutância inicial do disjuntor = 10  $\mu$ S



E: Constante de tensão do sistema = 30000 V

d: Distância entre contactos do disjuntor [m]

De notar que a associação do modelo do driver anteriormente explicado com o modelo do arco é feito através da dependência da distância entre os contactos no parâmetro U descrito na fórmula 15.

### 3.4 - Disjuntor em Simulink

Para modelar o disjuntor em Simulink teve que se encontrar uma maneira de o relacionar com a condutância gerada pelo modelo do arco elétrico. Optou-se por uma fonte de tensão controlada (fig. 3.14).

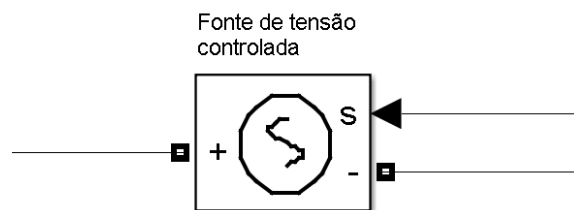


Figura 3.14: Fonte de Tensão usada no modelo do disjuntor

Lendo a corrente que passa no disjuntor e através da condutância gerada pelo modelo em (14), onde U é a tensão obtida em (15), obtém-se o valor da tensão:

$$V = RI \Leftrightarrow V = \frac{I}{g} \quad (16)$$

Em que:

V: Tensão [V]

R: Resistência [ $\Omega$ ]

I: Corrente [A]

g: Condutância [S]

Este valor é utilizado num bloco de atraso seguido por um bloco de limitador de rampa ("Rate Limiter") (fig. 3.16) antes de entrar na fonte de tensão controlada por tensão, para evitar que a dinâmica não representada resulte em malhas algébricas fechadas (fig. 3.15).

Isto deve-se ao facto de estarmos a usar valores que ainda estão a ser gerados naquele instante pelo próprio modelo.

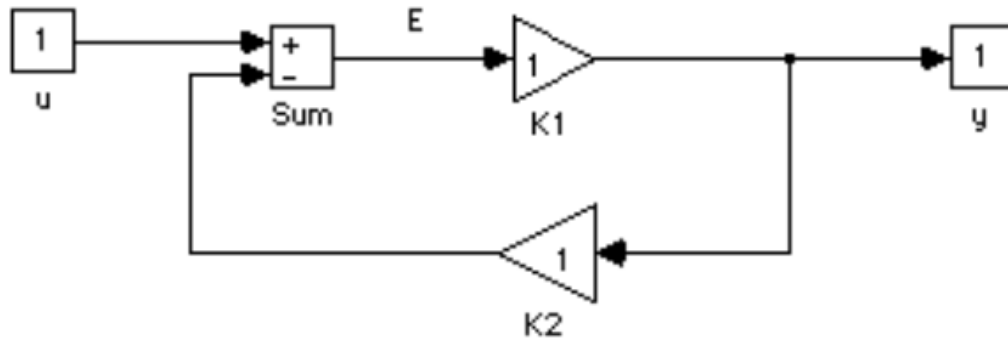


Figura 3.15: Exemplo clássico de uma malha algébrica

Como podemos observar (fig. 3.15) a variável E está a ser gerada por uma soma em que uma das variáveis precisa dessa mesma variável E para ser computada.

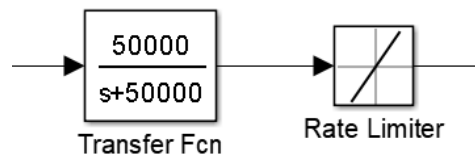


Figura 3.16: Atraso e Limitador de Rampa usado no modelo

$$\text{Rising slew rate} = U_{\text{fonte\_peak}} \cdot 2\pi f \quad (17)$$

$$\text{Falling slew rate} = -U_{\text{fonte\_peak}} \cdot 2\pi f \quad (18)$$

$$U_{\text{fonte\_peak}} = \sqrt{2} U_{\text{fonte\_eficaz}} \quad (19)$$

Em que:

$U_{\text{fonte\_eficaz}}$ : Tensão eficaz da fonte = 17320 V

$U_{\text{fonte\_peak}}$ : Tensão de pico da fonte = 24421 V

### 3.5 - Disjuntor Rápido auxiliado por semicondutores

Pode ser observada a arquitetura usada e respectivos componentes na figura 3.17.

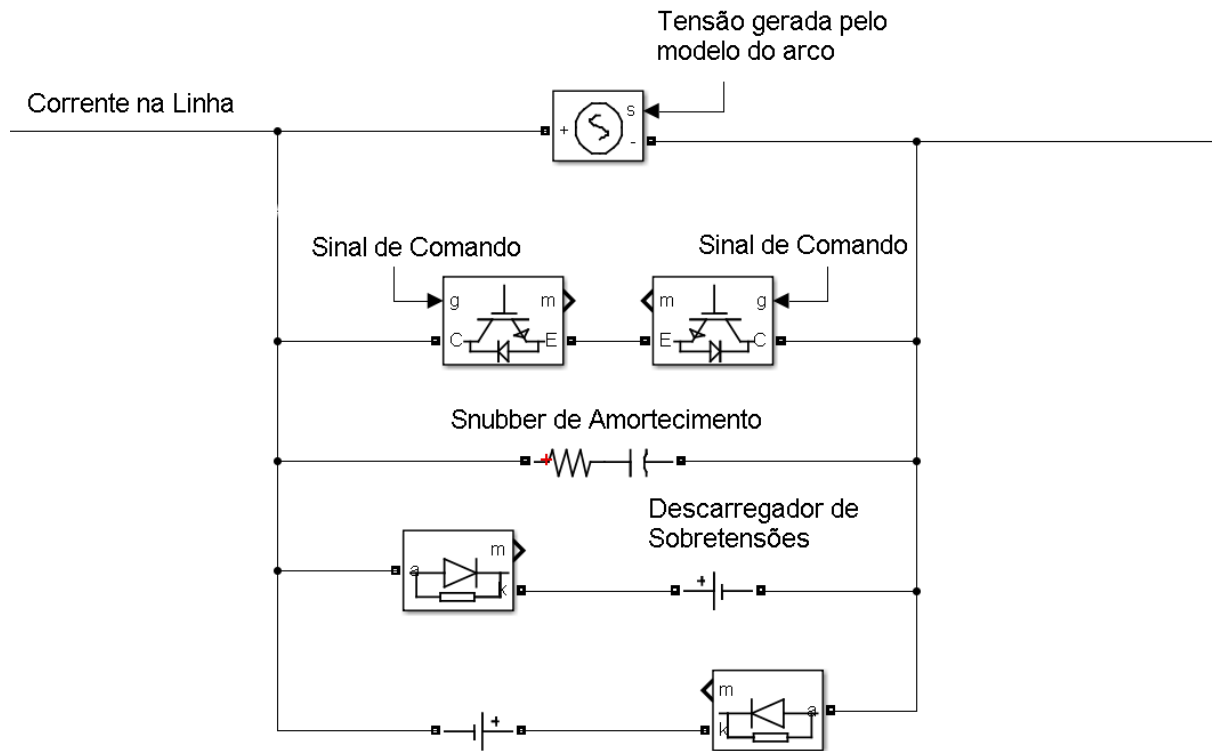


Figura 3.17: Modelo do disjuntor rápido auxiliado por semicondutores

#### Cálculo dos Semicondutores

O Semicondutor usado para simulação foi o CM600HG-130H, um IGBT da Mitsubishi (Datasheet em anexo) devido ao seu elevado valor de corrente de coletor e de tensão coletor-emissor.

Dados mais relevantes:

- $I_c = 600 \text{ A}$
- $V_{ce} = 6500 \text{ V}$
- $V_{ge} = \pm 15 \text{ V}$
- $E_{on} = 4,5 \text{ J}$
- $E_{off} = 4,3 \text{ J}$

Para o cálculo do número de semicondutores a usar tem que se ter em conta alguns dados da rede, de notar ainda que os semicondutores vão conduzir nas duas arcadas da corrente, logo o número de dispositivos em serie será a duplicar.

$$N_{serie} = \frac{V_{pico}}{V_{CE}} = \frac{24421}{6500} \approx 4 \rightarrow 8 \quad (20)$$

$$N_{paralelo} = \frac{I_{ccm\acute{a}x}}{I_C} = \frac{2200}{600} \approx 4 \quad (21)$$

Em que:

$N_{serie}$  : Número de semicondutores a colocar em série

$V_{pico}$  : Tensão de pico da fonte [V]

$V_{CE}$ : Tensão coletor-emissor do IGBT [V]

$N_{paralelo}$ : Número de semicondutores a colocar em paralelo

$I_{ccm\acute{a}x}$ : Corrente máxima de curto-circuito observada no modelo [A]

$I_C$ : Corrente de coletor do IGBT [A]

Para o cálculo da resistência interna do HVIGBT retira-se o valor da tensão coletor-emissor para a corrente máxima de coletor dos gráficos de performance do semiconductor (datasheet em anexo)[13].

$$R_{in} = \frac{V_{CE}}{I_c} = \frac{4,5}{600} \approx 7,5 \text{ m}\Omega \quad (22)$$

## Snubber do IGBT

Um “snubber” é um dispositivo construído para amortecer oscilações transitórias de tensão em circuitos elétricos. Neste caso vai estar em paralelo com cada semiconductor evitando oscilações resultantes da passagem abrupta ao corte.

Através das fórmulas mencionadas (23)-(27) conseguimos dimensionar o “snubber” referido anteriormente [5][27].

$$R_s = \frac{t_{on}}{3C_s} \quad (23)$$

$$C_s = \frac{I_c \cdot t_{off}}{2V_{ce}} \quad (24)$$

$$E = \int V_{ce} \cdot I_c dt = V_{ce} \cdot I_c \cdot \Delta t \quad (25)$$

$R_s$  : Resistência de Amortecimento

$t_{on}$ : Tempo necessário para o semiconductor passar à condução

$C_s$ : Capacidade de Amortecimento

$I_c$  : Corrente de coletor

$t_{off}$  : Tempo necessário para o semiconductor passar ao corte

$V_{ce}$  : Tensão coletor-emissor

$E$  : Energia total

$\Delta t$  : Tempo

$$t_{on} = \frac{E_{on}}{V_{ce} I_c} = 1,15 \mu s \quad (26)$$

$E_{on}$  representa a energia associada para a passagem do semiconductor à condução durante o tempo  $t_{on}$ .

$$t_{off} = \frac{E_{off}}{V_{ce} I_c} = 1,1 \mu s \quad (27)$$

$E_{off}$  representa a energia associada para a passagem do semiconductor ao corte durante o tempo  $t_{off}$ .

Após o cálculo destes valores conseguimos obter o valor da Resistência e da Capacidade de amortecimento através das fórmulas supramencionadas.

$$R_s = 7,6 \Omega$$

$$C_s = 50,8 \text{ nF}$$

## Snubber de Amortecimento

Tal como descrito no t3pico anterior foi introduzido um snubber para suprimir os transit3rios de tens3o, no entanto este vai estar em paralelo com todos os semicondutores providenciando assim uma solu3o de amortecimento para o sistema geral (fig. 3.18).

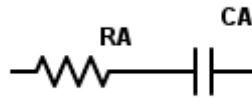


Figura 3.18: Snubber de Amortecimento

### C3lculo do Condensador de Amortecimento

$$C_A = \frac{LI^2}{U^2} \quad (28)$$

$$L = L_{fonte} + L_{linha} = 1,1 \text{ m}\Omega \quad (29)$$

Em que:

I: Valor eficaz da corrente de curto-circuito = 1500 A

U: Tens3o nominal = 30kV

Condi3o de converg3ncia:

$$h < \frac{\tau}{2} \Rightarrow R_A > \frac{2h}{C_A} \quad (30)$$

h: passo de c3lculo usado = 20 $\mu$ s

$\tau$  : Constante de tempo do circuito ( $R_A C_A$ )

Após o cálculo destes valores conseguimos obter o valor da Resistência e da Capacidade de amortecimento:

$$R_a \geq 14,55 \Omega$$

$$C_a = 2,75 \mu\text{F}$$

### Descarregador de Sobretensões

O descarregador de Sobretensões ou simplesmente DST como é normalmente referenciado é de extrema importância num sistema elétrico.

A sua função como o próprio nome indica é o de proteger os aparelhos contra sobretensões existentes na rede.

Estes descarregadores foram modelados através de um diodo em anti série com uma fonte de tensão (fig. 3.19), fonte esta que simula a tensão de zener.

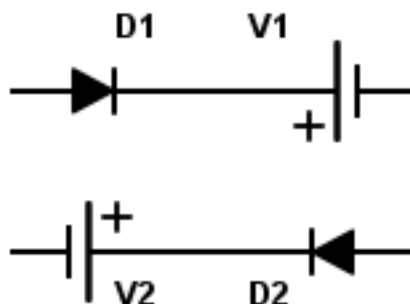


Figura 3.19: Modelo dos DST's usado

$$V_1 = V_2 = 30\text{kV}$$

## 4. Resultados da Simulação

Para comprovar o modelo do disjuntor rápido com semicondutores desenvolvido realizou-se simulações em simulink usando o modelo da rede da figura 4.1. Vão ser feitas 2 simulações: uma usando o modelo do disjuntor típico (modelado pela arquitetura da fig.3.17 sem os ramais em paralelo com a fonte de tensão controlada) e outra usando o modelo do disjuntor rápido com semicondutores (modelado pela arquitetura da fig. 3.17 na íntegra).

Simulando o comportamento da rede durante 0,8 s e forçando um curto-circuito dos 0,2 s aos 0,4 s no consumidor 2, pretende-se observar as implicações deste acontecimento no consumidor 1 (fig 4.2).

Vão ser observadas e comparadas as grandezas relevantes envolvidas com especial foco para a tensão no consumidor 1 visto ser esse o foco deste trabalho, o de análise do comportamento das cavas de tensão.

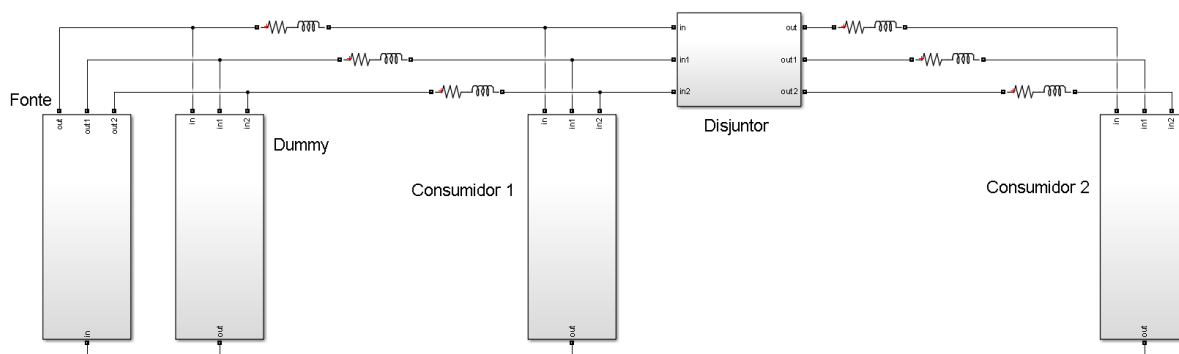


Figura 4.1: Esquema Geral do Modelo

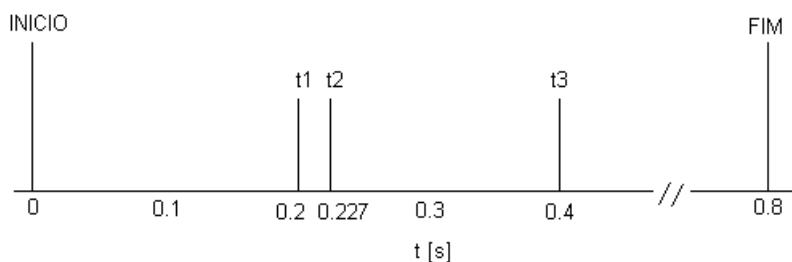


Figura 4.2: Diagrama Temporal da Simulação

t1:

- Início do curto-circuito no consumidor 2
- Início do processo de abertura ao disjuntor
- Ordem de condução aos semicondutores no início da abertura do disjuntor



t2:

- Ordem de corte aos semicondutores

t3:

- Fim do curto-circuito no consumidor 2
- Ordem de religação ao disjuntor

### Disjuntor típico

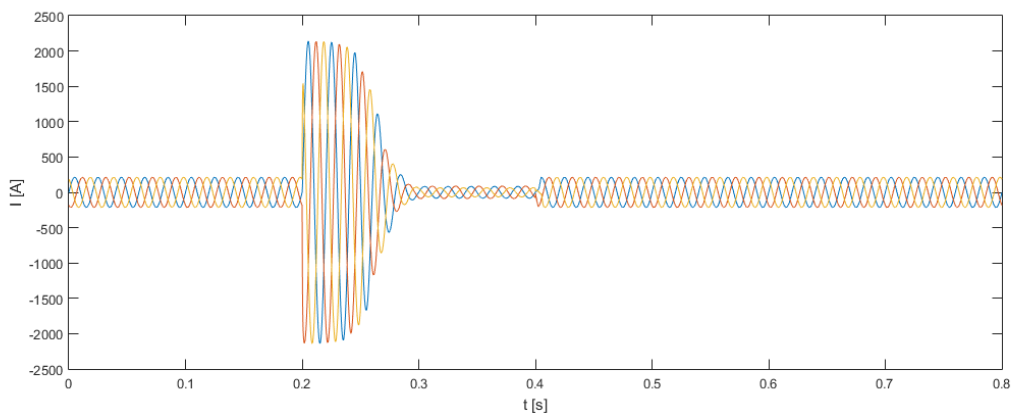


Figura 4.3: Corrente na Linha

Observando a figura 4.3 consegue-se verificar que quando ocorre o curto-circuito aos 0,2 s existe um aumento elevadíssimo na corrente da linha que só se extingue passado cerca de 60ms (3 ciclos). Depois disto ocorre uma tentativa de religação bem-sucedida visto ocorrer depois da extinção do defeito.

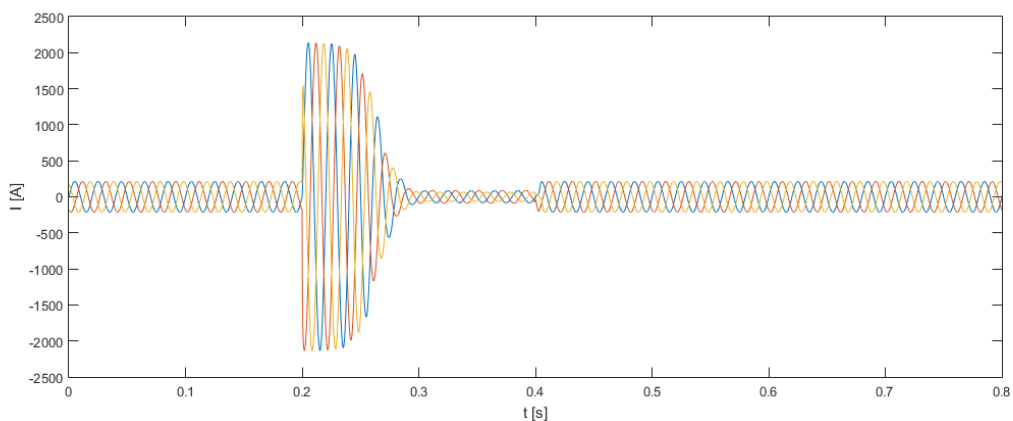


Figura 4.4: Corrente nos Disjuntores

Pode-se reparar que neste caso a corrente nos disjuntores (fig. 4.4) é exatamente igual à corrente na linha devido ao facto de não haver circuitos em paralelo com o disjuntor.

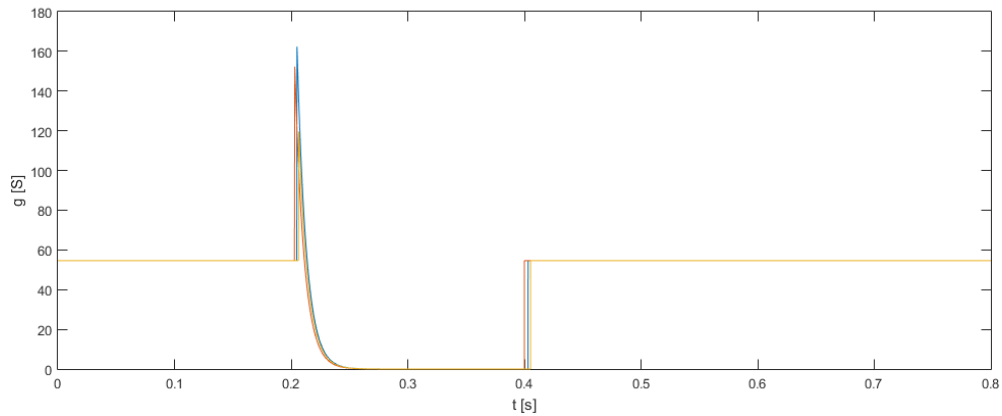


Figura 4.5: Condutância

Consegue-se verificar um pico na condutância gerada pelo modelo (fig. 4.5) no momento do curto-circuito seguido duma diminuição consistente com a abertura dos contactos do disjuntor. Verifica-se então que o modelo gerado é consistente com os acontecimentos.

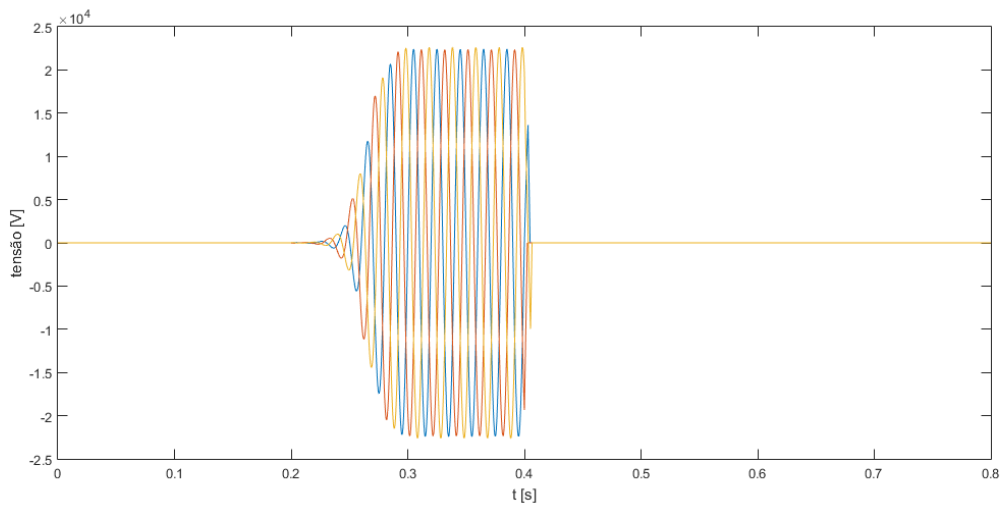
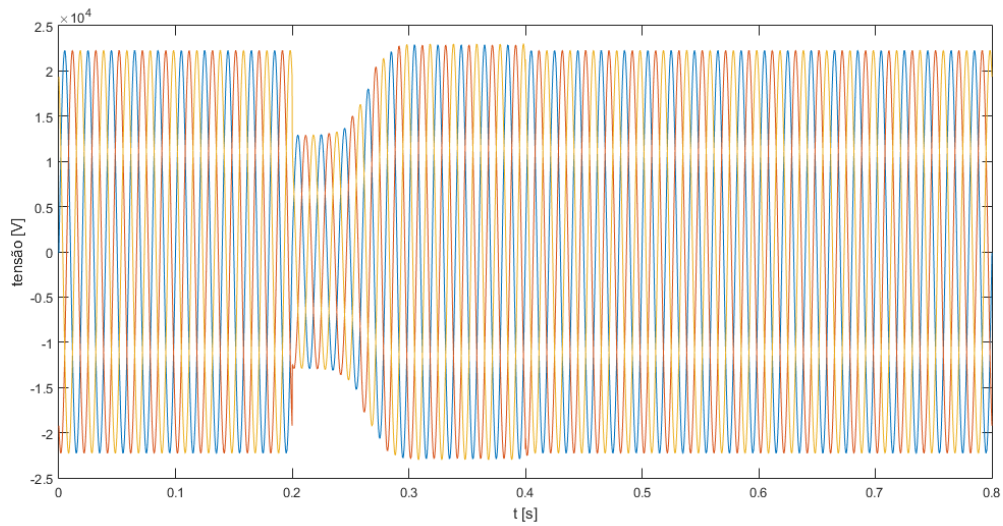


Figura 4.6: Tensão do Arco

Verificam-se elevadas sobretensões aos terminais do disjuntor durante o tempo de defeito (fig. 4.6) congruente com os fenómenos transitórios de abertura em causa no momento do curto-circuito.



**Figura 4.7: Tensão no Consumidor 1**

Na figura 4.7 pode-se observar o comportamento da tensão no consumidor 1 durante todo o acontecimento.

Verifica-se que existe uma cava de tensão com uma profundidade de 50% durante cerca de 60 ms concordante com o tempo de extinção do defeito discutido anteriormente. Esta cava de tensão deve-se à queda de tensão na linha devido ao aumento significativo da corrente no circuito.

## Disjuntor rápido auxiliado por semicondutores

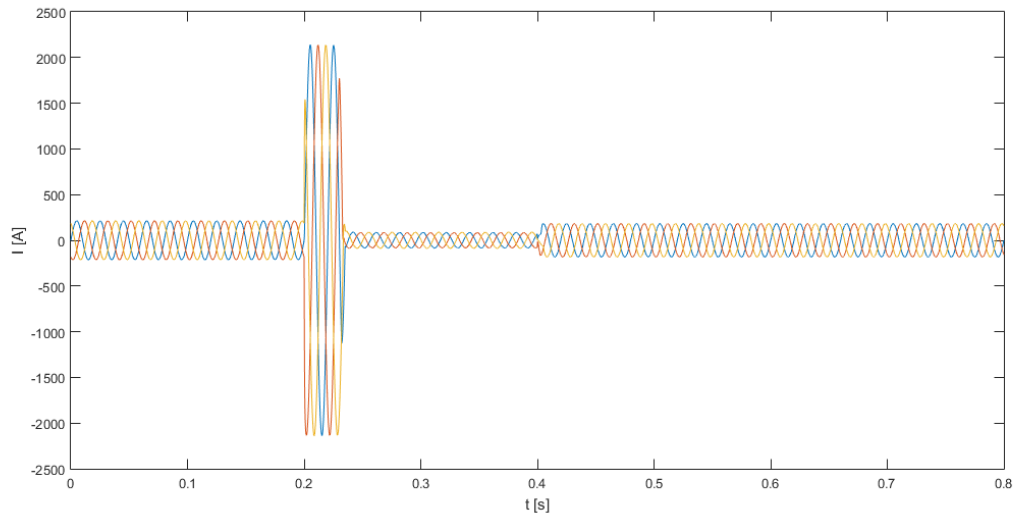


Figura 4.8: Corrente na Linha

Usando agora o disjuntor modelado consegue-se observar uma diminuição substancial no tempo de extinção da corrente de defeito (fig. 4.8). Repara-se que dura cerca de 30 ms (1 ciclo e meio) metade do tempo do disjuntor típico.

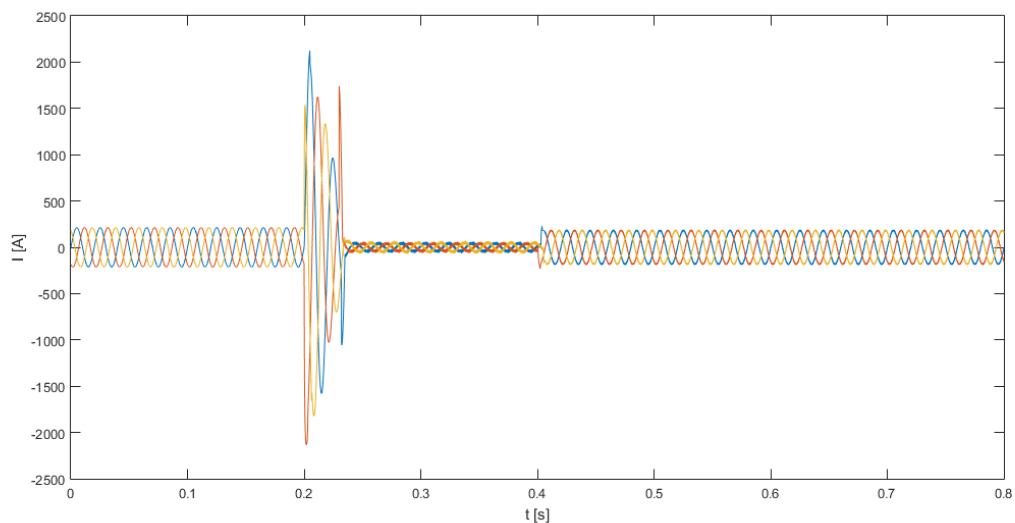
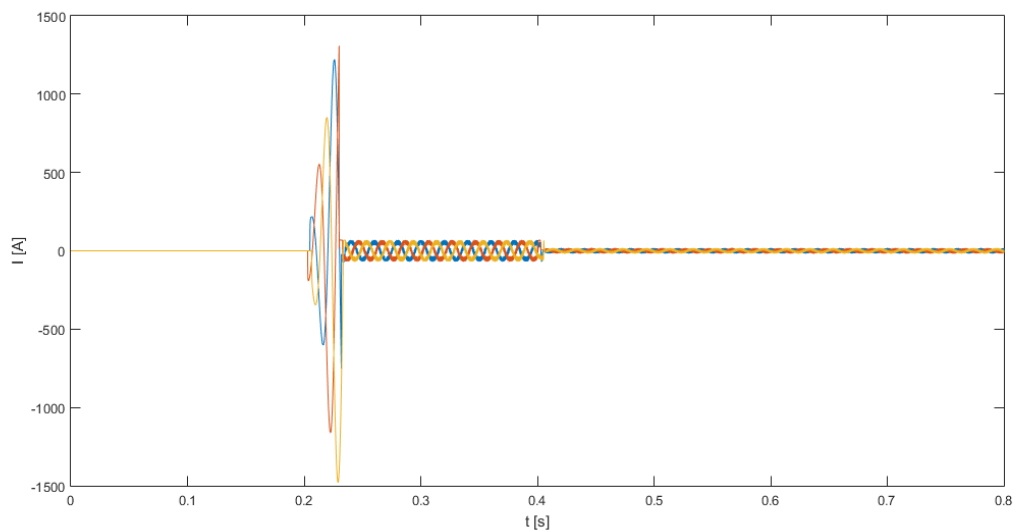


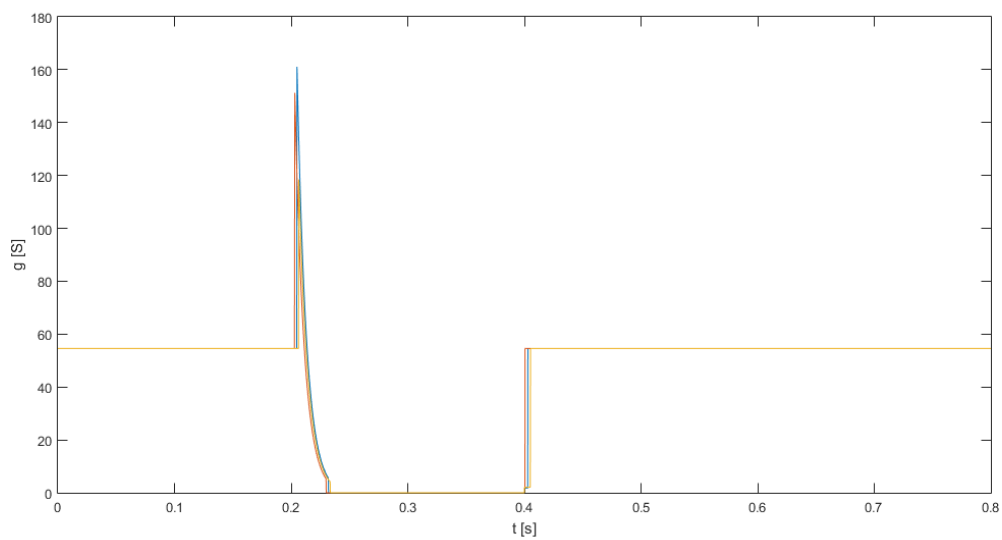
Figura 4.9: Corrente nos Disjuntores

Ao contrário do observado anteriormente a corrente nos disjuntores (fig. 4.9) não é igual à corrente na linha devido à existência de semicondutores em paralelo com o disjuntor. Consegue-se verificar que existe uma repartição da corrente da linha entre o disjuntor e os semicondutores conforme esperado.



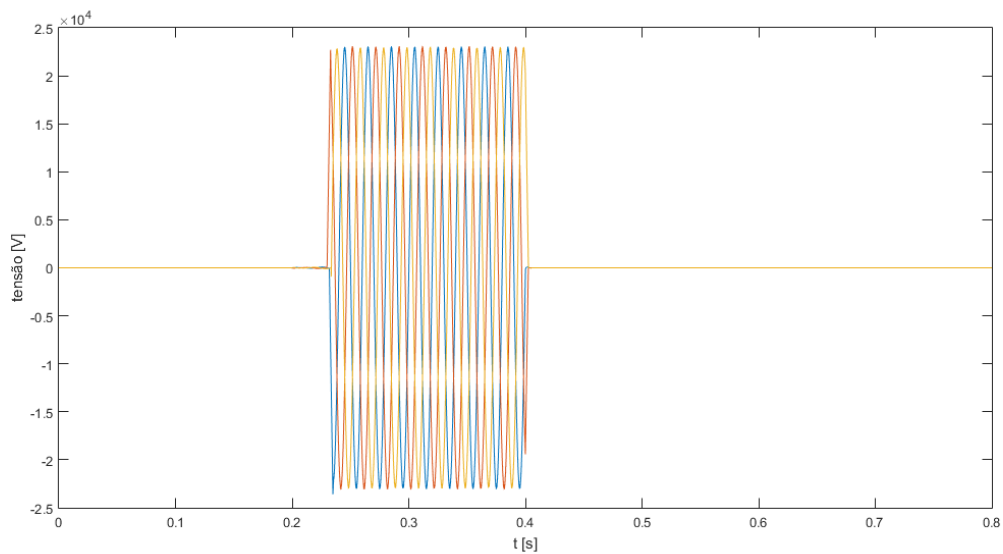
**Figura 4.10: Corrente nos Semicondutores**

Verifica-se como referido anteriormente que existe uma repartição da corrente da linha sendo uma parte direcionada pelos semicondutores conforme esperado (fig. 4.10). Passado cerca de 30ms da ordem de condução ser dada, a ordem de passagem ao corte é efetuada voltando assim a existir uma corrente nula nos semicondutores.



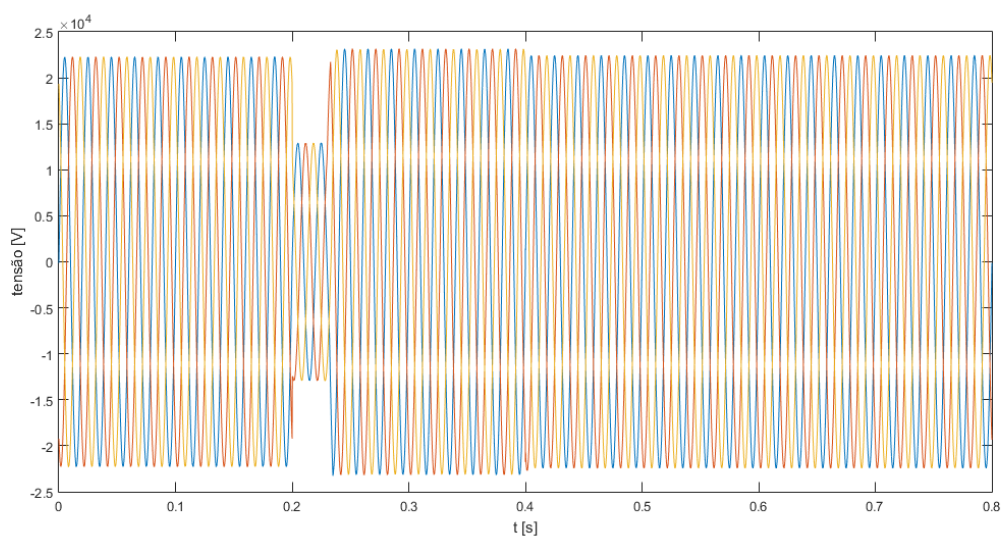
**Figura 4.11: Condutância**

À semelhança do observado anteriormente a condutância gerada pelo modelo é consistente com os acontecimentos gerados (fig. 4.11).



**Figura 4.12: Tensão do Arco**

Verifica-se elevadas sobretensões aos terminais do disjuntor durante o tempo de defeito tal como na simulação anterior (fig. 4.12).



**Figura 4.13: Tensão no Consumidor 1**

Em relação à tensão no consumidor 1 (fig. 4.13) vê-se uma diminuição substancial no tempo de duração da cava de tensão face ao disjuntor anterior, cerca de 30 ms de duração com igual profundidade.

## 5.

### 5.1 - Conclusões

Através da análise dos resultados da simulação pode-se comprovar que existe uma diminuição no tempo de extinção do defeito e consequente diminuição do tempo da cava de tensão no consumidor 1.

No gráfico da tensão no consumidor 1, para o caso do disjuntor clássico, a cava de tensão tem uma duração de cerca de 60 ms enquanto que no disjuntor rápido auxiliado por semicondutores a cava de tensão dura aproximadamente 30 ms.

Através da comparação com os limites da curva CBEMA ITIC consegue-se concluir que com este novo sistema os aparelhos informáticos não iriam sentir perturbação no seu funcionamento durante uma cava de tensão, visto respeitar a zona de seguro funcionamento da curva.

### 5.2 - Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros propõe-se:

- Um estudo económico acerca da implementação deste tipo de disjuntores em subestações e postos de cortes.
- A realização de um protótipo em laboratório para obter mais dados e consequentemente mais argumentos a favor desta solução.
- Trabalhar em parceria com um fabricante de disjuntores na otimização da solução desenvolvida.

## 6. Bibliografia

- [1] J. P. Sucena Paiva, "Redes de Energia Eléctrica: Uma Análise Sistémica", 3rd ed. IST Press, 2011.
- [2] R. D. Garzon, "High Voltage Circuit Breakers Design and Applications", Marcel Dekker, INC, 1997.
- [3] C. H. Flurscheim, "Power circuit breaker theory and design", IEE MONOGRAPH SERIES 17, 1975.
- [4] J. F. Silva, "Electrical Power Quality", Texto Complementar da disciplina de SAA, 2013.
- [5] D. J. G. Bidarra, "Mitigação de Cavas de Tensão na Rede de Distribuição MT", Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016.
- [6] A. L. P. Sampaio, "Consolidação de Material Didático para a Disciplina de Equipamentos Elétricos – Disjuntores", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012
- [7] J. Andrea, P. Besdel, O. Zirn and M. Bournat, "The electric arc as a circuit component," *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama, 2015, pp. 003027-003034. doi: 10.1109/IECON.2015.7392564
- [8] N. S. Majajan, K.R. Patil e S. M. Shembekar, "Electric Arc model for High Voltage Circuit Breakers Based on MATLAB/SIMULINK", *Pratibha: International Journal of Science, Spirituality, Business and Technology (IJSSBT)*, Vol 1. No.2, Fevereiro 2013
- [9] Jonathan Andrea, Marc Bournat, Romaric Landfried, Philippe Testé, Serge Weber, et al.. Model of an electric arc for circuit analysis . *28th International Conference on Electric Contacts ICEC 2016*, Jun 2016, Edinburgh, United Kingdom. pp.361 - 366, Proceedings of the 28th International Conference on Electric Contacts ICEC 2016. <hal-01335278>
- [10] C. Peng, I. Husain, A. Huang, B. Lequesne and R. Briggs, "A fast mechanical switch for medium voltage hybrid DC and AC circuit breakers," *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, 2015, pp. 5211-5218. doi: 10.1109/ECCE.2015.7310393
- [11] Stefan Berger, "Mathematical approach to model rapidly elongated free-burning arcs in air in electric power circuits", *Proceedings / the 23rd International Conference on Electrical Contacts, ICEC2006 Sendai, together with the 6th International Session on Electromechanical Devices, IS-EMD2006: Sendai, 6 - 9 June, 2006*
- [12] S. Nity, C. Nitu, C. Mihalance, P. Anghelita, and D. Pavelescu, " Comparison between model and experiment in studying the electric arc", *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, vol.10. no. 5, pp. 1192-1196. 2008.



- [13] “MITSUBISHI 3<sup>rd</sup>-Version HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules Traction drives, High Reliability Converters/Inverters, DC choppers INSULATED TYPE”, 2009.
- [14] “Cavas de Tensão: Origem, consequências e soluções”, Victor Fernão Pires, ATEC, 24 de Maio 2016, Palmela, IPS. Último acesso 04/12/2018, Available: [https://www.atec.pt/images/stories/noticias/2016/Evento\\_EDP/2\\_-\\_IPS--.pdf](https://www.atec.pt/images/stories/noticias/2016/Evento_EDP/2_-_IPS--.pdf)
- [15] Último acesso 04/12/2018, Available: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Circuitbreaker.jpg>
- [16] Último acesso 04/12/2018, Available: <http://www.hager.pt/catalogo-de-produtos/distribuicao-de-energia/proteccao/disjuntores-magnetotermicos/3-ka/mw116/13286.htm>
- [17] Último acesso 04/12/2018, Available: <http://edersonerodolfo.blogspot.com/2010/12/normas-para-curvas-de-disparo.html>
- [18] Último acesso 04/12/2018, Available: <https://circuitglobe.com/oil-circuit-breaker.html>
- [19] Último acesso 04/12/2018, Available: [http://1.bp.blogspot.com/-M\\_7ts\\_q2QiY/U4luJfgODwI/AAAAAAAAA7s/jLCpZ-7dfIk/s1600/axial-blast-air-circuit-breaker.png](http://1.bp.blogspot.com/-M_7ts_q2QiY/U4luJfgODwI/AAAAAAAAA7s/jLCpZ-7dfIk/s1600/axial-blast-air-circuit-breaker.png)
- [20] Último acesso 04/12/2018, Available: <https://www.electrical4u.com/images03/air-circuit-breaker.gif>
- [21] Último acesso 04/12/2018, Available: <https://www.elprocus.com/types-of-circuit-breakers-and-its-application/>
- [22] Último acesso 04/12/2018, Available: [http://www.oocities.org/hemant\\_thermal/img2/SF\\_01.gif](http://www.oocities.org/hemant_thermal/img2/SF_01.gif)
- [23] Último acesso 04/12/2018, Available: <https://www.efacec.pt/produtos/divac-disjuntores-media-tensao/?portfolioCats=52>
- [24] Último acesso 04/12/2018, Available: <https://www.efacec.pt/produtos/normacel-barramento-simples/?portfolioCats=52>
- [25] Último acesso 04/12/2018, Available: <http://en.el-insta.cz/alstom-sf6-circuit-breakers-till-420kv/>
- [26] Último acesso 04/12/2018, Available: <http://dicasemeletricidade.blogspot.com/2015/07/o-que-e-arco-eletrico.html>
- [27] J. F. Silva, “Eletrónica Industrial: Semicondutores e Conversores de Potência”, 2<sup>nd</sup> Edition. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2013.
- [28] “Norma Portuguesa EN 50160:2010/A1:2015, Características da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia eléctrica,“ Termo de Adoção No578/2015 – Instituto Português da Qualidade, Maio de 2015.




## 7. ANEXOS

### Semiconductor Usado: CM600HG-130H – Datasheet [13]

MITSUBISHI HVIGBT MODULES  
**CM600HG-130H**  
 HIGH POWER SWITCHING USE  
 INSULATED TYPE

3rd-Version HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules

**CM600HG-130H**

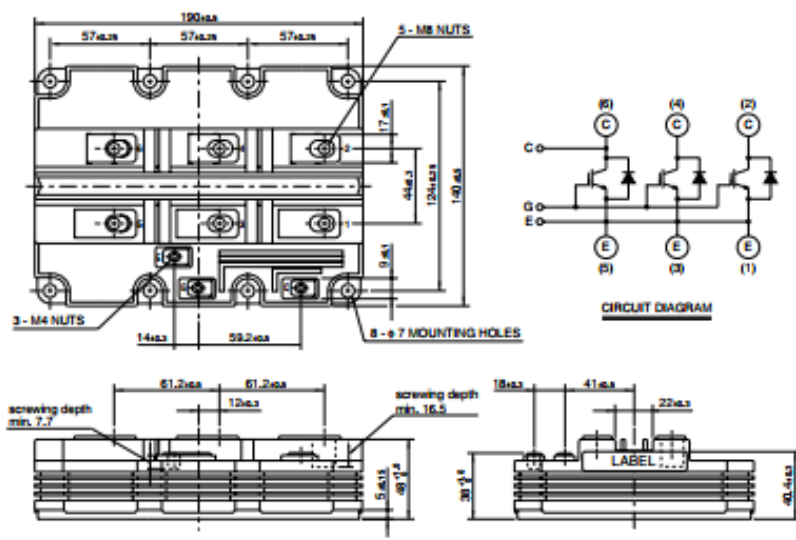


- IC ..... 600A
- VCES ..... 6500V
- High Insulated Type
- 1-element in a Pack
- AISiC Baseplate

#### APPLICATION

Traction drives, High Reliability Converters / Inverters, DC choppers

**OUTLINE DRAWING & CIRCUIT DIAGRAM** Dimensions in mm



**CIRCUIT DIAGRAM**

Dimensions in mm:

- Overall width: 190.0
- Mounting hole spacing: 57.0
- Mounting hole diameter: 17.0
- Module height: 140.0
- Baseplate thickness: 44.0
- Terminal height: 120.0
- Terminal diameter: 10.0
- Terminal spacing: 14.0, 59.2
- Mounting holes: 8 - φ 7
- Nuts: 5 - M8 NUTS, 3 - M4 NUTS
- Terminal dimensions: 61.2, 12.0, 61.2, 18.0, 41.0, 22.0
- Screwing depth: min. 7.7, min. 16.5
- Terminal diameter: φ 10.0
- Terminal diameter: φ 10.0

HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules

Jul. 2005



MITSUBISHI HVIGBT MODULES

**CM600HG-130H**

HIGH POWER SWITCHING USE  
INSULATED TYPE

3rd-Version HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules

**MAXIMUM RATINGS**

Symbol	Item	Conditions	Ratings	Unit
V <sub>ces</sub>	Collector-emitter voltage	V <sub>ge</sub> = 0V, T <sub>j</sub> = -40°C	5800	V
		V <sub>ge</sub> = 0V, T <sub>j</sub> = 25°C	6300	
		V <sub>ge</sub> = 0V, T <sub>j</sub> = 125°C	6500	
V <sub>ges</sub>	Gate-emitter voltage	V <sub>ce</sub> = 0V, T <sub>j</sub> = 25°C	±20	V
I <sub>c</sub>	Collector current	T <sub>c</sub> = 80°C	600	A
I <sub>cm</sub>		Pulse (Note 1)	1200	A
I <sub>e</sub> (Note 2)	Emitter current		600	A
I <sub>em</sub> (Note 2)		Pulse (Note 1)	1200	A
P <sub>c</sub> (Note 3)	Maximum power dissipation	T <sub>c</sub> = 25°C, IGBT part	8900	W
T <sub>j</sub>	Junction temperature		-40 - +150	°C
T <sub>op</sub>	Operating temperature		-40 - +125	°C
T <sub>stg</sub>	Storage temperature		-40 - +125	°C
V <sub>iso</sub>	Isolation voltage	RMS, sinusoidal, f = 60Hz, t = 1min.	10200	V
Q <sub>pd</sub>	Partial discharge	V1 = 6900V <sub>rms</sub> , V2 = 5100V <sub>rms</sub> f = 60Hz (acc. to IEC 1287)	10	pC
t <sub>psc</sub>	Maximum short circuit pulse width	V <sub>cc</sub> = 4500V, V <sub>ces</sub> ≤ 6500V, V <sub>ge</sub> = 15V T <sub>j</sub> = 125°C	10	μs

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

Symbol	Item	Conditions	Limits			Unit
			Min	Typ	Max	
I <sub>ces</sub>	Collector cut-off current	V <sub>ce</sub> = V <sub>ces</sub> , V <sub>ge</sub> = 0V, T <sub>j</sub> = 25°C	—	—	10	mA
V <sub>ge(th)</sub>	Gate-emitter threshold voltage	I <sub>c</sub> = 60mA, V <sub>ce</sub> = 10V, T <sub>j</sub> = 25°C	5.0	6.0	7.0	V
I <sub>ges</sub>	Gate leakage current	V <sub>ce</sub> = V <sub>ces</sub> , V <sub>ce</sub> = 0V, T <sub>j</sub> = 25°C	—	—	0.5	μA
V <sub>ce(sat)</sub>	Collector-emitter saturation voltage	I <sub>c</sub> = 600A, V <sub>ge</sub> = 15V, T <sub>j</sub> = 25°C (Note 4)	—	5.10	—	V
		I <sub>c</sub> = 600A, V <sub>ge</sub> = 15V, T <sub>j</sub> = 125°C (Note 4)	—	5.00	—	
C <sub>ies</sub>	Input capacitance	V <sub>ce</sub> = 10V, f = 100kHz	—	124	—	nF
C <sub>oes</sub>	Output capacitance	V <sub>ce</sub> = 0V, T <sub>j</sub> = 25°C	—	7.6	—	nF
C <sub>res</sub>	Reverse transfer capacitance		—	2.2	—	nF
Q <sub>g</sub>	Total gate charge	V <sub>cc</sub> = 3600V, I <sub>c</sub> = 600A, V <sub>ge</sub> = 15V, T <sub>j</sub> = 25°C	—	9.9	—	μC
V <sub>tc</sub> (Note 2)	Emitter-collector voltage	I <sub>c</sub> = 600A, V <sub>ge</sub> = 0V, T <sub>j</sub> = 25°C (Note 4)	—	4.00	—	V
		I <sub>c</sub> = 600A, V <sub>ge</sub> = 0V, T <sub>j</sub> = 125°C (Note 4)	—	3.60	—	
t <sub>don</sub>	Turn-on delay time	V <sub>cc</sub> = 3600V, I <sub>c</sub> = 600A, V <sub>ge</sub> = ±15V	—	1.20	—	μs
t <sub>r</sub>	Turn-on rise time	R <sub>g(ge)</sub> = 10Ω, T <sub>j</sub> = 125°C, L <sub>s</sub> = 150nH	—	0.35	—	μs
E <sub>on</sub>	Turn-on switching energy	t <sub>g(ge)</sub> = 60μs, Inductive load	—	4.50	—	μJ/pulse
t <sub>doff</sub>	Turn-off delay time	V <sub>cc</sub> = 3600V, I <sub>c</sub> = 600A, V <sub>ge</sub> = ±15V	—	6.60	—	μs
t <sub>f</sub>	Turn-off fall time	R <sub>g(ge)</sub> = 24Ω, T <sub>j</sub> = 125°C, L <sub>s</sub> = 150nH	—	3.30	—	μs
E <sub>off</sub>	Turn-off switching energy	t <sub>g(ge)</sub> = 60μs, Inductive load	—	3.50	—	μJ/pulse
t <sub>r</sub> (Note 2)	Reverse recovery time	V <sub>cc</sub> = 3600V, I <sub>c</sub> = 600A, V <sub>ge</sub> = ±15V	—	2.40	—	μs
Q <sub>r</sub> (Note 2)	Reverse recovery charge	R <sub>g(ge)</sub> = 10Ω, T <sub>j</sub> = 125°C, L <sub>s</sub> = 150nH	—	1100	—	μC
E <sub>rec</sub> (Note 2)	Reverse recovery energy	t <sub>g(ge)</sub> = 60μs, Inductive load	—	2.00	—	μJ/pulse

- Note 1. Pulse width and repetition rate should be such that junction temperature (T<sub>j</sub>) does not exceed T<sub>opmax</sub> rating (125°C).  
 2. The symbols represent characteristics of the anti-parallel, emitter to collector free-wheel diode (FWD).  
 3. Junction temperature (T<sub>j</sub>) should not exceed T<sub>jmax</sub> rating (150°C).  
 4. Pulse width and repetition rate should be such as to cause negligible temperature rise.

HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules

Jul. 2005



MITSUBISHI HVIGBT MODULES

**CM600HG-130H**

HIGH POWER SWITCHING USE  
INSULATED TYPE

3rd-Version HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules

**THERMAL CHARACTERISTICS**

Symbol	Item	Conditions	Limits			Unit
			Min	Typ	Max	
$R_{th(j-c)}$	Thermal resistance	Junction to Case, IGBT part	—	—	14.0	K/W
$R_{th(j-r)}$		Junction to Case, FWDI part	—	—	22.0	K/W
$R_{th(c-f)}$	Contact thermal resistance	Case to Fin, $\lambda_{grease} = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$	—	6.0	—	K/W

**MECHANICAL CHARACTERISTICS**

Symbol	Item	Conditions	Limits			Unit
			Min	Typ	Max	
M	Mounting torque	M8 : Main terminals screw	7.0	—	15.0	N-m
		M6 : Mounting screw	3.0	—	6.0	
		M4 : Auxiliary terminals screw	1.0	—	3.0	
—	Mass		—	1.35	—	kg
CTI	Comparative tracking index		600	—	—	—
$d_a$	Clearance distance in air		26.0	—	—	mm
$d_s$	Creepage distance along surface		56.0	—	—	mm
LC- $t_{(le)}$	Internal inductance	IGBT part	—	18	—	nH
RC- $t_{(le)}$	Internal lead resistance	Tc = 25°C	—	0.18	—	mΩ

HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules

Jul. 2005

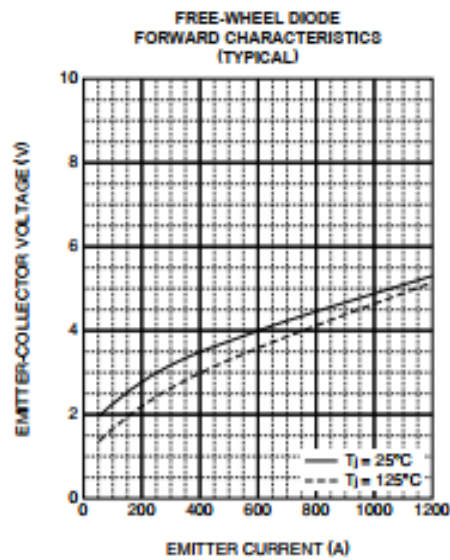
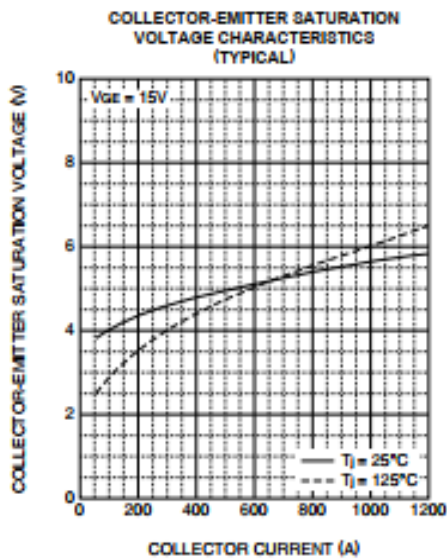
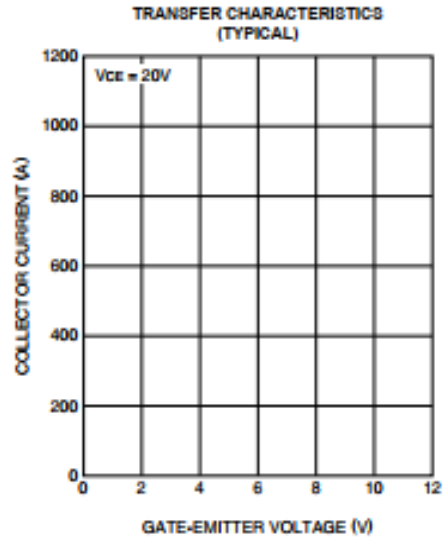
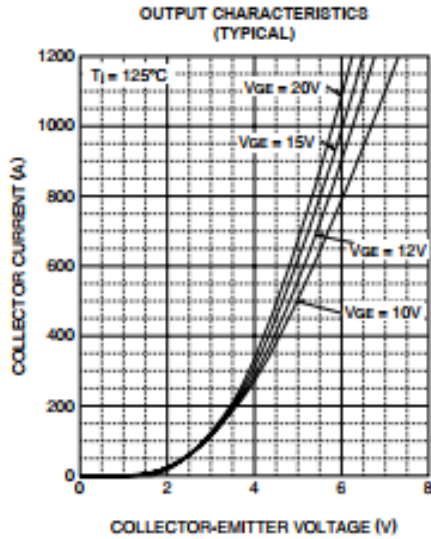


**CM600HG-130H**

HIGH POWER SWITCHING USE  
INSULATED TYPE

3rd-Version HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules

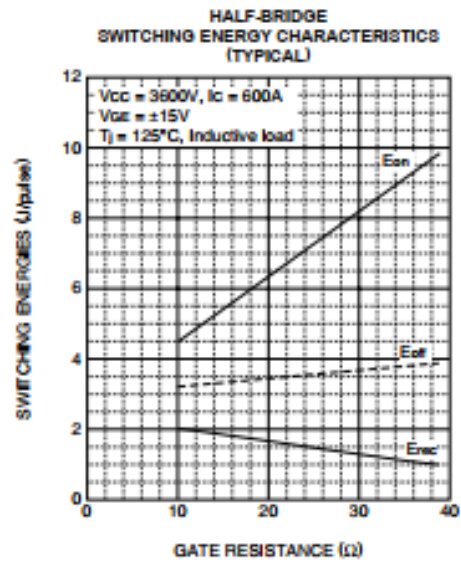
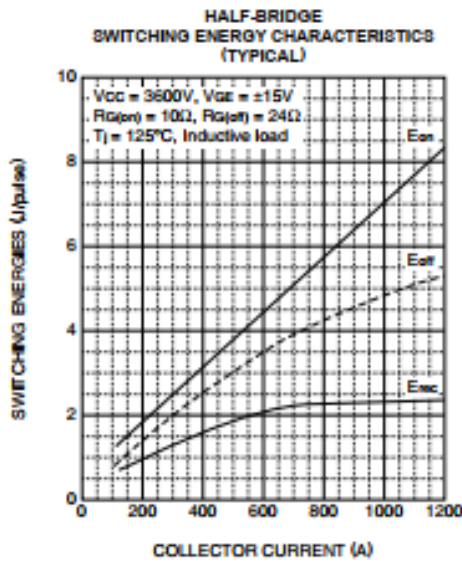
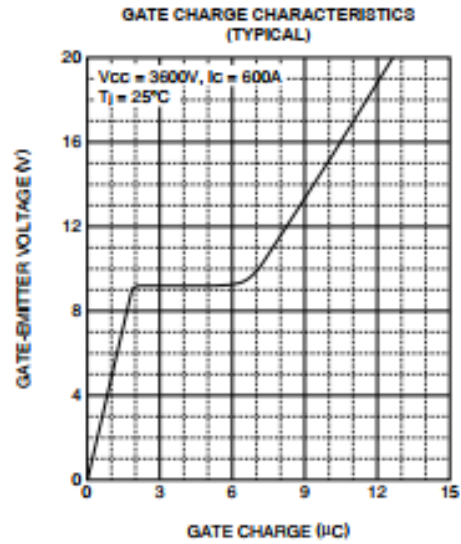
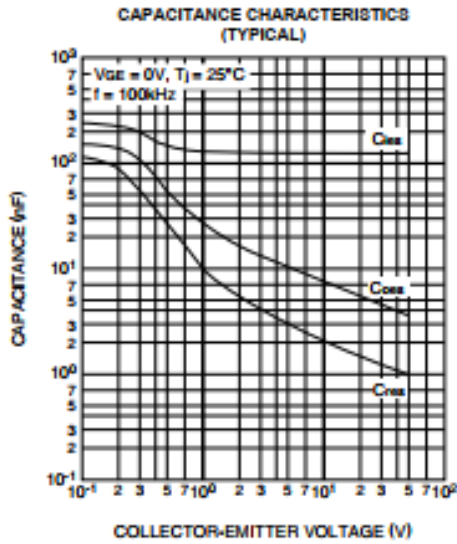
PERFORMANCE CURVES



**CM600HG-130H**

HIGH POWER SWITCHING USE  
INSULATED TYPE

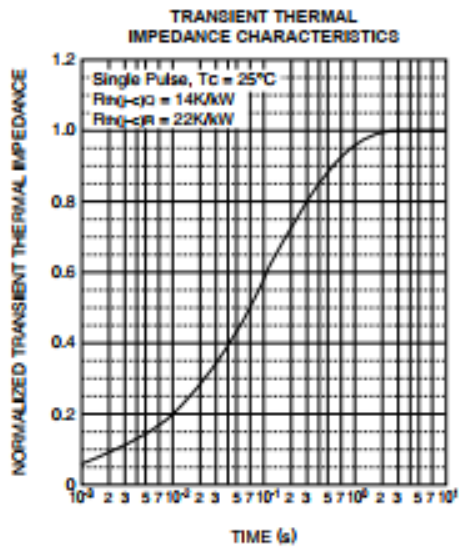
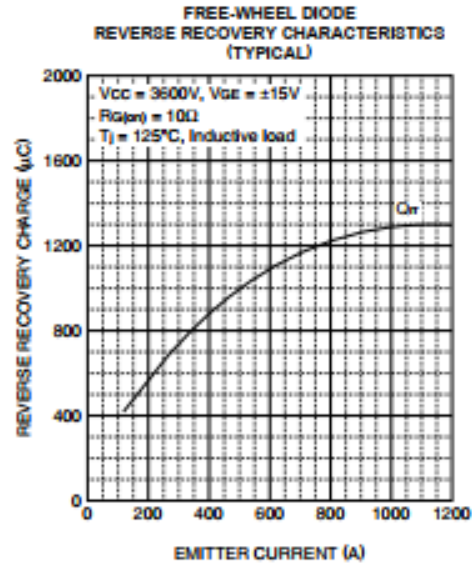
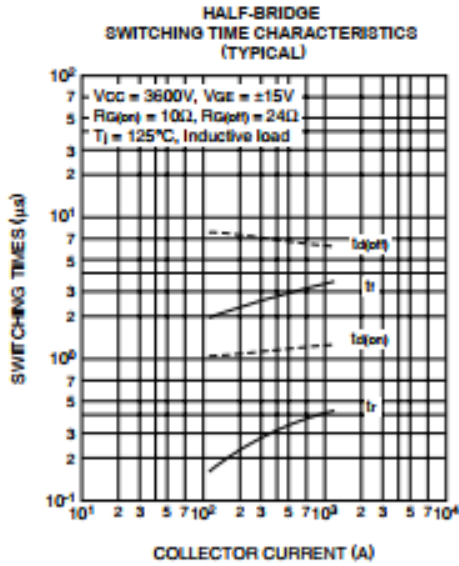
3rd-Version HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules



**CM600HG-130H**

HIGH POWER SWITCHING USE  
INSULATED TYPE

3rd-Version HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules



HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules

JUL 2005

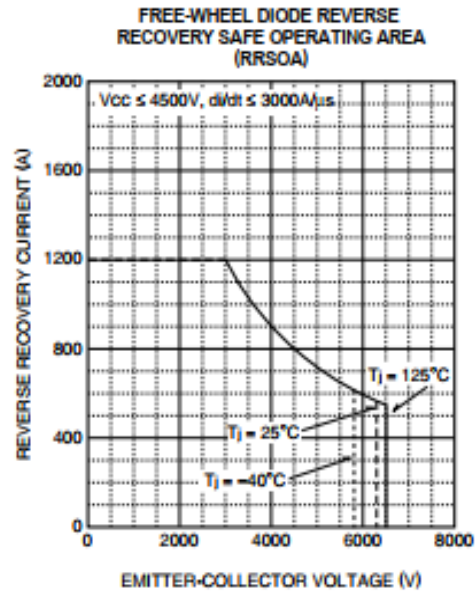
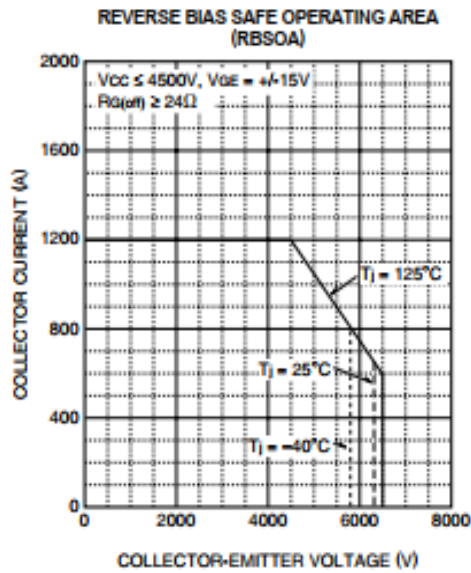




# CM600HG-130H

HIGH POWER SWITCHING USE  
INSULATED TYPE

3rd-Version HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules



HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor) Modules

Jul. 2005

