



Carlos Miguel Gomes Carvalho

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

Caracterização experimental de díodos a temperaturas criogénicas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: João Miguel Murta Pina, Professor Doutor,
Co-orientador: João Francisco Alves Martins, Professor
Doutor,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professora Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto
Arguente: Professor Doutor Vítor Manuel de Carvalho Fernão Pires
Vogais: Professor Doutor João Francisco Alves Martins,
Professor Doutor João Miguel Murta Pina

Caracterização experimental de díodos a temperaturas criogénicas

Copyright © Carlos Miguel Gomes Carvalho, FCT/UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao meu orientador João Murta Pina e ao meu co-orientador João Francisco Alves Martins, o apoio prestado no auxílio e resolução de todos os problemas ocorridos durante a elaboração da presente dissertação. Obrigado a ambos pois sem eles a conclusão da presente dissertação não seria possível.

Aos meus amigos e colegas de faculdade, pela ajuda prestada quer nos trabalhos de grupo quer no estudo que sempre antecedia a realização de testes ou exames.

À minha namorada Raquel Afonso pela importância que teve na etapa final do meu percurso académico e principalmente na realização da presente dissertação.

Por último, e com uma importância acrescida, um agradecimento à minha família, em especial aos meus Pais pelo apoio que sempre me prestaram, financeiro e não só e por todas as oportunidades que me foram proporcionando durante todo o meu percurso académico e pessoal. Muito daquilo que eu sou hoje se deve a eles.

A todos um muito obrigado, este trabalho aqui apresentado é a minha forma de vos agradecer.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Sumário

A electrónica de potência, desempenha um papel fundamental nos dispositivos e nos sistemas eléctricos que usamos hoje em dia. As aplicações que agora emergem na área dos supercondutores necessitam do auxílio do uso da electrónica de potência. Essas aplicações podem-se encontrar nas mais variadas áreas entre as quais, armazenamento de energia (SMES), limitadores de corrente, transformadores ou motores. Porém os dispositivos de electrónica de potência, raramente funcionam a temperaturas criogénicas, isto acontece, não por conveniência mas sim pelo facto de que os elementos de electrónica de potência são projectados para trabalharem à temperatura ambiente. A inclusão da criogenia neste tipo de aplicações pode melhorar significativamente o desempenho global do dispositivo de electrónica de potência. Assim e para que a integração dos elementos de electrónica de potência com os supercondutores seja possível, um melhor conhecimento de como os elementos de electrónica de potência funcionam à temperatura criogénica é necessário.

Este estudo pode permitir a incorporação dos sistemas de electrónica de potência juntamente com os supercondutores, melhorando assim a performance do circuito de potência.

Palavras-chave:

Electrónica de potência, Supercondutores

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Abstract

Power electronics plays a key role in electrical devices and systems we use today. Superconductivity emerging applications also require power electronic converters. These applications can be found in several fields including, energy storage (SMES), fault current limiters, transformers or motors. However, several commercially available power electronic devices are rarely specified to operate at cryogenic temperatures, as they are intended to operate at room temperature. The inclusion of cryogenics in this kind of applications can greatly improve the performance of the converter as well as the device. In order to optimize the integration of power electronics in superconducting systems, a better understanding of how these elements operate at cryogenic temperature is required.

This work envisages the integration of power electronic converters in superconducting applications, thereby improving their overall performance.

Keywords:

Power electronics, Superconductors

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Índice de Matérias

1	Introdução.....	17
1.1	Motivação.....	17
1.2	Objectivo da dissertação.....	17
1.3	Contribuições Originais.....	17
1.4	Organização da Dissertação	17
2	Revisão Bibliográfica.....	19
3	Teoria	23
3.1	Semicondutores	23
3.1.1	Átomo.....	23
3.1.2	Orbitas e Níveis Energéticos	24
3.1.3	Condução em Sólidos.....	25
3.1.4	Condutores, Isolantes, Semicondutores.....	27
3.1.5	Forças de Ligação entre os Átomos.....	28
3.1.6	Dopagem	30
3.1.7	Efeito Calor e Luz	32
3.2	Junção.....	33
3.2.1	Junção pn.....	33
3.2.2	Junção pn polarizada inversamente	35
3.2.3	Junção pn polarizada directamente.....	36
3.2.4	Efeito da Temperatura	38
3.2.5	Capacidade da Junção	39
3.3	Díodo.....	40
3.3.1	Introdução.....	40
3.3.2	Característica Estática	41
3.3.3	Característica Dinâmica	42
3.3.4	Modelo – Parâmetros e Equações	44
4	Resultados Experimentais	50
4.1	Método Experimental.....	51

4.2	Díodo Recuperação normal	55
4.3	Díodos Ultra-rápidos, Hiper-rápidos e Schottky	65
4.4	Degradação.....	72
5	Conclusões e trabalho futuro.....	75
6	Bibliografia.....	77

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Índice de Figuras

Figura 3.1.1 - Esquemático dos átomos, (a) – Silício (b) – Germânio, adaptado [7].....	24
Figura 3.1.2 - Diagrama dos níveis energéticos, adaptado [8].....	25
Figura 3.1.3 - Condução por transferência de buracos, adaptado [8].....	26
Figura 3.1.4 - (a) Isolador, (b) Semicondutor, (c) Condutor, adaptado [8].....	27
Figura 3.1.5 - Ligação iónica, adaptado [8]	28
Figura 3.1.6 - Ligação metálica	29
Figura 3.1.7 - Ligação Covalente.....	30
Figura 3.1.8 - Dopagem dadora, adaptado [8]	31
Figura 3.1.9 - Dopagem aceitadora, adaptado [8].....	32
Figura 3.2.1 - Condição inicial dos portadores de carga numa junção pn, adaptado [8] ..	33
Figura 3.2.2 - Difusão dos portadores de carga na junção pn, adaptado [8]	34
Figura 3.2.3 - Zona de depleção com a junção polarizada inversamente, adaptado [8] ...	35
Figura 3.2.4 - Característica inversa, adaptado [8]	36
Figura 3.2.5 - Zona de depleção com a junção polarizada directamente, adaptado [8]	37
Figura 3.2.6 – Característica estática do Germânio e do Silício, adaptado [7]	37
Figura 3.2.7 - Relação da característica inversa com a temperatura, adaptado [8]	38
Figura 3.2.8 - Variação da tensão directa e da corrente do díodo com a temperatura, adaptado [8].....	39
Figura 3.3.1 - Símbolo díodo junção pn.....	40
Figura 3.3.2 - Característica estática do díodo.....	41
Figura 3.3.3 - Curvas típicas de tensão e corrente no doído, adaptado [6]	43
Figura 3.3.4 - Modelo estático díodo	45
Figura 3.3.5 - Modelo recuperação inversa.....	46
Figura 3.3.6 - Forma de onda típica do díodo ao desligar.....	47
Figura 3.3.7 - Modelo completo do díodo	49
Figura 4.1.1 - Circuito de teste utilizado nos ensaios estáticos ao DUT.....	51
Figura 4.1.2 - Montagem do ensaio estático à temperatura ambiente.....	52
Figura 4.1.3 - Montagem do ensaio estático à temperatura criogénica.....	52
Figura 4.1.4 - Circuito de teste utilizado nos ensaios dinâmicos	53
Figura 4.1.5 - Montagem dos ensaios dinâmicos à temperatura ambiente	54
Figura 4.1.6 - Montagem dos ensaios dinâmicos à temperatura criogénica	54
Figura 4.2.1 - Curva estática do fabricante Fairchild.....	55
Figura 4.2.2 - Curva dinâmica do fabricante Fairchild à temperatura ambiente.....	56
Figura 4.2.3 - Curva dinâmica do fabricante Fairchild à temperatura ambiente (pinça efeito hall)	56

Figura 4.2.4 - Curva dinâmica do fabricante Fairchild à temperatura criogénica.....	57
Figura 4.2.5 - Curva estática do fabricante NTE	58
Figura 4.2.6 - Curva dinâmica do fabricante NTE à temperatura ambiente	58
Figura 4.2.7 - Curva dinâmica do fabricante NTE à temperatura ambiente (pinça efeito hall)	59
Figura 4.2.8 - Curva dinâmica do fabricante NTE à temperatura criogénica	59
Figura 4.2.9 - Curva estática do fabricante Semikron.....	60
Figura 4.2.10 - Curva dinâmica do fabricante Semikron à temperatura ambiente.....	60
Figura 4.2.11 - Curva dinâmica do fabricante Semikron à temperatura ambiente (pinça efeito hall)	61
Figura 4.2.12 - Curva dinâmica do fabricante Semikron à temperatura criogénica.....	61
Figura 4.2.13 - Curva estática do fabricante Vishay	62
Figura 4.2.14 - Curva dinâmica do fabricante Vishay à temperatura ambiente.....	62
Figura 4.2.15 - Curva dinâmica do fabricante Vishay à temperatura ambiente (pinça efeito hall)	63
Figura 4.2.16 - Curva dinâmica do fabricante Vishay à temperatura criogénica.....	63
Figura 4.3.1 - Curvas estáticas dos díodos Schottky, Ultra-rápido e Hiper-rápidos à temperatura ambiente	65
Figura 4.3.2 - Curva dinâmica do díodo Hiper-rápido NXP à temperatura ambiente	66
Figura 4.3.3 - Curva dinâmica do díodo Hiper-rápido NXP à temperatura criogénica	66
Figura 4.3.4 - Curva dinâmica do díodo Ultra-rápido Vishay à temperatura ambiente	67
Figura 4.3.5 - Curva dinâmica do díodo Ultra-rápido Vishay à temperatura criogénica..	67
Figura 4.3.6 - Curva dinâmica do díodo Schottky Vishay à temperatura ambiente	68
Figura 4.3.7 - Curva dinâmica do díodo Schottky Vishay à temperatura criogénica.....	68
Figura 4.3.8 - Variação da capacidade do díodo com a temperatura, retirado [6]	70
Figura 4.3.9 - Ensaio dinâmico com as indutâncias L2 e L3 em série.....	71
Figura 4.3.10 - Ensaio dinâmico com as indutâncias L2 e L3 em paralelo	71
Figura 4.4.1 - Curva estática do díodo NXP antes e depois da criogenia	72
Figura 4.4.2 - Curva estática do díodo Schottky antes e depois da criogenia.....	73

Índice de tabelas

Tabela 1 - Temperaturas aproximadas esperadas nas missões espaciais, retirado [4]	20
Tabela 2 – Díodos de recuperação normal à temperatura ambiente	64
Tabela 3 - Díodos de recuperação normal à temperatura criogénica	64
Tabela 4 - Díodo do fabricante Vishay	69
Tabela 5 - Díodo do fabricante NXP	69
Tabela 6 - Díodo Schottky do fabricante Vishay	69

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Lista de Acrónimos

HTS – High Temperature Superconductor

IGBT – Insulated-Gate Bipolar Transistor

LED – Light-Emitting Diode

LTS – Low Temperature Superconductor

MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor

SMES – Superconducting Magnet Energy Storage

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

1 Introdução

1.1 Motivação

Como finalista do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, surgiu a oportunidade de realizar a minha dissertação num tema relacionado com o comportamento da electrónica de potência em ambientes criogénicos. O interesse deste tipo de estudos vem na sequência das inúmeras aplicações dos supercondutores ou espaciais. É importante saber as diferenças de desempenho que os componentes de electrónica de potência estão sujeitos quando colocados a temperaturas criogénicas e se essas diferenças de desempenho são ou não aceitáveis numa dada aplicação.

1.2 Objectivo da dissertação

O objectivo da presente dissertação centrou-se fundamentalmente no estudo do díodo e diferenças de comportamento quando o díodo se encontra à temperatura criogénica, face à temperatura ambiente. Foram realizados ensaios de modo a observar o comportamento do díodo quer ao nível estático quer ao nível dinâmico. Os ensaios estáticos foram realizados não só de modo a validar ensaios já realizados por outros autores, mas também para que uma comparação entre o comportamento à temperatura ambiente e à temperatura criogénica possa ser realizada e a partir dessa comparação, conclusões possam ser retiradas.

Um outro objectivo foi saber, se o comportamento do díodo se degradaria quando o mesmo voltasse à temperatura ambiente após ter sido sujeito a temperaturas criogénicas.

1.3 Contribuições Originais

Em termos de contribuições originais, a presente tese de dissertação apresenta um estudo experimental comparativo sobre vários díodos, os de recuperação normal, díodos rápidos e de schottky, de diversos fabricantes com correntes de condução iguais, para que a comparação de resultados seja realizada entres díodos equivalentes.

1.4 Organização da Dissertação

A presente dissertação começa com um estudo teórico sobre os semicondutores. Após este estudo, apresenta-se um estudo acerca das características estáticas e dinâmicas que compõem o díodo.

A parte experimental apresenta o método utilizado na obtenção das características estáticas e dinâmicas, seguida dos resultados obtidos nos ensaios e a sua compreensão encontram-se apresentados nas secções seguintes.

2 Revisão Bibliográfica

A descoberta dos supercondutores de baixa temperatura (*Low Temperature Superconductors*) em meados de 1960, permitiu que, o que até à data tinha sido apenas uma mera curiosidade, se tenha tornado em termos práticos num conjunto de aplicações e dispositivos condutores sem perdas.

Os primeiros supercondutores de baixa temperatura que operavam em hélio líquido, estimularam o desenvolvimento de protótipos em motores, geradores, linhas de transporte ou mesmo sistemas de armazenamento de energia [1]. No entanto, todos estes protótipos foram comprometidos pelo custo e as complicações dos requisitos no uso do hélio líquido. Em 1986, com a descoberta dos supercondutores de alta temperatura (*High Temperature Superconductors*), um novo ímpeto foi criado no desenvolvimento de novas aplicações de potência a temperaturas criogénicas, a temperaturas de operação do azoto líquido (77 K) ou superiores.

A electrónica de potência, envolve a conversão da potência eléctrica de uma frequência, tensão ou corrente numa outra. Contudo, a operação da electrónica de potência à temperatura ambiente é uma questão de conveniência e não de optimização. Ao diminuirmos a temperatura de operação dos componentes de electrónica de potência, podemos estar a potenciar o seu desempenho ao reduzir os efeitos disruptivos devidos à energia térmica. O arrefecimento da electrónica de potência, que era pensado como sendo um inconveniente, tem vindo a ser visto como uma forma de melhorar o desempenho dos circuitos de electrónica de potência [2].

Um das aplicações em que a electrónica de potência está sob temperatura muito baixas, são as aplicações espaciais. Explorações planetárias e missões espaciais, requerem que os componentes electrónicos, sejam fiáveis em ambientes bastante inóspitos em termos de temperaturas. Além disso muitos dos satélites usados em missões espaciais, estão sujeitos a descolagens a temperaturas extremamente baixas. Alguns exemplos de temperaturas aproximadas que se podem encontrar nas missões espaciais encontram-se na Tabela 1. Estas temperaturas abrangem um intervalo que pode ir abaixo dos 30 K (-243 °C). O interesse da NASA, bem como de outras organizações em explorar planetas no sistema solar e para além dele, faz com que o estudo dos comportamentos dos componentes de electrónica de potência, tenha um papel fundamental [3].

Missão	(°C)	(K)
Marte	-112	160
Júpiter	-150	120
Saturno	-150	120
Urano	-150	120
Neptuno	-180	90
Plutão	-220	50

Tabela 1 - Temperaturas aproximadas esperadas nas missões espaciais, retirado [4]

Um dos métodos utilizados neste tipo de missões espaciais, é usar material com isolamento térmico que juntamente com algum tipo de sistema de aquecimento, permite manter a temperatura perto dos 20 °C, temperatura essa que foi para a qual os componentes foram fabricados [3].

Embora tenha sido esta a abordagem seguida [4], é possível concluir que não será a solução mais eficiente pois torna o sistema total mais pesado, ao levar um sistema extra apenas para manter a temperatura dos sistemas electrónicos a uma temperatura desejável. Este facto leva a que exista um aumento dos consumos dos propulsores. Assim é desejável a eliminação deste sistema de aquecimento e permitir que os componentes electrónicos funcionem a temperaturas criogénicas.

Os benefícios directos poderão advir deste tipo de melhorias são a redução do tamanho e peso, diminuição da complexidade dos sistemas, o que conseqüentemente poderá levar a um aumento da eficiência. Além disso, estas melhorias permitem aumentar a fiabilidade dos sistemas, reduzir custos de lançamento e aumentar o tempo de vida e operação dos sistemas [3].

Existem também outras aplicações neste tipo de estudos, quer comerciais quer na área da indústria, onde a electrónica de potência é usada em sistema criogénicos ou supercondutores.

Os sistemas SMES (Superconducting Magnet Energy Storage) utilizam bobinas supercondutoras para armazenar energia eléctrica, ao manter uma corrente DC a fluir nestas mesmas bobinas, que têm perdas virtualmente nulas. Para tal ser possível, as bobinas têm que estar imersas num banho criogénico. A energia eléctrica é armazenada no sistema ao converter uma corrente AC de entrada numa corrente DC, que por sua vez alimenta a bobina supercondutora. O processo é reversível e a energia armazenada nas bobinas supercondutoras pode ser utilizada para alimentar o sistema pretendido [2].

Também os transformadores de potência, podem ser melhorados quanto ao seu desempenho utilizando supercondutores. Num transformador de potência convencional, as perdas provocadas por efeito de joule, dadas por RI^2 , representam cerca de 80% das perdas totais, sendo que os restantes 20% são perdas provocadas por correntes de Foucault [1]. Os esforços na redução das perdas por efeito de joule têm sido deixadas para segundo plano. Ao contrário do que acontece com o cobre ou com o alumínio os supercondutores não apresentam praticamente nenhuma resistência quando neles flui uma corrente DC. Como consequência, as perdas por efeito de joule (RI^2) tornam-se praticamente negligenciáveis criando assim um potencial enorme no decréscimo das perdas. Em funcionamento AC os supercondutores de alta temperatura, têm perdas por correntes de Foucault, que são extremamente mais pequenas, quando comparadas com as perdas em materiais convencionais como o cobre ou o alumínio. Mesmo com os custos, associados à refrigeração, os transformadores HTS na ordem dos 10 MVA e superior, são projectados de modo a serem mais eficientes e menos dispendiosos que os seus homólogos [1].

Os supercondutores são também usados, em limitadores de corrente. Os limitadores de corrente operam normalmente com uma impedância baixa e portanto, são componentes praticamente “invisíveis” do ponto de vista da rede eléctrica. Na eventualidade de ocorrer uma falha, o limitador insere uma impedância no circuito, que limita a corrente que advém do problema ocorrido. O desenvolvimento dos supercondutores de alta temperatura, permitiu o desenvolvimento de limitadores de corrente mais económicos [5].

Como já foi referido anteriormente, umas das razões para o uso dos componentes electrónicos a baixas temperaturas, é aumentar o desempenho dos componentes quando comparados à temperatura ambiente. Este facto, fez com que vários projectos de investigação tenham sido criados, nomeadamente com MOSFETs em 1970 [6]. Esta investigação mostrou que várias vantagens podem advir do uso da criogenia, vantagens como um menor tempo de comutação.

Todas as aplicações criogénicas, referidas requerem o uso de fontes de alimentação, conversores, controladores entre outros circuitos eléctricos. Tendo em conta que é esperado que todas estas aplicações trabalhem em ambientes criogénicos, sinergias podem resultar, caso todos os dispositivos de electrónica de potência que constituem as fontes de alimentação, conversores entre outros, trabalhem no mesmo ambiente criogénico. Assim é necessário saber como estes componentes se comportam à temperatura criogénica, para que seja possível incorporar esses mesmos dispositivos no mesmo ambiente criogénico juntamente com as aplicações supercondutoras.

3 Teoria

3.1 Semicondutores

3.1.1 Átomo

O átomo é constituído por um núcleo central, onde à sua volta orbitam electrões. Cada electrão tem uma carga eléctrica negativa de $1,602 \times 10^{-19}$ coulombs (C), existem também algumas partículas dentro do núcleo com carga eléctrica positiva, mas da mesma magnitude. Visto que cargas eléctricas diferentes se atraem entre si, uma força de atracção existe entre o núcleo e os electrões. Tal como os satélites que orbitam à volta de um dado planeta, a força de atracção é balanceada pela força centrífuga devido ao movimento dos electrões à volta do núcleo.

Comparativamente à massa do núcleo, os electrões são partículas com massa praticamente negligenciável. O núcleo de um átomo, contém dois tipos de partículas, protões e neutrões. Os protões possuem uma carga eléctrica positiva e de igual magnitude à dos electrões, já os neutrões não têm qualquer carga eléctrica. Os protões e os neutrões têm cada um uma massa de cerca de 1800 vezes maior que a massa do electrão.

Para um dado átomo, o número de protões é normalmente igual ao número de electrões que orbitam esse mesmo átomo. Tendo em conta que os protões e os electrões são iguais em número e opostos em termos de carga, estes neutralizam-se electricamente, é por esta razão que os átomos são normalmente electricamente neutros. Caso um átomo perca um electrão, este perde alguma carga negativa, conseqüentemente fica carregado positivamente e é então referido como sendo um ião positivo. Semelhantemente, caso um átomo ganhe um electrão, ficará carregado negativamente e nesse caso é referido como sendo um ião negativo. A diferença entre átomos consiste no grande número e nos variadíssimos arranjos diferentes deste tipo de partículas básicas (electrões, protões e neutrões). Embora todos os electrões sejam idênticos assim como todos os protões e os neutrões, um electrão de um dado átomo pode substituir um electrão de outro átomo. Diferentes materiais são feitos de diferentes tipos de átomos.

Ao número de protões (ou electrões) num átomo dá-se o nome de número atómico. O peso atómico é aproximadamente igual ao número total de protões e neutrões presentes no núcleo desse mesmo átomo. O átomo do elemento semiconductor Silício tem, 14 protões e 14 neutrões no seu núcleo, assim como 14 electrões na sua orbita, então o número atómico do Silício é 14 e o seu peso atómico é aproximadamente igual a 28.

3.1.2 Orbitas e Níveis Energéticos

Os átomos são por conveniência representados por diagramas a duas dimensões. Foi descoberto que os electrões apenas podem ocupar certas orbitas a distâncias fixas do núcleo do átomo e que cada orbita apenas pode conter um certo número de electrões. Os electrões da última camada, determinam as características eléctricas (e químicas) de um átomo. Estes electrões são usualmente chamados de electrões de valência. Um átomo pode conter na sua camada de valência um máximo de oito electrões. A camada de valência de um átomo pode estar completa ou parcialmente preenchida.

Os átomos de dois importantes semicondutores, Silício (Si) e Germânio (Ge), encontram-se ilustrados na figura 3.1.1.

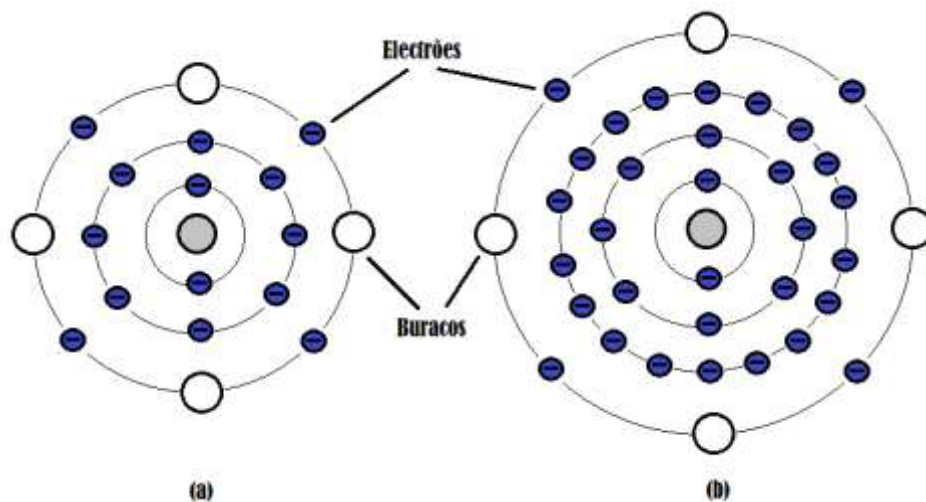


Figura 3.1.1 - Esquemático dos átomos, (a) – Silício (b) – Germânio, adaptado [7]

Como se pode observar cada um destes átomos contém quatro electrões de valência. Assim diz-se que estes átomos têm na sua camada de valência quatro electrões e quatro buracos (*holes*). Um buraco é definido simplesmente como sendo a ausência de um electrão onde o mesmo poderia existir. Apesar de a camada de valência ter quatro electrões, tanto o Silício como o Germânio são electricamente neutros, pois o número de electrões que orbitam à volta do núcleo é igual ao número de prótons contidos no núcleo.

Quanto mais perto do núcleo estiver o electrão maior será a força que os liga. Cada orbita tem um nível energético associado, que representa a quantidade de energia que terá de ser fornecida ao electrão para o extrair da sua orbita. Assim os electrões da camada de valência, sendo os que se encontram mais afastados do núcleo necessitam de uma menor quantidade de energia para que sejam retirados do átomo. Os níveis energéticos considerados são

quantificados em electrão volt (eV). Um electrão-volt é definido como a quantidade de energia necessária para mover um electrão através de uma diferença de potencial de um volt.

Dentro de um qualquer material existem duas bandas energéticas distintas, onde os electrões podem existir, a banda de valência e a banda de condução. A separar estas duas bandas existe um intervalo energético, onde os electrões não podem existir, este intervalo é chamado de intervalo proibido. A camada de valência, banda de condução e o intervalo proibido, encontram-se ilustrados na figura 3.1.2.

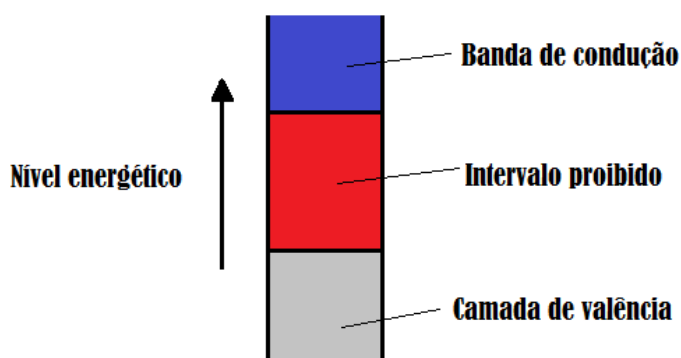


Figura 3.1.2 - Diagrama dos níveis energéticos, adaptado [8]

Os electrões que se encontram na banda de condução “escaparam” dos seus átomos ou têm uma fraca ligação com o núcleo. Estes electrões podem-se mover facilmente dentro do material através da aplicação de pequenas quantidades de energia. Uma quantidade maior de energia é necessária para extrair electrões que se encontrem na camada de valência. Para um qualquer tipo de material o intervalo proibido pode ser grande, pequeno ou mesmo inexistente. A diferença que existe entre os condutores, isoladores e os semicondutores está relacionada com os intervalos proibidos.

3.1.3 Condução em Sólidos

A condução ocorre quando a um dado material é aplicada uma diferença de potencial que causa o movimento dos electrões no sentido desejado. Isto pode ser devido a um ou a ambos de dois processos, movimento de electrões e transferência de buracos. No movimento de electrões, electrões livres na banda de condução movem-se devido ao campo eléctrico aplicado. Visto que os electrões têm carga eléctrica negativa são repelidos pelo terminal negativo da diferença de potencial aplicada e atraídos pelo terminal positivo. A transferência de buracos envolve os

electrões que estão ainda ligados ao átomo, ou seja, aqueles que se encontram na camada de valência.

Caso algum nível energético na camada de valência não esteja a ser ocupado por electrões, existem buracos onde electrões poderão existir. Assim um electrão poderá “saltar” de um átomo para outro de modo a preencher o buraco existente nesse átomo. Quando ocorre o salto, o electrão deixa um buraco para trás e diz-se então que o buraco se deslocou na direcção oposta à do movimento do electrão, deste modo uma corrente flui devido ao movimento de buracos.

Na figura 3.1.3 (a), a diferença de potencial aplicada, faz com que um electrão salte do átomo y para o átomo x, este irá preencher um buraco que existia na camada de valência do átomo x deixando para trás um buraco no átomo y, como ilustrado na figura 3.1.3 (b). Caso um electrão salte agora do átomo z, sobe a diferença de potencial aplicada, irá preencher o buraco da camada de valência do átomo y, deixando assim um buraco no átomo z. Os buracos podem ser vistos como sendo “partículas positivas” pois movimentam-se na direcção contrária à do movimento dos electrões.

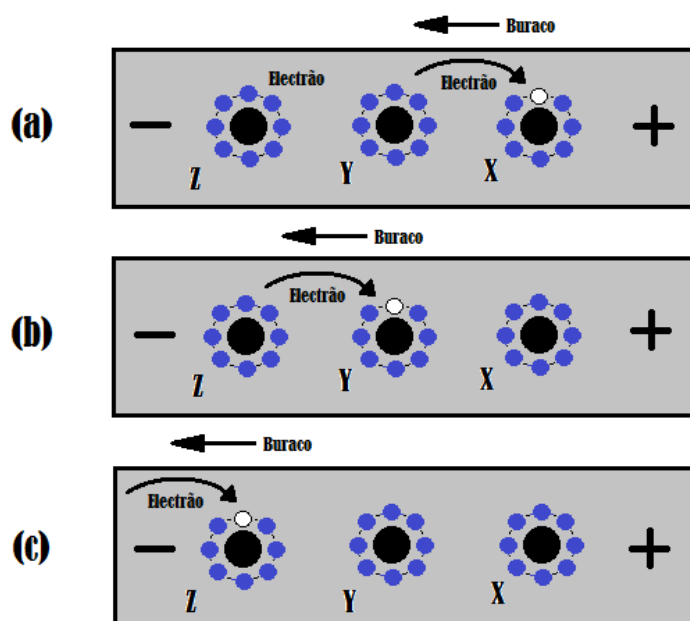


Figura 3.1.3 - Condução por transferência de buracos, adaptado [8]

Assim a corrente eléctrica é constituída pelo movimento dos electrões na banda de condução e pelos buracos na camada de valência. Os electrões e os buracos são referidos como sendo portadores de carga. Os electrões livres necessitam de uma menor quantidade de energia que os buracos para se moverem, pois já não estão ligados aos seus átomos.

3.1.4 Condutores, Isolantes, Semicondutores

Como se pode observar no diagrama das bandas energéticas ilustrado na figura 3.1.4, os isoladores têm um grande intervalo proibido quando comparados com os semicondutores, já os condutores não têm qualquer intervalo proibido.

No caso dos isoladores, não existem praticamente electrões na banda de condução dos níveis energéticos e a camada de valência está preenchida, além disso como o intervalo proibido é amplo, é necessário uma grande quantidade de energia (aproximadamente 6 eV) para que um electrão passe da camada de valência para a banda de condução. Portanto quando uma diferença de potencial é aplicada, a condução não pode ser feita nem por movimento de electrões nem por transferência de buracos.

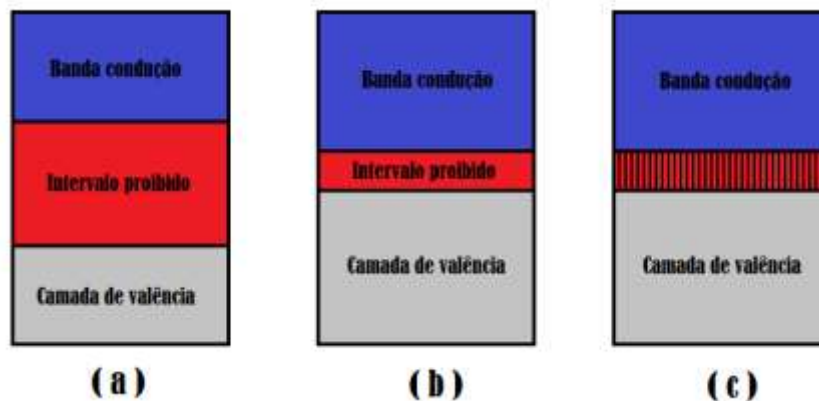


Figura 3.1.4 - (a) Isolador, (b) Semicondutor, (c) Condutor, adaptado [8]

Para os semicondutores à temperatura do zero absoluto ($-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$), a camada de valência está normalmente completa e não existem electrões na zona de condução. Porém como ilustrado na figura 3.1.4 (b), o intervalo proibido no semicondutor é muito mais estreito do que no isolador e a aplicação de pequenas quantidades de energia (cerca de 1.2 eV para o Silício e 0.785 eV para o Germânio) pode elevar os electrões da camada de valência para a banda de condução. Caso seja aplicada uma diferença de potencial ao semicondutor, a condução ocorre quer por movimento de electrões na banda de condução quer por transferência de buracos na camada de valência.

No caso dos condutores, como se encontra ilustrado na figura 3.1.4 (c), não existe intervalo proibido e então a camada de valência e a de condução sobrepõem-se. É por esta razão que existe um grande número de electrões disponíveis para condução mesmo a baixas temperaturas.

3.1.5 Forças de Ligação entre os Átomos

Os átomos num sólido são mantidos juntos por forças ou ligações. Existem três tipos de ligações atômicas: ligações iônicas, metálicas e covalentes.

Ligações iônicas, são encontradas em materiais sólidos isolantes. Na figura 3.1.5, o átomo A, perdeu um electrão da sua camada de valência para um buraco da camada de valência do átomo B. O átomo A tornou-se então positivamente carregado (ionizado positivamente) ao perder um electrão e o átomo B tornou-se negativamente carregado (ionizado negativamente) ao ganhar um electrão. Assim existe uma forte força electrostática de atracção entre os átomos. O termo ligação iónica, deriva do facto de os átomos se encontrarem ionizados.

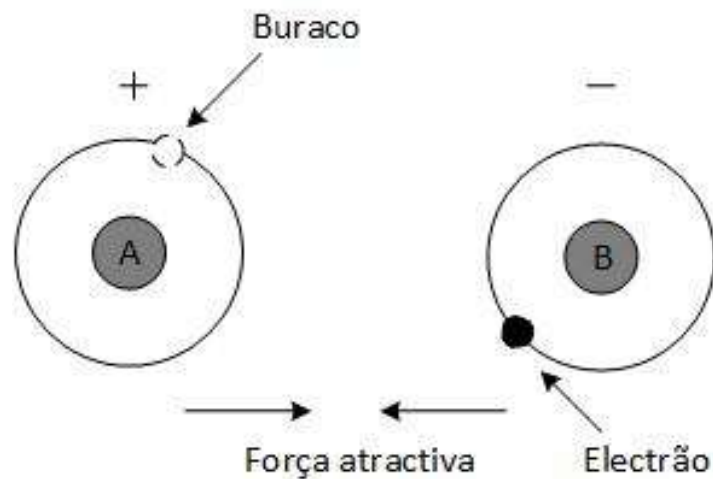


Figura 3.1.5 - Ligação iónica, adaptado [8]

As ligações metálicas ocorrem em sólidos condutores. Neste caso os átomos libertam com relativa facilidade os electrões da camada de valência, criando uma assim electrões livres no material. Tendo em conta que os átomos perdem electrões tornam-se positivamente carregados. O gás de electrões (*electron gas*) está carregado negativamente e uma forte força electrostática existe entre cada átomo e o gás de electrões. Esta força torna-se então a força de ligação que mantém o material junto. Na figura 3.1.6 encontra-se ilustrado as forças de ligações metálicas.

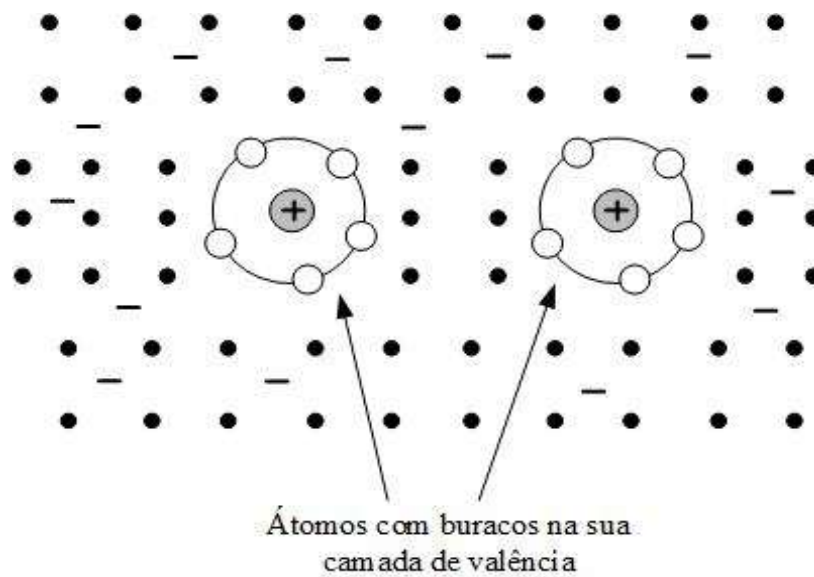


Figura 3.1.6 - Ligação metálica

As ligações covalentes são as forças que mantêm os átomos semicondutores juntos, conseqüentemente são de grande importância no nosso estudo. Neste tipo de ligação os átomos encontram-se muito mais juntos do que em qualquer outro tipo. Átomos com alguns elétrons e alguns buracos na sua camada de valência formam ligações com átomos semelhantes. Cada elétron de valência tem uma dupla função ao preencher o buraco da camada de valência do átomo vizinho, bem como servindo de elétron de valência ao seu próprio átomo. Tendo em conta que os átomos de silício têm quatro elétrons de valência e quatro buracos nas suas camadas de valência, formam ligações covalentes fortes entre eles. Como se encontra ilustrado na figura 3.1.7, os átomos preenchem a sua camada de valência com oito elétrons ao partilharem um elétron com cada um dos quatro átomos circundantes. O mesmo acontece no caso do átomo de germânio. Quando um material semicondutor é preparado na manufactura de um dispositivo, os átomos do material são alinhados num padrão tridimensional ou rede cristalina (*crystal lattice*). Cada átomo está ligado com uma ligação covalente com os quatro átomos circundantes.

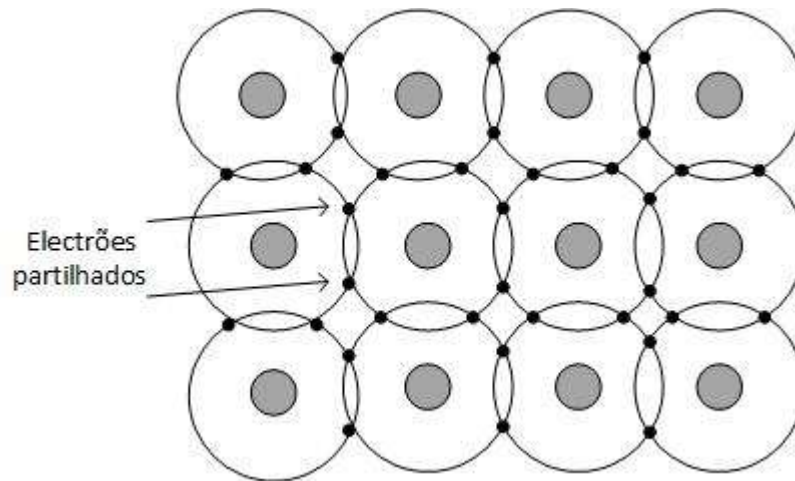


Figura 3.1.7 - Ligação Covalente

3.1.6 Dopagem

Ao material semiconductor puro, dá-se o nome de intrínseco. Antes que um material semiconductor possa ser usado em dispositivos, impurezas devem ser adicionadas aos átomos semicondutores. Ao processo de adicionar impurezas aos átomos dá-se o nome de dopagem. Este processo permite melhorar significativamente a condutividade do material. Aos semicondutores dopados dá-se o nome de extrínsecos. São possíveis dois tipos diferentes de dopagem, a dadora (*donor doping*) e a aceitadora (*acceptor doping*). A dadora gera electrões livres, na banda de condução, ou seja, electrões que não se encontram “amarrados” aos átomos, já a aceitadora produz buracos na camada de valência.

A dopagem dadora é realizada adicionando impurezas, ou seja, átomos que têm cinco electrões e três buracos na sua camada de valência. Estas impurezas formam ligações covalentes com os átomos de Silício ou de Germânio. Tendo em conta que estes átomos semicondutores têm quatro electrões e quatro buracos na sua camada de valência, um electrão livre é produzido por cada átomo impuro adicionado. Cada electrão livre produzido desta maneira entra na banda de condução como electrão livre. Visto que os electrões têm carga eléctrica negativa, os materiais dopados como dadores são chamados de materiais semicondutores de tipo n.

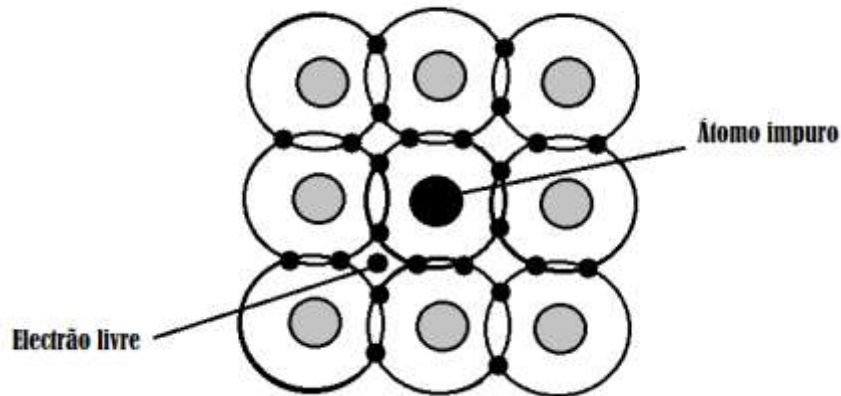


Figura 3.1.8 - Dopagem dadora, adaptado [8]

Os electrões livres na banda de condução são facilmente movidos quando se encontram sob a influência de um campo eléctrico, assim a condução ocorre maioritariamente por movimento de electrões no material semiconductor dopado como dador. O material dopado mantém-se electricamente neutro, pois o número total de electrões é igual ao número de prótons no núcleo do átomo. O termo dopagem dadora vem do facto de que um electrão é doado para a banda de condução, por cada impureza adicionada. Impurezas dadoras típicas são o fósforo ou o arsénio. Visto estes átomos terem cinco electrões de valência, são chamados de átomos pentavalentes.

Na dopagem aceitadora, os átomos impuros adicionados, têm três electrões e cinco buracos. Este tipo de átomos com três electrões de valência, são chamados de átomos trivalentes e os mais usados são o boro, alumínio e o gálio. Estes átomos formam ligações com os átomos semicondutores, porém neste tipo de dopagem um electrão fica em falta para completar a camada de valência, assim existe um buraco nesta ligação com os átomos circundantes. Neste tipo de dopagem, buracos são criados na camada de valência e a condução ocorre pelo processo de transferência de buracos.

Como os buracos podem ser vistos como tendo carga eléctrica positiva, os materiais semicondutores dopados como aceitadores são chamados de tipo p.

Tal como o material semiconductor do tipo n, o material do tipo p mantém-se electricamente neutro. Os buracos criados pela adição de impurezas podem aceitar electrões livres, daí advém o nome de dopagem aceitadora.

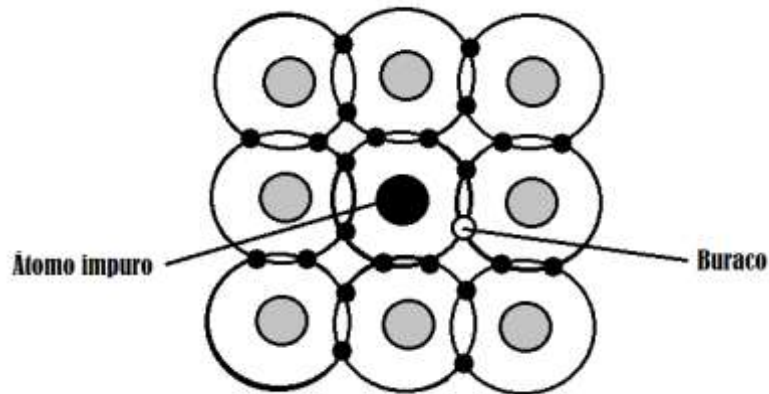


Figura 3.1.9 - Dopagem aceitadora, adaptado [8]

Mesmo nos materiais semicondutores intrínsecos (semicondutores não dopados) à temperatura ambiente existem electrões livres e buracos. Isto é devido à agitação térmica que faz com que as ligações entre os electrões e os seus átomos na banda de condução se quebrem.

Visto haver muitos mais electrões do que buracos nos materiais de tipo n, os electrões são chamados de portadores maioritários e os buracos de portadores minoritários. Enquanto que no material semiconductor do tipo p, os buracos são os portadores maioritários e os electrões os portadores minoritários.

3.1.7 Efeito Calor e Luz

Quando um condutor é aquecido os átomos tendem a vibrar, essa vibração impede o movimento dos electrões circundantes. Isto significa que há uma redução nos electrões que constituem a corrente eléctrica, diz-se então que a resistividade do condutor aumentou. Um condutor tem um coeficiente de temperatura positivo, isto é, a resistividade aumenta com o aumento da temperatura.

Quando um material semiconductor se encontra à temperatura do zero absoluto, não existem praticamente electrões livres na banda de condução nem buracos na camada de valência, então à temperatura do zero absoluto um semiconductor comporta-se como um isolador. Quando o material é aquecido, os electrões libertam-se da camada de valência ficando na banda de condução. A condução pode ocorrer devido ao movimento de electrões e por transferência de buracos.

3.2 Junção

3.2.1 Junção pn

Contactos graduais ou abruptos, entre dois tipos de materiais diferentes, como por exemplo semicondutores com dopagem diferente, semicondutor e metal, semicondutor e isolante, regiões semicondutoras com diferentes composições (junções heterogéneas), são o bloco primário para qualquer dispositivo semicondutor.

A figura 3.2.1 representa uma junção pn, formada por dois tipos de materiais semicondutores, um de tipo p e um outro de tipo n. No bloco do material do tipo p, os círculos representam buracos, que são os portadores de carga maioritários nos materiais semicondutores de tipo p. Os círculos preenchidos no bloco semicondutor do tipo n, representam electrões dentro do material.

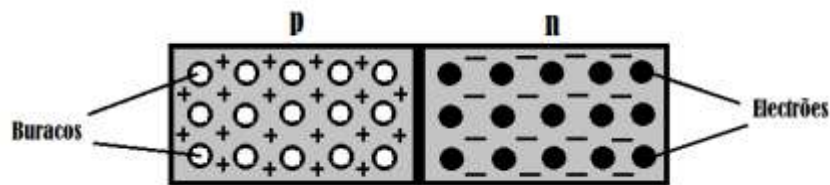


Figura 3.2.1 - Condição inicial dos portadores de carga numa junção pn, adaptado [8]

Os buracos existentes do material de tipo p estão fixos, pois os átomos nos quais eles existem fazem parte da estrutura cristalina. Estes encontram-se uniformemente distribuídos no material do tipo p, da mesma maneira que os electrões no material de tipo n também se encontram uniformemente distribuídos.

Devido ao facto de os buracos e os electrões estarem próximos na junção, alguns dos electrões livres são atraídos através da junção e preenchem alguns buracos no material do tipo p. Diz-se então que os electrões se difundem (*diffuse*) através da junção, isto é, vão de uma zona de alta concentração de portadores para uma zona de menor concentração. Os electrões livres que atravessam a junção criam iões negativos do material do tipo p ao darem aos átomos um electrão a mais do que o número total de protões. Consequentemente deixam para trás iões positivos, pois ficam com um electrão a menos que o número total de protões. Este processo encontra-se ilustrado na figura 3.2.2. Antes da difusão ocorrer, ambos os materiais quer o do tipo n quer o do tipo p, são electricamente neutros. Porém como iões negativos são criados no lado do material de tipo p, a região de material do tipo p perto da junção adquire uma carga

negativa. Semelhantemente, iões positivos são criados do material de tipo n, dando à região perto da junção carga positiva.

A carga negativa acumulada no lado do material de tipo p, tende a repelir os electrões vindos do material de tipo n, já o acumulado de carga positiva criado no material de tipo n tende a repelir os buracos do material de tipo p. Isto faz com que se torne mais difícil a difusão de portadores de carga na junção. O resultado final é que uma barreira potencial é criada na junção, negativa no lado do material de tipo p e positiva no lado do material de tipo n. O campo eléctrico produzido pela barreira potencial é grande o suficiente para prevenir qualquer outro movimento de electrões e buracos através da junção.

Considerando as densidades de dopagem (*doping densities*), as cargas eléctricas e a temperatura é possível calcular a magnitude da barreira de potencial criada. Tipicamente as barreiras potenciais à temperatura ambiente são de 0.3 V para o Germânio e 0.7 V para o Silício.

O movimento de portadores de carga na junção, deixa uma banda em cada lado da junção que está depleta de portadores de carga, como se encontra ilustrado na figura 3.2.2.

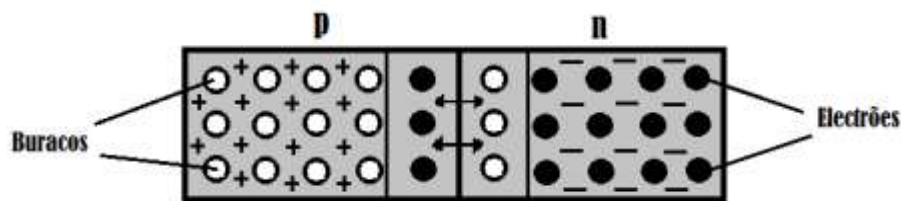


Figura 3.2.2 - Difusão dos portadores de carga na junção pn, adaptado [8]

No lado do material de tipo n, a zona depleta consiste em átomos impuros que perderam os electrões livres e portanto se tornaram positivamente carregados. Já no lado do material de tipo p, a região é formada por átomos impuros que se tornaram negativamente carregados ao perderem um buraco. Em ambos os lados da junção um número igual de átomos impuros estão envolvidos, assim se os dois blocos de materiais tiverem iguais densidades de dopagem, a zona de depleção é igual em largura. Se o lado do material do tipo p, for mais dopado que o lado do tipo n, a zona de depleção penetra mais no lado do material de tipo n de modo a incluir um número igual de átomos impuros em cada lado da junção. Inversamente, caso seja o lado do material de tipo n que esteja mais dopado, a região de depleção penetra mais no material de tipo p.

Foi demonstrado que o campo eléctrico produzido pela barreira potencial criada na junção opõe-se ao movimento de electrões do material de tipo n e ao movimento de buracos do

material de tipo p. Visto que os electrões são os portadores de carga maioritários no material de tipo n e os buracos os portadores de carga maioritários no material de tipo p, pode-se dizer então que a barreira de potencial se opõe ao movimento dos portadores de carga maioritários. Algum electrão que tenha sido extraído da sua orbita no material de tipo p devido à energia térmica é atraído pelo terminal positivo da barreira de potencial para o lado do material de tipo n. Igualmente os buracos gerados pela energia térmica no material de tipo n, são atraídos pelo terminal negativo da barreira de potencial. Os electrões do lado do material de tipo p e os buracos do lado do material do tipo n são os portadores de carga minoritários.

3.2.2 Junção pn polarizada inversamente

Se uma tensão positiva for aplicada ao material de tipo n da junção e uma tensão negativa ao material de tipo p, os electrões do material de tipo n são atraídos devido à tensão positiva e os buracos são atraídos ao material de tipo p devido à tensão negativa aplicada. Como se ilustra na figura 3.2.3, os buracos dos átomos impuros no material de tipo p são atraídos para fora da junção. Os electrões do material de tipo n são atraídos também para fora da junção. Deste modo, a zona de depleção é alargada e a barreira de potencial aumenta com a magnitude da tensão aplicada. Com a barreira de potencial e o campo eléctrico resultante a aumentar, não existe a possibilidade de os portadores de carga maioritários fluírem através da junção. Neste caso, a junção diz-se inversamente polarizada.

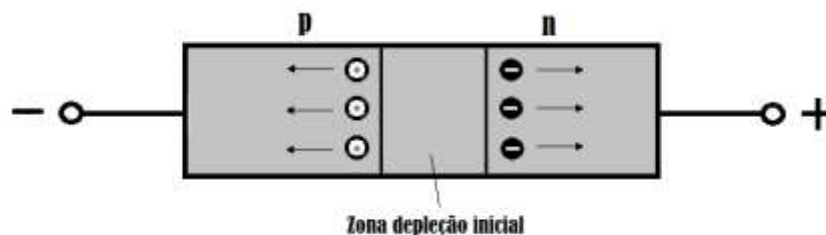


Figura 3.2.3 - Zona de depleção com a junção polarizada inversamente, adaptado [8]

Embora não haja a possibilidade de os portadores de carga maioritários fluírem através da junção polarizada inversamente, portadores de carga minoritários gerados em cada lado da junção atravessam a junção. Este efeito é ilustrado pela característica inversa da junção. No gráfico encontra-se representado, no eixo das abcissas a tensão inversa (V_r) e no eixo das ordenadas a corrente inversa (I_r). Apenas uma pequena tensão inversa é necessária, para que todos os portadores de carga minoritários atravessem a junção, o aumento da tensão inversa

aplicada não vai aumentar a corrente inversa. A esta corrente dá-se o nome de corrente de saturação inversa (I_s).

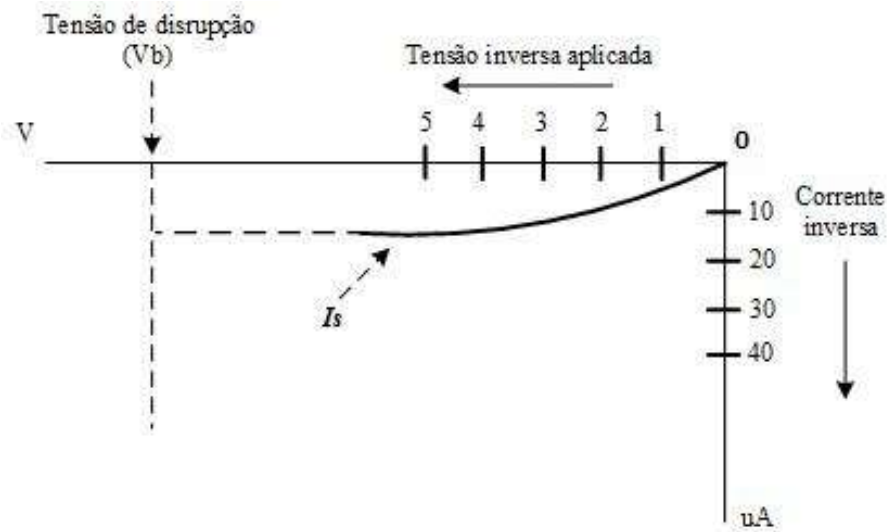


Figura 3.2.4 - Característica inversa, adaptado [8]

A corrente de saturação inversa é normalmente pequena. Para o Silício esta corrente é tipicamente inferior a $1 \mu\text{A}$, enquanto que para o Germânio pode exceder os $10 \mu\text{A}$. Isto deve-se ao facto de existirem mais portadores de carga minoritários no Germânio do que no Silício, pois os portadores de carga libertam-se mais facilmente nos átomos de Germânio.

3.2.3 Junção pn polarizada directamente

Consideremos uma tensão externa aplicada com a polaridade representada na figura 3.2.5, positiva no material de tipo p e negativa no material de tipo n.

Os buracos no lado do material de tipo p, sendo partículas positivamente carregadas, são repelidas do terminal positivo em direcção à junção. Igualmente, os electrões presentes no lado do material de tipo n são repelidos pelo terminal negativo da tensão aplicada e deslocam-se em direcção à junção. O resultado é que a região de depleção é reduzida e a barreira de potencial é também diminuída. Se a tensão aplicada for aumentando, a barreira de potencial irá progressivamente diminuir até que desaparece e então, os portadores de carga podem facilmente fluir através da junção.

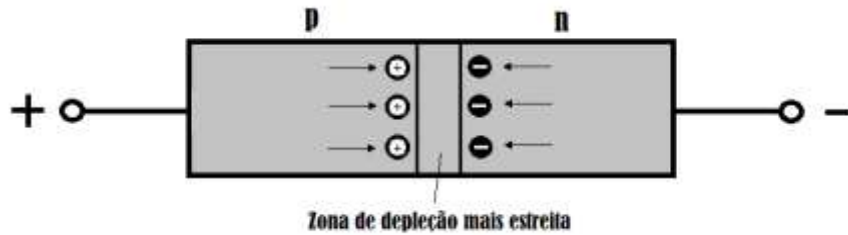


Figura 3.2.5 - Zona de depleção com a junção polarizada directamente, adaptado [8]

Os electrões do material de tipo n são agora atraídos pelo terminal positivo da tensão aplicada, enquanto que os buracos do material de tipo p são atraídos pelo terminal negativo da tensão aplicada. Isto faz com que portadores de carga maioritários fluam através da junção e então a junção diz-se polarizada directamente.

A figura 3.2.6, mostra a corrente em função da tensão aplicada para valores típicos do Germânio e do Silício. Em ambos os casos este gráfico é conhecido como a característica directa da junção.

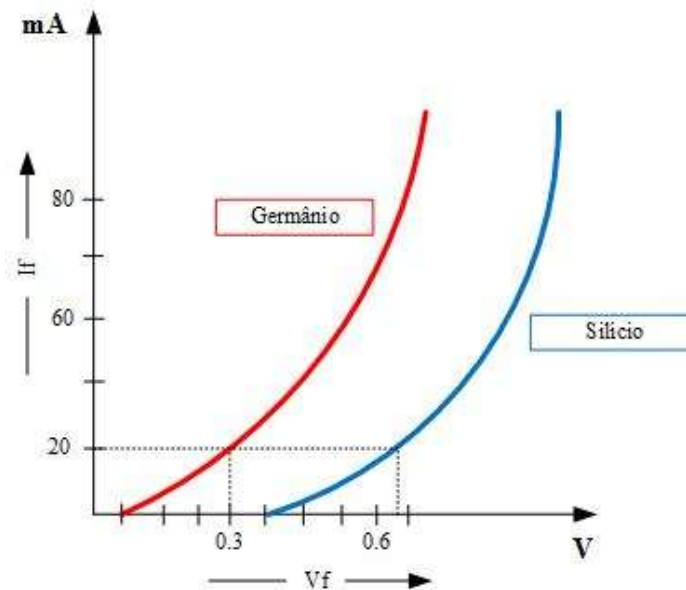


Figura 3.2.6 – Característica estática do Germânio e do Silício, adaptado [7]

Como é possível observar, uma pequena corrente flui até que a tensão exceda a barreira de potencial, cerca de 0.3 V para o Germânio e 0.7 no caso do Silício. A característica directa da junção assemelha-se a uma exponencial, à medida que V_f aumenta, a barreira de potencial, vai sendo progressivamente diminuída permitindo assim com que mais e mais portadores de carga maioritários atravessem a junção. Para lá da tensão de condução, a barreira de potencial

foi completamente ultrapassada e I_f aumenta linearmente com o aumento de V_f e os materiais semicondutores de tipo n e de tipo p, comportam-se simplesmente como uma resistência.

3.2.4 Efeito da Temperatura

A corrente de saturação inversa é devida aos portadores de carga minoritários que atravessam a junção. Quando a temperatura do condutor aumenta, essa energia térmica adicional causa o aumento do número de pares buracos-electrões (*hole-electron-pairs*) e consequentemente um maior número de portadores de carga minoritários é gerado. Assim, a corrente inversa de saturação (I_s), aumenta com o aumento da temperatura da junção.

Pode-se demonstrar que a corrente de saturação, depende, da carga eléctrica, densidade de dopagem, da área de junção, bem como da temperatura. Tendo em conta, que à excepção da temperatura, todos estes factores são constantes para uma dada junção é possível concluir que I_s apenas depende da temperatura. Tipicamente, I_s aumenta para o dobro por cada 10 °C de aumento de temperatura, como é possível observar na figura 3.2.7.

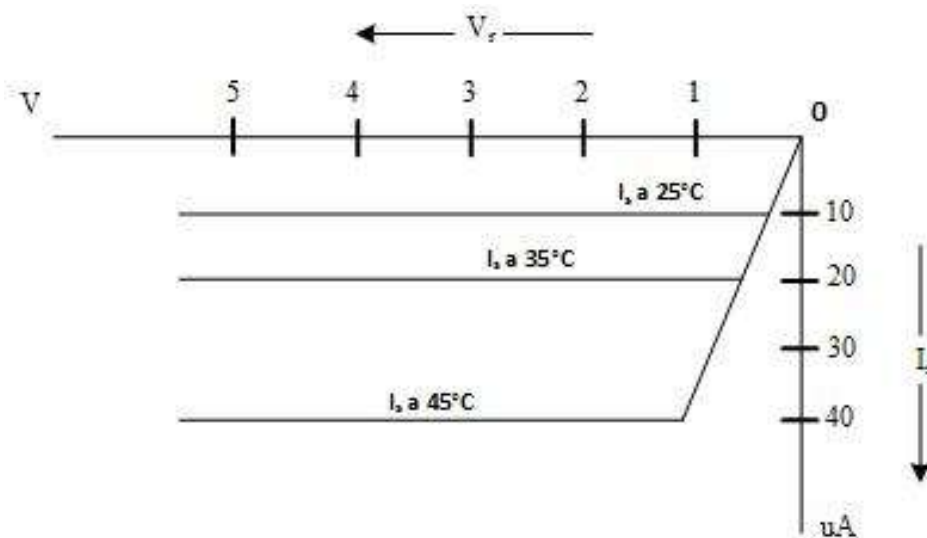


Figura 3.2.7 - Relação da característica inversa com a temperatura, adaptado [8]

Na figura anterior ilustrou-se que I_s aumenta, com o aumento da temperatura. Pode-se também demonstrar que I_f (corrente directa) é proporcional a I_s . Como se pode observar na figura 3.2.8 (a), para uma tensão V_f fixa, I_f aumenta com o aumento da temperatura. Já na figura 3.2.8 (b), pode-se observar que para um dado I_f fixo, V_f aumenta com a diminuição da temperatura, isto é, V_f tem um coeficiente de temperatura negativo.

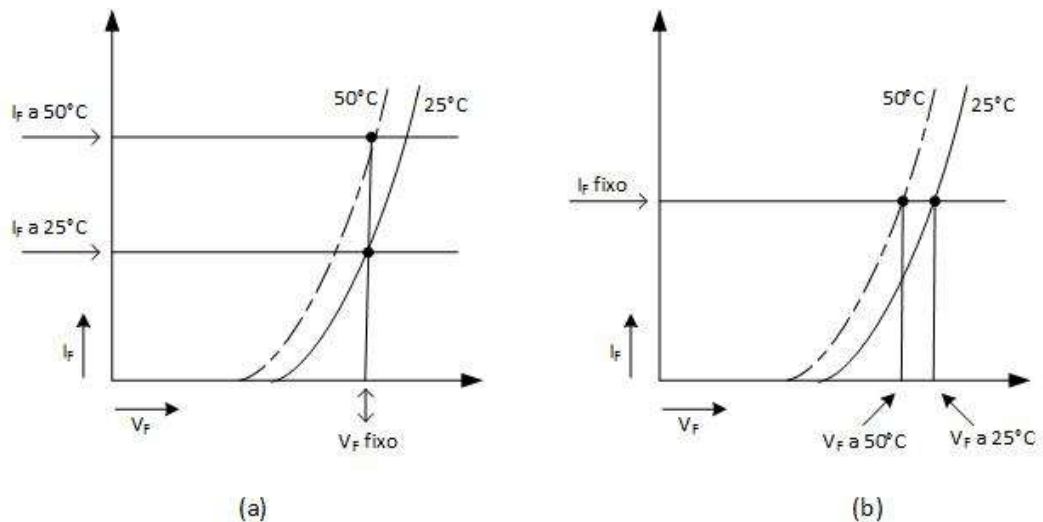


Figura 3.2.8 - Variação da tensão directa e da corrente do díodo com a temperatura, adaptado [8]

Valores típicos para os coeficientes de temperatura da tensão directa, para a junção pn, são aproximadamente de $-1,8 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ no caso do Silício e de $-2,02 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ no caso do Germânio.

3.2.5 Capacidade da Junção

Sendo a zona de depleção da junção pn, uma zona depleta de portadores de carga, é como se existisse um isolador ou um dielétrico situado no meio de dois blocos com baixa resistência. O valor da capacidade da zona de depleção (*depletion layer capacitance*) designado por C_{pn} , pode ser calculado usando a fórmula do condensador plano. Valores típicos para C_{pn} , são da ordem de 40 pF.

Visto que a largura da zona de depleção pode ser alterada, alterando a tensão inversa, a capacidade para uma dada junção pn, pode ser variada, alterando a tensão aplicada.

Considerando que a junção se encontra polarizada directamente, uma corrente I_f flui através da junção. Se a tensão aplicada for de repente invertida, I_f cessa de imediato, deixando alguns portadores de carga maioritários na zona de depleção. Estes portadores de carga têm de fluir para fora da zona de depleção, zona essa que está alargada quando polarizada inversamente. O resultado é que quando a junção se encontra polarizada directamente e de repente é polarizada inversamente, uma corrente inversa flui, corrente essa que é maior inicialmente e vai diminuindo até atingir o valor da corrente de saturação inversa (I_s), este efeito é conhecido como capacidade de difusão (*diffusion capacitance*) C_d . Pode-se demonstrar

que C_d é proporcional à corrente directa I_f , isto é espectável, pois o número de portadores de carga da região de depleção é directamente proporcional a I_f . Valores típicos para a capacidade de difusão são da ordem de $0.02 \mu\text{F}$, valor esse que é bastante maior que o valor da capacidade da zona de depleção C_{pn} .

O efeito produzido por C_d é conhecido por tempo de recuperação (*recovery time*), este parâmetro torna-se bastante importante em dispositivos, em que seja necessário comutar rapidamente da polarização directa para a polarização inversa.

3.3 Díodo

3.3.1 Introdução

O dispositivo fundamental electrónico semiconductor é o díodo de junção. O símbolo usado para um díodo de junção-pn é mostrado na figura 3.3.1. O tipo de material p (*p-type*) é chamado de Ânodo, enquanto que o tipo de material n (*n-type*) é chamado de Cátodo.

Existem vários tipos de díodos, cada um com o seu modo de operação e aplicação. Os vários tipos de díodos existentes são facilmente identificados pelo nome e símbolo. De notar ainda que o termo díodo refere-se a uma junção-pn. Outros tipos de díodos têm os seus próprios nomes que os identificam, como por exemplo: díodo zener ou o díodo emissor de luz (LED).



Figura 3.3.1 - Símbolo díodo junção pn

O díodo de junção é um dispositivo de dois terminais que permite a passagem de corrente se polarizado directamente e virtualmente nenhuma corrente caso esteja polarizado inversamente. Idealmente um díodo seria um curto-circuito se polarizado directamente e um circuito-aberto se polarizado inversamente.

Uma única junção pn serve não só apenas como rectificador mas também é o bloco básico de construção de todos os dispositivos semicondutores usados hoje em dia.

Estão incluídos o transistor bipolar, transistor junção efeito de campo (JFET) e o tiristor, entre outros.

3.3.2 Característica Estática

Como foi referido anteriormente, um diodo ideal deveria comportar-se como um curto-circuito quando polarizado directamente e um circuito-aberto se polarizado inversamente. Porém na prática existe uma resistência não-linear quando o diodo se encontra directamente polarizado e uma pequena corrente inversa quando polarizado inversamente (*leakage current*), esta corrente é independente da tensão inversa a que o diodo está sujeito.

A característica estática do diodo quando se encontra directamente polarizado, pode ser modelado aproximadamente, como um diodo ideal em série com uma fonte de tensão e uma resistência R_{on} .

Quando polarizado inversamente, apenas uma corrente de fuga I_s flui até que a tensão de disrupção (*breakdown voltage*) seja atingida. A disrupção do diodo deve ser evitada, pois a excessiva potência dissipada pode danificar o dispositivo.

Um esquema típico da característica estática do diodo encontra-se representada na figura 3.3.2. Normalmente são usados quatro parâmetros para representar a característica estática do diodo, estes parâmetros são definidos da seguinte forma:

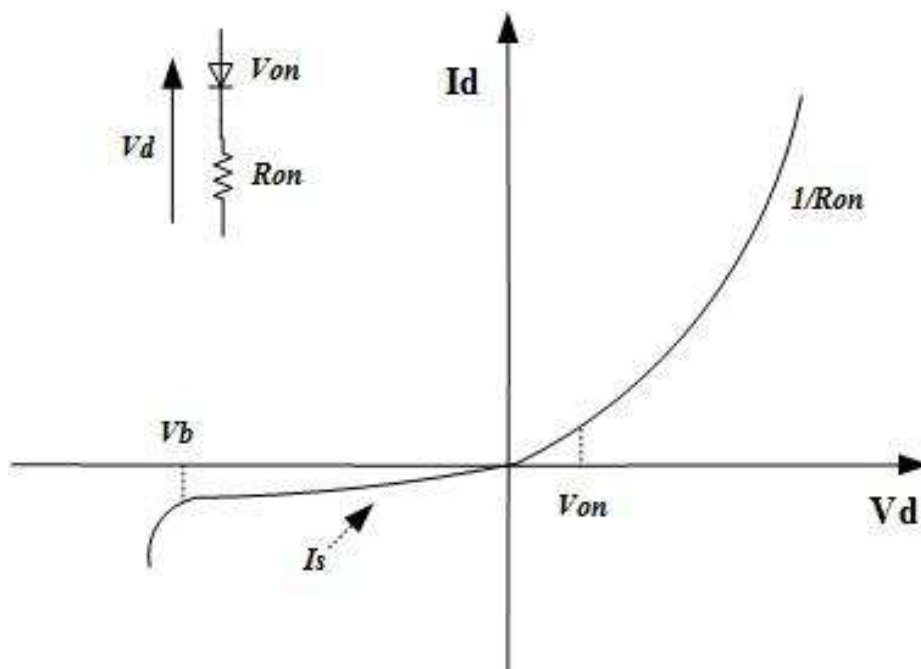


Figura 3.3.2 - Característica estática do diodo

V_{on} : Tensão de condução do díodo, correspondente a uma corrente de condução de 1 A;

R_{on} : Resistência incremental, este valor corresponde ao inverso do declive da recta tangente à característica directa do díodo;

I_s : Corrente de saturação inversa;

V_b : Tensão de disrupção.

3.3.3 Característica Dinâmica

A recuperação inversa é o efeito dinâmico mais importante no projecto de circuitos de electrónica de potência, pois este introduz sobretensões e uma grande dissipação de energia. Este fenómeno ocorre quando um díodo que se encontra polarizado directamente e é desligado rapidamente.

O excesso de carga armazenada na região levemente dopada durante a condução demora algum tempo até ser removida. Durante este tempo o díodo permanece a conduzir e uma corrente inversa flui no díodo, isto é, o díodo comporta-se como um curto-circuito quando se deveria comportar como um circuito aberto.

Curvas típicas de tensão e corrente dos transitórios estão ilustradas na figura 3.3.3.

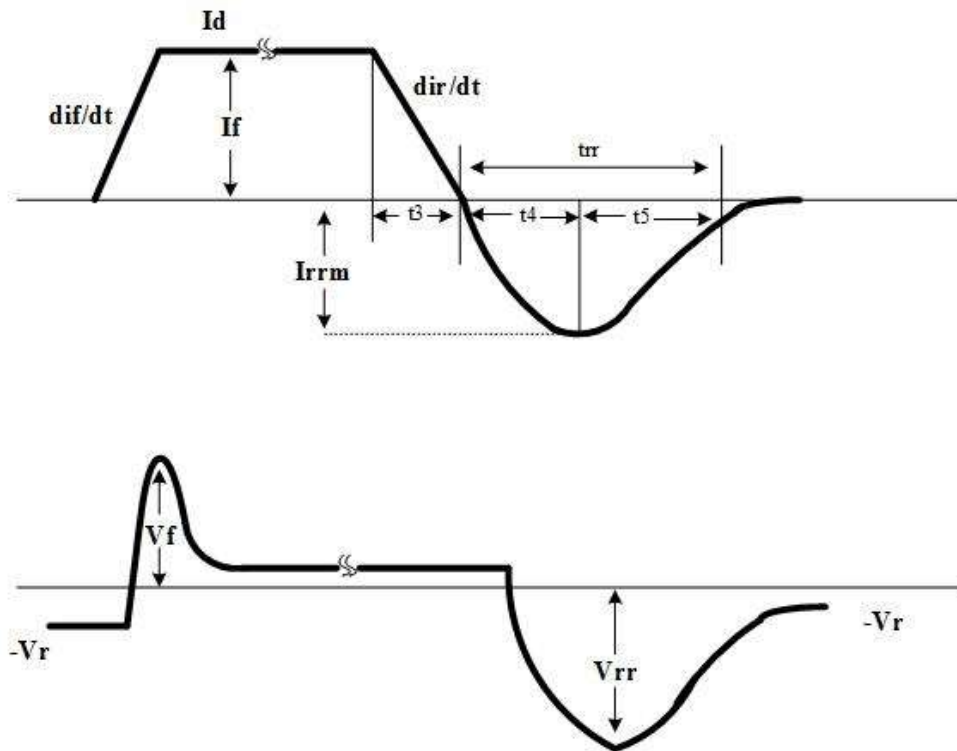


Figura 3.3.3 - Curvas típicas de tensão e corrente no diodo, adaptado [6]

A tensão directa na junção pn, excede inicialmente o seu valor estacionário com o mesmo nível de corrente com a diodo a entrar em condução com um elevado valor di/dt . Este fenómeno é chamado recuperação directa (*forward recovery*).

O processo de recuperação inverso ocorre quando o diodo se encontra a conduzir e é desligado. A figura 3.3.3 mostra um largo pulso inverso de corrente existente durante o processo em que o diodo se desliga. Ao intervalo de tempo $t_{rr} = t_4 + t_5$ dá-se o nome de tempo de recuperação inverso (*reverse recovery time*). O pico de corrente inversa I_{rrm} , pode ser comparado à corrente directa I_f .

De modo a melhorar o tempo de recuperação é comum o semiconductor ser dopado de modo a que o “tempo de vida” dos portadores de carga minoritários sejam reduzidos. Um factor S chamado de snapiness é usado para descrever a curva da corrente de recuperação e é dado por:

$$S = t_5/t_4 \quad (3-1)$$

Um alto valor de S é indesejável pois pode provocar oscilações parasitas e provocar problemas electromagnéticos.

O transitório de recuperação inversa depende da rapidez com que o diodo é desligado. Normalmente os datasheets dos diodos detalham os parâmetros t_{rr} e a carga de recuperação inversa Q_{rr} (*reverse recovery charge*) como funções da corrente inversa di_r/dt .

Em circuitos electrónicos de comutação, tipicamente a corrente inversa provocada pelo desligar do díodo flui para um transístor aumentando assim as perdas e degradando o transístor consequentemente diminuindo a sua fiabilidade.

3.3.4 Modelo – Parâmetros e Equações

Os parâmetros do modelo do díodo podem ser classificados como, parâmetros estáticos, de recuperação inversa e parâmetros de capacidade da junção. Estes parâmetros encontram-se descritos em baixo:

Parâmetros estáticos:

V_{on} (V) – Tensão em que se considera que o díodo começa a conduzir, correspondente à tensão quando no díodo flui uma corrente de 1 A;

R_{on} (Ω) – Resistência do díodo quando se encontra a conduzir;

I_s (A) – Corrente de saturação inversa.

Parâmetros de recuperação inversa:

I_{fo} (A) – Corrente que flui no díodo antes de este ser desligado;

di_r/dt (A/s) – Declive da recta que aproxima a forma de onda de corrente do díodo ao desligar;

I_{rrm} (A) – Corrente de pico alcançada quando o díodo desliga;

t_{rr} (s) – Tempo de recuperação inversa do díodo;

Q_{rr} (C) – Carga de recuperação do díodo (*turn-off recovery charge*), aproximadamente igual a $(I_{rrm} \cdot t_{rr})/2$.

Parâmetros da capacidade da junção:

C_j (F) – Capacidade da junção do díodo, que se representa pela tensão de junção V_j .

Todos estes parâmetros podem ser obtidos por ensaios realizados ao diodo.

(a) Modelo estático do diodo

O modelo estático do diodo é o modelo básico, ao qual todos os efeitos dinâmicos vão ser adicionados.

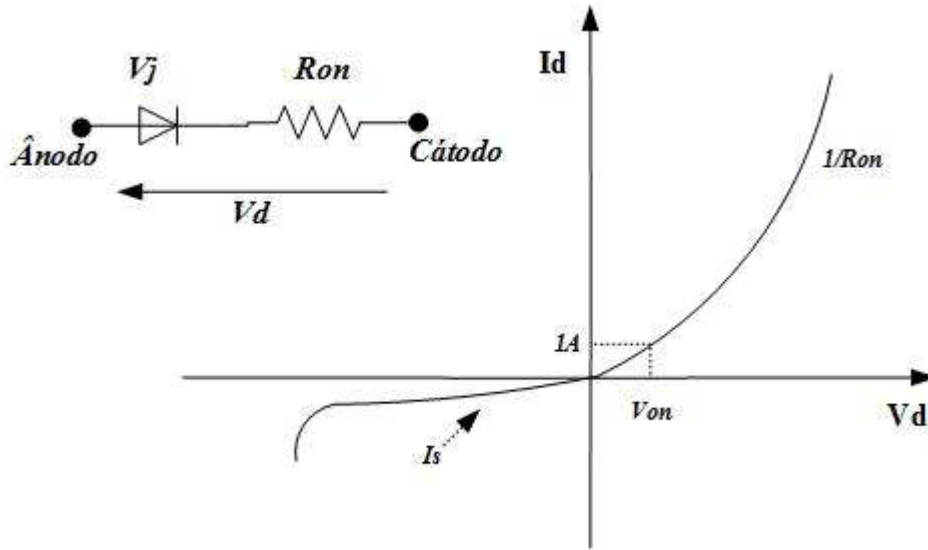


Figura 3.3.4 - Modelo estático diodo

Este modelo como se encontra ilustrado na figura 3.3.4 e como já referido anteriormente, consiste numa resistência R_{on} em série com um diodo ideal que representa a tensão da junção V_j (*junction voltage*) e que se pode representar matematicamente pela expressão:

$$I_d = I_s * (e^{\frac{V_j}{V_b}} - 1) \tag{3-2}$$

onde, $V_j = V_d - I_d \cdot R_{on}$

A corrente de saturação inversa I_s e a resistência em série R_{on} , podem ser obtidos da curva de característica estática. A barreira de potencial da junção V_b (*junction barrier potencial*), pode também ser facilmente obtida através da relação:

$$V_b = \frac{V_{on} - R_{on}}{\ln(1 + \frac{1}{I_s})} \quad (3-3)$$

em que V_{on} corresponde à tensão, quando a corrente que flui no díodo é de 1 A.

Para os parâmetros V_{on} , R_{on} e I_s a característica estática do díodo fica então definida.

(b) Modelo de recuperação inversa

Como referido anteriormente o efeito dinâmico mais importante no díodo é o da recuperação inversa que ocorre quando o díodo se encontra a conduzir é desligado rapidamente.

Baseado no submodelo de recuperação inversa proposto por [9], que consiste numa resistência, uma indutância e uma fonte de corrente controlada por tensão. Este submodelo encontra-se representado na figura 3.3.5.

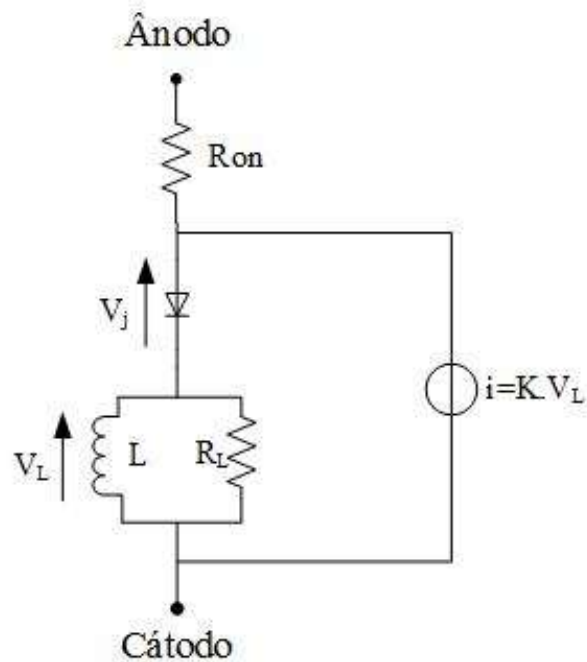


Figura 3.3.5 - Modelo recuperação inversa

De notar que o modelo estático do díodo, composto por uma resistência em serie com uma fonte de tensão a que corresponde a tensão da junção, não é suficientemente satisfatório

visto o diodo se comportar como um gerador quando nele flui uma corrente negativa quando o próprio é desligado rapidamente. Nesse caso ao modelo estático foi adicionado o efeito dinâmico.

Ao ser desligado com uma carga indutiva, o circuito do submodelo apresentado na figura 3.3.5, fornece a típica forma de onda de corrente de um diodo como se mostra da figura 3.3.6.

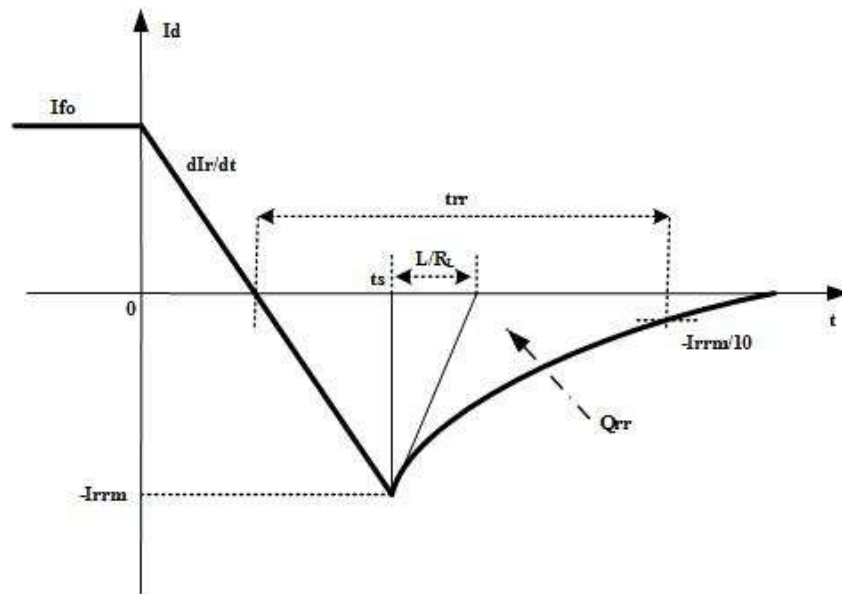


Figura 3.3.6 - Forma de onda típica do diodo ao desligar

Para $t < t_s$ o diodo conduz e o circuito externo onde o diodo se encontra determina a corrente que nele flui. À medida que I_d decresce linearmente, a tensão aos terminais de L (V_L), comanda a corrente inversa da fonte de corrente I_{rrm} . No momento em que $t = t_s$, I_d atinge o valor de $-I_{rrm}$ e então o diodo ideal corta. Após $t > t_s$, o diodo ideal pode então ser visto como um circuito aberto e o subcircuito $R_L//L$ age agora como um circuito independente, com a corrente a cair exponencialmente segundo a expressão matemática:

$$I_d(t) = -I_{rrm} * \exp\left(-\frac{R_L(t-t_s)}{L}\right) \quad (3-4)$$

Portanto o modelo de recuperação inversa apenas depende de dois parâmetros: $R_L//L$ e K . Normalmente os datasheets dos diodos fornecem I_{rrm} , t_{rr} e Q_{rr} para um dado I_{fo} , dI_r/dt e

condições de temperatura. O tempo de recuperação inversa t_{rr} é o tempo desde que a corrente passa por zero até que decaia novamente a 10% de $-I_{rrm}$. Os dois parâmetros R_L/L e K , de que o modelo depende, estão relacionados com estes mesmo parâmetros que se encontram indicados no datasheet e podem ser obtidos através das seguintes expressões:

$$\frac{L}{R_L} = \frac{1}{\ln 10} * \left(t_{rr} - I_{rrm} \left(\frac{di_r}{dt} \right)^{-1} \right) \quad (3-5)$$

$$K = \frac{I_{rrm}}{L} \left(\frac{di_r}{dt} \right)^{-1} \left(1 - \exp \left(\frac{-I_{fo} - I_{rrm}}{L \frac{di_r}{dt} \left(K + \frac{1}{R_L} \right)} \right)^{-1} \right) \quad (3-6)$$

A constante de tempo L/R_L é obtida pela equação acima descrita, em que existe um grau de liberdade entre L e R_L , então a indutância L é arbitrariamente igualada a 10 pH. Com L fixo, R_L pode então ser determinado pela equação e K obtido resolvendo a outra equação.

Uma vez ligado o díodo, as condições I_{fo} e di_r/dt são dadas e apenas três parâmetros são necessários I_{rrm} , t_{rr} e Q_{rr} para definir a forma de onda de corrente do díodo ao desligar.

(c) Capacidade da junção

O segundo efeito dinâmico mais importante no díodo ocorre devido aos portadores de cargas nas duas regiões da junção e o espaço existente entre eles. A correspondente capacidade devido ao que foi explicado depende da largura das regiões em questão, que por sua vez depende da tensão aplicada. Uma descrição mais precisa da capacidade da junção por ser dada pelas seguintes expressões [6]:

$$C_j = \frac{C_0}{\left(1 - \frac{V_j}{V_b} \right)^m} \quad \text{para } V_j < 0 \quad (3-7)$$

$$C_j = C_0 \left(1 + m \frac{V_j}{V_b} \right) \quad \text{para } V_j > 0 \quad (3-8)$$

onde o factor m depende do tipo de dopagem. Valores típicos variam entre 0.3 e 0.5. C_0 é a capacidade da junção sem tensão aplicada.

A capacidade da junção é implementada como uma fonte de corrente controlada por tensão, cujo valor é definido como:

$$I_c(V_j) = \frac{d}{dt} \int (C_j) \cdot dV_j \quad (3-9)$$

Considerando o efeito dinâmico falado, o modelo completo do díodo, encontra-se ilustrado na figura 3.3.7.

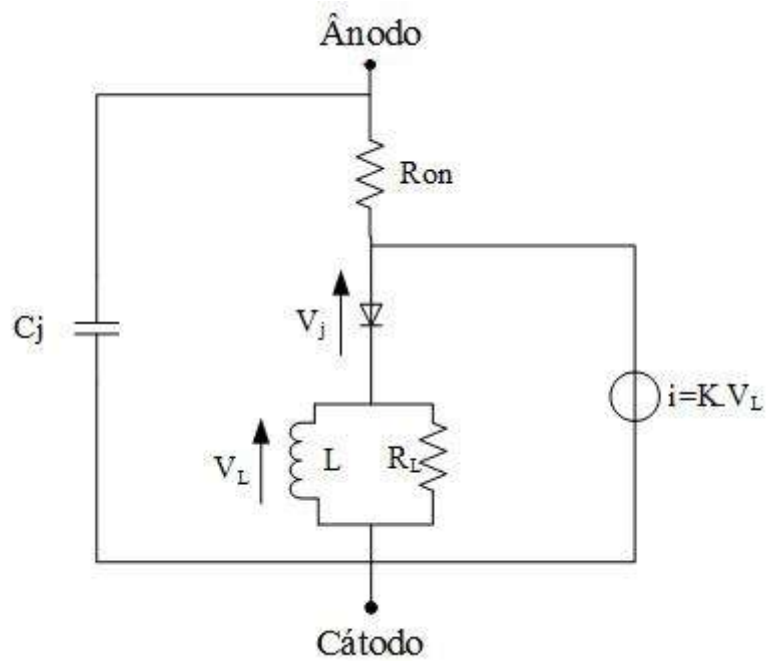


Figura 3.3.7 - Modelo completo do díodo

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

4 Resultados Experimentais

4.1 Método Experimental

Para que a caracterização dos díodos ou de outros componentes de electrónica de potência seja possível, circuitos de teste necessitam de ser implementados

A característica estática do díodo permite-nos observar como é que a tensão aos terminais do díodo se relaciona com a corrente que nele flui.

Como referido anteriormente, as características estáticas, inversas e directas do díodo dizem respeito à corrente, queda de tensão, resistência e a tensão de disrupção. Em geral, estas características podem ser obtidas por métodos estáticos.

No caso do trabalho apresentado, optou-se por efectuar estas medidas usando o método de medida estático Ponto por Ponto Corrente-Directa (*Direct-Current Point-by-Point Methodo*) [10].

Este método requer a aplicação de uma corrente ou tensão directa ao díodo e a medição da tensão ou da corrente aos terminais do díodo. Este método encontra-se ilustrado na figura 4.1.1. O multímetro utilizado na medição dos valores de tensão aos terminais do díodo, foi um multímetro de alta precisão. Foi também medida a temperatura do díodo com recurso a um termopar. Os díodos foram de seguida ensaiados à temperatura ambiente e à temperatura criogénica, conseguida com recurso à imersão em azoto líquido (77 K).

De referir também que nos ensaios em criogenia quer estáticos, quer dinâmicos, o ensaio só foi iniciado após se esperar cinco minutos com o díodo dentro da criogenia, para que este ficasse à temperatura criogénica.

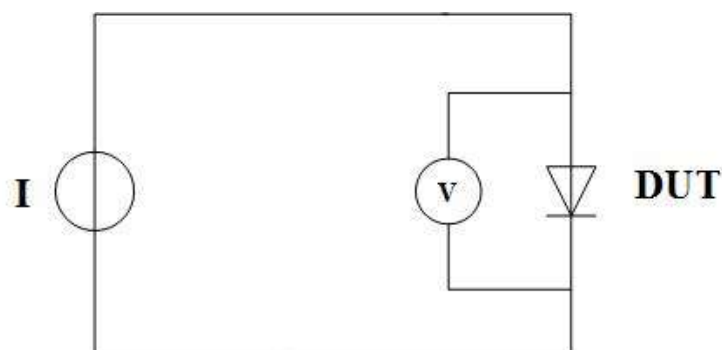


Figura 4.1.1 - Circuito de teste utilizado nos ensaios estáticos ao DUT¹

¹ DUT – Diode under test

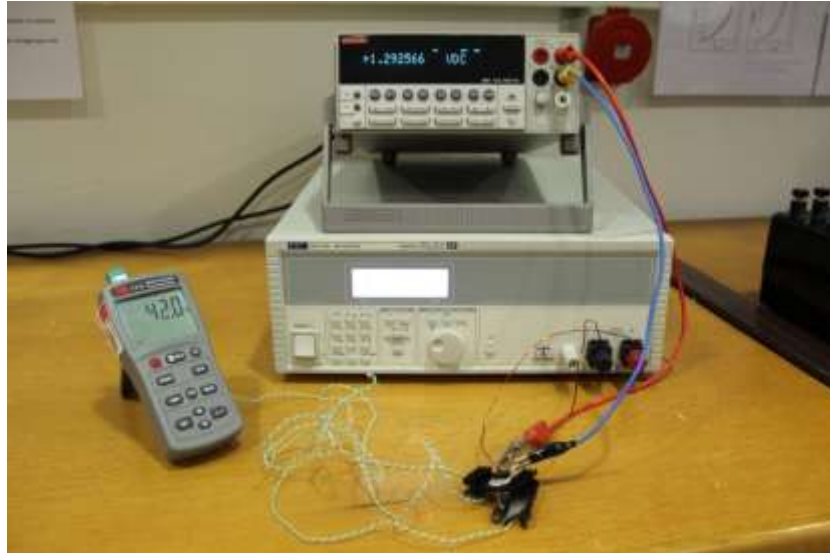


Figura 4.1.2 - Montagem do ensaio estático à temperatura ambiente



Figura 4.1.3 - Montagem do ensaio estático à temperatura criogênica

Nos ensaios dinâmicos realizados e após uma revisão dos circuitos de teste que se poderiam aplicar nos ensaios dos díodos [11], optou-se pelo que está descrito em [12], circuito esse que esse encontra ilustrado na figura 4.1.4. O circuito utilizado consiste num conjunto de indutâncias e de resistências e num MOSFET utilizado como interruptor na abertura ou no fecho do circuito. O circuito tem como funcionamento o seguinte princípio, quando o MOSFET de encontra fechado, a corrente fecha-se pela resistência R_1 e pelas indutâncias L_2 e L_3 , neste caso a díodo encontra-se ao corte. Assim que o MOSFET passa ao corte, a energia armazenada na indutância L_2 e L_3 fecha-se para o díodo pois este encontra-se a conduzir. Para controlar o

MOSFET utilizou um gerador de sinais que juntamente com a resistência R_2 serve apenas de comando para o MOSFET. A corrente que atravessa o díodo quer ao desligar quer ao ligar é visualizada com recurso à tensão medida na resistência de amostragem. Os valores da tensão visualizada no Osciloscópio digital, são então guardados numa disquete, onde posteriormente os dados são tratados com recurso ao software Matlab. Além da resistência de amostragem foi utilizada uma pinça amperimétrica (efeito de Hall), para visualização da corrente que percorria o díodo. Porém devido ao facto de a largura de banda da pinça amperimétrica não ser suficiente para visualizar os tempos de comutação quando os díodos se encontravam à temperatura criogénica (pois os tempos de comutação eram inferiores) ou mesmo para os díodos rápidos, foi utilizada a resistência de amostragem (1Ω) na visualização das correntes no díodo. Sendo que a resistência de amostragem utilizada tem o valor de 1Ω , as tensões medidas são imagens da corrente que flui no díodo. Relativamente à escala da pinça amperimétrica de efeito de hall utilizada as medições foram realizadas com a escala de 100 mV/A .

Os valores dos componentes utilizados foram retirados da referência [12], no caso onde não houve a possibilidade de valores de componentes iguais foram utilizados valores os mais próximos possíveis.

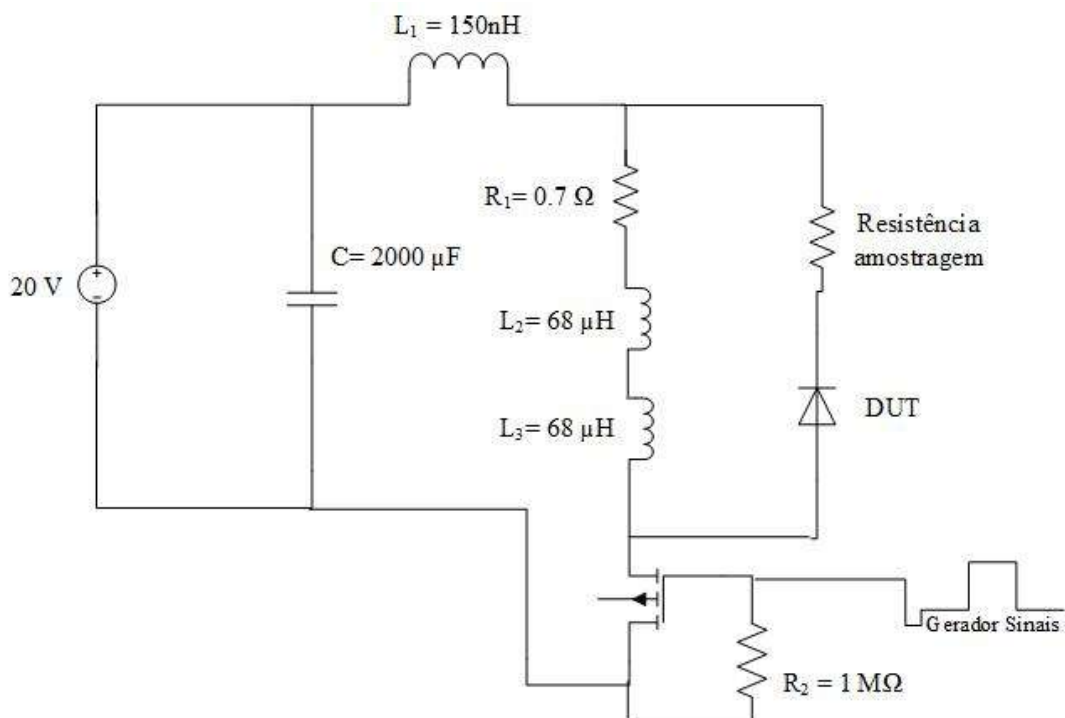


Figura 4.1.4 - Circuito de teste utilizado nos ensaios dinâmicos

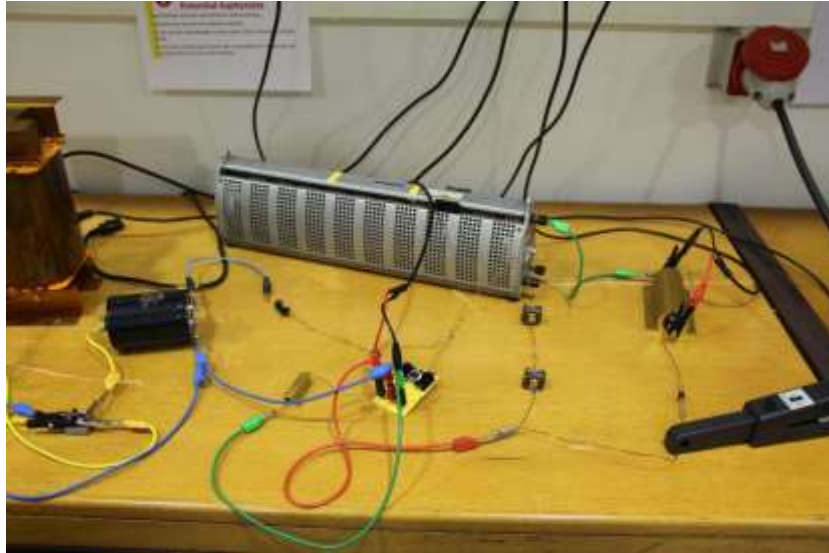


Figura 4.1.5 - Montagem dos ensaios dinâmicos à temperatura ambiente

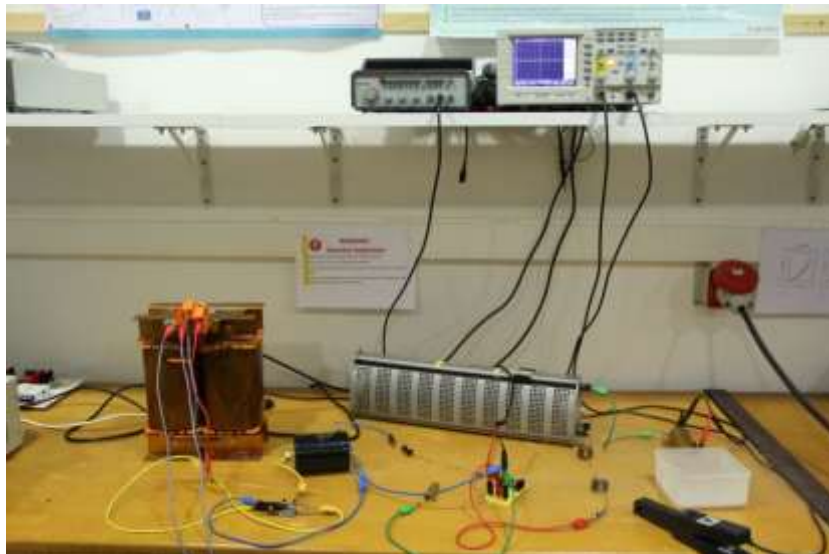


Figura 4.1.6 - Montagem dos ensaios dinâmicos à temperatura criogénica

4.2 Díodo Recuperação normal

Foram realizados, ensaios a três grupos de díodos, os de recuperação normal (*standard recovery*), os díodos de recuperação rápida e schottky. Para uma comparação de resultados mais fidedignos foram realizados ensaios a díodos de marcas diferentes mas com correntes de condução iguais. O modelo e o fabricante, dos díodos de recuperação normal ensaiados foram:

- Fairchild Semiconductor – FFPP10F150STU – 10 A
- NTE Electronics – NTE5812HC – 10 A, Axial
- Semikron – P1000G – 10 A, Axial
- Vishay Formerly I.R – VS-10ETS12PBF – 10 A

Os resultados obtidos encontram-se representados nas figuras seguintes. Nas figuras estão ilustradas as curvas de características estáticas e dinâmicas dos díodos de recuperação normal, à temperatura ambiente e à temperatura criogénica (77 K). Encontram-se também representadas para os díodos de recuperação normal, as curvas dinâmicas obtidas com recurso à pinça de efeito de hall à temperatura ambiente.

(a) Fairchild

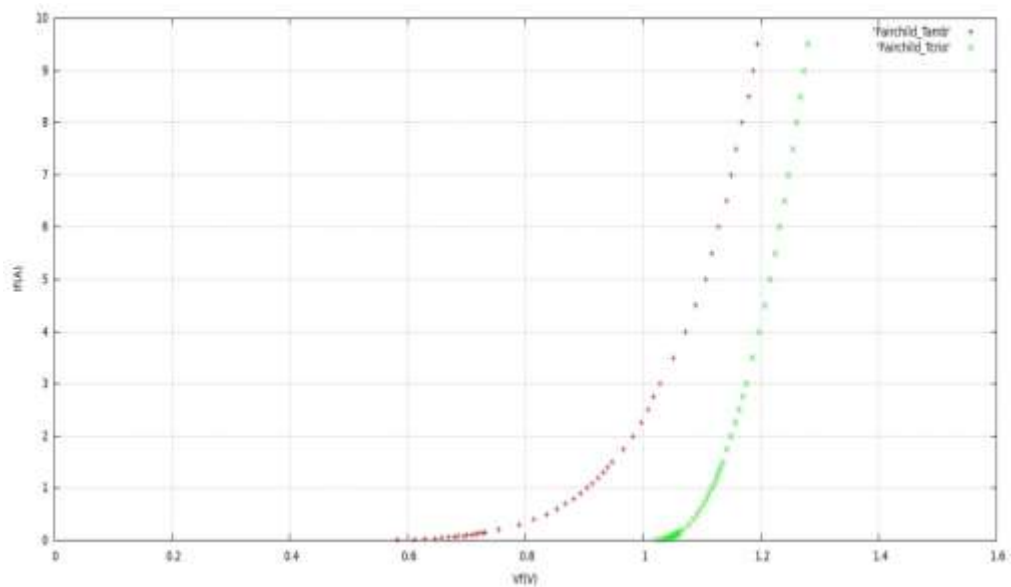


Figura 4.2.1 - Curva estática do fabricante Fairchild

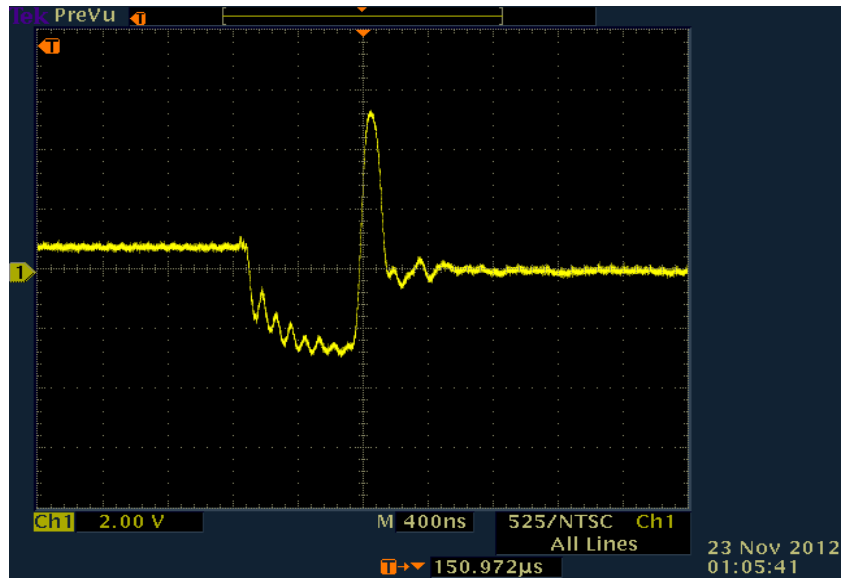


Figura 4.2.2 - Curva dinâmica do fabricante Fairchild à temperatura ambiente

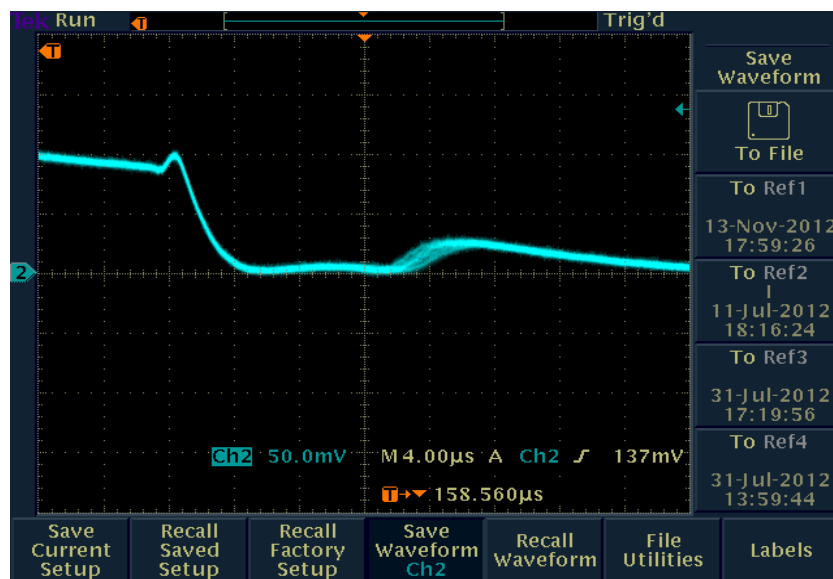


Figura 4.2.3 - Curva dinâmica do fabricante Fairchild à temperatura ambiente (pinça efeito hall)

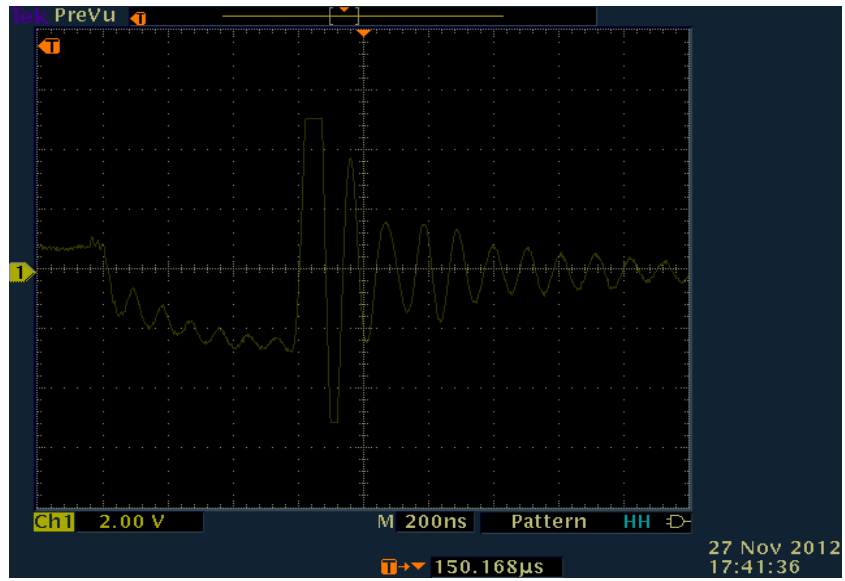


Figura 4.2.4 - Curva dinâmica do fabricante Fairchild à temperatura criogénica

(b) NTE

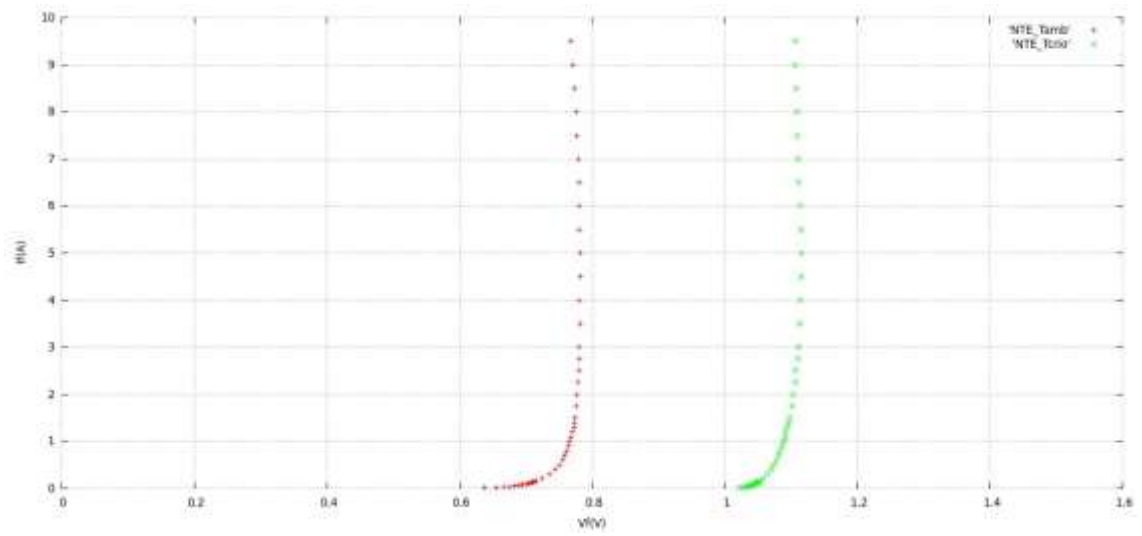


Figura 4.2.5 - Curva estática do fabricante NTE

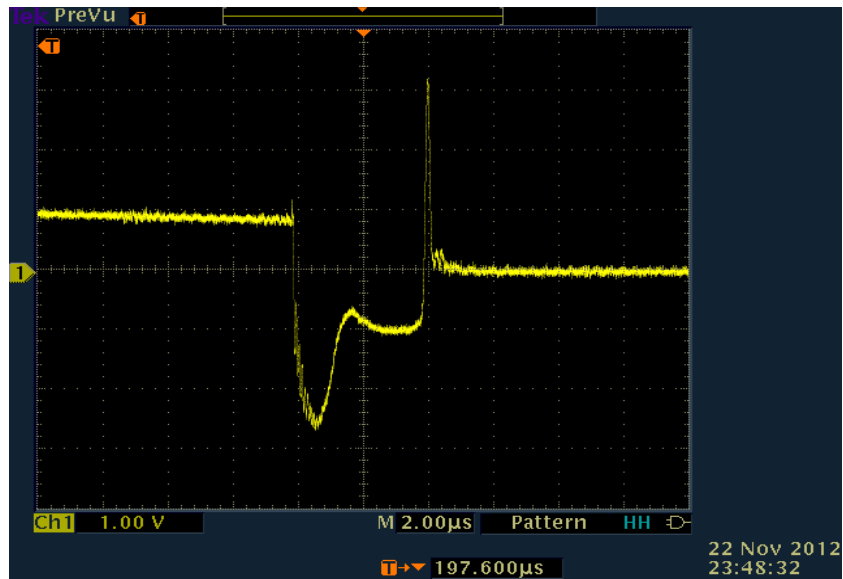


Figura 4.2.6 - Curva dinâmica do fabricante NTE à temperatura ambiente

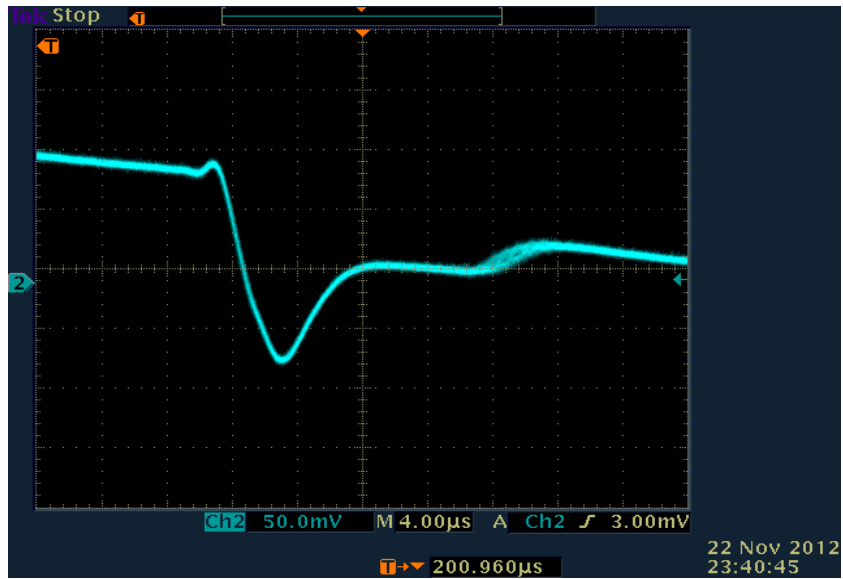


Figura 4.2.7 - Curva dinâmica do fabricante NTE à temperatura ambiente (pinça efeito hall)

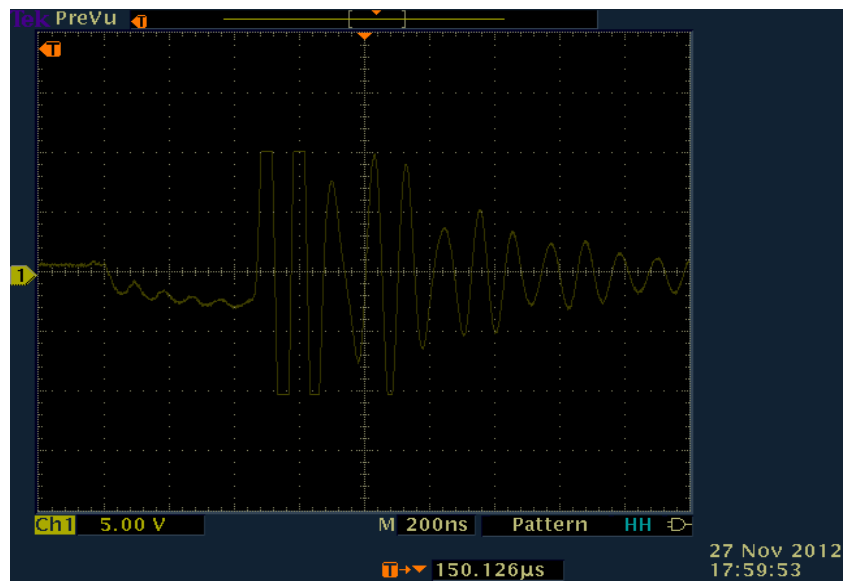


Figura 4.2.8 - Curva dinâmica do fabricante NTE à temperatura criogénica

(a) Semikron

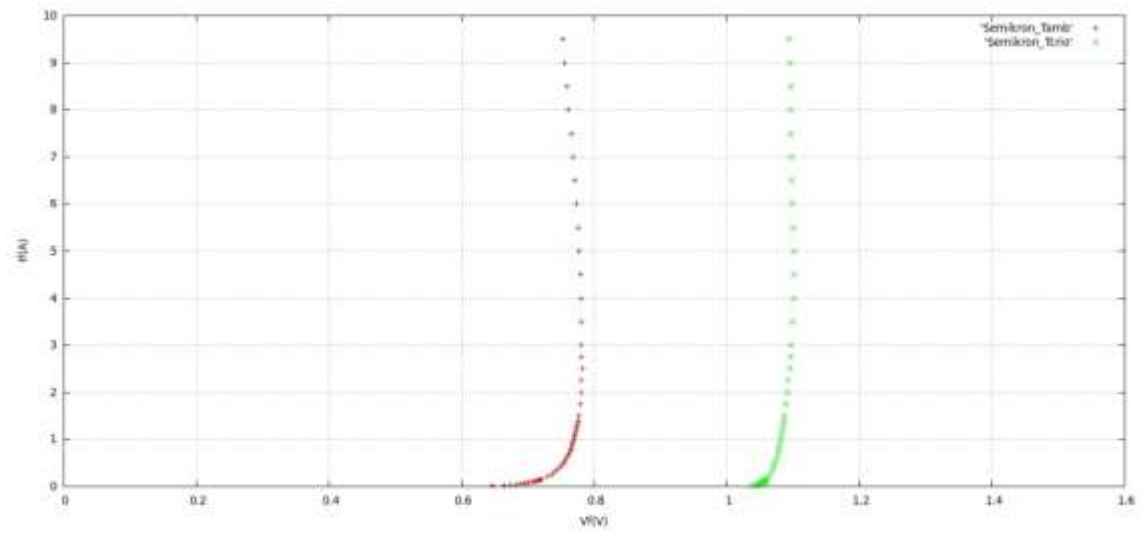


Figura 4.2.9 - Curva estática do fabricante Semikron

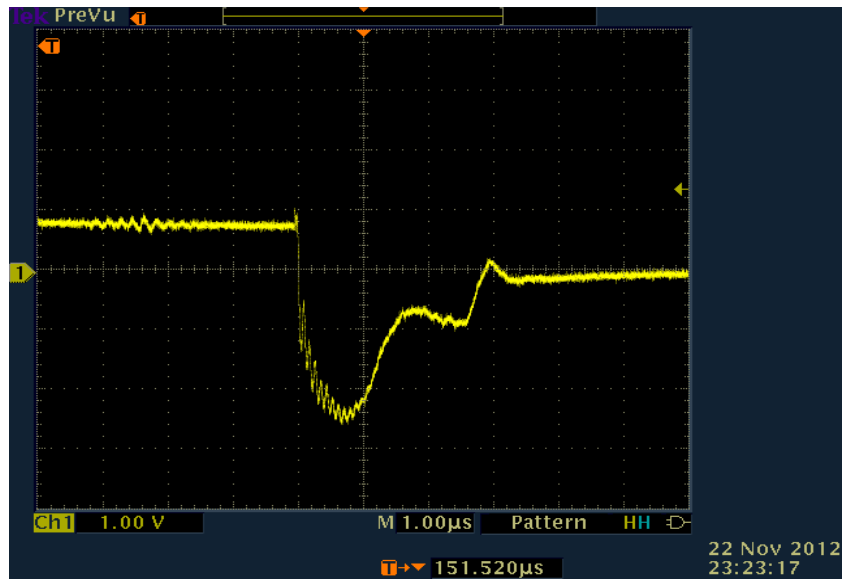


Figura 4.2.10 - Curva dinâmica do fabricante Semikron à temperatura ambiente

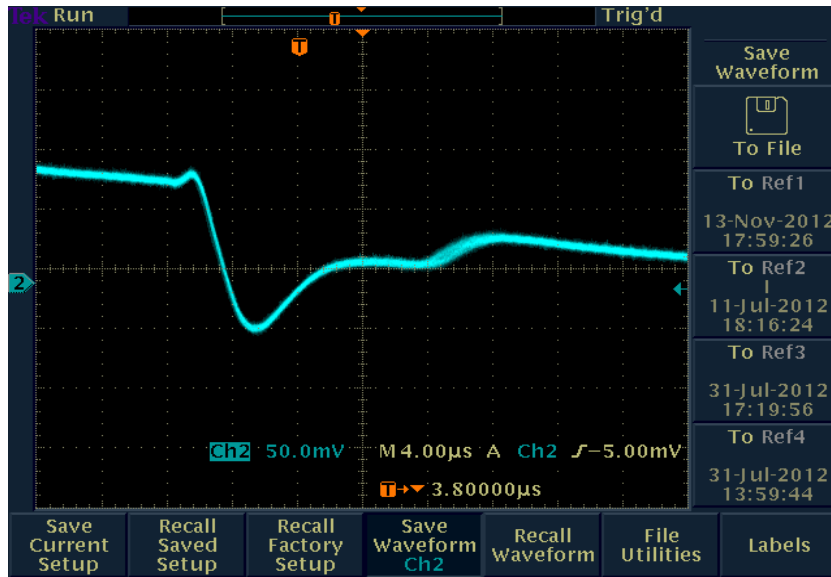


Figura 4.2.11 - Curva dinâmica do fabricante Semikron à temperatura ambiente (pinça efeito hall)

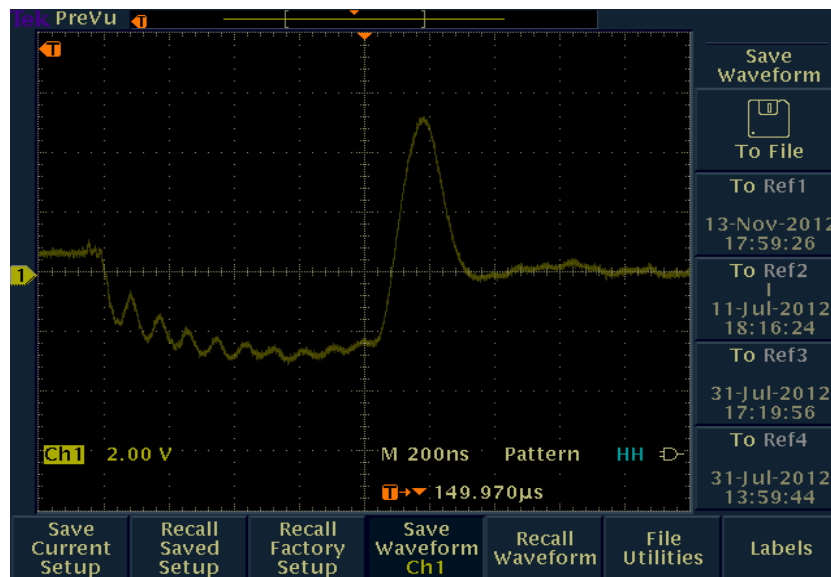


Figura 4.2.12 - Curva dinâmica do fabricante Semikron à temperatura criogénica

(b) Vishay

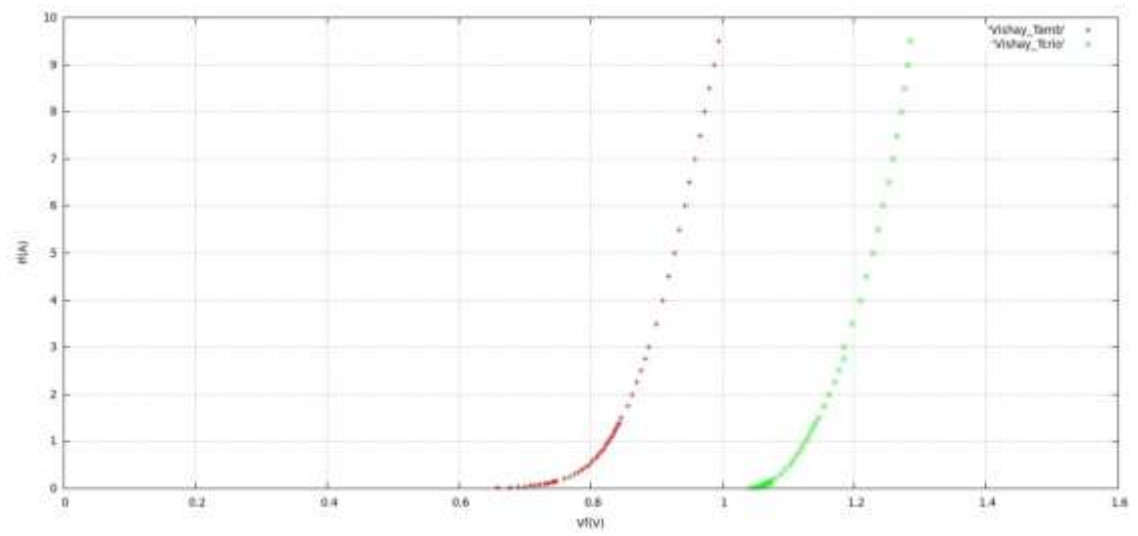


Figura 4.2.13 - Curva estática do fabricante Vishay

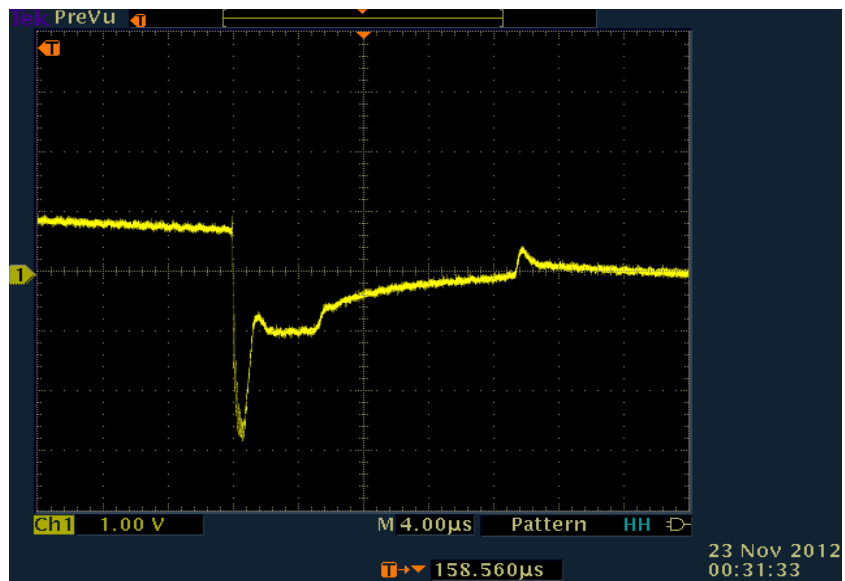


Figura 4.2.14 - Curva dinâmica do fabricante Vishay à temperatura ambiente

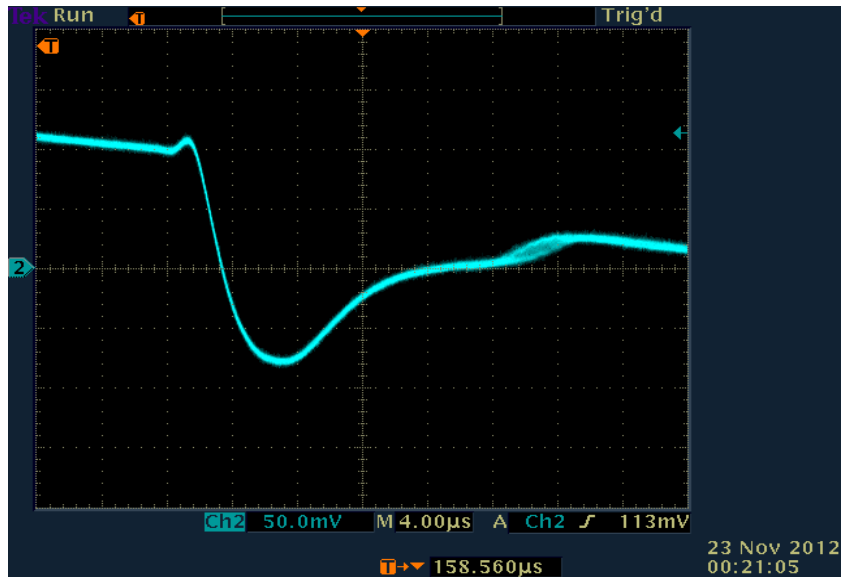


Figura 4.2.15 - Curva dinâmica do fabricante Vishay à temperatura ambiente (pinça efeito hall)

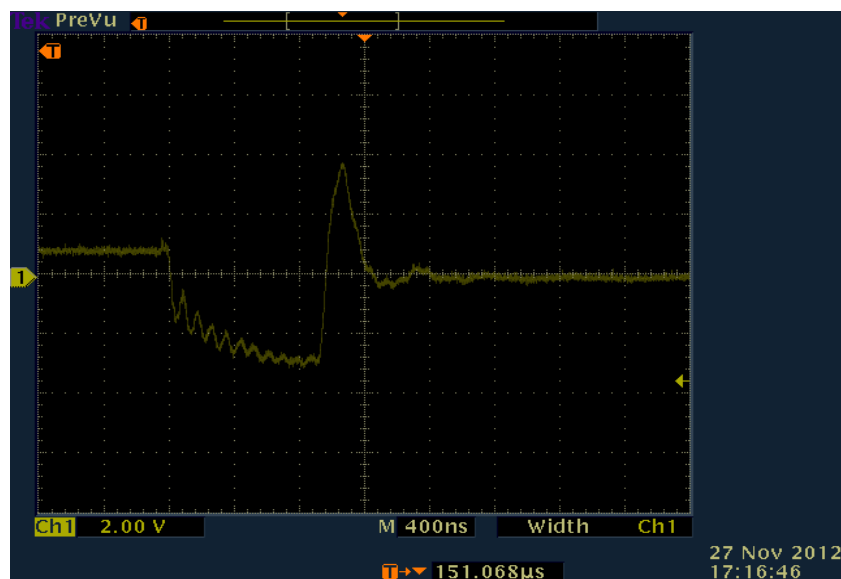


Figura 4.2.16 - Curva dinâmica do fabricante Vishay à temperatura criogénica

Com recurso ao software Matlab, foi possível analisar os dados obtidos através do osciloscópio. As imagens obtidas no osciloscópio foram guardadas em formato digital e com esses mesmos valores obtiveram-se os dados que a seguir se apresentam. O software utilizado permitiu obter com precisão os tempos de recuperação e as áreas necessárias ao cálculo de Q_{rr} , tempos esses que foram referidos no Capítulo 3. Os resultados obtidos quer à temperatura

ambiente, quer à temperatura criogénica para os quatro díodos de recuperação normal ensaiados, encontram-se respectivamente na Tabela 2 e na Tabela 3.

Díodo	t4 (µs)	t5 (µs)	trr (µs)	Qrr (µC)	Irrm (A)	S
Fairchild	0,565	0,536	1,102	1,458	-2,840	0,949
NTE	0,658	3,322	3,980	4,745	-2,641	5,049
Semikron	0,669	2,089	2,758	3,575	-2,540	3,123
Vishay	0,568	10,360	10,928	6,251	-2,780	18,240

Tabela 2 – Díodos de recuperação normal à temperatura ambiente

Díodo	t4 (µs)	t5 (µs)	trr (µs)	Qrr (µC)	Irrm (A)	S
Fairchild	0,564	0,022	0,586	0,126	-2,681	0,039
NTE	0,391	0,063	0,454	0,812	-2,801	0,161
Semikron	0,560	0,317	0,877	1,923	-2,999	0,567
Vishay	0,815	0,133	0,948	1,946	-3,041	0,163

Tabela 3 - Díodos de recuperação normal à temperatura criogénica

Em relação às curvas estáticas dos díodos de recuperação normal, pode-se observar que à temperatura criogénica a tensão de condução do díodo aumenta, ou seja, quando no díodo flui uma dada corrente a tensão aos terminais do díodo é superior caso este se encontre à temperatura criogénica. Este resultado coincide com os estudos teóricos realizados no Capítulo 3.

Pode-se observar também que os díodos do fabricante Semikron e NTE, apresentam umas curvas estáticas com declive maior do que quando comparados com os outros fabricantes (Fairchild, Vishay). Este resultado pode advir do facto dos díodos do fabricante NTE e Semikron serem cilíndricos o que dificulta a dissipação de calor, ao contrário dos díodos da Fairchild e Vishay, que dada a sua topologia permitem a colocação de um dissipador de calor o que aumenta consideravelmente a dissipação de calor.

Relativamente aos estudos dinâmicos e após a comparação dos tempos de recuperação entre a temperatura ambiente e a temperatura criogénica, pode-se observar em todos os díodos ensaiados o tempo de recuperação (t_{rr}), é superior à temperatura ambiente, pode-se portanto concluir que a criogenia faz com que o tempo de recuperação diminua, ou seja, o tempo de corte

do diodo é inferior quando o diodo se encontra à temperatura criogénica. Para os diodos Fairchild, NTE, Semikron e Vishay obtiveram-se diminuições dos tempos de comutação, em termos percentuais, de cerca 46,82%, 88,59%, 68,20% e 91,32% respectivamente.

Pode-se também observar que a criogenia potencia a diminuição do factor S (*snappiness*), nos quatro diodos ensaiados o factor S diminui quando o diodo se encontra na criogenia. Neste caso observou-se para os diodos do fabricante Fairchild, NTE, Semikron e Vishay um decréscimo de cerca de 95,89%, 96,81%, 81,84%, e 99,10% respectivamente. Assim e tendo em conta, que um alto valor de S pode provocar oscilações parasitas e provocar problemas electromagnéticos, é possível concluir a criogenia pode diminuir a ocorrência das oscilações parasitas e dos problemas electromagnéticos que advêm do desligar do diodo.

4.3 Diodos Ultra-rápidos, Hiper-rápidos e Schottky

Relativamente ao segundo grupo de diodos (rápidos e schottky), foram realizados ensaios estáticos à temperatura ambiente e ensaios dinâmicos à temperatura ambiente e à temperatura criogénica. Os modelos dos diodos ensaiados, neste teste foram os seguintes:

- NXP – BYC10D-600, Hyperfast, 10 A
- Vishay Formerly I.R – VS-10ETF12PBF, Ultrafast 10 A
- Vishay Formerly I.R – VS-10TQ035PBF, Schottky, 10 A

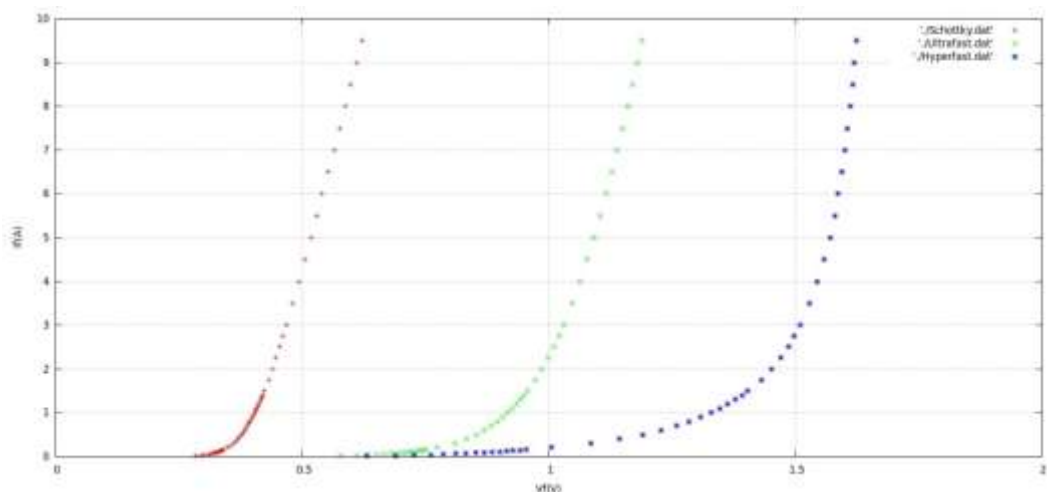


Figura 4.3.1 - Curvas estáticas dos diodos Schottky, Ultra-rápido e Hiper-rápidos à temperatura ambiente

(a) NXP Hiper-rápido

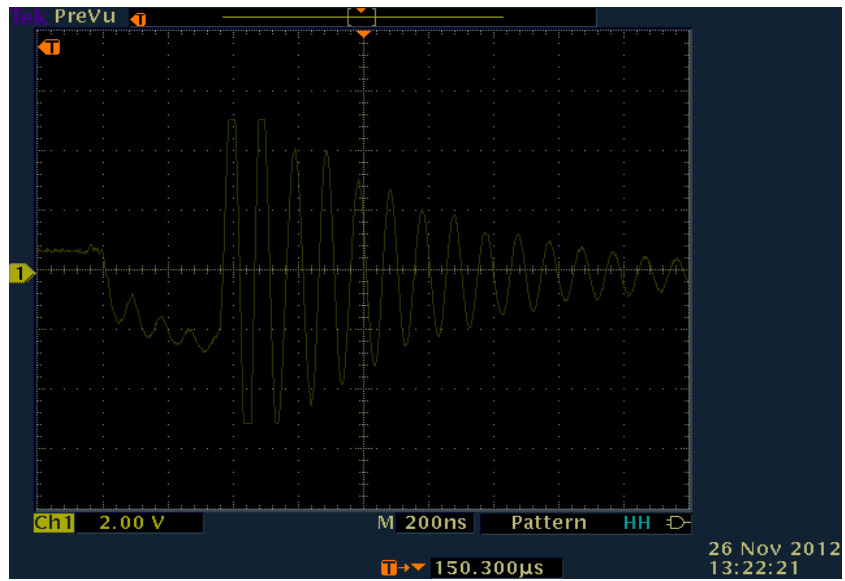


Figura 4.3.2 - Curva dinâmica do diodo Hiper-rápido NXP à temperatura ambiente

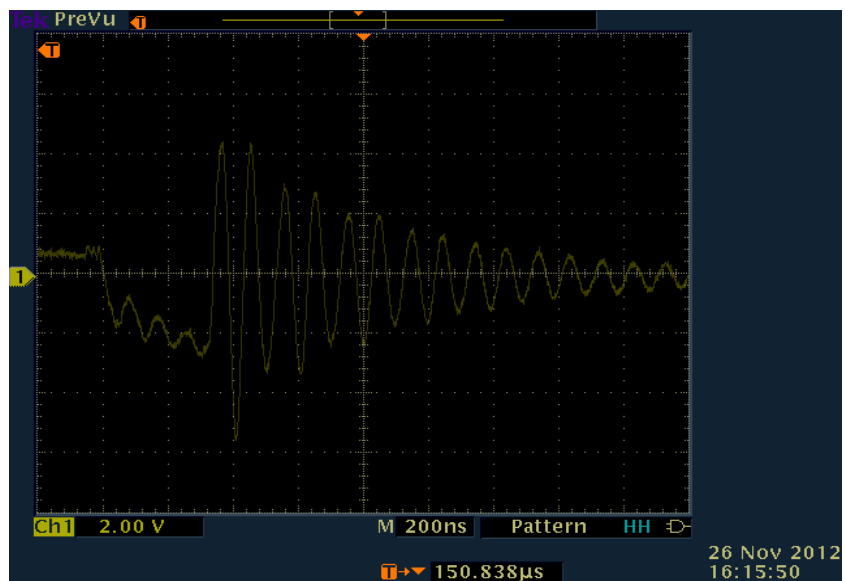


Figura 4.3.3 - Curva dinâmica do diodo Hiper-rápido NXP à temperatura criogénica

(b) Vishay Ultra-rápido

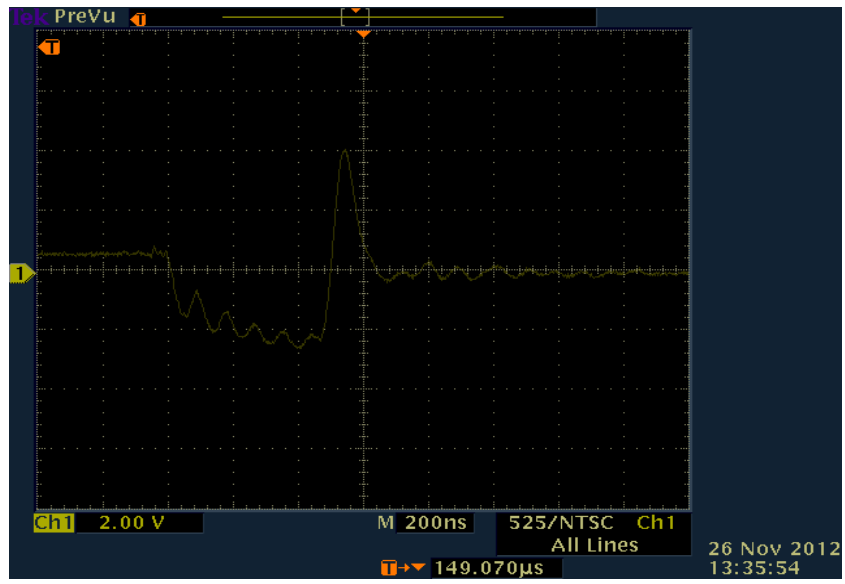


Figura 4.3.4 - Curva dinâmica do diodo Ultra-rápido Vishay à temperatura ambiente

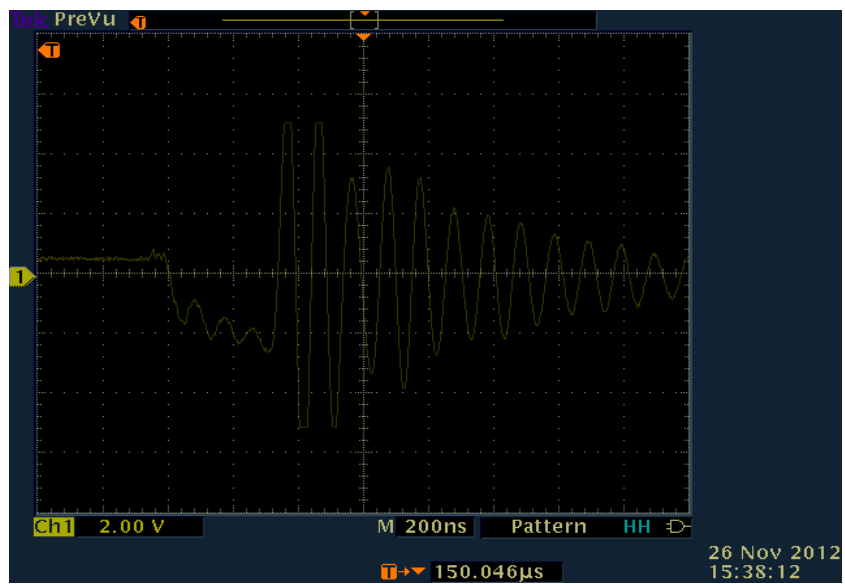


Figura 4.3.5 - Curva dinâmica do diodo Ultra-rápido Vishay à temperatura criogénica

(c) Vishay Schottky

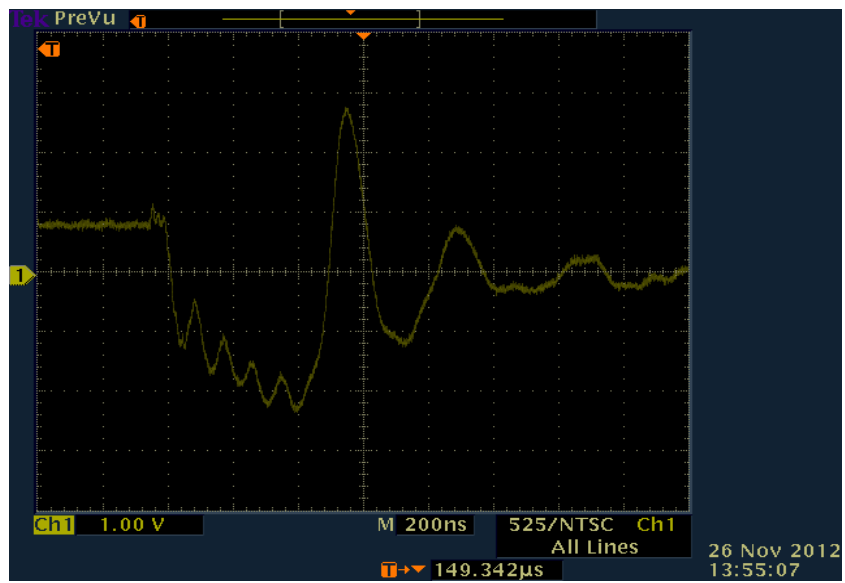


Figura 4.3.6 - Curva dinâmica do díodo Schottky Vishay à temperatura ambiente

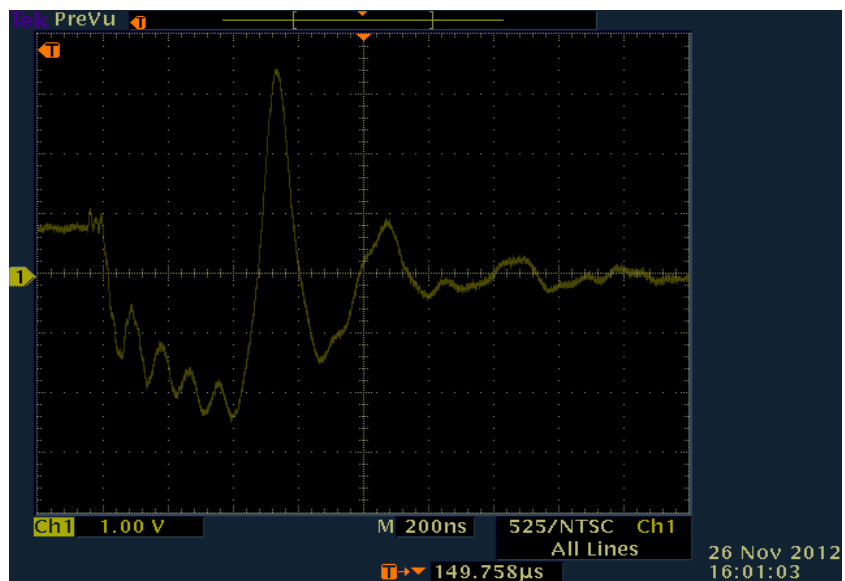


Figura 4.3.7 - Curva dinâmica do díodo Schottky Vishay à temperatura criogénica

Díodo	t4 (µs)	t5 (µs)	trr (µs)	Qrr (µC)	Irrm (A)	S
Vishay Ultra-rápido Tamb	0,386	0,100	0,486	0,912	-2,520	0,259
Vishay Ultra-rápido Tcrio	0,300	0,030	0,330	0,572	-2,540	0,100

Tabela 4 - Díodo do fabricante Vishay

Díodo	t4 (µs)	t5 (µs)	trr (µs)	Qrr (µC)	Irrm (A)	S
NXP Hiper-rápido Tamb	0,304	0,054	0,358	0,663	-2,660	0,178
NXP Hiper-rápido Tcrio	0,299	0,033	0,332	0,628	-2,716	0,110

Tabela 5 - Díodo do fabricante NXP

Díodo	t4 (µs)	t5 (µs)	trr (µs)	Qrr (µC)	Irrm (A)	S
Vishay Schottky-Tamb	0,381	0,098	0,479	0,740	-2,303	0,256
Vishay Schottky-Tcrio	0,377	0,078	0,455	0,727	-2,433	0,206

Tabela 6 - Díodo Schottky do fabricante Vishay

Os resultados obtidos com os ensaios dinâmicos realizados aos díodos rápidos, ultra-rápidos e schottky demonstram, que os tempos de recuperação (t_{rr}), diminuiram quando o díodo se encontrava em criogenia. Em termos percentuais os díodos ultra-rápidos, hiper-rápido e o schottky, diminuiram o seu tempo de comutação em cerca de 32,09%, 7,26% e 5,01% respectivamente. Estes resultados, assemelham-se aos resultados obtidos nos díodos de recuperação normal. De notar que também, tal como no caso dos díodos de recuperação normal o valor de S diminui quando os díodos se encontram em criogenia. Neste caso a diminuição dos valores de S para os díodos, ultra-rápido, hiper-rápido e schottky foram de 61,39%, 38,20% e 19,53% respectivamente.

Relativamente ao díodo schottky verifica-se que dos díodos em teste, foi o díodo que nos ensaios dinâmicos, se mostrou mais imune a alterações quando colocado à temperatura criogénica. Este facto pode ser verificado quando se compara as formas das curvas dinâmicas do díodo schottky à temperatura ambiente e à temperatura criogénica. Dos díodos ensaiados, foi aquele onde menos se fez notar a diminuição do tempo de comutação (cerca de 5,01%). Os díodos de schottky, são aqueles que têm uma menor tensão de condução, isto deve-se ao facto de os díodos de schottky serem formados não por uma junção pn, mas por uma junção metal/semicondutor.

As oscilações que se verificam nos gráficos, dos ensaios dinâmicos efectuados podem figurar uma zona de ressonância. A figura 4.3.8, representa a variação da capacidade do díodo com a temperatura, o referido gráfico foi retirado de um estudo já realizado anteriormente em [6]. Pode-se observar que a capacidade diminui com a temperatura o que relativamente aos ensaios realizados se traduz no facto de que em todos os ensaios a capacidade diminui quando o díodo foi colocado em criogenia.

De notar ainda que em todos os ensaios realizados, não existe nenhum em que a oscilação se tenha verificado à temperatura ambiente e não à temperatura criogénica, ou seja, sempre que se verificaram as oscilações à temperatura ambiente, essas oscilações verificaram-se à temperatura criogénica. Este facto pode explicar então o resultado obtido e de que a criogenia pode potencia a ocorrência de oscilações.

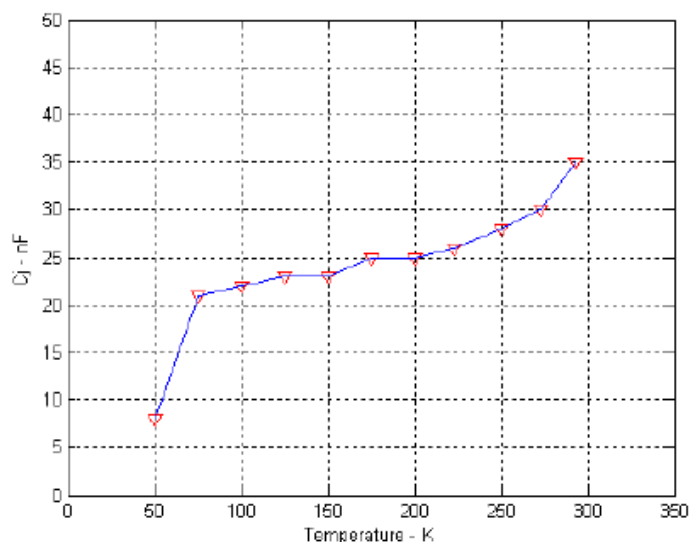


Figura 4.3.8 - Variação da capacidade do díodo com a temperatura, retirado [6]

Foi também realizado, um ensaio à temperatura ambiente com as indutâncias L_2 e L_3 , em serie e em paralelo, para se fosse possível comparar o que aconteceria com alterações dos valores de indutâncias equivalentes do circuito de teste. Esses ensaios encontram-se nas figuras 4.3.9 e 4.3.10. Como se pode observar, quando as indutâncias de encontram em paralelo as oscilações são mais visíveis. Este facto juntamente, com o facto de que a capacidade do díodo diminuir com a diminuição da temperatura podem explicar o aparecimento das oscilações à temperatura criogénica.

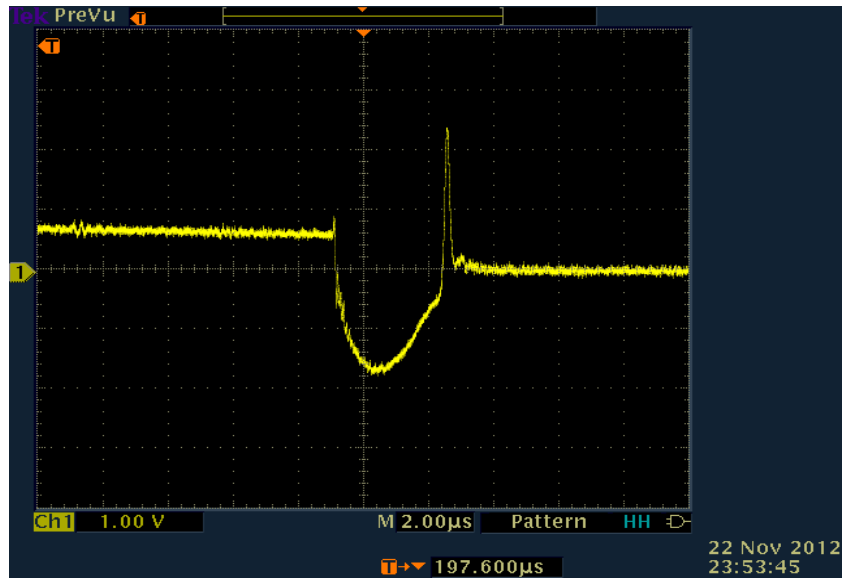


Figura 4.3.9 - Ensaio dinâmico com as indutâncias L2 e L3 em série

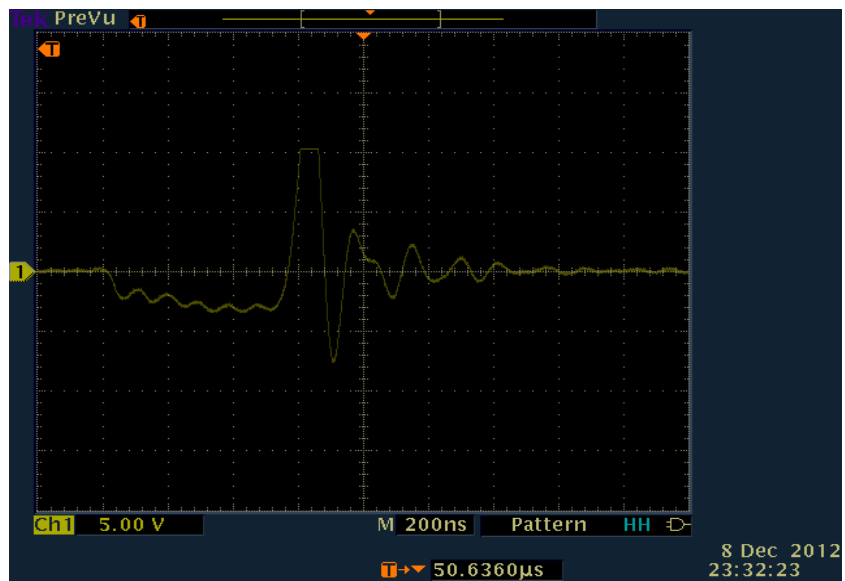


Figura 4.3.10 - Ensaio dinâmico com as indutâncias L2 e L3 em paralelo

4.4 Degradação

Pretendeu-se também saber se havia alguma alteração no comportamento estático do díodo após o díodo ir à criogenia, ou seja, saber alterações que a criogenia teria sobre o díodo e determinar, após o díodo ir à criogenia se este ficaria inutilizado. A degradação pode ocorrer devido ao facto de os materiais contraírem a temperaturas baixas, degradando assim a junção pn. Para saber se esse facto teria algum contributo na degradação do díodo, foram realizados ensaios com o díodo dentro da criogenia durante um intervalo de tempo bem definido. Para a realização deste ensaio, o procedimento usado foi o seguinte:

Inicialmente foi realizado o ensaio da curva de característica estática, antes de o díodo ir à criogenia. De seguida, o díodo foi colocado em criogenia sem conduzir 20 minutos. Passados 20 minutos o díodo foi então colocado a conduzir durante 30 minutos com uma corrente de 9 A (90% da sua capacidade máxima). Este processo foi repetido duas vezes. No final dos dois ensaios (díodo sempre em criogenia) o díodo foi então retirado da criogenia, onde de seguida se esperou até que atingisse novamente a temperatura ambiente. Ao atingir a temperatura ambiente, o díodo foi novamente ensaiado, obtendo-se assim a sua característica estática depois de o díodo ir à criogenia. Assim foi possível comparar as curvas estáticas antes e depois de o díodo passar pelo procedimento referido anteriormente.

A curva estática obtida depois de os díodos passarem pelo procedimento descrito encontra-se ilustrado na figura 4.4.1 e 4.4.2, nesses mesmos gráficos está também ilustrado a curva estática antes de os díodos irem à criogenia, para que assim seja possível a comparação antes e depois da criogenia.

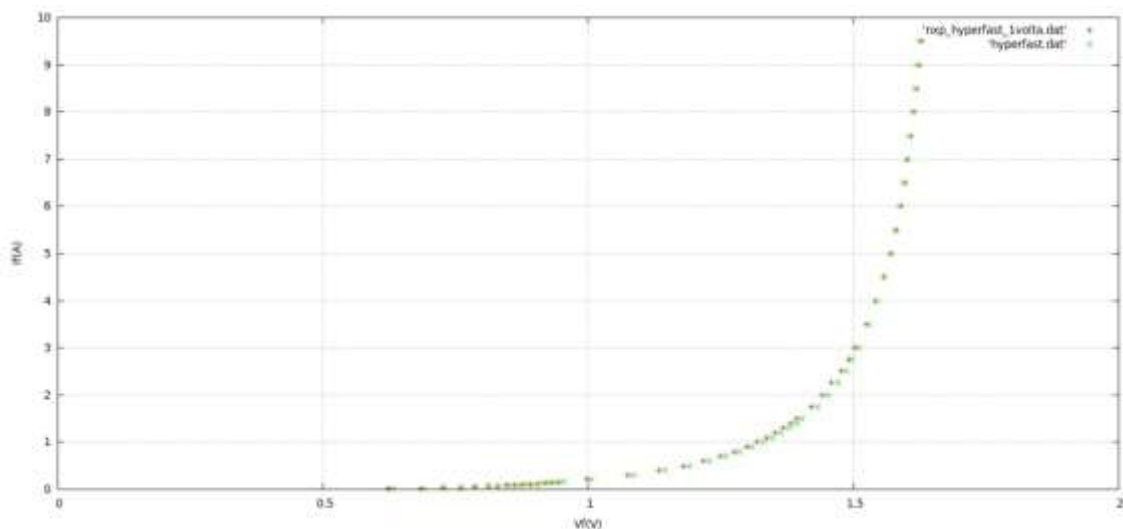


Figura 4.4.1 - Curva estática do díodo NXP antes e depois da criogenia

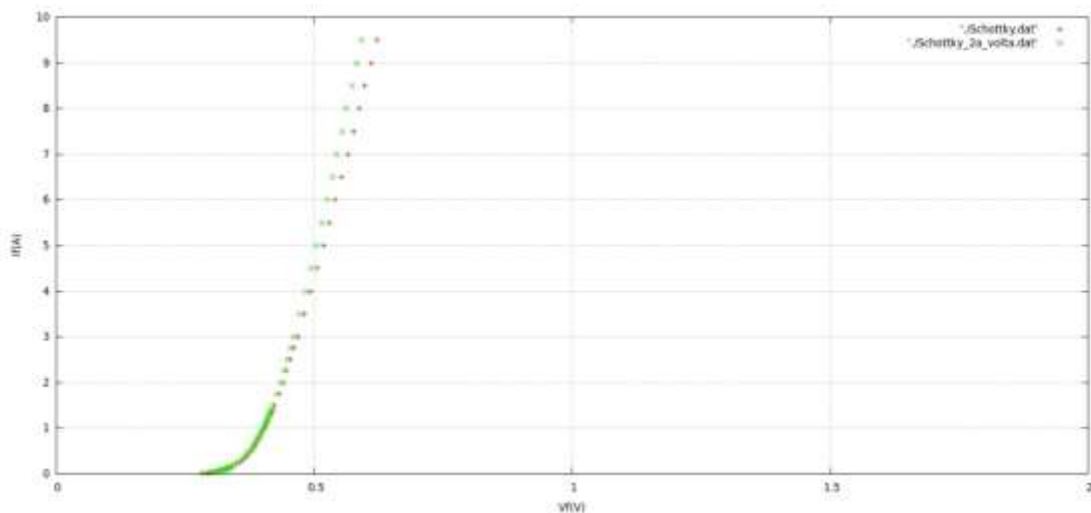


Figura 4.4.2 - Curva estática do diodo Schottky antes e depois da criogenia

Como se pode observar não existem diferenças significativas das curvas estáticas antes e depois de os díodos irem à criogenia, contudo esta conclusão não se poderá alargar à generalidade dos díodos, pois o ensaio foi realizado a apenas dois díodos.

Com este ensaio pretendeu-se, verificar o estado do diodo quando fosse colocado novamente à temperatura ambiente e se o seu comportamento se degradaria, quando fosse à criogenia. De referir também que os díodos utilizados nestes ensaios foram os díodos ultra-rápido do fabricante NXP e o diodo de Schottky.

Testes mais exaustivos, terão de ser realizados para que conclusões mais realísticas sejam obtidas, porém dadas as restrições financeiras não foi possível realizar ensaios em mais díodos.

Estudos mais exaustivos sobre esta temática permitirão no futuro, observar que tipos de alterações existem no comportamento dos componentes de electrónica de potência, quando estes sejam colocados à criogenia num circuito de electrónica de potência juntamente com supercondutores.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

5 Conclusões e trabalho futuro

O objectivo da presente dissertação era saber quais as implicações que a utilização dos díodos à temperatura criogénica teria sobre o seu desempenho.

Nesse sentido e para que a abrangência de conclusões fosse o mais alargado possível, foram ensaiados vários tipos de díodos, de recuperação normal (*standard recovery*), ultra-rápidos (*ultrafast*), hiper-rápidos (*hyperfast*) e de schottky. Foram realizados ensaios estáticos, dinâmicos e ensaios para detectar se o díodo degradaria o seu desempenho, quando voltasse à temperatura ambiente e após ter sido, exposto a temperaturas criogénicas.

Os resultados obtidos nos ensaios estáticos realizados permitem-nos observar que, ao expormos o díodo a temperaturas criogénicas a tensão de condução aumenta, este resultado vai ao encontro dos estudos teóricos e dos ensaios realizados por outros autores. Ainda relativamente aos ensaios estáticos é possível concluir que o díodo de schottky, é aquele que apresenta uma menor tensão de condução.

Relativamente aos ensaios dinâmicos, os resultados obtidos demonstram que em todos os ensaios realizados o tempo de comutação do díodo diminuiu quando o díodo se encontrava em criogenia. Observou-se em média, um decréscimo em termos percentuais, nos díodos de recuperação normal de cerca de 73,73%. Nos díodos ultra-rápidos, hiper-rápidos e de schottky a diminuição dos tempos de comutação foi de 32,09%, 7,26% e 5,01% respectivamente.

Outro parâmetro que diminuiu, quando o díodo se encontrava em criogenia, foi o factor S (*snappiness*). No caso dos díodos de recuperação normal o decréscimo, situou-se em média, em cerca de 93,41%. Já nos díodos ultra-rápidos, hiper-rápidos e de schottky a diminuição do factor S foi de 61,39%, 38,20%, 19,53% respectivamente. Esta diminuição permite concluir que a criogenia potencia a diminuição dos problemas electromagnéticos que advêm do desligar do díodo.

Um outro ponto que se pretendia observar, era se o díodo degradaria o seu comportamento quando voltasse à temperatura ambiente, após ter ido à criogenia. Este ensaio foi apenas realizado em dois díodos e foram apenas realizados ensaios estáticos. Os resultados obtidos mostram que a criogenia não degrada significativamente os díodos. Porém este tipo de ensaios terá de ser aplicado a mais díodos, pois, os ensaios realizados não correspondem a uma amostra suficientemente representativa.

Em termos de trabalhos futuros, muito pode ainda ser desenvolvido neste campo. É importante saber o comportamento dos dispositivos de electrónica de potência a temperaturas criogénicas, quer componentes discretos como sejam MOSFET, IGBT's, quer montagens que

incorporem estes mesmos componentes. Um estudo mais aprofundado sobre estes mesmos dispositivos à temperatura criogénica fará com que melhorias de desempenho no uso da electrónica de potência sejam implementadas. Esse conhecimento é também importante para saber se os sistemas de electrónica de potência, que por exemplo são usados nos supercondutores, podem ou não ser incorporados dentro da criogenia juntamente com os supercondutores.

6 Bibliografia

1. Larbalestier D, Schwall RE, Sokolowski RS, Willis JO, Sokolowski R. WTEC Panel Report on POWER APPLICATIONS OF SUPERCONDUCTIVITY IN JAPAN AND GERMANY. 1997;(September).
2. Singh R, Baliga BJ. *Cryogenic Operation of Silicon Power Devices*. Springer Science+Business Media; 1998.
3. Ward R.R, Dawson W.J., Zhu L., Kirschman R.K., Mueller O., Hennessy M.J., Mueller E., Patterson R.L., Dickman J.E. and Hammoud A. Hammoud, et al. Power Diodes for Cryogenic operation. 2003:1891–1896.
4. Hammoud A., Patterson R.L, Gerber S., Elbuluk M. Electronic Components and Circuits for Extreme Temperature Environments. 2003:44–47.
5. Giese R.F., Rundle M.. Assessment of the impact of HTSCs on superconducting fault-current limiters. 1993.
6. Yang S. Cryogenic characteristics of IGBTs. 2005;(July).
7. Jonh C, Kerr F, Evangelisti F, Klingensmith C. *Introductory Electronic Devices and Circuits*. Prentice-Hall; 1994.
8. Bell DA. *Fundamentals of Electronic Devices*. Prentice-Hall; 1975.
9. Batard, Christophe. Components - Circuits interactions in voltage-source inverters. Characterization, modeling, simulation. 1992.
10. IEEE Standard Test Procedure for Semiconductor Diodes. 48(216):1772–1775.
11. Rahimo M.T, Shamma N.Y.A. TEST -AND CHARACTERISATION OF MODERN FAST RECOVERY DIODES FOR HIGH SPEED SWITCHING APPLICATIONS. 2000;(475):18–19.
12. Alan C. MAST Power Diode and Thyristor Models Including Automatic Parameter Extraction. 1995;(September).
13. Silva M de M. *Introdução aos Circuitos Eléctricos e Electrónicos*. 2ª edição. Lisboa: Fundação Calouste Glubenkian; 2001.
14. Jonh C., Kerr F., Evangelisti F. *Introductory Electronic Devices and Circuits*. Prentice-Hall; 1994