



Desenvolvimento e Implementação de Sistemas de Proteção Aplicados a Micro-Redes de Corrente Contínua

Kiesse Mangaka António

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António João Marques Cardoso

Covilhã, outubro de 2021

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, pelo fôlego de vida e pela força de ter chegado até aqui. Agradeço também a todos os professores que contribuíram para a minha formação, em especial ao Prof. Doutor António João Marques Cardoso, e ao Mestre Fernando Bento, que esteve sempre à disposição e me auxiliou ao longo deste período. Endereço também os meus agradecimentos à Sra. Ana Silva, que sempre foi como uma mãe para mim, desde a minha chegada à Universidade, estando sempre disponível para ajudar de alguma forma. À minha família, de modo geral, pelo apoio prestado. Aos meus amigos, que vivenciaram a minha trajetória e também à Cristiane Mayabanza, pelo apoio e pelas palavras motivadoras.

Resumo

O desenvolvimento exponencial dos dispositivos eletrônicos de potência tem um impacto significativo no desenvolvimento de sistemas de distribuição de energia em corrente contínua (DC), visto que as micro-redes em DC podem levar a uma integração mais eficiente de sistemas de microgeração descentralizados. As micro-redes DC têm atraído atenção significativa, tanto na academia quanto na indústria, pois demonstram superioridade sobre as micro-redes em corrente alternada (AC) no que diz respeito à confiabilidade, à eficiência, à simplicidade de controle e à integração de fontes de energia renováveis e de cargas DC. Apesar de inúmeras vantagens, a implementação de um sistema de proteção apropriado a micro-redes DC continua a representar um desafio significativo. Para além do extraordinariamente rápido aumento das correntes de falha, a ausência de passagem por zero da corrente num sistema DC constitui um importante entrave à adoção de micro-redes em DC. Nesta dissertação são abordados e analisados métodos de proteção do estado da arte, sendo desenvolvido um sistema de proteção híbrido, de arquitetura simples.

Palavras-chave

Micro-rede DC; Proteção DC; Disjuntores Híbridos.

Abstract

The exponential development of power electronic devices has a significant impact on the development of direct current (DC) power distribution systems, as DC microgrids can promote a more efficient integration of distributed microgeneration systems. DC microgrids have attracted significant attention in both academia and industry, as they demonstrate superior performance over AC microgrids with respect to reliability, efficiency, simplicity of control, and integration of renewable energy sources and DC loads. Despite its numerous advantages, it is still challenging to implement a protection system appropriate for DC microgrids. Apart the extraordinarily rapid increase of the fault currents, the absence of zero crossing of the current on a DC system constitute an important obstacle to the adoption of DC microgrids. In this work, different state-of-the-art protection methods are addressed and analysed, and a simple protection system is developed.

Keywords

DC Microgrids; DC Protection; Hybrid Circuit Breakers.

Índice

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrónimos	xv
Introdução	1
1.1. Micro-redes DC.....	2
1.1.1. Fontes de Energia.....	3
1.1.2. Conversores eletrônicos de potência	3
1.1.3. Armazenamento de Energia	3
1.1.4. Cargas	4
1.2. Falhas em micro-redes DC.....	4
1.2.1. Tipos de falhas	4
1.3. Desafios em sistemas de proteção DC.....	5
1.3.1. Ausência da passagem natural da corrente por zero	5
1.3.2. Sistemas de aterramento.....	6
Sistemas de proteção em DC	9
2.1. Dispositivos de proteção	9
2.1.1. Fusível.....	10
2.1.2. Disjuntor DC mecânico (MCB)	11
2.1.3. Disjuntor de estado sólido (SSCB)	11
2.1.4. Disjuntores híbridos (HCB)	12
2.1.5. Análise comparativa de tecnologias	14
2.2. Arquiteturas de disjuntores híbridos.....	14
Resultado de simulação	17
Resultados experimentais.....	23
Conclusão.....	37
Referências.....	39
Apêndice	41

Lista de Figuras

Figura 1.1: Estrutura genérica de uma micro-rede DC.....	2
Figura 1.2: Falhas pólo-a-pólo.....	4
Figura 1.3: Falha pólo-a-terra.....	5
Figura 1.4: Sistemas de aterramento: (a) TT; (b) TN-S; (c) TN-C; (d) TN-C-S; (e) IT. ...	7
Figura 2.1: Fusível DC e respetivos componentes principais: 1-elemento fusível; 2-areia de quartzo; 3-invólucro cerâmico; 4-tampas.....	10
Figura 2.2: Elemento fusível com: (a) aberturas circulares; (b) aberturas rômbricas.	10
Figura 2.3: Disjuntor DC mecânico.	11
Figura 2.4: Disjuntor de estado sólido.	12
Figura 2.5: Esquema de um disjuntor híbrido.	13
Figura 2.6: Disjuntor híbrido com aplicação de fototransistor.	15
Figura 2.7: Disjuntor híbrido baseado na tecnologia FET.....	15
Figura 2.8: Disjuntor híbrido de múltiplos estágios baseado na tecnologia IGBT.	16
Figura 3.1: (a) Circuito implementado em ambiente de simulação; (b) Sistema de proteção proposto.....	17
Figura 3.2: Evolução das principais variáveis do circuito que integra o sistema de proteção, com o curto-circuito a ocorrer no instante ($t = 1$ s): (a) I_{in} , (b) I_{in} zoom; (c) V_{in} ; (d) I_{mainSW} ; (e) V_{mainSW} ; (f) I_{IGBT2} ; (g) V_{IGBT2} ; (h) I_{mov} ; (i) V_{mov} ; (j) I_{led} ; (k) I_{led} zoom; (l) V_{led}	20
Figura 3.3: Evolução das principais variáveis do circuito que não integra o sistema de proteção, com o curto-circuito a ocorrer no instante ($t = 1$ s): (a) I_{in} ; (b) V_{in} ; (c) I_{led} ; (d) I_{led} zoom; (e) V_{led} ; (f) V_{Prot}	21
Figura 4.1: Evolução das principais variáveis do circuito que integra o sistema de proteção baseada numa resistência de proteção de 200Ω e num atraso de $150 \mu s$: (a) I_{led} ; (b) I_{led} zoom; (c) V_{led} ; (d) v_{led} zoom; (e) I_{mainSW} ; (f) I_{mainSW} zoom; (g) V_{mainSW} ; (h) V_{mainSW} zoom; (i) I_{mov} ; (j) I_{mov} zoom; (k) V_{mov} ; (l) V_{mov} zoom; (m) I_{R200} ; (n) I_{R200} zoom; (o) V_{R200} ; (p) V_{R200} zoom; (q) I_{SW2} ; (r) I_{SW2} zoom; (s) ICC	27
Figura 4.2: Evolução das principais variáveis do circuito que integra o sistema de proteção baseada numa resistência de proteção de 200Ω e num atraso de $200 \mu s$: (a) I_{led} ; (b) I_{led} zoom; (c) V_{led} ; (d) V_{led} zoom; (e) I_{mainSW} ; (f) V_{mainSW} ; (g) V_{mainSW} zoom; (h) I_{mov} ; (i) V_{mov} ; (j) V_{mov} zoom; (k) I_{R200} ; (l) I_{R200} zoom; (m) V_{R200} ; (n) V_{R200} zoom; (o) I_{SW2} ; (p) I_{SW2} zoom; (q) ICC	30

Figura 4.3: Evolução das principais variáveis do circuito que integra o sistema de proteção baseada numa resistência de proteção de $300\ \Omega$ e num atraso de $150\ \mu\text{s}$: (a) I_{led} ; (b) I_{led} zoom; (c) V_{led} ; (d) V_{led} zoom; (e) I_{mainSW} ; (f) V_{mainSW} ; (g) I_{mov} ; (h) V_{mov} ; (i) I_{R600} ; (j) V_{R600} ; (k) I_{SW2} ; (l) ICC.32

Figura 4.4: Evolução das principais variáveis do circuito que integra o sistema de proteção baseada numa resistência de proteção de $600\ \Omega$ e num atraso de $150\ \mu\text{s}$: (a) I_{led} ; (b) I_{led} zoom; (c) V_{led} ; (d) V_{led} zoom; (e) I_{mainSW} ; (f) V_{mainSW} ; (g) I_{mov} ; (h) V_{mov} ; (i) I_{R600} ; (j) V_{R600} ; (k) I_{SW2} ; (l) ICC.35

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Comparação dos diferentes sistemas de aterramento [12].....	8
Tabela 2.1: Alguns dispositivos de proteção disponíveis comercialmente.	9
Tabela 2.2: Comparação das diferentes tecnologias de disjuntores.....	14
Tabela A.1: Parâmetros da proteção.	41
Tabela A.2: Parâmetros do IGBT principal.	41
Tabela A.3: Parâmetros do IGBT 2.	41

Lista de Acrónimos

AC	Corrente Alternada
BT	Baixa Tensão
CB	Disjuntor
DC	Corrente Contínua
FET	Transístor de Efeito de Campo
GTC	Tirístor de Entrada Comutada
HCB	Disjuntor Híbrido
I	Isolado
IGBT	Transístor Bipolar de Porta Isolada
IGCT	Tirístor Comutável por Porta Integrada
JFET	Transístor de Efeito de Campo de Junção
MCCB	Disjuntor em Caixa Moldada
MOSFET	Transístor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor
MOV	Varístor de Óxido Metálico
N	Neutro
PE	Terra Protetora
SSCB	Disjuntor de Estado Sólido
T	Terra

Capítulo 1

Introdução

Uma micro-rede em corrente contínua (DC) de baixa tensão (BT) é mais adequada para aplicações onde a maioria das cargas a alimentar consiste em equipamentos eletrônicos sensíveis [1]. A vantagem mais óbvia de uma micro-rede DC em comparação com as tradicionais redes AC reside na redução do número de conversores eletrônicos de potência necessários, bem como na facilidade com que várias fontes podem ser ligadas a um único barramento, permitindo assim uma abordagem descentralizada e mais robusta para a gestão do fluxo de energia [2]. A adoção de micro-redes DC pode também ser uma opção a considerar para proteger cargas sensíveis contra falhas temporárias de energia e, em alguns casos, distúrbios, como quedas de tensão no barramento DC. Por outro lado, o crescente interesse em micro-redes DC deve-se também ao relevo da produção descentralizada de energia, consubstanciada através de sistemas de microgeração que exploram fontes de energia renováveis. Esta produção de energia é, maioritariamente, feita em DC [1].

A ideia de que as micro-redes DC de BT podem tornar-se comuns em locais como residências, hospitais, empresas e fábricas começou com o reconhecimento da crescente adoção de cargas alimentadas por DC, sobretudo a partir do início dos anos 90. Por outro lado, esse interesse foi potenciado pela necessidade de encontrar soluções de fornecimento ininterrupto de energia a cargas sensíveis, através de bancos de baterias ou similares [2].

Os avanços tecnológicos ocorrem numa grande variedade de campos: na indústria, onde muitos processos de fabrico se tornam autónomos; no transporte, com o aumento significativo de veículos elétricos; em telecomunicações, com a propagação de fibra ótica e comunicações sem fios super-rápidos, entre muitas outras. A maior parte desta evolução foi alcançada devido aos avanços no campo de eletrónica de potência. Devido a esses avanços no campo de eletrónica de potência (semicondutores), a adoção de conversores DC/DC está a tornar-se cada vez mais frequente, sendo também integrados em alguns equipamentos de média/alta potência [3].

Embora apresentem vantagens significativas, as micro-redes DC têm também associados muitos desafios a nível de proteção e distribuição, destacando-se, por exemplo, a deteção e localização precisa de falhas, a seleção do esquema de aterramento adequado, a rapidez em isolar as áreas com falha ou o dimensionamento adequado dos disjuntores DC [4].

Tendo em vista o desenvolvimento de uma solução adequada à proteção de micro-redes DC, este trabalho propõe um novo dispositivo de proteção híbrido.

Assim sendo, a continuação deste capítulo providencia uma contextualização ao tema deste trabalho, ao descrever os principais componentes de uma micro-rede DC de BT e respetiva constituição, os tipos de falhas mais recorrentes e as respetivas causas, os desafios que podem vir a surgir em micro-redes DC, assim como as potenciais estratégias para resolver os mesmos, enfatizando a ausência da passagem natural da corrente por zero e as arquiteturas de sistemas de aterramento.

O segundo capítulo aborda os sistemas de proteção em DC, critérios a cumprir na projeção de um sistema de proteção, assim como os dispositivos de proteção existentes para micro-redes DC, dando assim maior ênfase aos disjuntores híbridos, à sua constituição, às suas características, desafios e topologias.

O dispositivo de proteção desenvolvido neste trabalho, bem como os resultados de simulação são apresentados no capítulo três. Por fim, o quarto capítulo retrata os resultados obtidos através de ensaios experimentais.

1.1. Micro-redes DC

Os principais componentes constituintes de uma micro-rede DC são: fontes, conversores, sistemas de armazenamento de energia e cargas, tal como ilustrado na Figura 1.1. No esquema da micro-rede DC apresentado na Figura 1.1, C1 representa um conversor AC/DC, enquanto C2 e C3 representam conversores DC/DC.

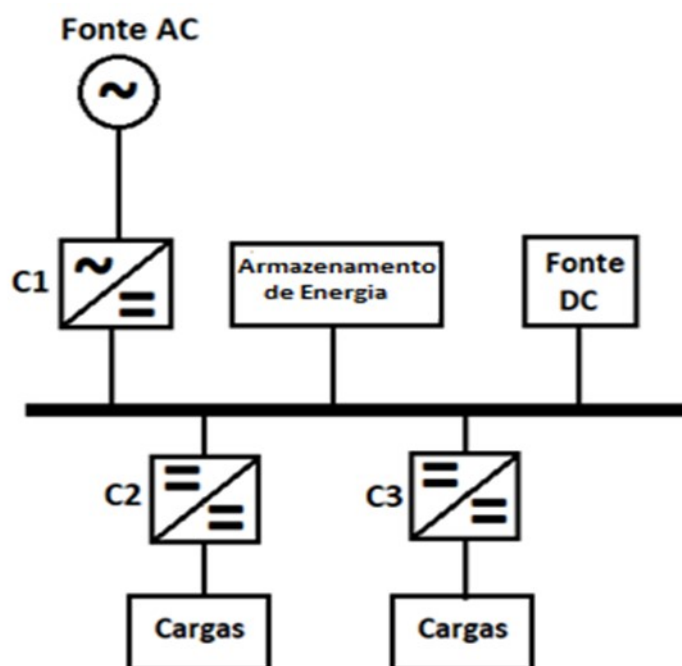


Figura 1.1: Estrutura genérica de uma micro-rede DC.

1.1.1. Fontes de Energia

Numa micro-rede DC de BT, as fontes de energia podem ser de vários tipos, sendo as tecnologias fotovoltaicas e de células de combustível algumas das mais recorrentes. Estas tecnologias têm, à saída, tensões em DC, sendo por isso adequadas para ligação a um sistema de energia DC por meio de conversores DC/DC.

As microturbinas e os geradores de turbinas eólicas são também tecnologias de microgeração recorrentes. Por produzirem tensão AC de frequência variável, o recurso a um conversor AC/DC para ligação à rede é inevitável, independentemente do tipo de micro-rede – AC ou DC [1].

1.1.2. Conversores eletrónicos de potência

Nas micro-redes DC de BT, é comum o recurso a conversores AC/DC e DC/DC, tendo em vista a realização da interface entre os diversos elementos constituintes da micro-rede e o barramento DC. Os conversores AC/DC podem ainda ser considerados para interligar uma rede AC e a micro-rede DC. Estes conversores assumem diferentes topologias e, conseqüentemente, diferentes possibilidades de controlar o fluxo de potência. Devem, por isso, ter isolamento galvânico e ser capazes de lidar com perturbações da rede, como quedas de tensão [1], [5].

Diferentes conversores DC/DC são usados para interligar diferentes fontes de energia e cargas na micro-rede DC. Estes convertem tensões e correntes DC em outros níveis de tensão e corrente DC (podendo aumentar ou reduzir estes níveis de tensão e corrente DC). Os conversores DC/DC podem ser construídos de forma mais simples em comparação com os conversores AC/DC, o que leva a ganhos importantes em termos de custo e rendimento [1].

1.1.3. Armazenamento de Energia

A disponibilidade intermitente de algumas fontes de energia renovável, como a energia eólica e a energia fotovoltaica, exigem a hibridização com outras fontes de energia ou, em alternativa, o recurso a sistemas de armazenamento de energia. Numa micro-rede DC, a capacidade de armazenamento de energia pode ser usada para melhorar a qualidade de energia, nivelar a carga ou assegurar uma fonte de alimentação de emergência. As tecnologias de baterias e supercondensadores são as mais recorrentes em sistemas de armazenamento de energia. Em determinadas circunstâncias, estes sistemas podem inclusivamente ser ligados diretamente ao barramento DC [1], [6].

1.1.4. Cargas

As micro-redes DC de BT assumem particular interesse para alimentar cargas sensíveis a variações de tensão e que necessitam de uma fonte de alimentação de alta disponibilidade. Estas cargas são: sistemas de iluminação, sistemas de dados e comunicação, sistemas de controlo, sistemas de segurança, equipamentos de aquecimento, ventiladores e sistemas de ar condicionado. Estas cargas têm como denominador comum o fato de serem compatíveis com DC [1].

1.2. Falhas em micro-redes DC

No domínio dos sistemas de energia elétrica, define-se como falha todo e qualquer fluxo anormal de corrente elétrica. As falhas num sistema de energia causam sobrecarga de corrente, subtensão no barramento principal, etc. De modo geral, as falhas em linhas de transmissão DC têm origem em stresses mecânicos ou fontes de ruído [7]. É possível verificar a ocorrência de diferentes tipos de falhas numa micro-rede DC.

1.2.1. Tipos de falhas

Existem dois tipos de falha passíveis de ocorrer em micro-redes DC. Estes são descritos seguidamente.

Falhas pólo-a-pólo: ocorre quando existe um curto-circuito entre o pólo positivo e o pólo negativo do sistema, resultante de um deficiente isolamento entre os dois condutores, como ilustra a Figura 1.2. Este tipo de falha é, geralmente, de baixa impedância. Desta forma, a amplitude da corrente de falha é tipicamente elevada. Estas falhas podem ocorrer quer no barramento DC, quer nas cargas da micro-rede [1], [7], [8].

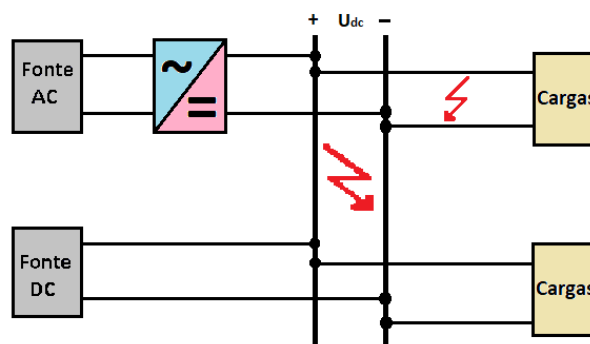


Figura 1.2: Falhas pólo-a-pólo.

Falhas pólo-a-terra: ocorre quando existe um curto-circuito entre um dos pólos e a terra, resultante de uma falha de isolamento entre um condutor DC e a terra, como ilustra a Figura 1.3. Este tipo de falha pode ser de baixa ou alta impedância, dependendo da configuração e do tipo de aterramento. Tal como acontece com as falhas pólo-a-pólo, as falhas pólo-a-terra podem ocorrer no barramento DC ou na carga [1], [7], [8].

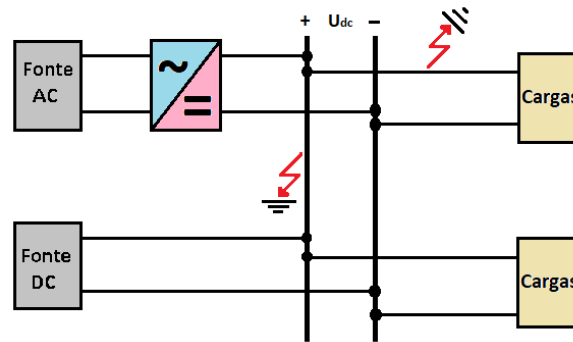


Figura 1.3: Falha pólo-a-terra.

1.3. Desafios em sistemas de proteção DC

Os desafios inerentes aos sistemas de proteção em DC estão focalizados em aspetos de natureza variada, sendo a predominância de conversores eletrônicos de potência nas micro-redes DC, a ausência da passagem natural da corrente por zero, a arquitetura dos sistemas de aterramento, o tempo de extinção do arco elétrico e das falhas e a manutenção da estabilidade do sistema alguns dos elementos mais preponderantes e que levantam preocupações.

1.3.1. Ausência da passagem natural da corrente por zero

Contrariamente aos disjuntores de corrente alternada (AC), em que o seu mecanismo de funcionamento depende exclusivamente da passagem natural da corrente por zero, permitindo assim a extinção natural do arco elétrico momentos após o disparo do disjuntor, a interrupção das correntes num sistema DC constitui um grande desafio, precisamente devido à ausência de passagem da corrente por zero. Isto resulta em problemas de segurança para utilizadores e a própria micro-rede DC, bem como a erosão dos contatos dos disjuntores, diminuindo assim o seu tempo de vida útil [7].

Para tentar ultrapassar os desafios citados no parágrafo anterior, os disjuntores puramente eletromecânicos a aplicar em redes DC devem ser maiores, mais pesados e dispendiosos, para que possam extinguir de forma efetiva a corrente. Em consequência

disso, o custo e a carga física do sistema de proteção aumentam. A rede DC com interfaces de conversão eletrônica de potência permite que as falhas elétricas se desenvolvam muito rapidamente, criando assim correntes de falha extremamente elevadas e condições de tensão transitória grave. A dimensão em que estas condições de falha se desenvolvem depende, em parte, do tipo de conversores eletrônicos de potência integrados na micro-rede DC [7], [9].

1.3.2. Sistemas de aterramento

O aterramento de um sistema é um fator importante para um funcionamento estável e seguro do mesmo. É também um tópico complexo, pois envolve várias considerações de dimensionamento. Ao projetar um esquema de aterramento, o objetivo principal passa por assegurar a segurança de utilizadores e equipamentos. Fatores como a amplitude da corrente de falha, a capacidade de deteção de falha, a suscetibilidade a falhas e a tensão de pico devem ser considerados [10]. A aplicação de esquemas de aterramento tem como vantagens aspetos como a facilitação dos procedimentos de deteção de falha, a criação de condições de funcionamento previsíveis e a redução do stress de tensão aplicado aos componentes do sistema [11].

De acordo com a norma IEC-60364, existem três tipos de sistemas de aterramento, identificados através de um código de duas letras: TT, TN e IT. A primeira letra representa o tipo de ligação entre o barramento da fonte e o aterramento, podendo esta ligação ser do tipo T (ligação direta) ou I (sem ponto de ligação). A segunda letra indica o tipo de ligação entre a terra ou a rede e o dispositivo elétrico que é alimentado, podendo esta ligação ser do tipo T (a ligação à terra é fornecida por uma ligação local direta à terra) ou N (a ligação à terra é fornecida pela rede, na forma de condutor de terra protetora ou combinado com o condutor neutro) [7].

O sistema de aterramento TT é simples na sua forma de implementação. O condutor neutro do conversor tem uma ligação direta à terra protetora (PE). De forma idêntica, todas as outras partes condutoras da instalação expostas ao contato elétrico estão ligadas à terra, sendo, no entanto, esta terra eletricamente independente da terra da fonte, como mostra a Figura 1.4 (a). De entre as vantagens desta topologia, destaca-se o fato de a falha não ser transferida para outras partes da micro-rede. Por outro lado, a circulação de corrente e a possibilidade de imposição de tensão elevada são os principais inconvenientes desta topologia [11]–[13].

O sistema de aterramento TN é o mais utilizado em sistemas DC. Este sistema garante um aterramento distribuído e uma deteção de falhas mais simples e direta. Nesta configuração, o ponto médio do conversor é ligado diretamente à terra e todas as outras partes condutoras expostas da instalação estão ligadas ao neutro aterrado do conversor.

Essa ligação pode ser efetuada através de um condutor PE, condutor neutro ou condutor PE e neutro combinado. Como principal desvantagem deste esquema, destaca-se o fato de a tensão de contato poder facilmente exceder o seu limite, afetando assim a segurança pessoal [7], [11]–[13].

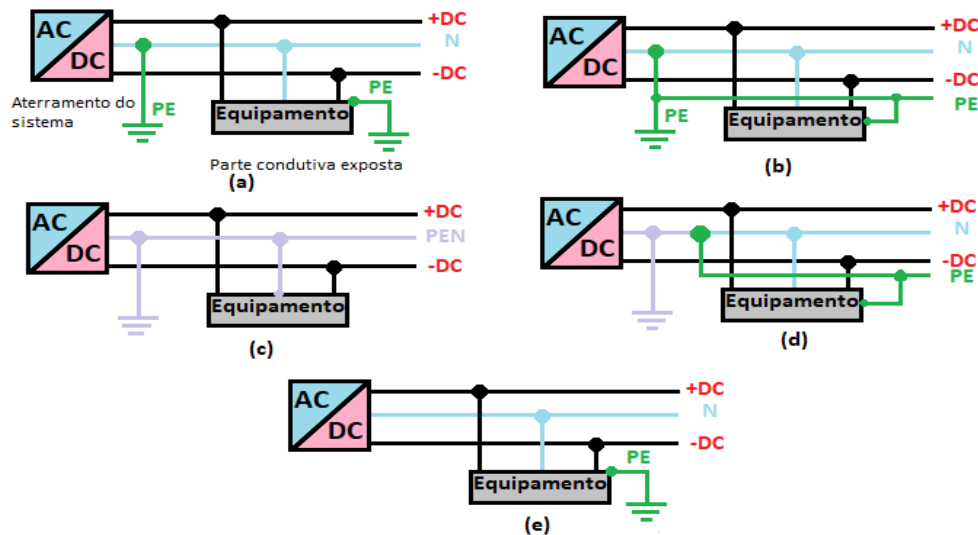


Figura 1.4: Sistemas de aterramento: (a) TT; (b) TN-S; (c) TN-C; (d) TN-C-S; (e) IT.

O sistema de aterramento TN tem três subclasses: TN-S, TN-C e TN-C-S. No sistema TN-S, o condutor neutro é separado do condutor PE. Todas as partes condutoras expostas estão ligadas a um condutor PE, através do terminal de terra, como se pode ver na Figura 1.4 (b). Este sistema garante mais segurança do que o sistema TN-C, uma vez que, caso o condutor seja desligado, as características de proteção permanecem intactas. Para além disso, este esquema assegura uma maior compatibilidade eletromagnética quando comparado com os outros esquemas de aterramento. O sistema TN-C oferece uma solução mais económica, visto que usa um único condutor, combinando assim neutro e PE, como mostra a Figura 1.4 (c). O esquema TN-C-S resulta da combinação de TN-S e TN-C, obtendo assim o máximo benefício dos dois sistemas, como mostra Figura 1.4 (d). No entanto, caso o condutor neutro seja desligado e venha a ocorrer uma falha no sistema, a identificação da falha torna-se difícil. Uma solução para este problema consiste em ligar o condutor PE e o condutor neutro ao conversor [12], [13].

O sistema de aterramento IT tem a particularidade de não possuir nenhuma ligação entre o neutro e a terra, como se pode observar na Figura 1.4 (e). Este sistema permite continuar a fornecer energia às cargas, mesmo após a ocorrência das falhas. Ao mesmo tempo, permite limitar fortemente a corrente de falha linha-terra. Em consequência disso, a deteção de falhas é dificultada e os caminhos de corrente de falhas tornam-se imprevisíveis [12], [13], o que configura importantes desvantagens deste esquema. A Tabela 1.1 apresenta

uma comparação entre os tipos de aterramento, tendo em conta a sua capacidade de proteção.

Tabela 1.1: Comparação dos diferentes sistemas de aterramento [12].

	TT	TN-S	TN-C	IT
Proteção de pessoas	<ul style="list-style-type: none"> • Boa 	<ul style="list-style-type: none"> • Boa 	<ul style="list-style-type: none"> • Boa 	<ul style="list-style-type: none"> • Boa
Proteção dos elementos do sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Boa • Corrente de falha inferior a poucas dezenas de A 	<ul style="list-style-type: none"> • Boa • Corrente de falha em torno de 1 kA 	<ul style="list-style-type: none"> • Fraco • Corrente de falha em torno de 1 kA 	<ul style="list-style-type: none"> • Muito boa • Corrente de falha inferior a poucas dezenas de mA, mas elevada para segunda falha

Capítulo 2

Sistemas de proteção em DC

Devido aos avanços tecnológicos em eletrônica de potência, o uso eficiente de sistemas DC é cada vez mais facilitado. Apesar disso, os sistemas AC ainda são preferidos, devido à falta de meios e tecnologias de proteção de micro-redes DC economicamente viáveis [2].

Para projetar todo e qualquer sistema de proteção compatível com os requisitos de uma micro-rede DC, existem alguns critérios que devem ser cumpridos:

- **Confiabilidade:** certeza da resposta de maneira consistente, caso ocorram falhas no sistema;
- **Rapidez:** assegurar que a falha é detetada e removida do sistema, o funcionamento normal do sistema é rapidamente repostado, evitando assim danos maiores no sistema;
- **Desempenho:** garantir que os elementos do sistema sofram o menor dano possível em caso de falhas no sistema;
- **Economia:** assegurar o menor custo de instalação, garantindo proteção máxima a um custo baixo, de modo geral ou em oposição, visto que um sistema com bom desempenho custa mais;
- **Simplicidade:** minimizar a quantidade de elementos e a complexidade do sistema, ao mesmo tempo que se promovem zonas de proteção e a descentralização de controle, de modo a facilitar a implementação e controle.

2.1. Dispositivos de proteção

Existem alguns dispositivos de proteção indicados para micro-redes de BT que se encontram disponíveis comercialmente, tais como fusíveis, disjuntores em caixa moldada (MCCB), disjuntores de potência e disjuntores (CB). A Tabela 2.1 mostra alguns modelos de dispositivos de proteção para sistemas de BT disponíveis comercialmente [1].

Tabela 2.1: Alguns dispositivos de proteção disponíveis comercialmente.

Tipo	Fabricante	U_n [V]	I_n [A]	I_{sc} [kA]
Fusível	Ferraz Shawmut	500-1000	1-600	100
Fusível	IFÖ ELECTRIC	250-550	2-630	120
MCCB	ABB	250-750	25-800	16-70
MCCB	Eaton	250-750	15-630	10-42
MCCB	Siemens	250-600	26-630	20-32
CB	Sécheron	900-3600	1000-6000	80

2.1.1. Fusível

O fusível é um dos dispositivos de proteção mais conhecidos e comuns no que se refere a falhas como sobrecargas ou curto-circuitos. Normalmente, é aplicado em série com o ramo ou elemento a proteger. Tem a função de interromper a passagem da corrente caso essa exceda o valor predefinido. É rápido na sua atuação e tem a capacidade de interromper altas correntes de curto-circuito, podendo ser utilizado em instalações elétricas AC ou DC. O fusível DC tem como principais componentes: o elemento fusível, areia de quartzo, invólucro de cerâmica e tampas, conforme apresentado na Figura 2.1. O elemento fusível pode ser de zinco ou de prata; os terminais são construídos a partir de cobre; e as tampas podem ser de aço ou de cobre. A areia de quartzo tem como função extinguir o arco elétrico [14], [15].

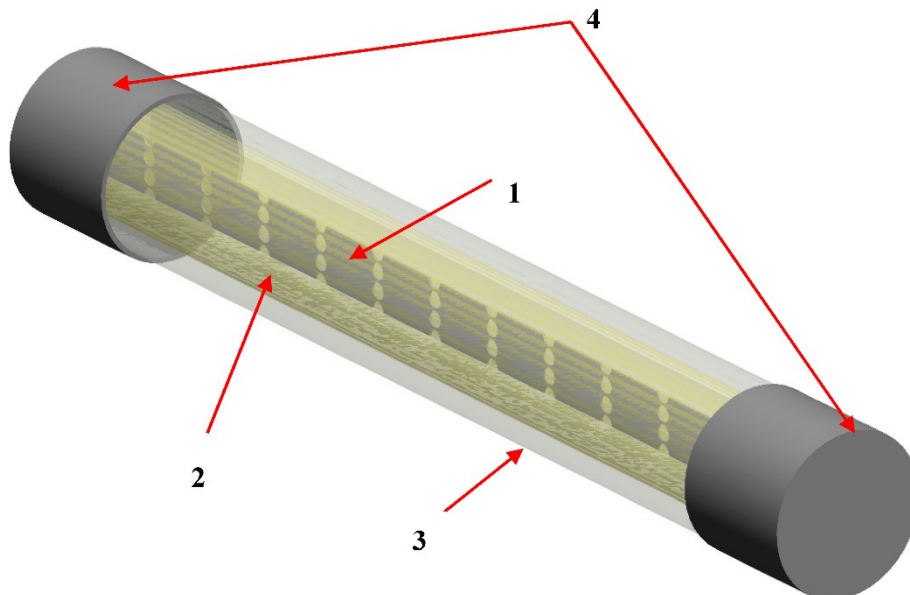


Figura 2.1: Fusível DC e respectivos componentes principais: 1-elemento fusível; 2-areia de quartzo; 3-invólucro cerâmico; 4-tampas.

No elemento fusível, podem considerar-se dois tipos de modelo geométrico: o primeiro com aberturas circulares e o segundo com aberturas rômbricas, como mostra a Figura 2.2. As diferentes formas de geometria do elemento fusível, especialmente a forma das aberturas e o número, influenciam na distribuição térmica ao longo do elemento fusível [14].

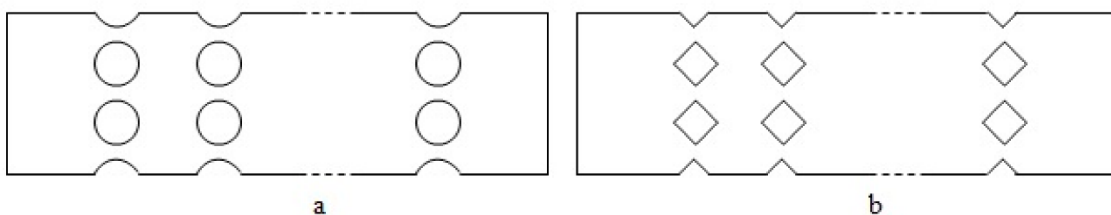


Figura 2.2: Elemento fusível com: (a) aberturas circulares; (b) aberturas rômbricas.

2.1.2. Disjuntor DC mecânico (MCB)

O disjuntor é um dispositivo elétrico usado para proteção contra sobrecargas ou curto-circuitos. Pode ser definido como um interruptor elétrico projetado para disparar automaticamente, interrompendo assim a passagem de corrente quando a mesma ultrapassa um valor predefinido, evitando assim danos no circuito elétrico.

Para a implementação de um disjuntor DC mecânico é geralmente aplicado o princípio da ressonância, onde são usados circuitos osciladores que conduzem a um ponto em que a corrente passa por zero a certo instante. Geralmente, é composto por um interruptor mecânico, um circuito de comutação e um varistor de óxido metálico (MOV), que serve para absorver e dissipar a energia após a interrupção. No momento em que é detetada uma falha, o interruptor mecânico abre, criando assim um arco que flui através do circuito de comutação, constituído por um condensador em série com uma bobina. Gera-se, assim, uma corrente oscilante, que por sua vez cria um ponto em que a corrente passa a zero. É a partir daí que o interruptor mecânico interrompe completamente a corrente de falha. O tempo de resposta destes disjuntores é manifestamente longo (aproximadamente 30 ms), comparável com o tempo de descarga do condensador. Assim sendo, a rede é sujeita a corrente de falha muito elevada, sobretudo em condições de falhas graves. A Figura 2.3 ilustra a estrutura de um disjuntor DC mecânico [10], [16].

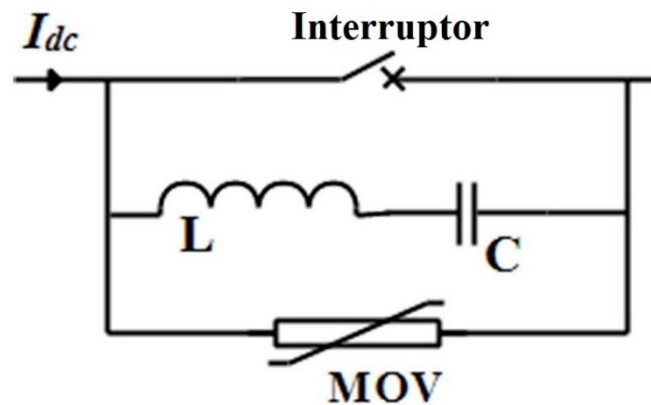


Figura 03: Disjuntor DC mecânico.

2.1.3. Disjuntor de estado sólido (SSCB)

Os disjuntores de estado sólido (SSCBs) são baseados em dispositivos semicondutores como: transístor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (MOSFET), transístor bipolar de porta isolada (IGBT), tirístor comutável por porta integrada (IGCT) ou transístor de efeito de campo de junção (JFET). Por aplicarem tecnologias de semicondutores, os SSCBs oferecem um tempo de resposta muito curto, sendo capazes de comutar do estado de condução para o bloqueio em alguns

microssegundos. Devido à ausência de partes móveis na sua constituição, não sofrem fenômenos como arco elétrico ou erosão por contato, tendo assim uma vida útil maior do que os disjuntores mecânicos. A resistência dos interruptores de eletrônica de potência causam perdas e aquecimento, implicado assim a utilização de um sistema de refrigeração adequado. Por esse motivo, a gama de aplicações em que as correntes de falha são limitadas a uma taxa fixa é reduzida. Nessa gama de aplicações, as perdas dos dispositivos semicondutores são comportáveis e a transição rápida é o requisito essencial. A Figura 2.4 mostra um disjuntor de estado sólido baseado em tirístores de entrada comutada (GTC) [17], [18].

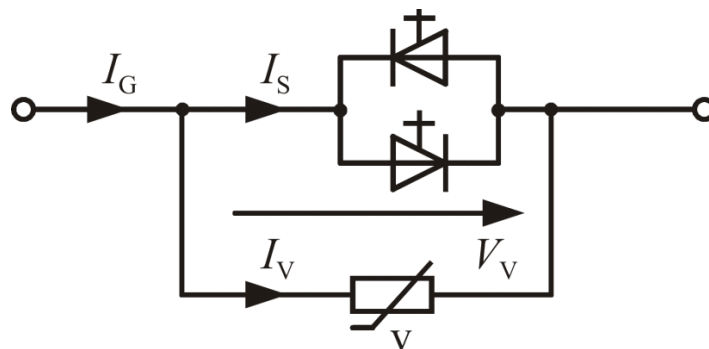


Figura 2.4: Disjuntor de estado sólido.

2.1.4. Disjuntores híbridos (HCB)

Um disjuntor eficaz deve cumprir os seguintes requisitos básicos: 1) uma grande capacidade de tratamento de correntes, sem com isso implicar perdas muito elevadas; 2) capacidade de transitar do estado de condução para bloqueio com uma velocidade elevada, sem se danificar nesse processo de transição; 3) no momento em que a corrente é interrompida, isto é, quando o disjuntor se encontra em estado aberto, a rigidez dielétrica deve ser capaz de bloquear qualquer nível de corrente [19]. Devido às condições transitórias do circuito de comutação, os disjuntores mecânicos podem falhar no segundo requisito, exceto se a tolerância do projeto for suficiente e o tempo de reação for longo devido à necessidade de extinguir o arco elétrico. Em contrapartida, o disjuntor de estado sólido pode levar a perdas e aquecimento, devido à resistência interna dos semicondutores, o que faz com que falhe no primeiro requisito [19].

O disjuntor híbrido é a combinação das duas tecnologias de disjuntores, anteriormente mencionadas, extraindo assim o máximo das suas vantagens. Como se pode ver na Figura 2.5, um disjuntor híbrido tem dois interruptores incorporados, o interruptor principal e o interruptor de isolamento. O interruptor principal é ligado em paralelo com o circuito de comutação, composto por semicondutores. O circuito de comutação só intervém durante o processo de interrupção. Tal processo pode ser dividido em três fases: abertura de contactos, momento de dissipação de energia e interrupção da falha [7], [20].

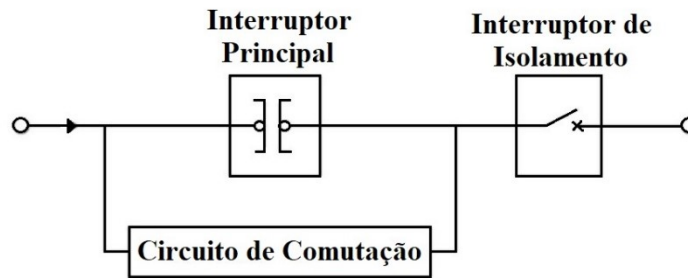


Figura 2.5: Esquema de um disjuntor híbrido.

Um disjuntor híbrido tem as seguintes características [7], [19]:

- A corrente de falha leva algum tempo a comutar do disjuntor mecânico para o semicondutor. Logo, a corrente a ser interrompida pelo semicondutor é muito elevada quando comparado com a do disjuntor de estado sólido;
- As perdas na condução não são um problema, uma vez que a corrente em condição de funcionamento normal flui através do interruptor mecânico. Já a corrente de falha é comutada para o semicondutor durante a falha, ampliando assim a utilização de dissipadores de calor;
- O interruptor mecânico deve ser capaz de suportar a tensão e sobretensão do sistema.

Por outro lado, a implementação de sistemas de proteção baseados em disjuntores híbridos apresenta alguns desafios [7], [19]:

- O disjuntor mecânico tem um tempo de resposta inferior ao tempo de resposta dos semicondutores (detecção de falhas, tempo de atuação);
- O disjuntor mecânico e o semicondutor têm diferentes capacidades de limitação da corrente;
- A separação dos contactos mecânicos está sujeita às amplitudes da corrente de falha: quanto maior for a corrente de falha, maior será o afastamento dos contactos;
- A tensão do arco deve ser maior do que a queda de tensão do disjuntor de estado sólido. Caso contrário, a corrente não será capaz de comutar do disjuntor mecânico para o semicondutor;
- A combinação do disjuntor mecânico e do semicondutor formam um circuito fechado com uma certa indutância. Caso essa indutância seja elevada, o tempo de comutação também é elevado, o que implica que a amplitude da corrente de falha seja superior;
- Tempos de condução elevados resultam em elevadas perdas de condução, levando assim ao sobreaquecimento do disjuntor, podendo danificar o mesmo.

2.1.5. Análise comparativa de tecnologias

Para perceber de forma clara quais as vantagens e características inerentes a cada uma das tecnologias de proteção DC abordadas nas seções anteriores, a Tabela 2.2 estabelece uma comparação entre as várias tecnologias de disjuntores, indicadas para micro-redes DC.

Tabela 2.2: Comparação das diferentes tecnologias de disjuntores.

	MCB	SSCB	HCB
Princípio de funcionamento	Criação de um ponto de passagem por zero, através de um circuito oscilante.	Utiliza a capacidade de bloqueio de corrente dos dispositivos de estado sólido.	Criação de um ponto de passagem por zero, através de dispositivos de estado sólido ligados em paralelo.
Custo	Relativamente baixo	Caro	Muito caro
Perdas	Irrelevante (<0.1%)	Alto (~ 0.1-2%)	Baixo (< 0.1%)
Tempo de resposta	~ 40ms	< 100µs	500µs - 2ms
Complexidade	Baixa	Baixa	Relativamente baixa
Alta velocidade na deteção de falha?	Não	Sim	Sim
Seletividade	Sim	Sim	Sim
Observações	Possui isolamento galvânico	Necessita de um sistema de refrigeração	Ausência de arcos elétricos nos contactos mecânicos

Com base nos dados apresentados, verifica-se que a adoção de sistemas de proteção baseados na tecnologia HCB assume vantagem em relação às restantes, do ponto de vista de interesse prático. O único ponto desfavorável à tecnologia HCB reside no seu custo de implementação. Assim sendo, importa desenvolver soluções, baseadas na tecnologia HCB, que possam reduzir o custo de implementação.

2.2. Arquiteturas de disjuntores híbridos

Os disjuntores híbridos podem assumir diferentes arquiteturas. A Figura 2.6 mostra um disjuntor híbrido, onde foram usados fototransístores como componentes semicondutores. Estes encontram-se montados em grandes cadeias em série para suportar uma grande tensão de bloqueio. Na presença de correntes elevadas, a eficácia no processo de atração de eletrões a partir do emissor é muito reduzida. Portanto, o fototransístor não foi considerado adequado para aplicações de disjuntores híbridos [19].

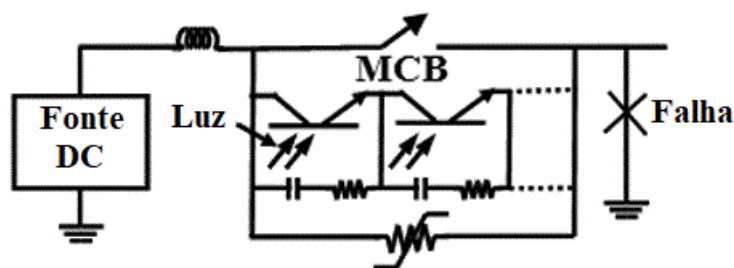


Figura 2.6: Disjuntor híbrido com aplicação de fototransistor.

Em situações de utilização de disjuntores híbridos a grandes altitudes e baixa pressão, observa-se que a mobilidade do arco elétrico é baixa. Assim sendo, há muita dificuldade em aplicar disjuntores convencionais. Para essas aplicações, o peso e o volume são fatores importantes e decisivos no projeto do disjuntor. A Figura 2.7 mostra um disjuntor híbrido que usa um transistor de efeito de campo (FET) como semicondutor. Em funcionamento normal, a corrente flui pelo disjuntor mecânico, o que resulta em reduzidas perdas por condução. Ao mesmo tempo, o semicondutor assegura a interrupção do circuito, pois as suas características de comutação não são afetadas pela altitude [19].

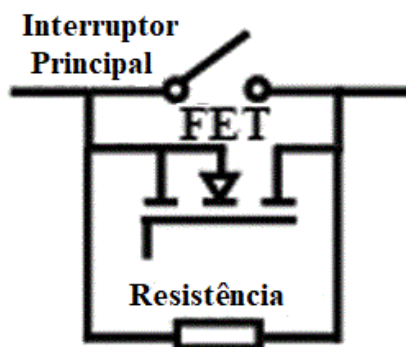


Figura 2.7: Disjuntor híbrido baseado na tecnologia FET.

Um disjuntor híbrido de múltiplos estágios baseado em IGBT, como é ilustrado na Figura 2.8, é particularmente indicado para aplicações de média tensão. Em funcionamento normal, a corrente flui pelo interruptor principal e os IGBTs encontram-se ao corte. Durante o processo de interrupção, é aplicada uma estratégia de comutação de múltiplos estágios. Numa primeira fase, a corrente de falha é comutada para IGBT1 e o interruptor principal é desligado, sendo esta fase concluída quando o arco se extingue. Em seguida, o IGBT2 é ligado e o IGBT1 desligado. Assim, a corrente flui através da resistência, que dissipa parte da energia associada à corrente de falha, e através do IGBT2. Durante o período de condução do IGBT2, a corrente de falha diminui progressivamente. Quando a corrente de falha é suficientemente baixa, o IGBT2 é desativado. Nesta fase, o varistor MOV assegura a proteção do IGBT2 contra a sobretensão [5], [21].

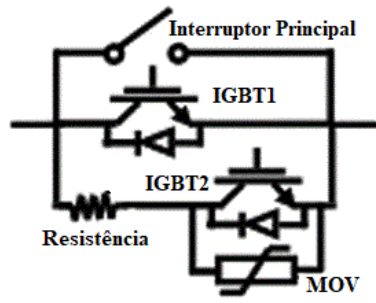


Figura 2.8: Disjuntor híbrido de múltiplos estágios baseado na tecnologia IGBT.

Capítulo 3

Resultado de simulação

Para testar a efetividade da solução proposta neste trabalho, a mesma foi simulada com recurso ao software MATLAB/Simulink. A proteção é integrada num sistema de iluminação LED. Os parâmetros considerados na simulação são idênticos aos dos elementos usados nos ensaios experimentais.

A Figura 3.1 ilustra o circuito completo usado na simulação e o sistema de proteção proposto, que resulta da simplificação do disjuntor híbrido de múltiplos estágios baseado em IGBT apresentado na Figura 2.8.

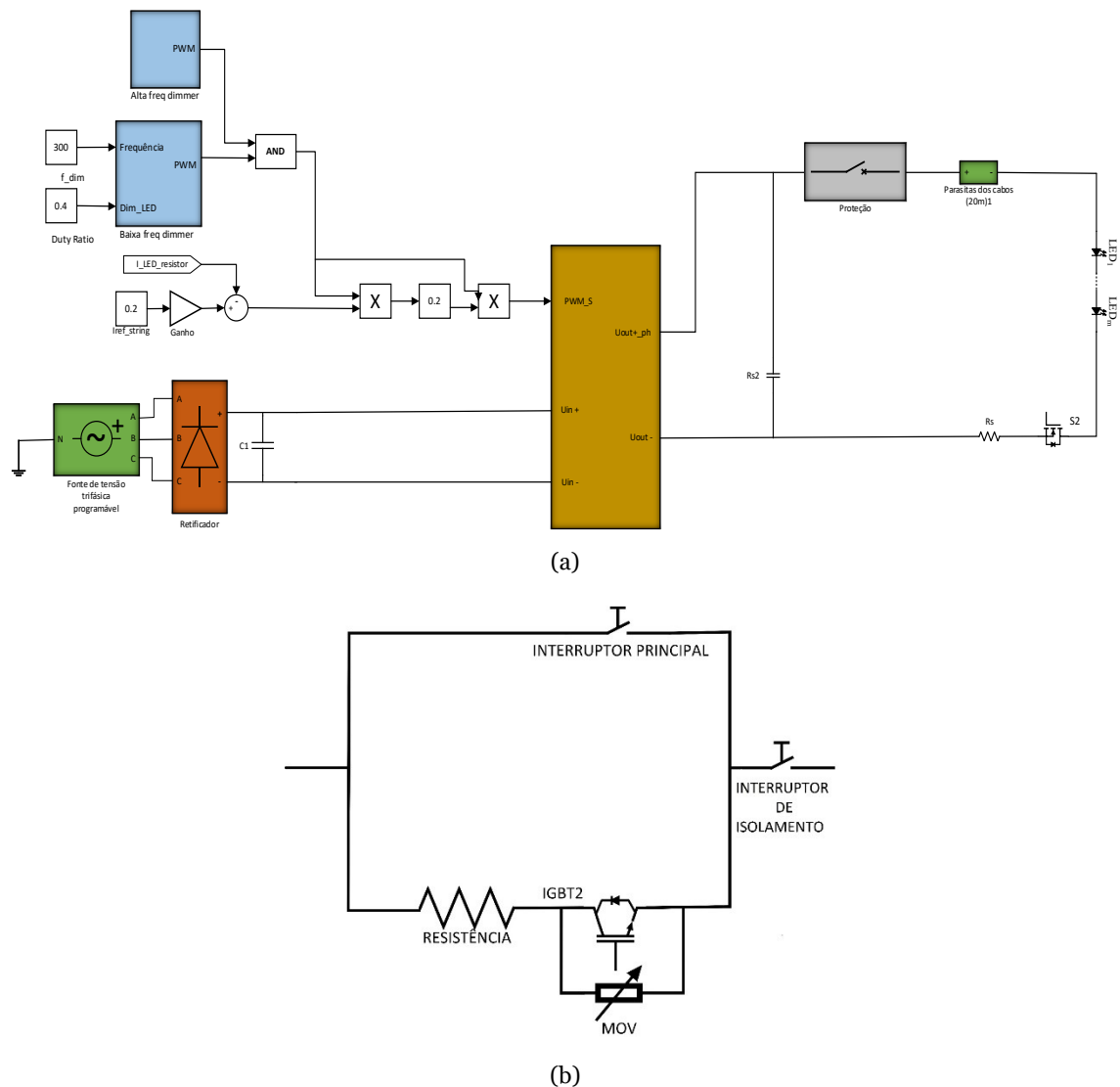
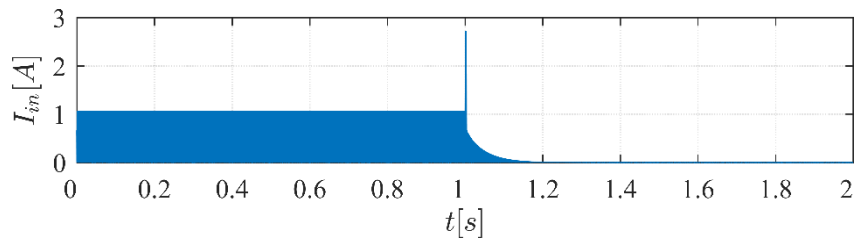


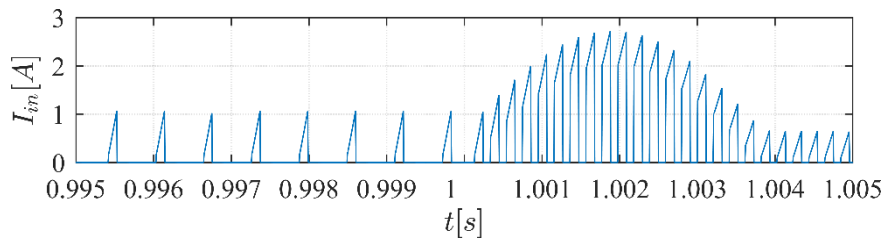
Figura 3.1: (a) Circuito implementado em ambiente de simulação; (b) Sistema de proteção proposto.

Os principais parâmetros aplicados nesta simulação encontram-se listados nas Tabelas A.1-A1.3 do Apêndice. Foi considerado, na simulação, um valor constante de corrente de referência dos LEDs.

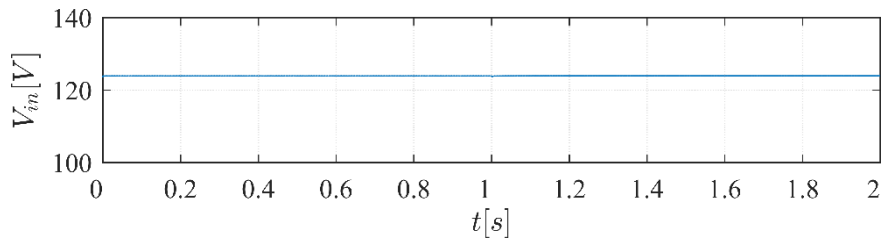
Para efeitos de simulação, consideram-se dois cenários de funcionamento distintos. A Figura 3.2 e a Figura 3.3 estabelecem uma comparação entre a resposta do circuito na presença e na ausência do sistema de proteção proposto. Na Figura 3.2 é usado o sistema de proteção proposto. Na Figura 3.3, o sistema de iluminação LED não aplica o sistema de proteção, sendo este substituído por um disjuntor convencional para levar a cabo a interrupção do circuito em caso de curto-circuito.



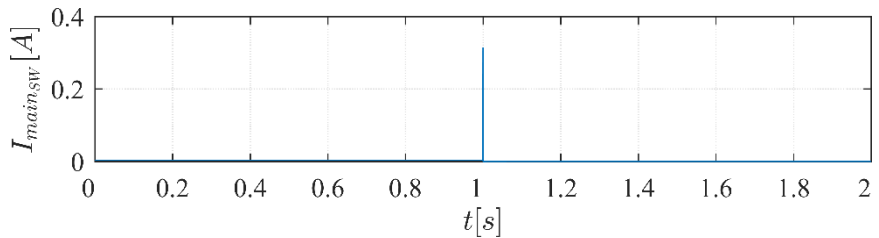
(a)



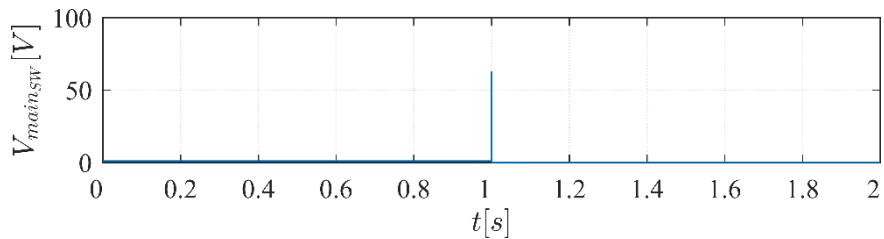
(b)



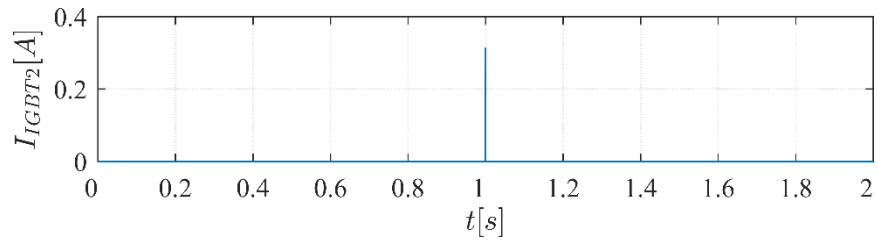
(c)



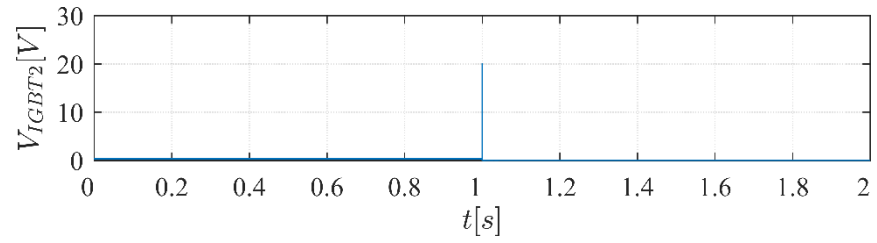
(d)



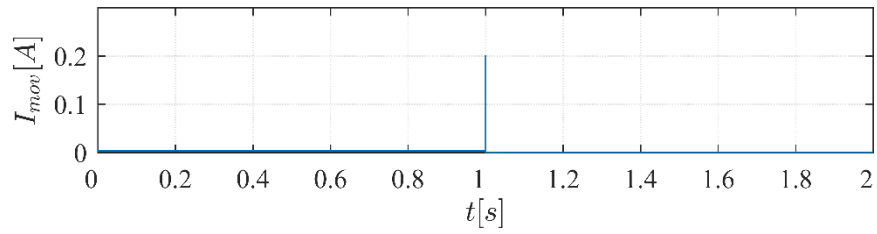
(e)



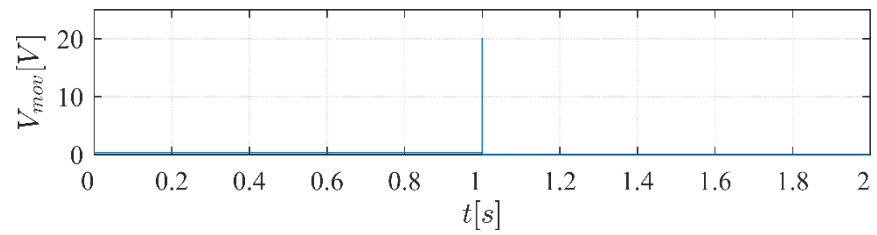
(f)



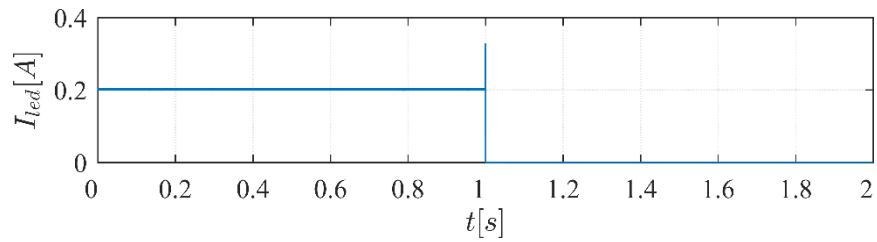
(g)



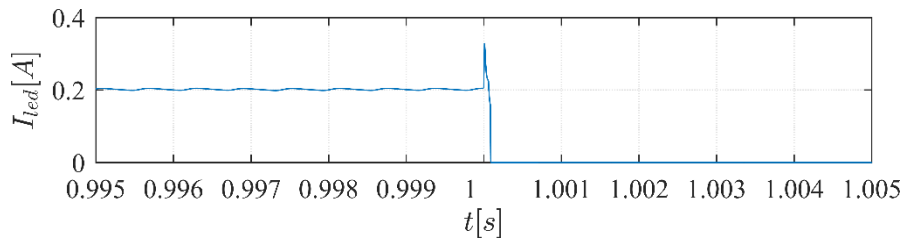
(h)



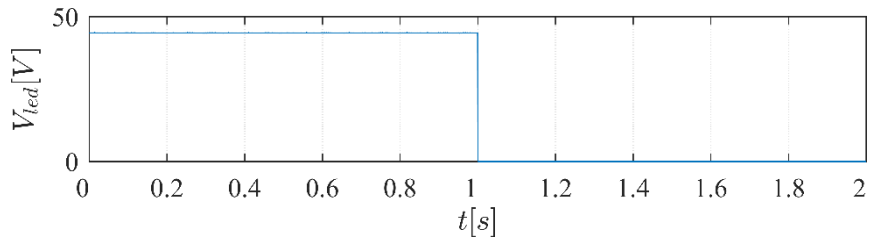
(i)



(j)

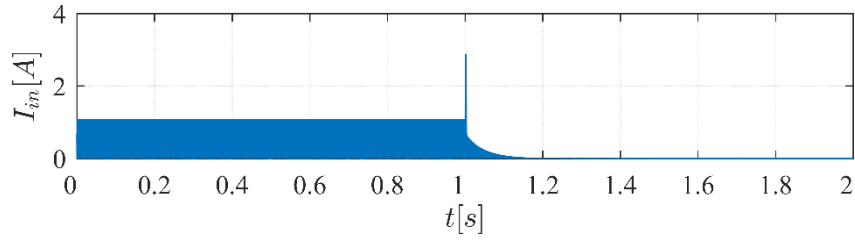


(k)

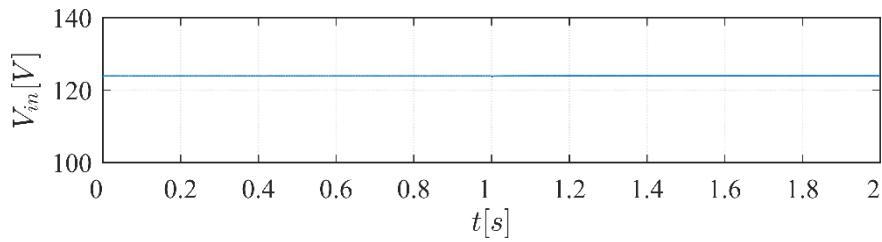


(l)

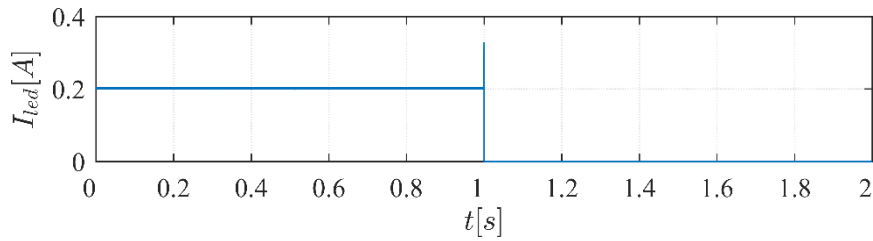
Figura 3.2: Evolução das principais variáveis do circuito que integra o sistema de proteção, com o curto-circuito a ocorrer no instante ($t = 1$ s): (a) I_{in} ; (b) I_{in} zoom; (c) V_{in} ; (d) I_{mainSW} ; (e) V_{mainSW} ; (f) I_{IGBT2} ; (g) V_{IGBT2} ; (h) I_{mov} ; (i) V_{mov} ; (j) I_{led} ; (k) I_{led} zoom; (l) V_{led} .



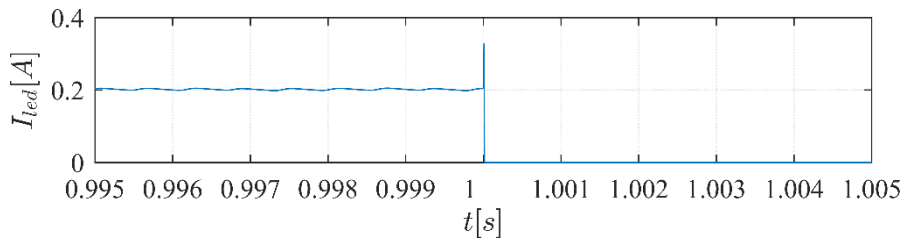
(a)



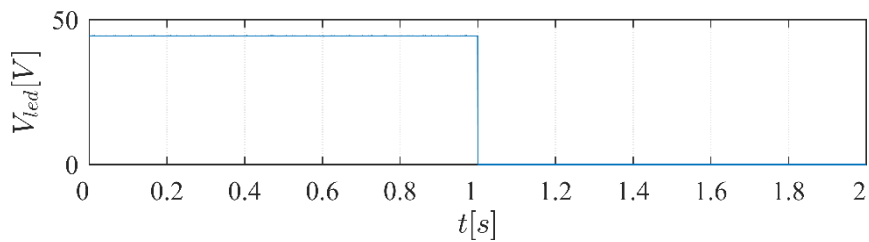
(b)



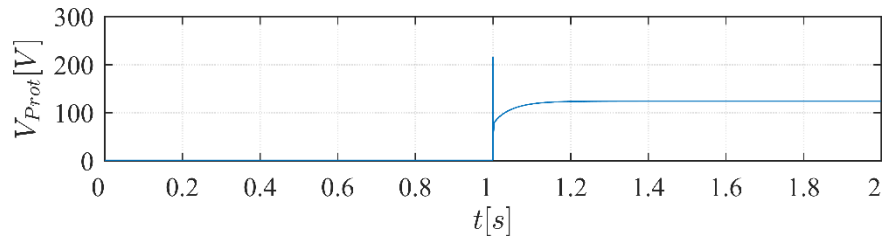
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.3: Evolução das principais variáveis do circuito que não integra o sistema de proteção, com o curto-circuito a ocorrer no instante ($t = 1$ s): (a) I_{in} ; (b) V_{in} ; (c) I_{led} ; (d) I_{led} zoom; (e) V_{led} ; (f) V_{Prot} .

Estabelecendo uma comparação entre a Figura 3.2 e a Figura 3.3, observa-se que a ausência do sistema de proteção adequado promove um aumento significativo na corrente de entrada I_{in} . Tal fato resulta da grande quantidade de energia que é direcionada para a criação e sustentação do arco elétrico, de difícil extinção no cenário de não adoção da proteção (Figura 3.3). Por outro lado, observa-se a rápida extinção do fluxo de energia para a carga, graças à adoção do sistema de proteção proposto (Figura 3.2).

Capítulo 4

Resultados experimentais

Para verificar experimentalmente o sistema de proteção proposto, foram levados a cabo ensaios experimentais, com a implementação de um protótipo laboratorial do sistema proposto. A arquitetura da montagem experimental é semelhante às usadas para fins de simulação.

A alimentação do sistema de iluminação LED foi efetuada através de um auto-transformador trifásico, ligado a um retificador trifásico a diodos. Para estabilizar a tensão à saída do retificador, foi aplicado um condensador eletrolítico de 3.3 mF. O auto-transformador foi regulado de forma a ajustar a tensão à saída da fonte de alimentação DC.

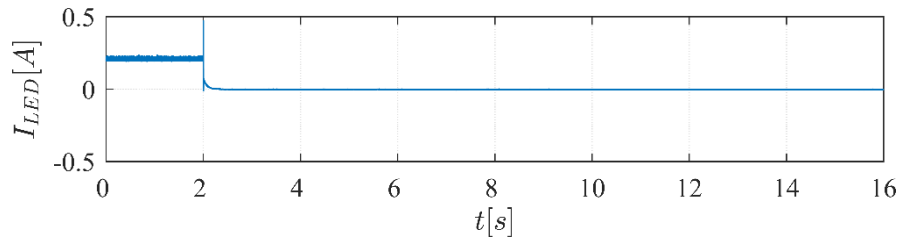
Para a construção do conversor controlador da lâmpada LED e das parcelas da proteção DC desenvolvidas neste trabalho, foram utilizados semicondutores de potência do módulo Power PACK 3-phase bridge SKiiP 132 GD e respetivo *gate driver*. Para a construção do conversor *buck*, foi aplicado uma bobina de 10 mH e um condensador de 200 μ F.

A proteção integral, para além dos dispositivos semicondutores do módulo de potência, um varistor de 39 V, com a referência JVR-14N390K.

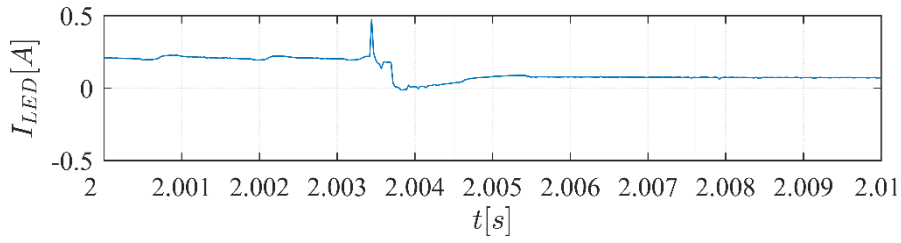
No que concerne à carga do sistema LED, foram utilizados os dispositivos LED de uma lâmpada de 11 W da marca V-TAC. A medição da corrente de alimentação dos dispositivos LED foi efetuada com recurso a uma resistência de 30 Ω . A condição de curto-circuito é estabelecida através da ligação, aos terminais da lâmpada LED, de uma resistência de 50 Ω .

Os processos de controlo, monitorização de todo o sistema e aquisição de dados são assegurados pela plataforma de desenvolvimento dSPACE DS1103. A interface entre o sistema desenvolvido e o utilizador é assegurada pelo software dSPACE ControlDesk.

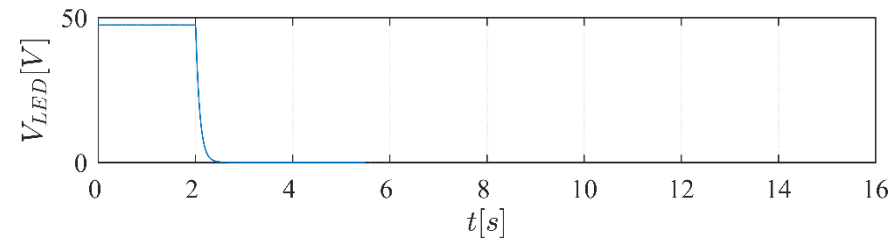
Os dados experimentais obtidos na Figuras 4.1 descrevem um cenário em que o sistema de proteção é implementado com uma resistência na proteção de 200 Ω e um atraso de 150 μ s. Este atraso refere-se ao período de tempo compreendido entre a entrada à condução do interruptor principal e a ativação do IGBT2, associado ao circuito de comutação da proteção.



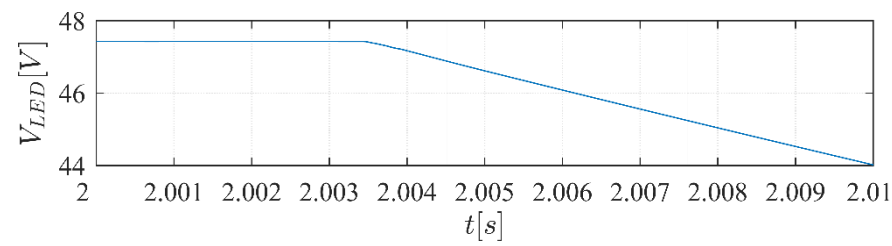
(a)



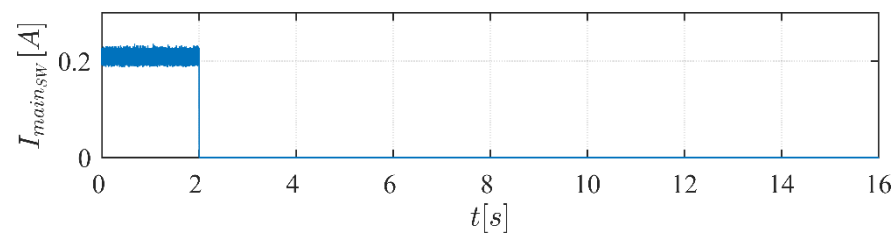
(b)



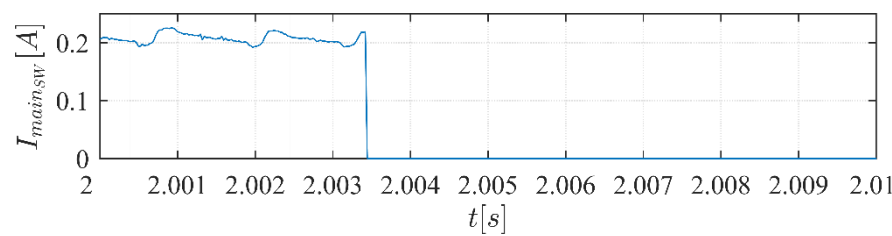
(c)



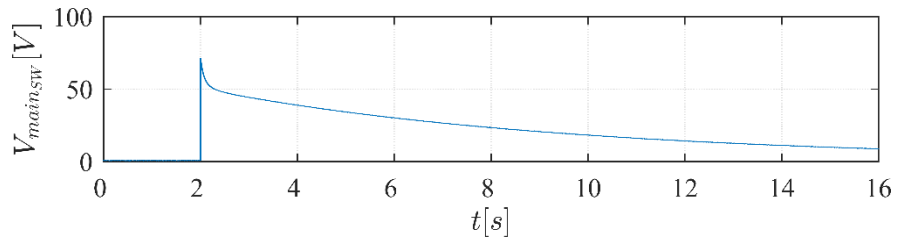
(d)



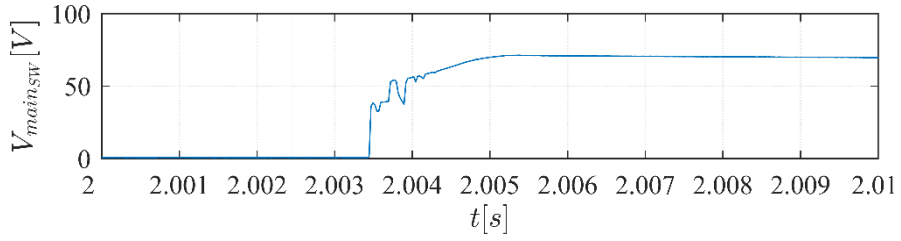
(e)



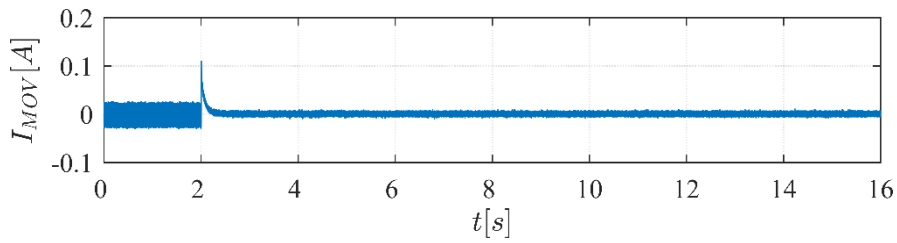
(f)



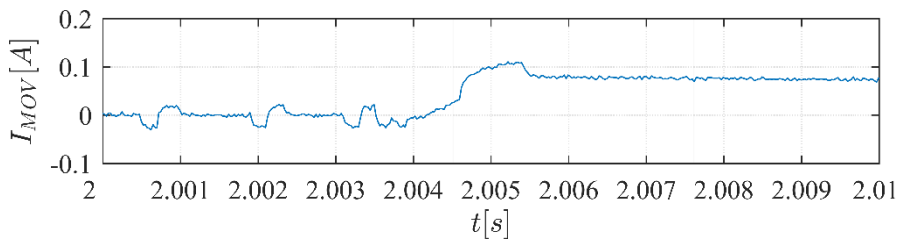
(g)



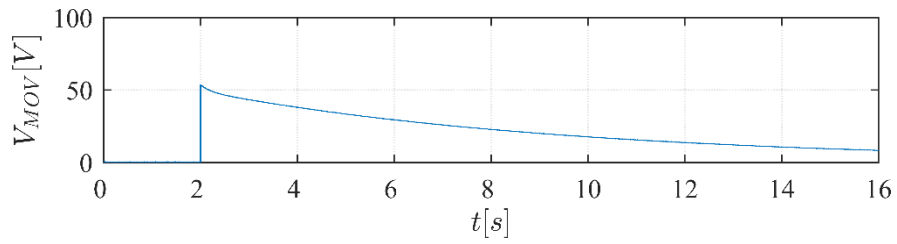
(h)



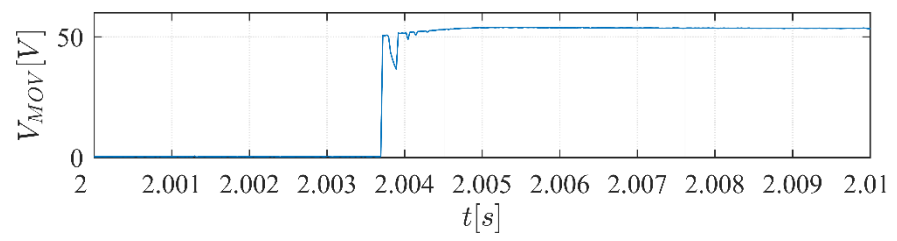
(i)



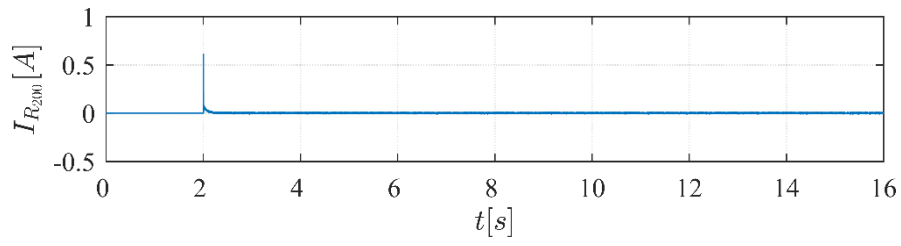
(j)



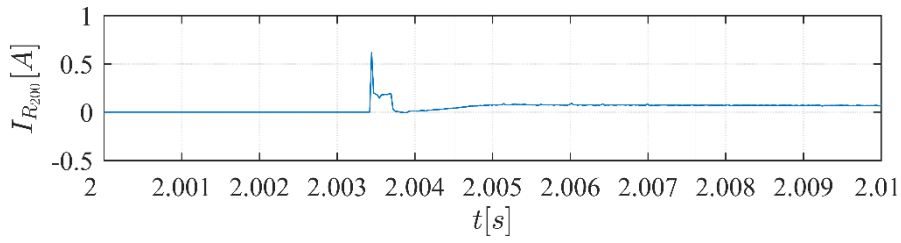
(k)



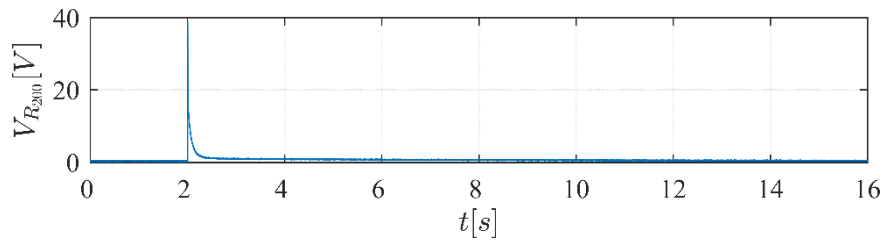
(l)



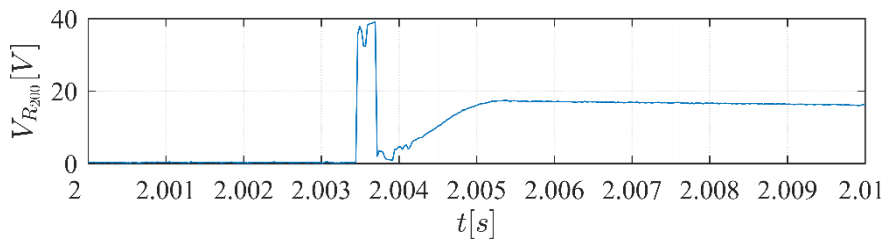
(m)



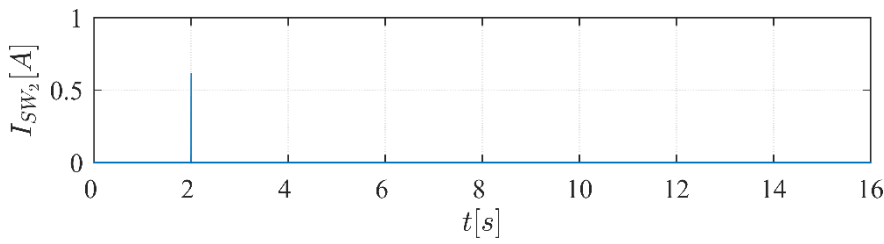
(n)



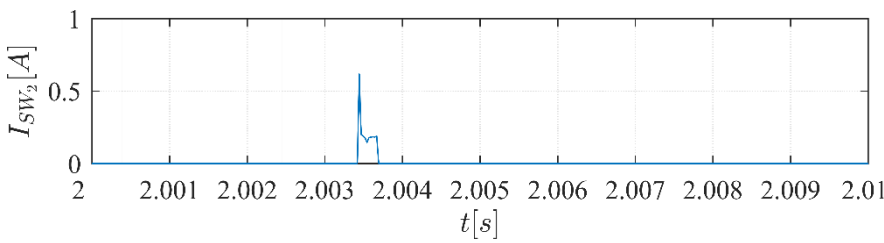
(o)



(p)



(q)



(r)

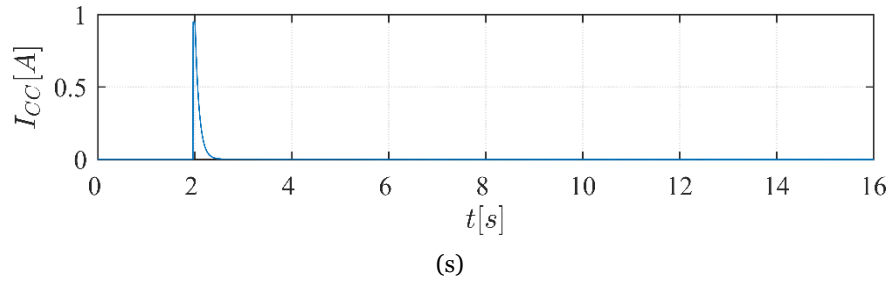
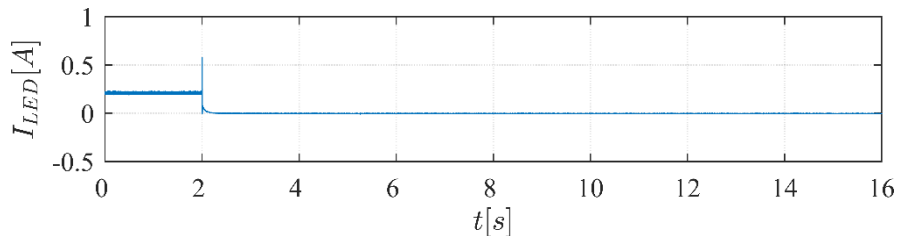


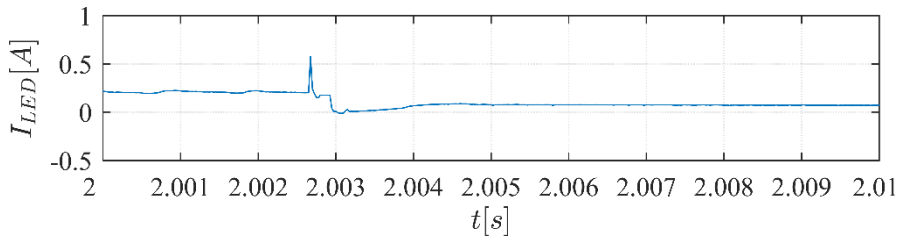
Figura 4.1: Evolução das principais variáveis do circuito que integra o sistema de proteção baseada numa resistência de proteção de 200Ω e num atraso de $150 \mu\text{s}$: (a) I_{led} ; (b) I_{led} zoom; (c) V_{led} ; (d) ϕV_{led} zoom; (e) I_{mainSW} ; (f) I_{mainSW} zoom; (g) V_{mainSW} ; (h) V_{mainSW} zoom; (i) I_{mov} ; (j) I_{mov} zoom; (k) V_{mov} ; (l) V_{mov} zoom; (m) I_{R200} ; (n) I_{R200} zoom; (o) V_{R200} ; (p) V_{R200} zoom; (q) I_{SW2} ; (r) I_{SW2} zoom; (s) I_{CC} .

O circuito demonstra estar em funcionamento normal até ao instante $t = 2 \text{ s}$, momento em que acontece um curto-circuito e o sistema de proteção entra em funcionamento. Observam-se picos de corrente no momento do curto-circuito. Esses picos acontecem na corrente do LED, na corrente do varistor, na corrente da resistência de proteção e na corrente do IGBT2, assim como na corrente de curto-circuito. Nota-se também um pico na tensão do interruptor principal, na tensão do varistor e na tensão da resistência. Com a atuação do sistema de proteção, o circuito é interrompido sem que com isso se observem picos de tensão e corrente nefastos quer para o sistema LED, quer para a proteção, protegendo assim a carga. A ocorrência de arco elétrico é evitada.

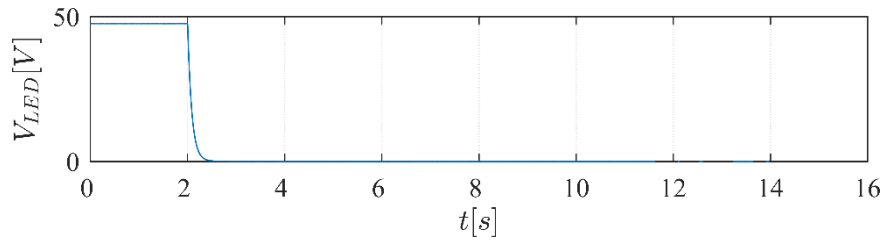
A Figura 4.2 apresenta dados relativos à aplicação do sistema de proteção com uma resistência de proteção de 200Ω e um atraso de $200 \mu\text{s}$.



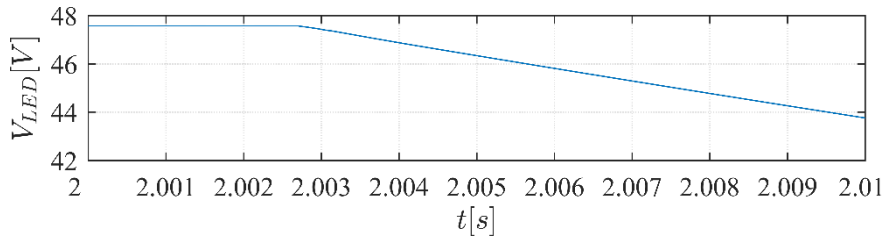
(a)



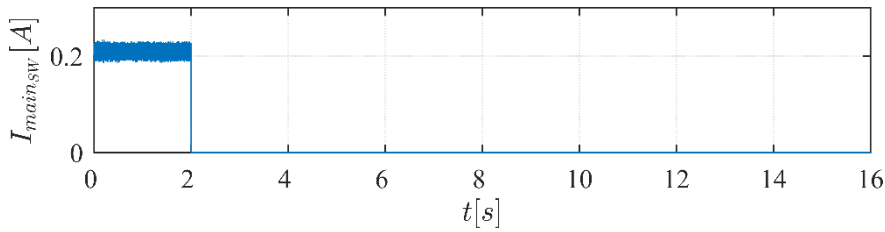
(b)



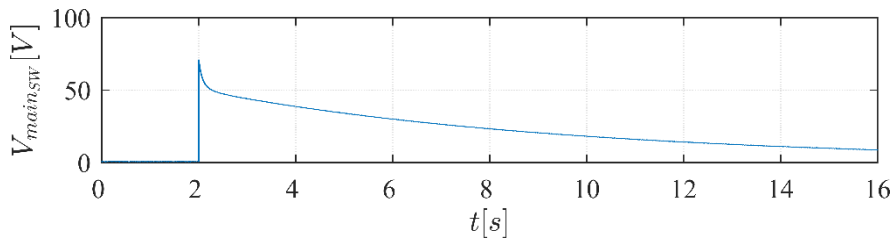
(c)



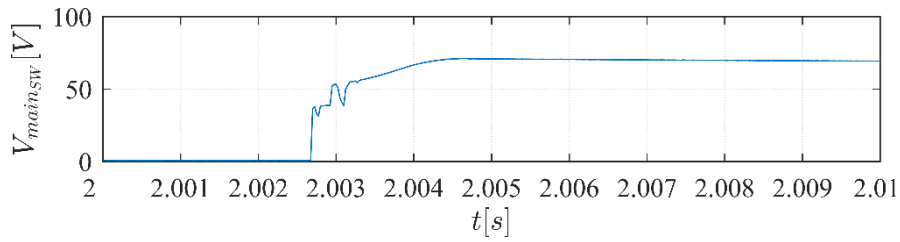
(d)



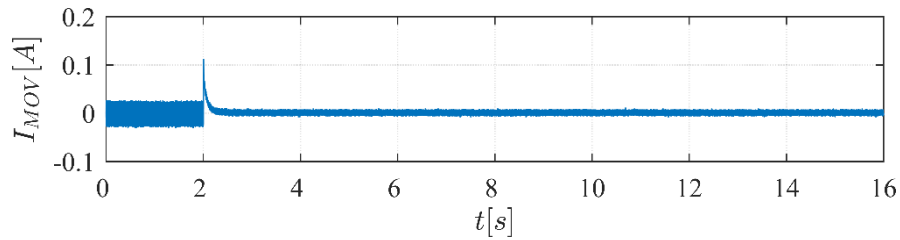
(e)



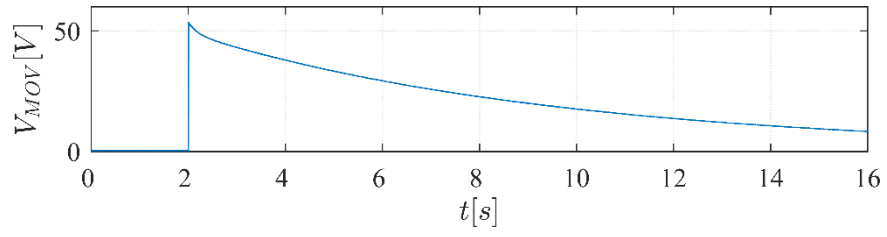
(f)



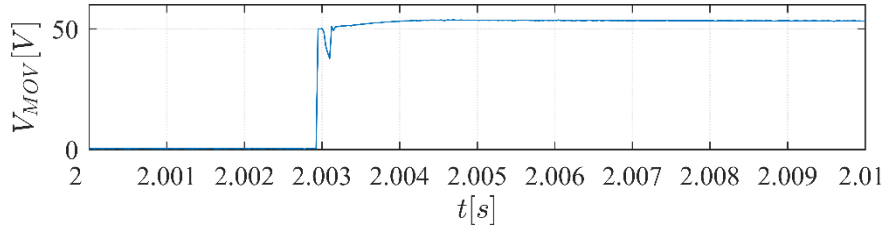
(g)



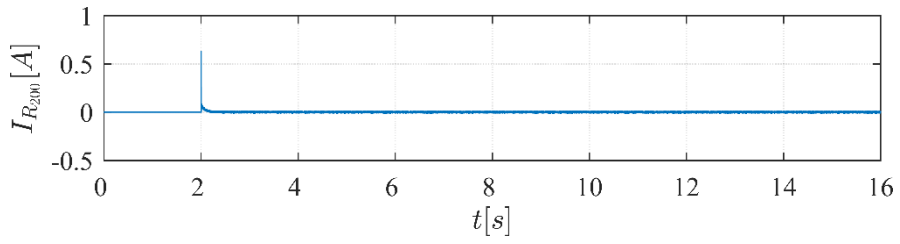
(h)



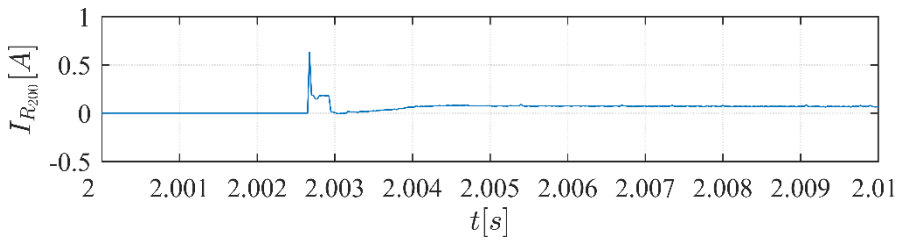
(i)



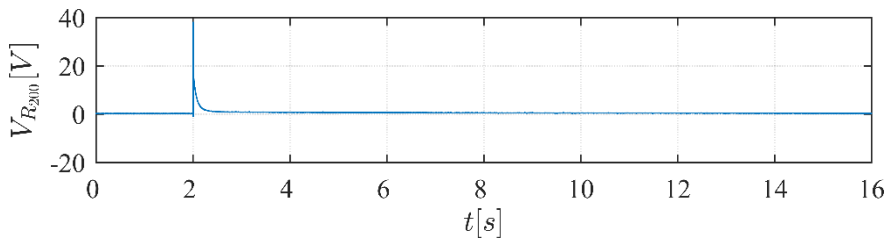
(j)



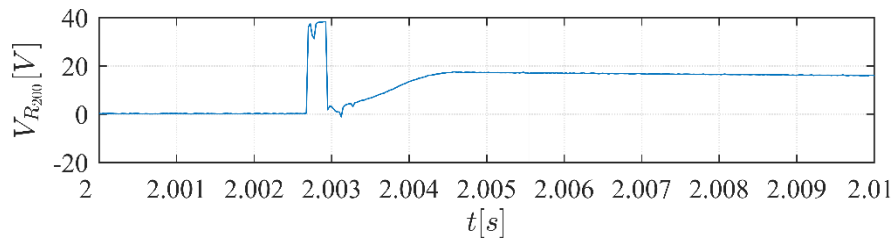
(k)



(l)



(m)



(n)

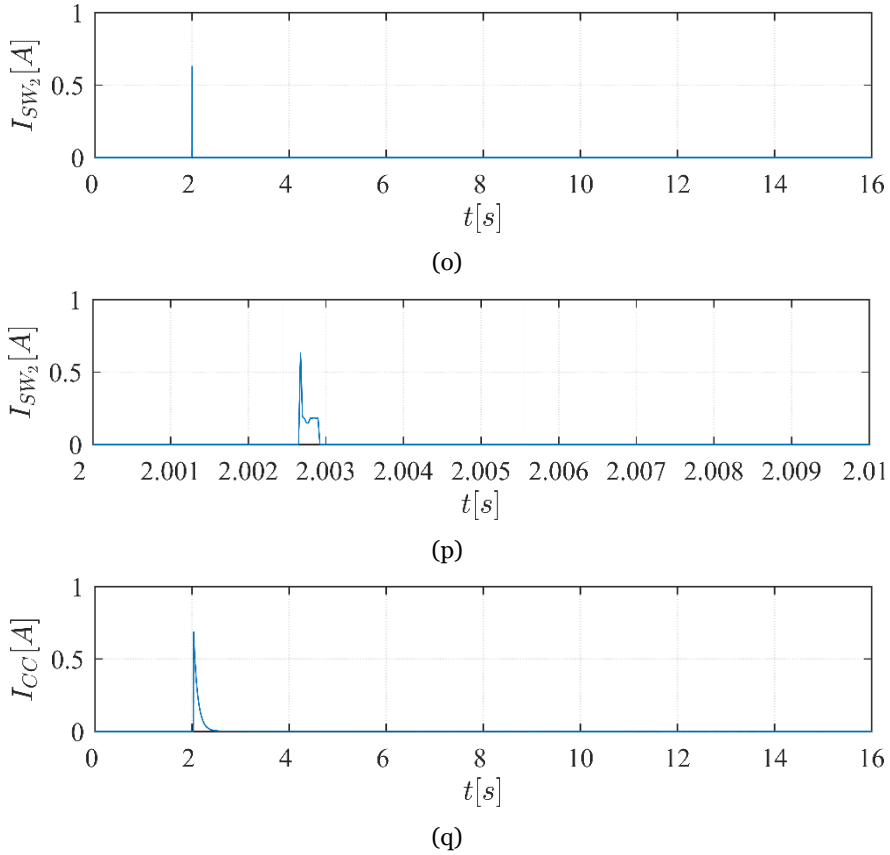
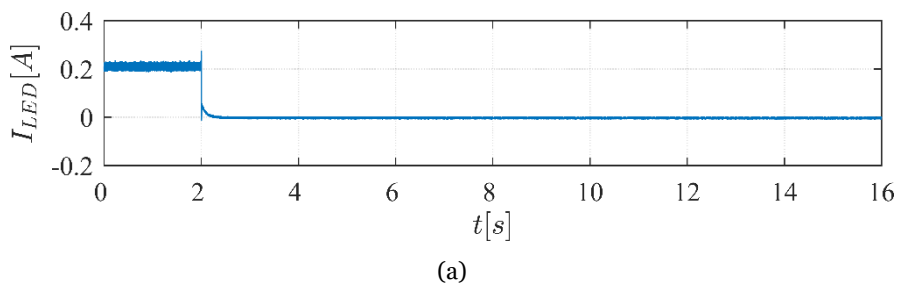
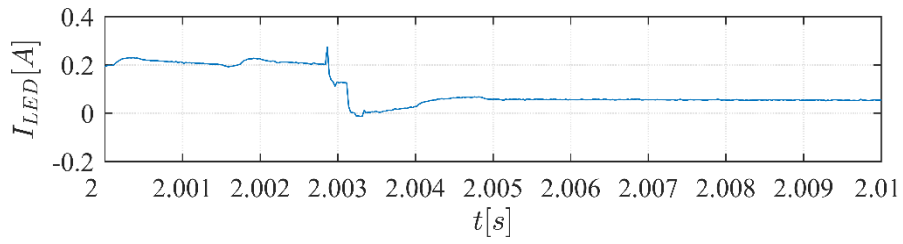


Figura 4.1: Evolução das principais variáveis do circuito que integra o sistema de proteção baseada numa resistência de proteção de 200Ω e num atraso de $200 \mu\text{s}$: (a) I_{led} ; (b) I_{led} zoom; (c) V_{led} ; (d) V_{led} zoom; (e) I_{mainSW} ; (f) V_{mainSW} ; (g) V_{mainSW} zoom; (h) I_{mov} ; (i) V_{mov} ; (j) V_{mov} zoom; (k) I_{R200} ; (l) I_{R200} zoom; (m) V_{R200} ; (n) V_{R200} zoom; (o) I_{SW2} ; (p) I_{SW2} zoom; (q) I_{CC} .

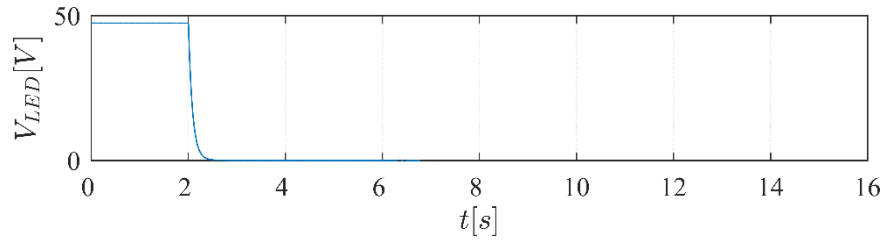
Analisando os dados apresentados na Figura 4.2, percebe-se claramente a influência que a variação do atraso entre a ativação dos interruptores tem no circuito. Constata-se um ligeiro aumento no pico de corrente no LED, na corrente do varistor e na corrente da resistência. Em contrapartida, o pico de corrente de curto-circuito sofreu uma diminuição significativa. Observa-se também que há uma ligeira diferença na taxa de decrescimento na tensão do LED, decrescendo mais rapidamente. Há uma ligeira diferença no comportamento da tensão no interruptor principal, na tensão do varistor e na tensão da resistência de proteção: com o aumento do atraso, a oscilação das tensões diminui.

A Figura 4.3 apresenta dados relativos ao cenário de adoção de resistência de proteção de 300Ω e um atraso de $150 \mu\text{s}$.

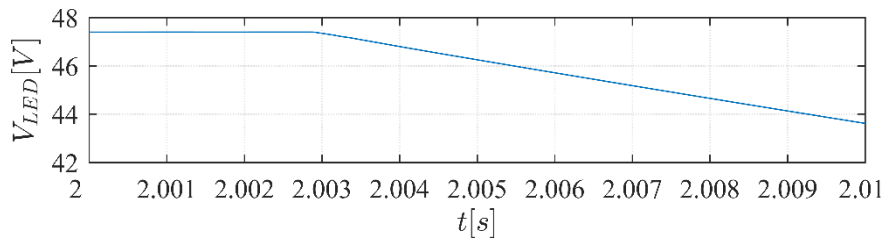




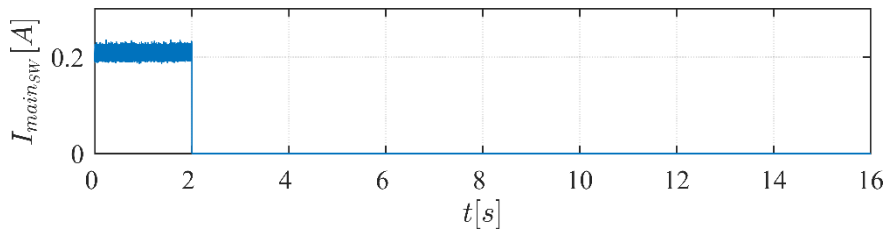
(b)



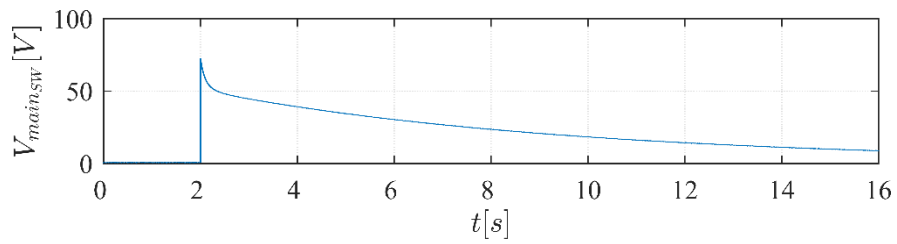
(c)



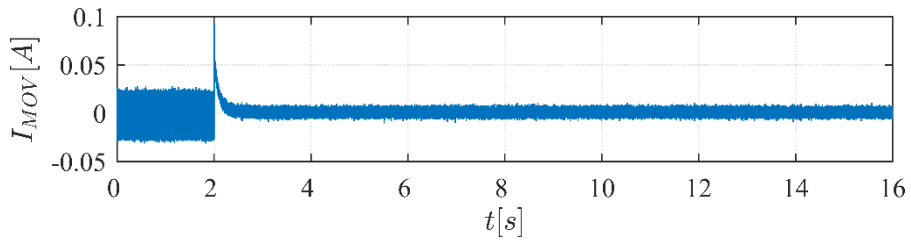
(d)



(e)



(f)



(g)

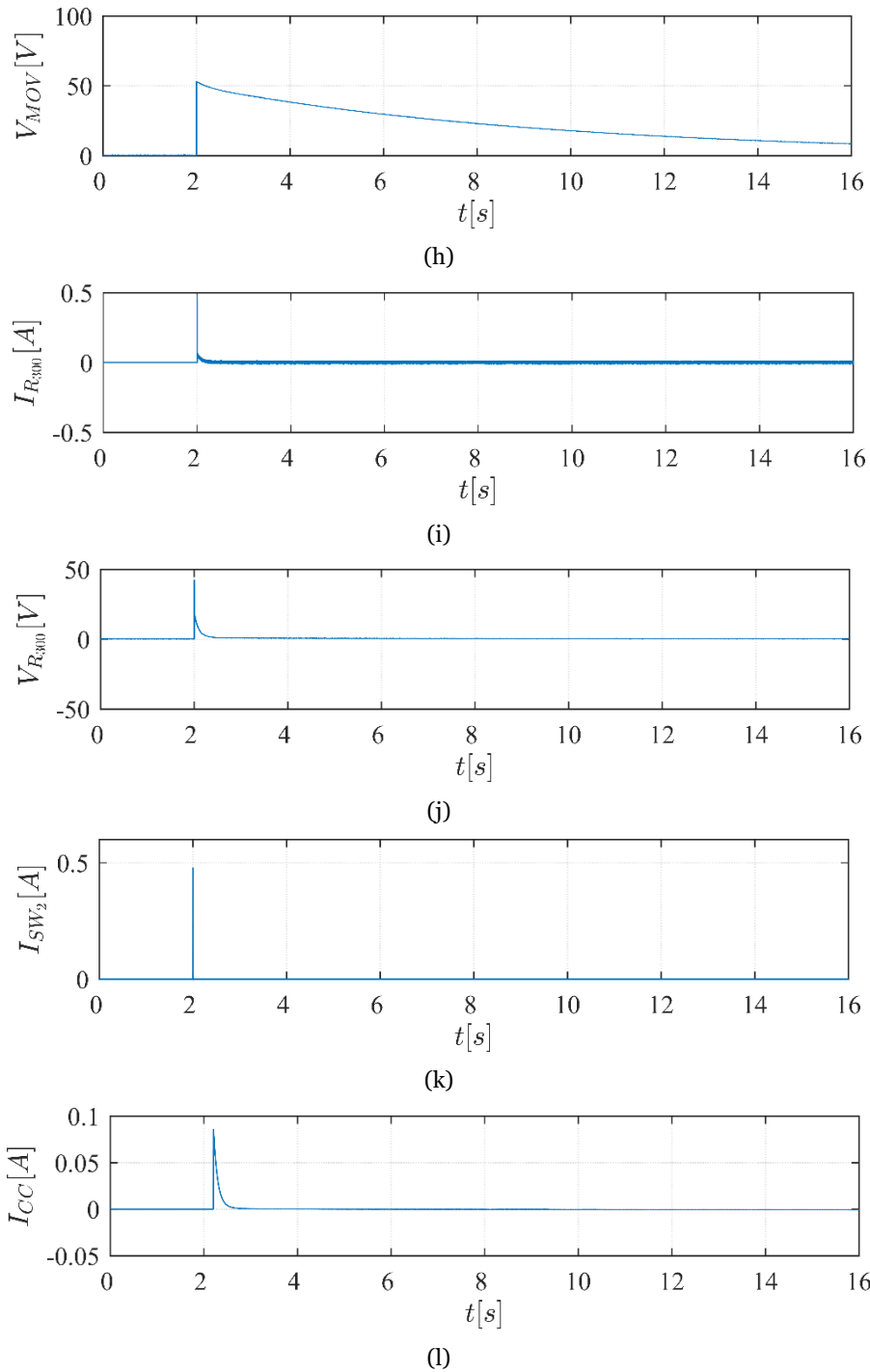
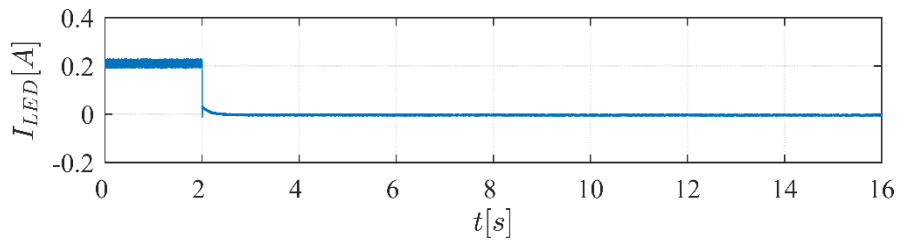


Figura 4.2: Evolução das principais variáveis do circuito que integra o sistema de proteção baseada numa resistência de proteção de $300\ \Omega$ e num atraso de $150\ \mu\text{s}$: (a) I_{led} ; (b) I_{led} zoom; (c) V_{led} ; (d) V_{led} zoom; (e) I_{mainsw} ; (f) V_{mainsw} ; (g) I_{mov} ; (h) V_{mov} ; (i) I_{R600} ; (j) V_{R600} ; (k) I_{SW2} ; (l) I_{CC} .

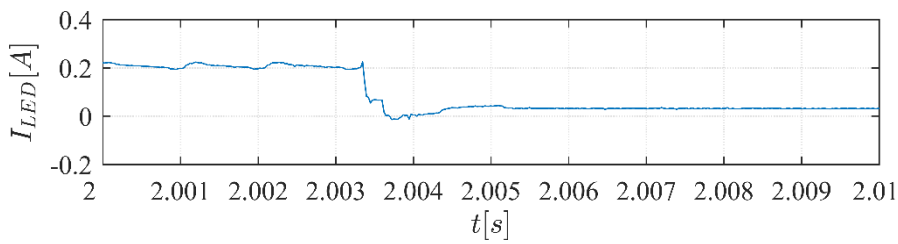
É evidente a influência da resistência da proteção no circuito, como se pode ver na Figura 4.3. O pico de corrente no LED e na corrente de curto-circuito reduziu significativamente, enquanto o pico de corrente no varistor, no IGBT2 e na resistência da proteção também sofreu uma redução, embora mais ténue. Nota-se, também, uma taxa de decrescimento ligeiramente maior na tensão do LED, enquanto que a tensão no varistor aumentou ligeiramente. Também é perceptível a influência do aumento da resistência da

proteção na tensão do interruptor principal, na tensão do varistor e na tensão da resistência de proteção, pois os gráficos apresentam menor oscilação.

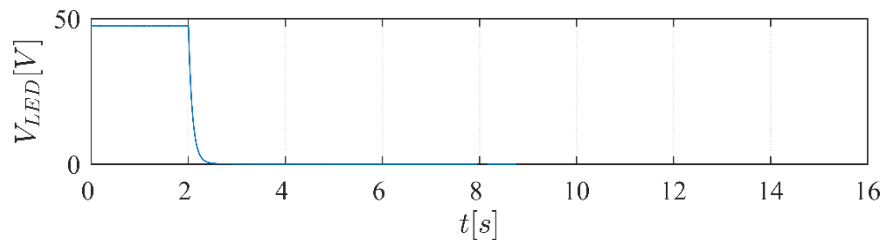
A Figura 4.4 apresenta dados relativos ao cenário de adoção de resistência da proteção de 600Ω e um atraso de $150 \mu\text{s}$.



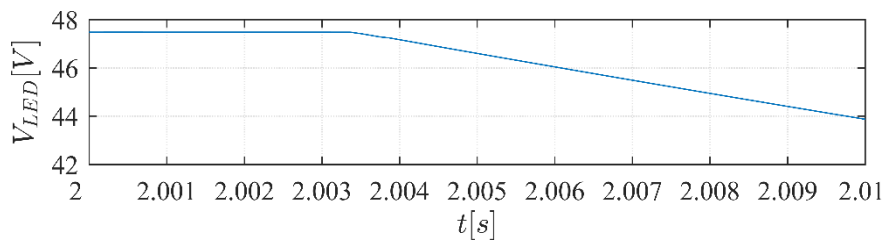
(a)



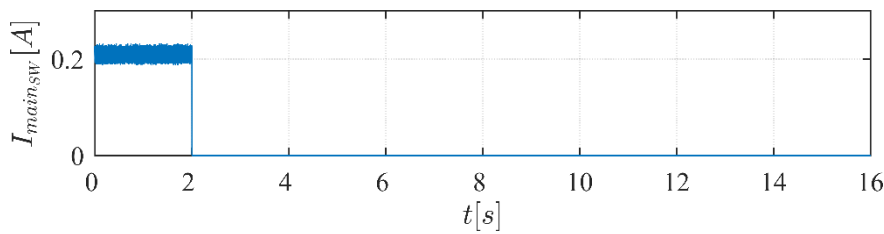
(b)



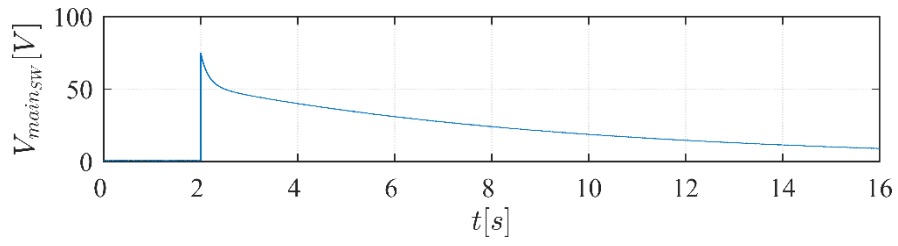
(c)



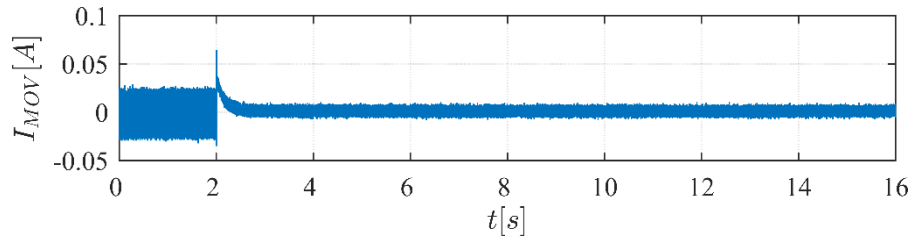
(d)



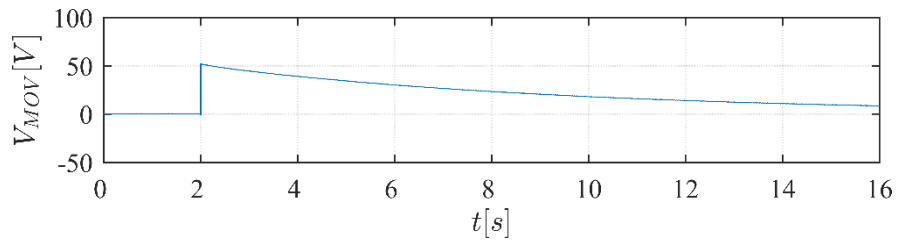
(e)



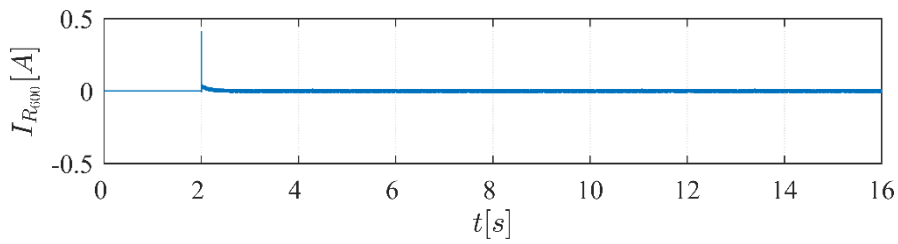
(f)



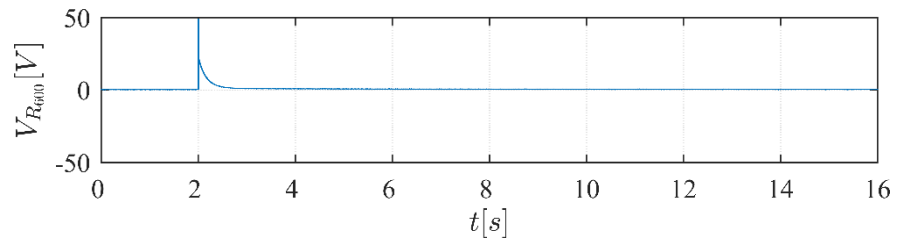
(g)



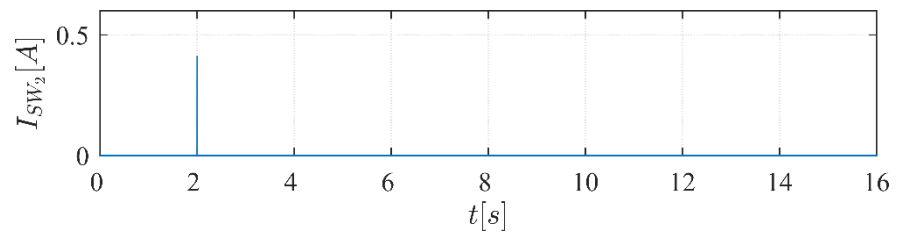
(h)



(i)



(j)



(k)

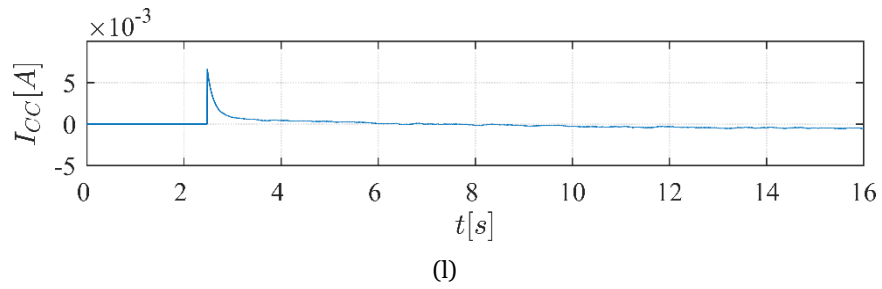


Figura 4.3: Evolução das principais variáveis do circuito que integra o sistema de proteção baseada numa resistência de proteção de $600\ \Omega$ e num atraso de $150\ \mu\text{s}$: (a) I_{led} ; (b) I_{led} zoom; (c) V_{led} ; (d) V_{led} zoom; (e) I_{mainSW} ; (f) V_{mainSW} ; (g) I_{mov} ; (h) V_{mov} ; (i) I_{R600} ; (j) V_{R600} ; (k) I_{SW2} ; (l) I_{CC} .

Os resultados apresentados na Figura 4.4 revelam claramente a influência do aumento da resistência da proteção, como descrito na figura anterior, sendo a diferença particularmente evidente na corrente de curto-circuito, que tem um valor muito reduzido, e na corrente do LED, onde se constata a inexistência de um pico de corrente no momento do curto-circuito. Considera-se, assim, o cenário de melhor desempenho do sistema de proteção.

Conclusão

As micro-redes DC encontram-se em constante desenvolvimento, sendo evidente o recente aumento do nível de incidência da investigação nessa área. Uma das motivações que leva a que isso aconteça é o desenvolvimento das tecnologias de eletrônica de potência, que apresentam um impacto significativo. Por outro lado, a proteção de micro-redes DC assume-se enquanto uma das áreas mais desafiantes.

Esta dissertação explora as tecnologias de proteção de circuitos DC. Foram apresentados dispositivos e sistemas de proteção, assim como dados de simulações e de ensaios experimentais de um novo sistema de proteção. Os resultados obtidos estão de acordo com os resultados esperados, revelando a efetividade na proteção do restante circuito. Em comparação com o estado da arte, o sistema de proteção proposto tem a vantagem de ser de simples implementação e eficaz no que concerne às falhas de curto-circuitos.

É de salientar que a adoção de um varistor de tensão inferior pode ajudar a melhorar a resposta do sistema de proteção, nesta aplicação em particular, ao permitir uma redução nos picos máximos de tensão e de corrente observados na proteção.

Referências

- [1] D. Salomonsson, L. Söder, and A. Sannino, “Protection of low-voltage DC microgrids,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1045–1053, July 2009.
- [2] R. M. Cuzner and G. Venkataramanan, “The status of DC micro-grid protection,” *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008, pp. 1–8.
- [3] F. Bento, “Fault Tolerant DC-DC Converters,” Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, 2016.
- [4] M. Farhadi and O. A. Mohammed, “Protection of multi-terminal and distributed DC systems: Design challenges and techniques,” *Electric Power Systems Research*, vol. 143, pp. 715–727, 2017.
- [5] D. Salomonsson and A. Sannino, “Centralized AC/DC power conversion for electronic loads in a low-voltage dc power system,” *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2006, pp. 1–7.
- [6] J. P. Barton and D. G. Infield, “Intermittent Renewable Energy,” vol. 19, no. 2, pp. 441–448, 2004.
- [7] A. Ansaari, “Hybrid Circuit Breaker Analysis for DC Applications,” Dissertação de Mestrado, Delft University of Technology, 2019.
- [8] S. Augustine, J. E. Quiroz, M. J. Reno, and S. Brahma, “DC Microgrid Protection : Review and Challenges”, Sandia National Laboratories, Aug. 2018.
- [9] S. Fletcher, P. Norman, and G. Burt, “Fault detection and location in DC systems from initial di/dt measurement,” *Euro Tech Con Conference*, 2012, pp. 1–14.
- [10] D. K. J. S. Jayamaha, N. W. A. Lidula, and A. D. Rajapakse, “Protection and grounding methods in DC microgrids: Comprehensive review and analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120 , p. 1-21, 2020.
- [11] J. Do Park and J. Candelaria, “Fault detection and isolation in low-voltage dc-bus microgrid system,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 779–787, April 2013.
- [12] S. Beheshtaein, R. M. Cuzner, M. Forouzesh, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero, “DC Microgrid Protection: A Comprehensive Review,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics (Early Access)*.
- [13] R. M. Kamel, A. Chaouachi, and K. Nagasaka, “Design and Testing of Three Earthing Systems for Micro-Grid Protection during the Islanding Mode,” *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 1, no. 3, pp. 132–142, 2010.
- [14] A. Plesca, “Numerical Analysis of Thermal Behaviour of DC Fuse,” *Energies*, vol. 13, no. 14, p. 1-17, 2020.

- [15] K. J. Shea and D. J. Rush, “Nanoscale molecularly imprinted polymers and method thereof” United States Patent, no. 54, 2000.
- [16] Z. Xu, H. Xiao, and Y. Xu, “Two basic ways to realise DC circuit breakers,” *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 16, pp. 3098–3105, 2019.
- [17] Z. J. Shen, Z. Miao, and A. M. Roshandeh, “Solid state circuit breakers for DC microgrids: Current status and future trends,” *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pp. 228–233, 2015.
- [18] Z. Miao, G. Sabui, A. M. Roshandeh, and Z. J. Shen, “Design and Analysis of DC Solid-State Circuit Breakers Using SiC JFETs,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 3, pp. 863–873, Sept. 2016.
- [19] A. Shukla and G. D. Demetriades, “A Survey on Hybrid Circuit-Breaker Topologies,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 2, pp. 627–641, April 2015.
- [20] M. Wang, M. Abedrabbo, W. Leterme, D. Van Hertem, C. Spallarossa, S. Oukaili, I. Grammatikos, and K. Kuroda, “A Review on AC and DC Protection Equipment and Technologies : Towards Multivendor Solution,” *Proc. Cigre 2017 Canada*, 2017, pp. 1–11.
- [21] Y. Tang, J. L. Duarte, R. P. P. Smeets, T. E. Motoasca, and E. A. Lomonova, “Multi-stage DC hybrid switch with slow switching,” *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2011, pp. 1462–1467.

Apêndice

Na implementação do modelo de simulação do sistema de proteção DC, foram considerados os parâmetros apresentados a seguir.

Tabela A.1: Parâmetros da proteção.

Resistência da proteção	600Ω
-------------------------	--------------

Tabela A.2: Parâmetros do IGBT principal.

R_{on}	$1 m\Omega$
L_{on}	$0 H$
V_f	$1 V$
R_s	inf
C_s	$0 F$

Tabela A.3: Parâmetros do IGBT 2.

R_{on}	$1 m\Omega$
R_s	$100 k\Omega$
C_s	inf