



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

GUILHERME DANTAS DE FREITAS

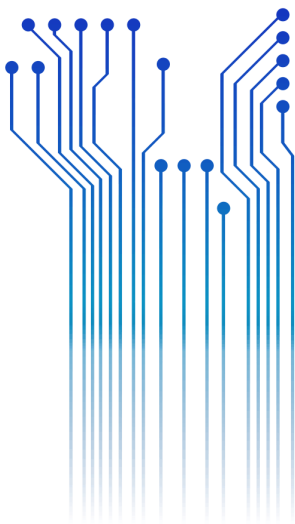


Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

RELATÓRIO DE ESTÁGIO INTEGRADO  
*SUPERGRID INSTITUTE*



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2016

GUILHERME DANTAS DE FREITAS

SUPERGRID INSTITUTE

*Relatório de Estágio Integrado submetido à coordenação do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Orientador:

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande  
2016

GUILHERME DANTAS DE FREITAS

SUPERGRID INSTITUTE

*Relatório de Estágio Integrado submetido à coordenação do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

## AGRADECIMENTOS

Os primeiros que passam por minha mente a agradecer são meus pais, pelo apoio e principalmente pela perseverança e valores passados. Dentre estes valores está a capacidade de agradecer a todos aqueles que nos acompanham em nossos trajetos.

Gostaria de agradecer aos professores que tive na UFCG pelo conhecimento transmitido em especial ao orientador deste relatório, o Prof. Tarso Vilela.

Queria ressaltar o quanto me sinto afortunado por fazer parte de um departamento tão eficiente quanto o DEE da UFCG. Gostaria também de agradecer meus amigos do período 11.1 em especial aos do grupo de “WhatsApp JackDaniels” porque, se tenho certeza de uma coisa é de que, sem os encontros para fazer relatório, provas estudadas juntas, horas de discussão e as informações compartilhadas, este trabalho não existiria. Também a meu amigo Bruno Sucupira, e especialmente minha namorada Lara Jeich pela cumplicidade, amizade e apoio sempre.

A todos que infelizmente não pude citar pelo espaço e memória limitados, meus sinceros agradecimentos.

# RESUMO

O presente relatório descreve as atividades realizadas durante o estágio no *SuperGrid Intitute* localizado em Villeurbanne na França que ocorreu durante participação do aluno no programa de intercâmbio BRAFITEC. Os seis meses de atividades começaram com o estagiário realizando um estado de arte de estratégias e métodos de proteções usadas em transmissões em corrente contínua e alta tensão. Os estudos serviram como base para que o estagiário desenvolvesse uma estratégia de proteção seletiva para redes multiterminais em alta tensão em corrente contínua baseada na derivada de tensão. Um estudo sobre o impacto de limitadores indutivos de corrente de falta nesse tipo de redes também esteve incluído nas atividades do estagiário.

**Palavras-chave:** MTDC, HVDC, proteção, supergrid, transmissão de energia.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Programas de pesquisa dentro do instituto SuperGrid e subprogramas dentro do Programa 1.....	11
Figura 2 – Exemplos de projetos para redes HVDC interconectando fontes de energias renováveis.....	13
Figura 3 – Proteção de zonas para um polo de uma subestação usando conversores comutados por linha. ....	18
Figura 4 – Atuação da proteção em caso de falta numa linha para diferentes estratégias de proteção. ....	21
Figura 5 – Tela inicial para início de um projeto no EMTP-RV.....	23
Figura 6 – Arquitetura de rede utilizada durante simulações. ....	24
Figura 7 – Símbolo no EMTP-RV para o conversor utilizado nas simulações.....	24
Figura 8 – Configurações do conversor MMC usado durante as simulações. ....	25
Figura 9 – Estrutura básica de cabos isolados .....	26
Figura 10 – Equipamento de proteção colocado em cada terminal de todos os cabos...	27
Figura 11 – Linha entre conversores 1 e 3 e posições dos casos de faltas referenciados nesse trabalho. ....	28
Figura 12 – Corrente de curto-circuito para uma falta logo após disjuntor 13 para diferentes valores de indutâncias.....	30
Figura 14 – Diagrama de blocos com exemplo de algoritmo de proteção derivativa. ...	33
Figura 15 – Representação da margem de proteção e suas fronteiras. ....	34
Figura 16 – Tamanho da margem de proteção para diferentes valores de indutância dos limitadores indutivos de corrente de falta. ....	34
Figura 17 – Tensão e correntes medidos em pontos da rede para caso de falta F4.....	36
Figura 18 – Diagrama de blocos seguido na identificação de uma falta. ....	37
Figura 19 – Diagrama de bloco para ações a serem tomadas após o comando de abertura do DCCB. ....	38
Figura 20 – Equipamento utilizado pelo sistema de proteção localizado em cada terminal das linhas de transmissão.....	39
Figura 21 – Exemplo de backup em caso de falha na abertura de um disjuntor durante isolamento de uma falta. ....	39

Figura 22 – Diagrama de blocos para ações a serem seguidas pelo sistema de proteção em caso de falha na abertura de um disjuntor durante a supressão de uma falta. .... 40

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 – Cronograma do estágio.....	15
Tabela 1 – Parâmetros do cabo isolado usado nas simulações.....	26
Tabela 2 – Valores do pico de derivada de tensão medido durante casos de faltas $F_{1,2,3}$ para diferentes valores de indutância limitadora. ....	32



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DCCB	<i>Direct Current Circuit Breaker</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
MMC	<i>Modular Multi-level Converter</i>
MTDC	<i>Multi-terminal Direct Current</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>10</b>
1.1	O Instituto SuperGrid .....	10
1.2	Motivação.....	11
1.3	Objetivos .....	14
1.4	Cronograma.....	14
<b>2</b>	<b>Embasamento Teórico .....</b>	<b>16</b>
2.1	Proteção em sistemas HVDC .....	16
2.2	Detecção e identificação de faltas .....	18
2.3	Estratégias de proteção em redes HVDC .....	19
<b>3</b>	<b>Atividades Realizadas.....</b>	<b>22</b>
3.1	Modelagem dos Componentes .....	22
3.1.1	O software EMTP-RV .....	22
3.1.2	Rede HVDC.....	23
3.1.3	Conversores .....	24
3.1.4	Cabos isolados .....	25
3.1.5	Rede CA .....	27
3.1.6	Modelo do equipamento de proteção .....	27
3.1.7	Casos de falta.....	28
3.2	Impacto de Limitadores Indutivos de Corrente de Falta na Proteção Estudada	29
3.2.1	Redução da corrente de falta .....	30
3.2.2	Impacto na taxa de variação de tensão .....	31
3.3	Proteção Derivativa de Tensão em Redes HVDC.....	32
3.3.1	Margem de proteção .....	33
3.3.2	Associação com outras proteções .....	35
3.3.3	Simulação .....	35
3.4	Descrição Conceitual da Estratégia de Proteção .....	37
3.4.1	Proteção primária.....	37
3.4.2	Proteção de retaguarda.....	38

3.4.3	Teste de supressão de falta e de seletividade.....	40
<b>4</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>41</b>
	<b>Referências .....</b>	<b>42</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A disciplina de Estágio Integrado é ofertada aos estudantes do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande com o intuito de fazer o aluno concluinte realizar atividades em empresas, e dessa forma prepará-lo melhor para o mercado de trabalho. O presente relatório exhibe as atividades desenvolvidas pelo estagiário Guilherme Dantas de Freitas durante o estágio realizado no Instituto SuperGrid em Villeurbanne, França. O estágio aconteceu no período entre 22 de fevereiro de 2016 e 22 de agosto de 2016 totalizando 880 horas.

Por motivos de acordos de confidencialidade para proteção de patentes e propriedades intelectuais do Instituto SuperGrid, o relatório não expõe a integridade do trabalho desenvolvido.

## 1.1 O INSTITUTO SUPERGRID

O Instituto SuperGrid é um Instituto pela Transição Energética (ITE) situado em Villeurbanne na França. Estes institutos são frutos do *Investissements d’Avenir*, um programa de investimentos em tecnologia feito pelo governo francês. Os ITEs são plataformas interdisciplinares no domínio de energias não fósseis; estas plataformas financiadas por investidores públicos e privados unem indústria e instituições de pesquisa públicas com o objetivo de desenvolvimento e criação de tecnologias em seus respectivos domínios de atividade. O instituto SuperGrid, conta com ajuda pública de 15 milhões de euros por ano até 2020, ano em que, segundo os planos, o instituto deve ser auto suficiente por meio da venda de propriedade intelectual. No alcance de seus objetivos, SuperGrid conta com a ajuda de parceiros empresariais como General Electric, Alstom, EDF, entre outros; e de laboratórios de pesquisas e universidades como G2Elab, Laboratório Ampère, INSA de Lyon, e a universidade de Grenoble INP.

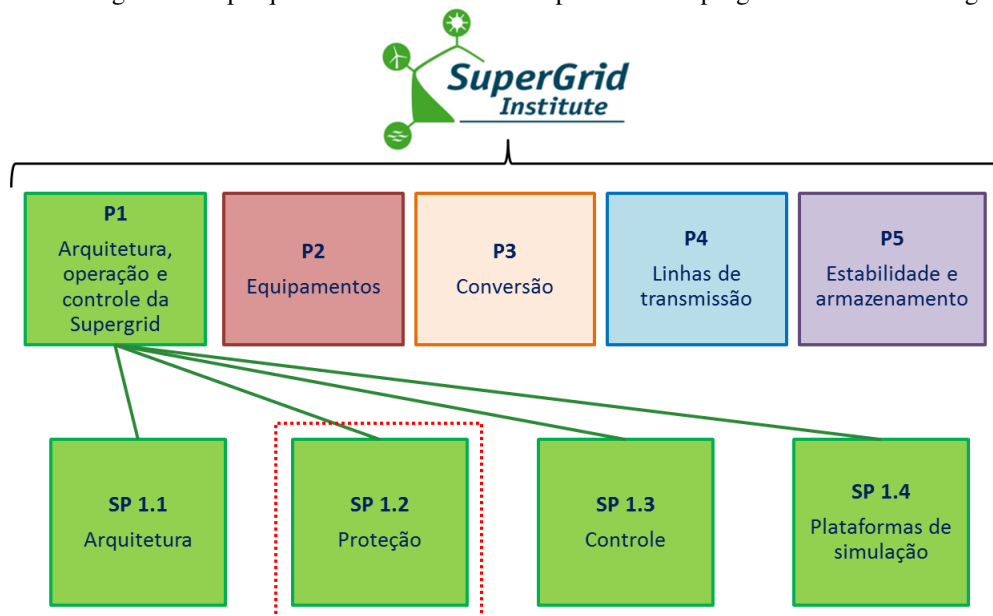
O objetivo do Instituto é desenvolver tecnologias para tornar possível a construção da Supergrid, uma rede malhada de transmissão usando alta tensão em corrente contínua. A rede ligará grandes produtores de energia renovável por toda Europa e servirá para transporte de grandes montantes de energia pelo continente e permitirá assegurar disponibilidade e segurança energética na área coberta.

O Instituto SuperGrid é dividido em cinco programas de pesquisa distintos:

- Programa 1: Arquitetura, operação e controle da Supergrid;
- Programa 2: Tecnologias de interrupção, isolamento e medição;
- Programa 3: Tecnologias de conversão de energia
- Programa 4: Cabos e linhas aéreas
- Programa 5: Estabilidade e armazenamento

O estágio ocorreu dentro do Programa 1. Este por sua vez é dividido em quatro subprogramas: arquitetura, proteção, controle e entrega, e por fim, plataformas de simulação. O estágio ocorreu dentro do subprograma de proteção. A Figura 1 mostra a organização do Instituto em programas e os subprogramas dentro do Programa 1.

Figura 1 – Programas de pesquisa dentro do instituto SuperGrid e subprogramas dentro do Programa 1.



Fonte: o próprio autor

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Com a entrada de fontes de energias renováveis na matriz energética dos países, a constância de energia disponível será o maior problema segundo Chaudhuri (2014, p.3). Para garantir a segurança no fornecimento, uma rede que se estenda por uma vasta região pode ser a solução para essa flutuação na produção. Uma interligação de unidades geradoras distantes aproveita os diferentes picos de produção de cada unidade. Esses

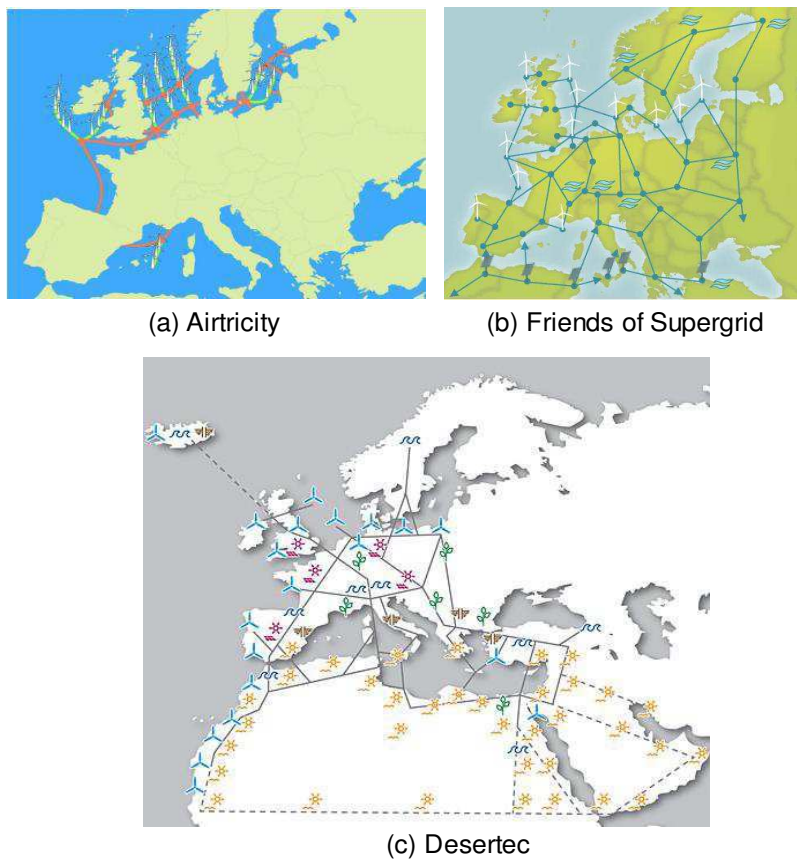
picos normalmente são defasados devido a diferenças sazonais, de fuso-horário, latitude e outros diversos fatores que podem gerar heterogeneidade de produção entre unidades geradoras.

Vários projetos visando este tipo de estrutura estão ganhando espaço em debates sobre a inserção de energias renováveis na matriz energética. Projetos como os expostos na Figura 2, aspiram uma interligação entre diversas unidades geradoras espalhadas por diversos países. Estes projetos clamam que o aumento deste tipo de estrutura é o caminho mais eficiente para alcançar a independência dos combustíveis fósseis na geração de energia elétrica. Um ponto em comum entre todos esses projetos é a afirmação de que o uso da transmissão HVDC (*High Voltage Direct Current*) é primordial para a viabilidade do projeto.

A transmissão usando alta tensão em corrente contínua apresenta inúmeras vantagens não apenas em projetos complexos como os presentes na Figura 2, mas também para transmissões de energia entre dois pontos, sendo muitas vezes a melhor solução para alimentação de cargas distantes das unidades geradoras. A ligação entre duas redes dessincronizadas também pode ser possível usando corrente contínua, assim como um controle mais fácil e bidirecional do fluxo de potência entre essas redes.

A evolução vivenciada pela tecnologia de transmissão HVDC nas últimas décadas, a solução que essa tecnologia de transmissão representa para o aumento da eficiência da transmissão de energia, utilização de energias renováveis e o reduzido impacto ambiental foram os motivadores deste trabalho.

Figura 2 – Exemplos de projetos para redes HVDC interconectando fontes de energias renováveis.



Fontes: (a) <http://www.maritimejournal.com/news101>, acessado em 18/06/2016.

(b) <http://www.friendsofthesupergrid.eu>, acessado em 18/06/2016.

(c) <http://www.desertec.org>, acessado em 18/06/2016.

### 1.3 OBJETIVOS

A finalidade deste estágio é integrar o saber acadêmico à prática profissional, incentivando o reconhecimento de habilidades e competências adquiridas dentro e fora do ambiente escolar. O estágio é obrigatório para a integralização da grade curricular requerida pela UFCG para o curso de Engenharia Elétrica.

É também objetivo deste estágio que o estagiário realize estudos e compreenda o estado de arte da proteção derivativa de tensão em redes multiterminais utilizando alta tensão em corrente contínua. Os estudos realizados pelo estagiário servem como base para implementação dessa proteção com uma filosofia seletiva; em uma rede triangular, na qual as subestações estão ligadas entre si por cabos e disjuntores CC híbridos proativos são utilizados. Como atividades-chave do estágio destacam-se as seguintes análises:

- Estudo do impacto de limitadores de corrente indutivos no comportamento do sistema durante a presença de uma falta;
- Estudo do impacto de limitadores de corrente indutivos na proteção derivativa de tensão. Uso do *software* EMTP-RV para verificação por meio de simulações digitais da validade da proteção na presença desses elementos;
- Desenvolvimento primário de uma estratégia de proteção seletiva para o modelo de rede. A estratégia deve tomar como proteção primária a proteção derivativa de tensão;
- Descrição conceitual da proteção de retaguarda para estratégia de proteção proposta.

### 1.4 CRONOGRAMA

O estágio teve início no dia 22 de fevereiro de 2016 e teve 6 meses de duração. A carga horária foi de 35 horas por semana representando um total de 880 horas de trabalho. O cronograma apresentado no Quadro 1 contém as principais atividades desenvolvidas, e o respectivo mês durante o estágio no qual elas foram desenvolvidas.



Quadro 1 – Cronograma do estágio.

Atividade	1	2	3	4	5	6
Estudo do estado da arte de estratégias e métodos de proteção aplicados a transmissões HVDC	x					
Estudo do impacto de limitadores de corrente indutivos no comportamento do sistema durante a presença de um curto-circuito do lado CC		x				
Escolha do algoritmo de proteção para a proteção primária do sistema			x			
Estudo da associação da proteção primária com outros métodos de proteção			x	x		
Determinar proteção de retaguarda em caso de falhas na proteção primária				x	x	
Validação e estudo das proposições feitas por meio de simulações no <i>software</i> EMTP-RV		x	x	x	x	
Confecção do relatório e documentação dos resultados						x

Fonte: o próprio autor.

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Antes do início da descrição das atividades realizadas é necessário uma introdução sobre o conteúdo que foi tratado durante o estágio.

O estágio trata de uma proteção para sistemas HVDC multiterminais. Este capítulo introduz alguns conceitos no assunto, entre eles, o conceito de estratégia de proteção seletiva, que foi a estratégia de proteção usada no projeto desenvolvido.

### 2.1 PROTEÇÃO EM SISTEMAS HVDC

A proteção em sistemas CC tem especificações bem diferentes da proteção para sistemas CA devido a diferença de comportamento desses dois sistemas na ocorrência de uma falta. O ponto mais divergente entre a proteção desses sistemas é o tempo requerido para supressão da falta; tipicamente para uma rede HVDC usando cabos, a falta deve ser eliminada em até 5 milissegundos para não prejudicar as estações até 200 km de distância da falta, segundo Häfner (2011).

Na proteção de uma linha HVDC ou de uma rede HVDC diferentes métodos podem ser utilizados. Leterme (2015) afirma que seja qual for a escolha optada durante o projeto os seguintes requerimentos básicos devem ser respeitados:

- **Confiabilidade:** A confiabilidade de uma proteção inclui diversos pontos, entre eles, a precisão de modelos utilizados durante estudos do projeto, a taxa de falha dos equipamentos, as limitações dos métodos de detecção, etc.
- **Velocidade:** Devido à elevada taxa de crescimento da corrente de falta em CC, a proteção deve agir com uma velocidade maior que em sistemas CA. A proteção deve atuar rapidamente para evitar danos aos equipamentos. Normalmente em sistemas CC este tempo para supressão da falta é de alguns milissegundos;
- **Robustez:** O sistema de proteção deve ser apto para operar mesmo em situações de degradação leve do equipamento e em casos de faltas não simulados durante os estudos do projeto;
- **Estabilidade:** A proteção não deve atuar desnecessariamente;

- Sensibilidade: A proteção tem que ser capaz de detectar qualquer defeito que possa afetar a transmissão. Para alcançar este objetivo, zonas de proteção cobrindo toda a rede são estabelecidas. A utilização de vários critérios de detecção também aumenta a sensibilidade da proteção;

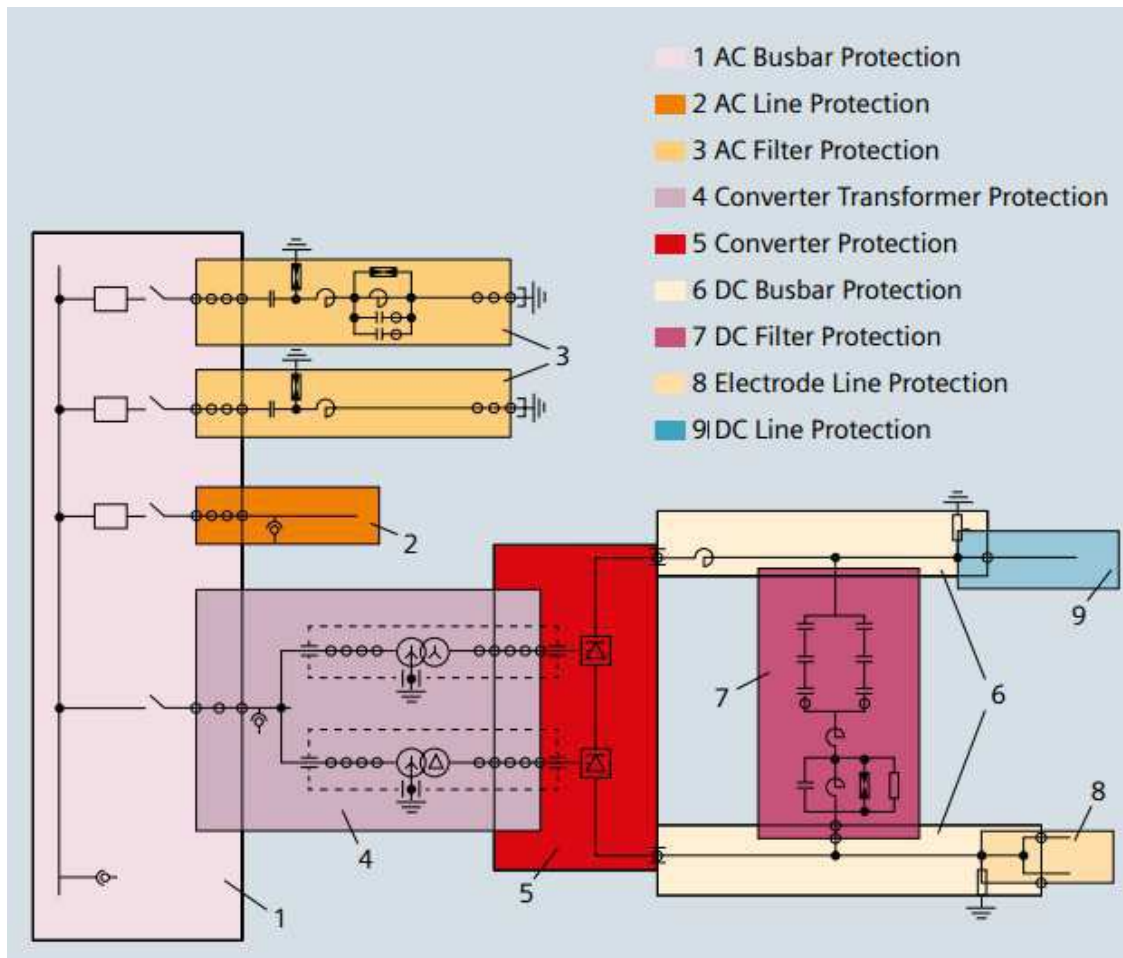
Existem diversos métodos de detecção de faltas e cada um deles têm seus pontos fortes assim como suas limitações. Essa diversidade na gama de casos protegidos por cada proteção é aproveitada na associações de proteções. Diversas proteções com diferentes níveis de sensibilidades para cada tipo de falta podem ser associadas assim, os pontos fortes de uma podem compensar os fracos de outra.

De acordo com o texto da SIEMENS (2011), o sistema de proteção de uma transmissão em HVDC pode ser dividido em duas áreas. A área relacionada com a proteção CC, englobando a proteção dos conversores e seus transformadores, dos barramentos, dos filtros CC, dos eletrodos e da linha de transmissão. E a proteção relacionada com a parte CA da transmissão, que consiste das linhas, barramentos, e transformadores CA. A Figura 3 apresenta um exemplo dessa divisão de proteção em um diagrama elétrico de um polo de uma transmissão em HVDC usando conversores comutados por linha.

A proteção de uma rede em HVDC tem critérios adicionais a serem levados em consideração quando comparada à proteção de uma transmissão HVDC ponto-a-ponto. Uma falta em um sistema malhado não significa o comprometimento de toda rede. De fato, para a concepção de uma grande rede interligada em HVDC, um dos maiores desafios é justamente, como isolar apenas o elemento defeituoso antes que todo o sistema seja comprometido.

Na ocorrência de uma falta em transmissões ponto a ponto, apenas a detecção e identificação do polo defeituoso no caso de sistemas bipolares é necessária. Por outro lado, a proteção de redes em HVDC é mais elaborada, envolvendo métodos de identificação do componente em defeito mais complexos e até filosofias de proteção que representam a maneira escolhida para suprimir o defeito e reestabelecer a entrega de potência.

Figura 3 – Proteção de zonas para um polo de uma subestação usando conversores comutados por linha.



Fonte: SIEMENS, 2011, p. 42.

## 2.2 DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE FALTAS

Detecção e identificação de faltas são conceitos parecidos que diferem na quantidade de informação que contém. Os métodos de detecção de faltas têm que ser capazes de fornecer uma informação confiável sobre a ocorrência de uma falta dentro de sua área de proteção que, pode englobar diversos equipamentos ou até toda a rede, no caso de uma rede HVDC pequena. Por outro lado, os métodos de identificação de faltas contêm uma informação a mais, o equipamento no qual o defeito está localizado.

Segundo Buigues (2016) os principais métodos de detecção e identificação de falta são:

- Sobrecorrente e Subtensão;
- Corrente diferencial;

- Proteção derivativa;
- Proteção baseada em ondas viajantes;

## 2.3 ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO EM REDES HVDC

As estratégias de proteção definem como será dada a eliminação da parte defeituosa em redes MTDC (*Multi-terminal Direct Current*). Essas estratégias estabelecem os equipamentos e coordenação desses equipamentos na supressão da corrente de curto-circuito. A classificação dessas estratégias, também chamada as vezes de filosofias de proteção, difere entre autores. Essa diferença é observada ao comparar os trabalhos de Descloux (2013), Leterme (2015) e Tang (2003). Neste trabalho, os conceitos usados para classificar as estratégias, serão uma mesclagem dos conceitos usados nos trabalhos supracitados.

As estratégias de proteção podem ser divididas em:

- Seletivas: o fluxo de potência é interrompido apenas no elemento defeituoso do sistema;
- *Open-grid*: o fluxo de potência é interrompido em toda a rede e depois do elemento defeituoso ser isolado ele é retomado na parte sã da rede;
- *Grid-splitting*: a rede é separada em zonas menores que lidarão com a falta independentemente;

As estratégias seletivas exigem o uso de disjuntores CC em cada terminal das linhas, por esse motivo, essas estratégias são chamadas de estratégias de auto uso de disjuntores CC por Descloux (2013). O intuito das estratégias seletivas é diminuir ao máximo o impacto da falta na alimentação das cargas. Na filosofia seletiva de proteção os disjuntores têm a abertura comandada somente após a identificação do componente defeituoso e, apenas os disjuntores requeridos na isolação deste componente atuarão. Após a atuação dos disjuntores, um novo fluxo de potência é atingido na parte sã da rede e a potência continua sendo entregue às cargas.

O desafio na aplicação de estratégias seletivas é a necessidade de algoritmos de proteção capazes de identificar a falta rapidamente. A corrente de curto-circuito continuará aumentando até que o algoritmo conclua a identificação do componente

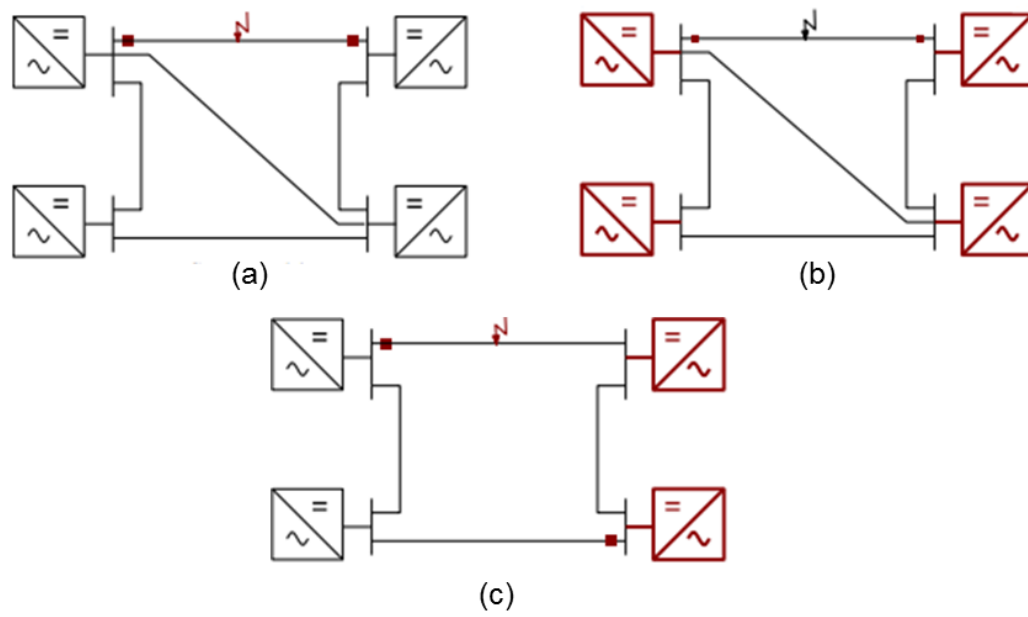
defeituoso. Em outras palavras, além de requerer um elevado número de disjuntores CC, os disjuntores usados necessitarão de uma capacidade de interrupção maior, encarecendo muito a estratégia.

As estratégias *open-grid* não esperam a identificação da falta para começar a suprimir a corrente de curto-circuito. Logo que uma falta é detectada, não importa a localização, todo o fluxo de potência será interrompido. Essa interrupção pode dar-se de várias maneiras: usando disjuntores CC nas saídas dos conversores ou disjuntores CA na entrada, pelo uso de conversores com capacidade de bloqueio da corrente de falta, ou até mesmo disjuntores CC em cada terminal dos cabos como na estratégia anterior. Tratando-se da última opção, a capacidade de interrupção dos disjuntores será menor que a daqueles usados em uma estratégia seletiva, uma vez que não se perderá tempo com identificação e a corrente de curto-circuito estará em um nível menor no momento da interrupção. O problema dessa estratégia é que, para retomar novamente o fluxo de potência na rede CC leva tempo, e se conectada a uma rede CA de estabilidade dependente da potência CC, a indisponibilidade da rede CC pode ocasionar perda de estabilidade na rede CA.

Estratégias *grid-splitting* tratam de dividir a rede HVDC em zonas para que essas lidem com as faltas independentemente. A divisão ocorre de maneira que a ocorrência de falta em uma zona não deve prejudicar as outras zonas. As estratégias *grid-splitting* se diferenciam pelo mecanismo utilizado para particionar a rede em zonas na ocorrência de falta.

A Figura 4 expõe diferentes cenários para atuação da proteção em caso de falta em uma linha. Em (a) apenas o mínimo de disjuntores necessários atuam, caracterizando uma estratégia seletiva. Em (b) a contribuição que viria da rede CA para a corrente de falta é interrompida por conversores capacitados para tal (conversores VSC usando ponte completa) e a isolação da linha é feita com o uso de equipamentos seccionadores mais simples, ou seja, uma estratégia *open grid* com uso de conversores com capacidade de bloqueio da corrente de falta. Por fim, em (c) a rede foi dividida em 2 partes e neste caso a parte na qual estava a falta fazia uso de uma estratégia *open-grid* igual da Figura 4 (b).

Figura 4 – Atuação da proteção em caso de falta numa linha para diferentes estratégias de proteção.



(a) Seletiva (b) Open-grid (c) Grid-splitting. Os elementos em vermelho são os envolvidos na supressão da corrente de falta.

Fonte: adaptada de Leterme, 2015.

## 3 ATIVIDADES REALIZADAS

As atividades realizadas pelo estagiário podem ser encontradas no Quadro 1. O objetivo principal é a proposição e configuração de uma proteção seletiva para uma rede HVDC de três terminais. Para tornar mais simples o entendimento, este capítulo apresentará apenas os passos seguidos na configuração da proteção do cabo isolado entre os conversores 1 e 3 presente no terminal da subestação do conversor 1 na Figura 6.

### 3.1 MODELAGEM DOS COMPONENTES

Para verificação das proposições feitas e análise do comportamento do sistema foi utilizado o *software* EMTP-RV. Este capítulo apresenta de forma sucinta os modelos dos principais componentes da rede simulada. A configuração dos parâmetros dos componentes foi realizada pelo estagiário a partir de informações e estudos feitos pelo mesmo.

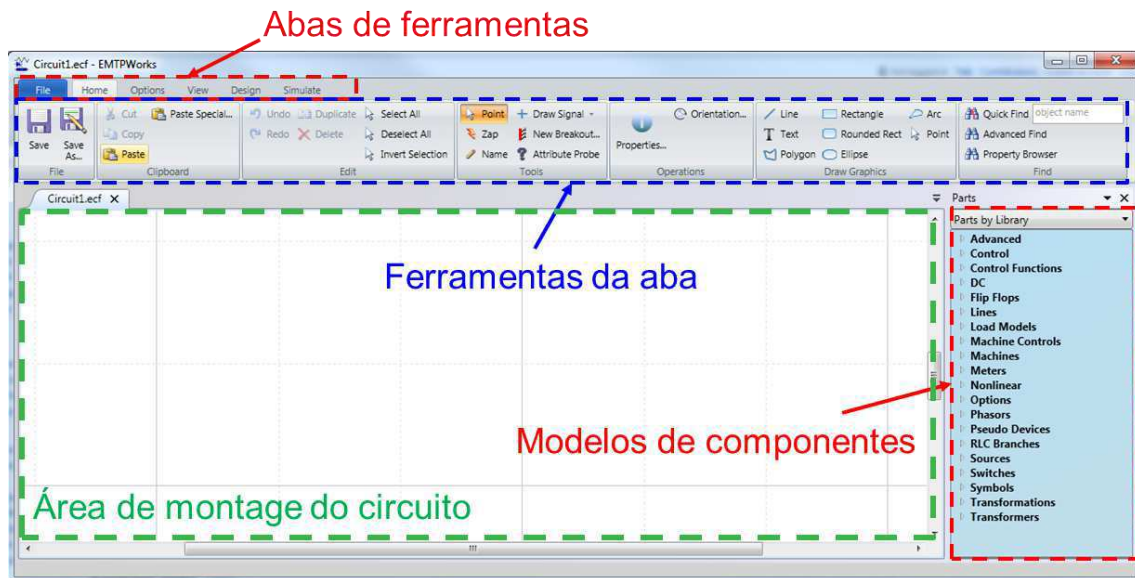
#### 3.1.1 O *SOFTWARE* EMTP-RV

O software usado pelo estagiário durante os estudos foi o EMTP-RV. Este é um software profissional que conta com ferramentas usadas na análise e simulação de sistemas de potência, o programa leva em conta também os transitórios eletromagnéticos. O *software* é aconselhado para uma ampla gama de estudo de sistemas de potência; desde aspectos ligados ao projeto de sistemas à resolução de problemas ligados a falhas desconhecidas durante funcionamento dos mesmos.

A Figura 5 apresenta a tela inicial de um projeto no EMTP-RV. A direita está a lista com os grupos de componentes disponíveis para utilização no projeto. As abas de ferramentas na parte superior da janela classificam por funcionalidade as ferramentas disponibilizadas pelo *software*. Abaixo dessas abas são exibidas as ferramentas da aba selecionada.



Figura 5 – Tela inicial para início de um projeto no EMTP-RV.



Fonte: o próprio autor.

### 3.1.2 REDE HVDC

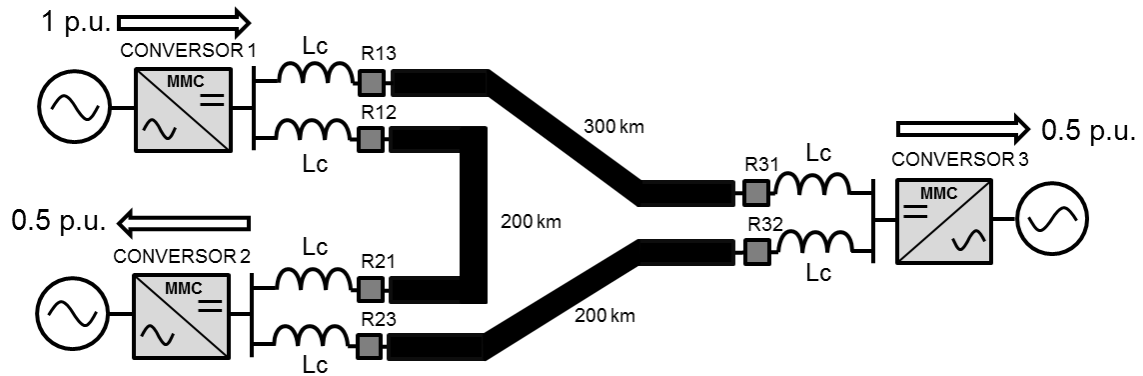
Até hoje a transmissão em alta tensão em corrente contínua é usada somente em transmissões ponto-a-ponto. Isso ocorre devido a existência de inúmeros desafios a serem resolvidos antes da construção de uma rede multiterminal usando essa tecnologia. O trabalho toma como modelo de estudo uma rede multiterminal com três terminais. A arquitetura em triângulo escolhida pelo estagiário é utilizada para diminuir a quantidade de potência não entregue. Uma conexão radial entre as estações implicaria perda de uma estação em caso de ocorrência de falta em um cabo. Por outro lado, na configuração em triângulo, desde que os equipamentos sejam dimensionados para tal, um caminho secundário pode ser usado para continuar transferindo potência entre as estações em caso da perda de uma linha.

Redes triangulares em HVDC podem também ser consideradas como células para a formação de uma complexa rede MTDC. A Figura 6 apresenta a configuração de rede usada pelo estagiário nas simulações, o posicionamento dos componentes e o fluxo de potência na mesma.

Os indutores  $L_c$  são os limitadores indutivos usados tanto para limitar a corrente de falta como para tornar possível a utilização da derivada de tensão como forma seletiva de proteção. Os quadrados  $R_{ij}$  entre esses indutores e os cabos representam os

equipamentos de proteção que serão descritos posteriormente nesse mesmo capítulo. Também serão descritos os parâmetros utilizados para os conversores, cabos e rede CA.

Figura 6 – Arquitetura de rede utilizada durante simulações.



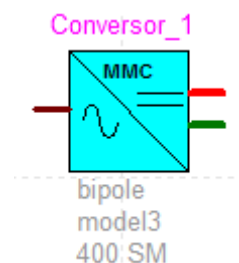
Fonte: o próprio autor.

### 3.1.3 CONVERSORES

No modelo de rede a ser utilizado existem três conversores. Entre eles, os conversores 2 e 3, realizam controle *droop* e o conversor 1 realiza controle de tensão. Essa configuração de controle foi escolhida pelo estagiário com base no trabalho de Spalarossa (2014), que afirma que o uso destes dois controles em uma rede multiterminal HVDC aumenta a confiabilidade e robustez da transmissão.

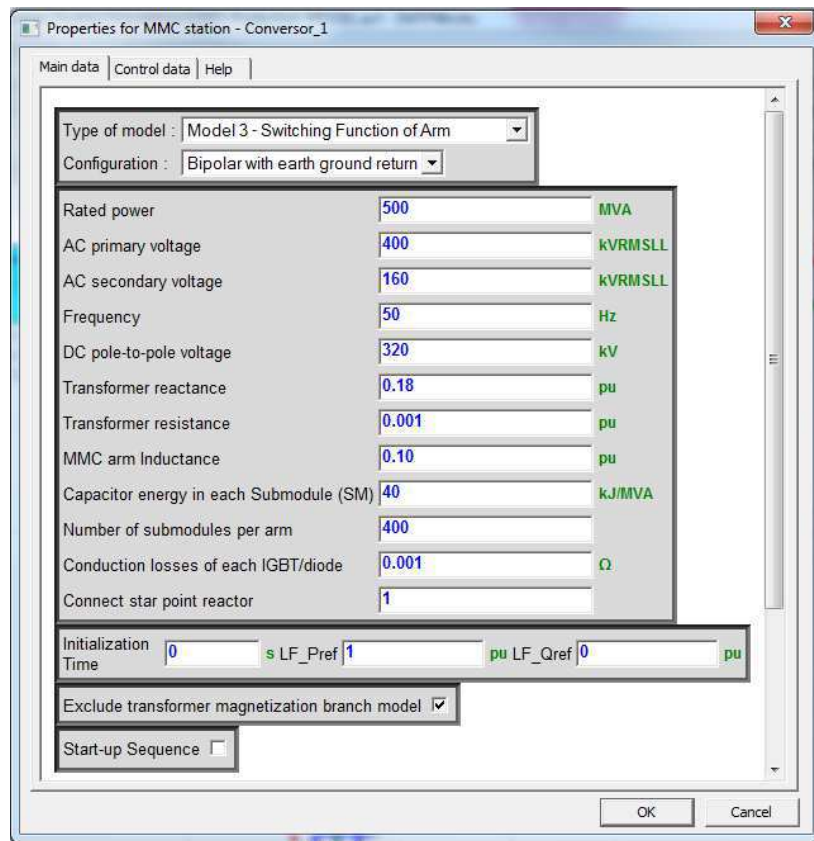
A Figura 7 contém o símbolo do conversor bipolar no EMTP-RV. Os parâmetros utilizados no modelo de conversores são expostos na Figura 8. A figura expõe a janela de propriedades do conversor que abre após duplo clique no símbolo.

Figura 7 – Símbolo no EMTP-RV para o conversor utilizado nas simulações.



Fonte: o próprio autor.

Figura 8 – Configurações do conversor MMC usado durante as simulações.



Fonte: o próprio autor.

### 3.1.4 CABOS ISOLADOS

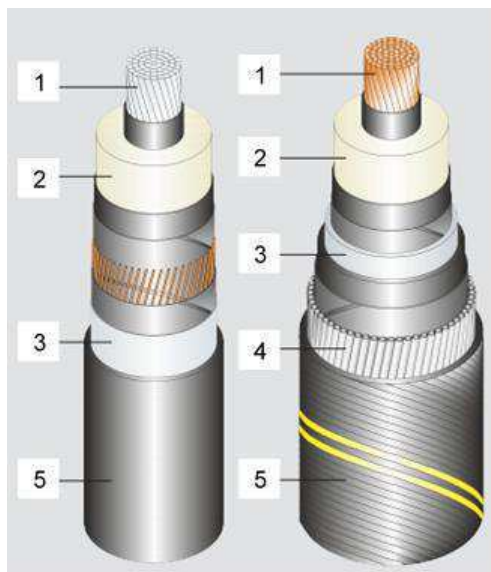
A potência no modelo é transmitida a partir de cabos isolados. Essa escolha feita pelo grupo de pesquisa deve-se aos seguintes fatos:

- Transmissão por meio de cabos isolados apresenta restrições maiores para a proteção devido a cargas acumuladas no cabo. Como a corrente de curto-circuito quando cabos isolados são utilizados é mais severa, considera-se que, se a proteção atuar de forma segura para esta escolha, atuará também quando linhas aéreas for a opção;
- Geradoras eólicas marítimas fazem usos de cabos para entrega de energia ao continente. Estas são as consideradas maiores beneficiárias e incentivadoras do desenvolvimento do HVDC;

Na Figura 9 está apresentada uma estrutura básica de um cabo subterrâneo e de um cabo submarino. O número 1 aponta o condutor, que pode ser de cobre ou alumínio. O número 2 indica a isolação, na figura um cabo com isolação XPLE é representado. Uma

lâmina de cobre ou de alumínio indicada por 3 serve de barreira contra água. Em cabos submarinos fitas absorventes são também usadas nessa camada para aumentar a estanqueidade do cabo. A armadura designada por 4 é presente apenas em cabos submarinos, esta camada serve para proteger contra corrosão ou qualquer degradação que o ambiente marítimo possa vir a causar. Por fim, um revestimento usando polietileno também fornece proteção contra agentes químicos e estabilidade mecânica.

Figura 9 – Estrutura básica de cabos isolados



Legenda: cabo subterrâneo (à esquerda) e submarino (à direita).  
Fonte: adaptada de ABB, 2015, p.4.

O modelo de cabo isolado escolhido para ser utilizado na rede simulada tem seus parâmetros expostos na Tabela 1. Três comprimentos de cabo foram usados durante as simulações: 300 km entre os conversores 1 e 3, 200 km entre conversores 1 e 2 e, entre os conversores 2 e 3, também 200 km.

Tabela 1 – Parâmetros do cabo isolado usado nas simulações.

<b>Tipo</b>	Núcleo único	<b>Resistividade</b>	<b>condutor 1</b>	17,2 nOhm/m
<b>Número de cabos</b>	2		<b>condutor 2</b>	28,3 nOhm/m
<b>Número de condutores por cabo</b>	2	<b>Permeabilidade relativa</b>		1
<b>Raio interno</b>	<b>condutor 1</b>	0	<b>Permeabilidade relativa do isolamento</b>	1
	<b>condutor 2</b>	56,9 mm		
<b>Raio externo</b>	<b>condutor 1</b>	32 mm	<b>Fator de perdas do isolamentos</b>	0,0004
	<b>condutor 2</b>	58,2 mm		

Fonte: o próprio autor.

### 3.1.5 REDE CA

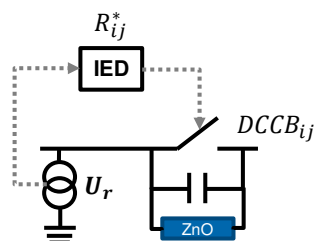
A rede CA é modelada nas simulações como uma fonte de tensão trifásica com neutro solidamente aterrado em série com uma impedância trifásica, esta representa a impedância da máquina e da linha de transmissão até a subestação conversora. O modelo de rede AC usado tem tensão nominal de 400 kV<sub>rms</sub> (entre fases), potência de curto circuito de 30.000MVA e coeficiente X/R igual a 10.

### 3.1.6 MODELO DO EQUIPAMENTO DE PROTEÇÃO

A ausência de passagem natural de corrente por zero em sistemas DC é o principal desafio na proteção desses sistemas. Também o rápido crescimento da corrente de curto-circuito CC impõe severas restrições temporais para a interrupção de corrente.

O objetivo do estágio é o desenvolvimento de uma estratégia de proteção que seja seletiva, ou seja, somente os disjuntores envolvidos na isolação do componente defeituoso serão comandados. Também, a proteção primária deve basear-se em medições locais, esta não deve necessitar de comunicação com outros terminais para tomar decisões sobre o comando dos disjuntores. Para tal feito, uma estrutura semelhante à da Figura 10 foi elaborada pelo estagiário para ser colocada entre os terminais de cada cabo e os limitadores indutivos. Sua localização é representada na Figura 6 por  $R_{ij}$ . O conjunto de equipamentos representado na Figura 10 é composto por um disjuntor de corrente contínua - *Direct Current Circuit Breaker*, DCCB – denominado  $DCCB_{ij}$ , um dispositivo de medida de tensão polo-terra e relé digital capaz de calcular a derivada do sinal de tensão medido.

Figura 10 – Equipamento de proteção colocado em cada terminal de todos os cabos.



Fonte: o próprio autor.

O modelo de disjuntor utilizado é composto por uma chave controlada em paralelo com um capacitor de  $20\mu F$  e um varistor ZnO de tensão nominal 1,6 p.u. Para deixar o

modelo com o mesmo tempo de atuação que o discutido por Callavik (2013), foi inserido um atraso de 3 ms entre a abertura da chave e a recepção do comando para tal pelo disjuntor.

A derivada da medida de tensão foi calculada usando uma função própria para tal e disponível no *software* de simulação. Não existe ruído na medida nem filtragem no cálculo. O passo de tempo usado foi de 50 microssegundos. O passo de tempo escolhido foi achado pelo estagiário como um compromisso entre tempo de simulação e a capacidade de captar os transitórios desejados.

O equipamento de proteção usado dita as restrições temporais e de corrente a ser interrompida pela proteção. Neste trabalho a proteção primária será capaz de suprimir a corrente de curto circuito em até 5 ms (estima-se 2 ms para identificação e 3 ms para abertura do disjuntor). A capacidade de interrupção considerada dos disjuntores é 15 kA.

### 3.1.7 CASOS DE FALTA

Durante o estágio, diversos casos de falta foram analisados pelo estagiário porém, apenas alguns deles são representativos para a proteção. Neste relatório apenas quatro casos de faltas serão referenciados, isso deve-se ao fato de que estes casos são os mais severos e se a proteção funcionar para estes assume-se que funcionará também para os demais. A localização desses casos representativos pode ser verificada na Figura 11. Os quadrados  $R_{13}$  e  $R_{31}$  representam o equipamento de proteção da Figura 10.

Figura 11 – Linha entre conversores 1 e 3 e posições dos casos de faltas referenciados nesse trabalho.



Fonte: o próprio autor.

Os casos de falta indicados na Figura 11 são:

- $F_1$ , localizada no começo do cabo na direção do conversor 3 para o conversor 1;
- $F_2$ , localizada no barramento CC da subestação 1;
- $F_3$ , localizada no barramento CC da subestação 3;

- $F_4$ , localizada no começo do cabo na direção do conversor 1 para o conversor 3.

$F_1$  é a falta no cabo que apresenta menor derivada calculada por R13.  $F_2$  e  $F_3$  representam os casos de faltas externas ao cabo de maior valor de derivada calculada por R13.  $F_4$  representa a falta com maior taxa de crescimento de corrente de falta passando pelo disjuntor em R13. Esses comportamentos para os casos de falta mostrados são já apresentados por alguns trabalhos como o de Laterme (2015) e, foram também observados pelo estagiário em seu modelo de rede usado.

## 3.2 IMPACTO DE LIMITADORES INDUTIVOS DE CORRENTE DE FALTA NA PROTEÇÃO ESTUDADA

O estudo dos limitadores indutivos de corrente de falta realizado pelo estagiário restringiu-se a:

- i. Encontrar o valor necessário de indutância para limitar a corrente de falta às restrições temporais e de capacidade de interrupção do equipamento de proteção;
- ii. Impacto desses limitadores na proteção seletiva derivativa de tensão.

O primeiro ponto, redução da taxa de crescimento da corrente de falta deve-se ao fato que, a proteção primária desenvolvida no estágio tem teoricamente um tempo de atuação de 5 ms e, uma capacidade de interrupção de 15 kA; esses valores devem ser independente da falta simulada. Segundo Häfner (2011), uma vez que esses parâmetros são ditados pelo equipamento usado, o único parâmetro ajustável no sistema para reduzir o crescimento da corrente de falta são os limitadores.

O segundo ponto refere-se ao fato de que, como será demonstrado, essas indutâncias são fundamentais para a realização de uma proteção seletiva usando a derivada da tensão. Não somente pelo fato de limitarem a corrente a um valor em que os disjuntores podem atuar com segurança, mas também essas indutâncias estarão ligadas às fronteiras da zona de proteção e robustez do algoritmo de proteção.

Existem algumas desvantagens no uso de limitadores indutivos, por exemplo, a constante de tempo do controle dos conversores aumenta com o uso dessas indutâncias.

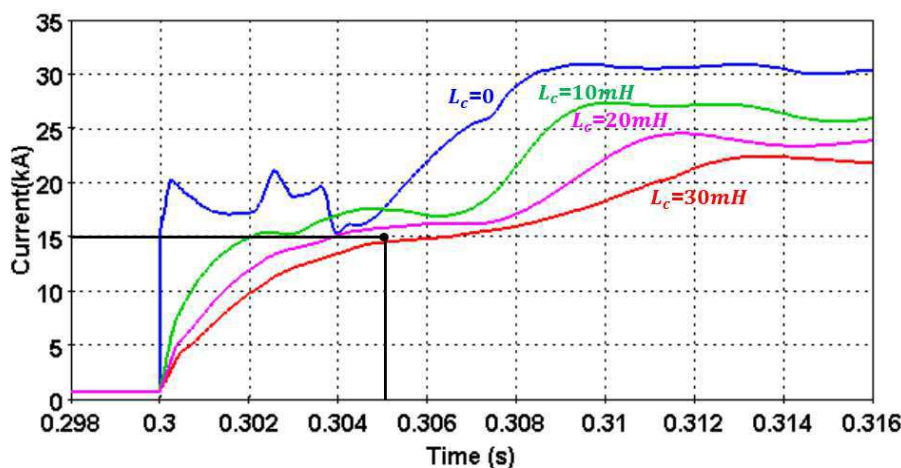
Também essas indutâncias armazenarão energia que deverá ser dissipada pelo disjuntor no momento da abertura, essa dissipação pode ser um problema no projeto de disjuntores CC.

### 3.2.1 REDUÇÃO DA CORRENTE DE FALTA

Conforme dito na introdução do relatório, a fim de facilitar a exposição de resultados, apesar do estagiário ter projetado a proteção para o modelo de rede completo, o relatório apresentará discussões sobre a proteção apenas do cabo entre os conversores 1 e 3 e, mais especificadamente, os estudos paramétricos do equipamento de proteção no terminal do cabo ligado à estação 1. Para a configuração dos parâmetros nos outros terminais, o estagiário seguiu o mesmo procedimento aqui descrito.

Para achar o valor de indutância necessário para limitar a corrente de falta à valores aceitáveis pela proteção, o estagiário realizou diversas simulações, com variadas configurações de indutâncias e diversas posições de faltas. A Figura 12 exibe a corrente de curto-circuito que atravessa o disjuntor para o caso de falta  $F_4$  em 0,3 s. Esta falta apresenta as condições mais severas quanto ao crescimento de corrente no disjuntor analisado.

Figura 12 – Corrente de curto-circuito para uma falta logo após o disjuntor 13 para diferentes valores de indutâncias.



Fonte: o próprio autor.

A partir da Figura 12, constata-se que para valores de indutância limitadora menor que 30mH, a corrente ultrapassa o limite de interrupção do disjuntor – 15kA – antes do tempo esperado da proteção atuar – 5 ms depois da ocorrência da falta, no caso da Figura



12. O valor de 30mH foi encontrado pelo estagiário como suficiente para conformar a corrente aos requerimentos da proteção. Pode-se inferir que, se esses requerimentos forem satisfeitos pela corrente de curto-circuito provocada pela falta  $F_4$  também será por todos os outros casos.

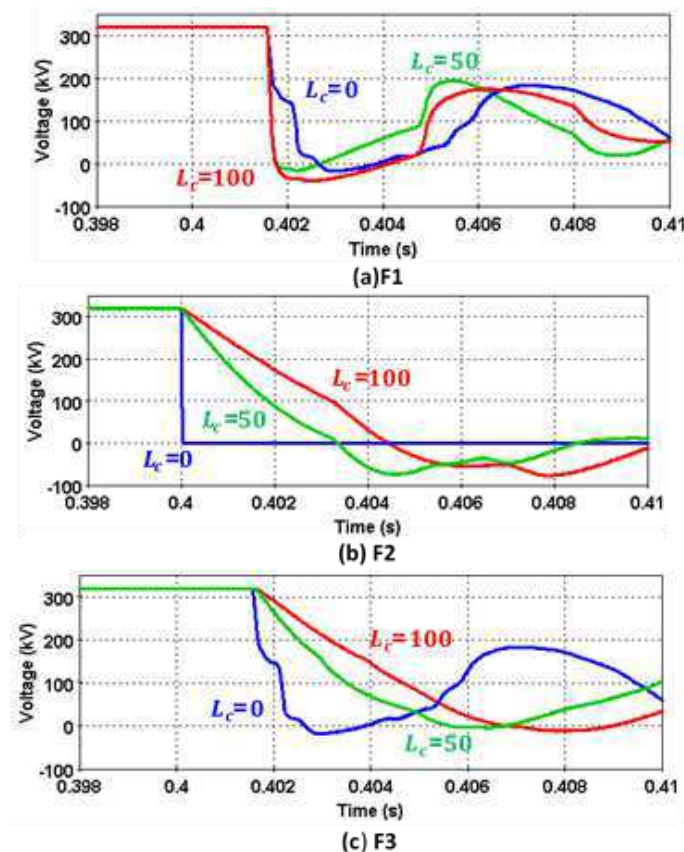
### 3.2.2 IMPACTO NA TAXA DE VARIAÇÃO DE TENSÃO

Este estudo relaciona-se com os princípios do uso da proteção derivativa de tensão de forma seletiva. A inserção de reatores em cada terminal dos cabos será um requerimento para tal.

Foi percebido durante o estágio que para faltas que ocorrem fora do cabo como,  $F_2$  e  $F_3$  na Figura 11, a derivada de tensão diminui rapidamente com o aumento das reatâncias nos terminais dos cabos. Por outro lado, para faltas que ocorrem no cabo como  $F_1$ , a derivada aumenta em proporções menores.

A Figura 13 contém as formas de onda de tensão medidas nas simulações para faltas  $F_{1,2,3}$  quando diferentes valores de indutâncias são utilizados. Na Tabela 2, os valores de derivada calculados são apresentados, as afirmações podem ser confirmadas pela análise dos dados expostos na tabela.

Figura 13 – Tensão fase-terra medida em R13 para diferentes casos de falta e de valores de indutância limitadora.



Nota: Indutância  $L_c$  em mH.

Fonte: o próprio autor.

Tabela 2 – Valores do pico de derivada de tensão medido durante casos de faltas  $F_{1,2,3}$  para diferentes valores de indutância limitadora.

Indutância $L_c$	Derivada de tensão medida nos casos de falta		
	$F_1$	$F_2$	$F_3$
0 mH	1576 kV/ms	21191 kV/ms	1576 kV/ms
50 mH	3257 kV/ms	143 kV/ms	145,5 kV/ms
100 mH	3286 kV/ms	75 kV/ms	83,5 kV/ms

Fonte: o próprio autor.

### 3.3 PROTEÇÃO DERIVATIVA DE TENSÃO EM REDES HVDC

A proteção derivativa de tensão para redes HVDC baseia-se na ideia de que, a partir da derivada da tensão medida entre um ponto específico da linha de transmissão e a terra, é possível identificar se a falta ocorreu na linha ou não. Esse ponto específico fica

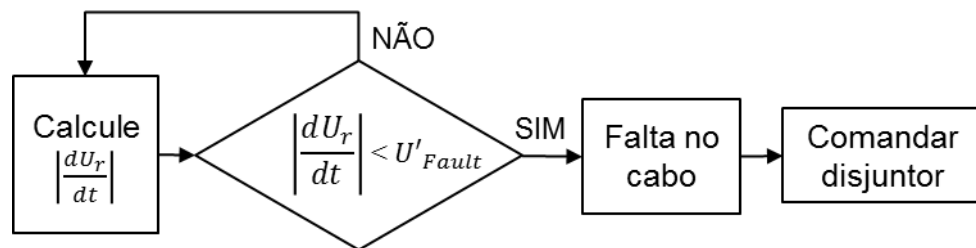
entre a linha de transmissão e os reatores limitadores de corrente de falta presentes em cada terminal da linha.

### 3.3.1 MARGEM DE PROTEÇÃO

A proteção derivativa de tensão atua analisando a derivada de tensão e, a partir desse valor, ela toma a decisão sobre ocorrência da falta. Como explicado no capítulo anterior, o uso de limitadores indutivos de corrente de falta cria uma diferença considerável entre valores de derivada de tensão entre faltas internas à linha e faltas externas à linha.

O diagrama de blocos presente na Figura 14 contém o algoritmo mais simples de implementação de uma proteção derivativa de tensão. O algoritmo baseia-se em uma comparação com limite pré-determinado,  $U'_{Fault}$ .

Figura 14 – Diagrama de blocos com exemplo de algoritmo de proteção derivativa.

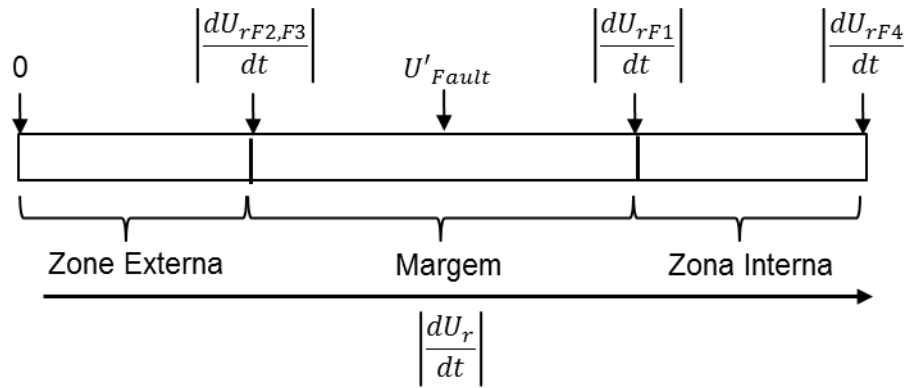


Fonte: o próprio autor.

Vários algoritmos, como o exposto por Li (2009), utilizam também critérios temporais de ultrapassagem do limite  $U'_{Fault}$ .

Na Figura 15, o intervalo entre o maior valor de derivada de tensão para os casos externos ( $F_2$  ou  $F_3$ ) e o menor valor para os casos internos ( $F_1$ ) é a margem de proteção. Essa margem é um ponto chave na proteção derivativa de tensão, nela será posto o limite e também, quanto maior ela for, mais confiável será a proteção.

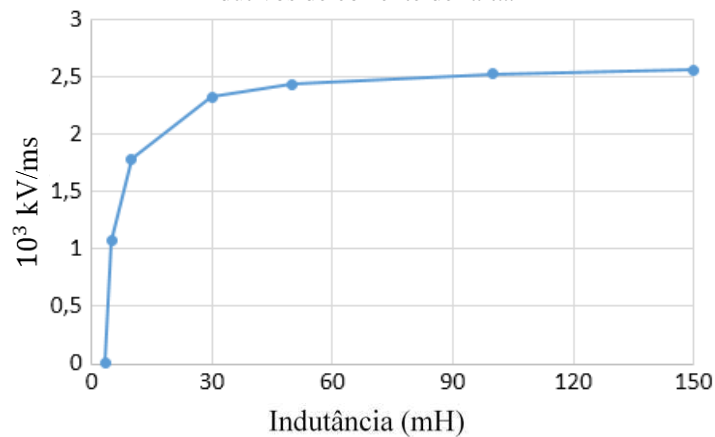
Figura 15 – Representação da margem de proteção e suas fronteiras.



Fonte: o próprio autor.

Durante os estudos, foi verificado pelo estagiário que o tamanho dessa margem varia de acordo com a indutância. A Tabela 2 exibe alguns dados encontrados que levam a essa conclusão. A Figura 16 exibe um gráfico que relaciona o tamanho da margem de proteção e a indutância colocada em cada terminal. A partir dessa figura, conclui-se que a margem aumenta rapidamente até 30 mH e depois esse crescimento decai. Semelhante fenômeno indica que existe um limite de eficácia do aumento da indutância com finalidade de expandir a margem de proteção.

Figura 16 – Tamanho da margem de proteção para diferentes valores de indutância dos limitadores indutivos de corrente de falta.



Fonte: o próprio autor.

### 3.3.2 ASSOCIAÇÃO COM OUTRAS PROTEÇÕES

A utilização de proteção derivativa de tensão é feita em conjunto com a utilização de outras proteções. O intuito dessa combinação é contornar algumas limitações desta proteção. Por serem os mais discutidos para tal, proteções baseadas em sobrecorrente, subtensão, corrente diferencial, derivativas de corrente, foram analisadas em conjunto com a proteção derivativa de tensão.

Subtensão e sobrecorrente são comumente usados como proteção de retaguarda em caso de falha na detecção de falta. Leterme (2016) faz uso desses critérios juntamente com a proteção derivativa de tensão é feito para contornar o problema de sensibilidade a ruídos da proteção derivativa.

A proteção derivativa de corrente tem muitos problemas em comum com a proteção derivativa de tensão. Esses problemas são, na maioria causados por sensibilidade de algoritmos derivativos. Wang (2014) define um conceito de proteção chamado *Voltage Derivative Supervised Current Derivative Protection* (VDSCD), que usa a derivada de corrente associada com a derivada de tensão para detectar faltas.

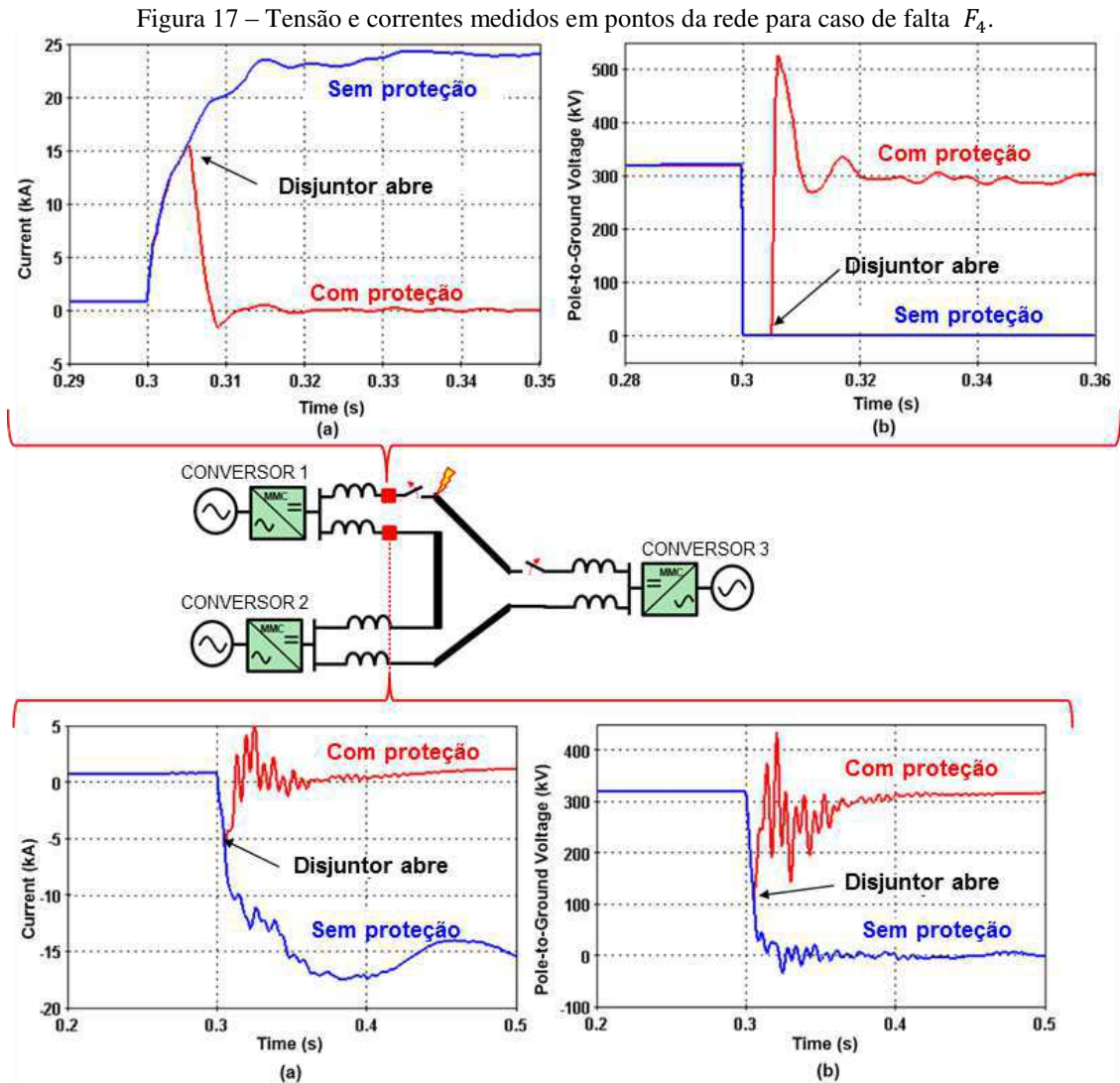
Para utilizar corrente diferencial na proteção é necessário comunicação entre os terminais dos cabos e essa comunicação insere um atraso na proteção. Como a velocidade de atuação é uma restrição severa na proteção HVDC, o uso de corrente diferencial é limitado à detecção de faltas de alta impedância; ponto forte desse método.

Testes para verificar a confiabilidade de associações entre a proteção derivativa de tensão e as demais foram feitas pelo estagiário mas, por motivo de proteção de propriedade intelectual, foram deixadas de fora deste relatório.

### 3.3.3 SIMULAÇÃO

A escolha do limite  $U'_{Fault}$  dentro da margem de proteção, deve respeitar diversos critérios relacionados a especificações da proteção. Os resultado apresentados nesse capítulo foram encontrados pelo estagiário em um cenário no qual a proteção faz uso do algoritmo apresentado na Figura 14. O limite  $U'_{Fault}$ , escolhido pelo estagiário, foi configurado no meio da margem de proteção. Os critérios dessa escolha devem-se ao fato de esta posição representar um compromisso entre a vantagens e desvantagens da aproximação deste limite das fronteiras da margem.

A Figura 17 contém os resultados obtidos com a simulação da falta  $F_4$ , considerada a mais severa para a proteção em R13. A figura apresenta a corrente passando pelo disjuntor e a tensão fase-terra medida pelo no terminal deste componente.



Nota: Em vermelho, resultado quando a proteção proposta está ativada. Em azul, quando a mesma encontra-se inoperante.

Fonte: o próprio autor.

Após a ocorrência da falta, a corrente passando pelo disjuntor aumenta rapidamente. Sem a proteção, tanto na linha em falta quanto na linha sã, a corrente sobe rapidamente a níveis elevados e danosos. Porém quando a proteção estava ativa, esta pode detectar a falta em tempo dos disjuntores atuarem antes que a corrente ultrapassasse a capacidade de interrupção dos mesmos. Depois da isolação da linha, um novo fluxo de potência foi estabelecido na rede e a energia voltou a ser entregue logo após a isolação da falta.

A tensão medida caiu a níveis próximos a zero na presença da falta, porém, após a isolamento do defeito a tensão retornou ao seu valor nominal.

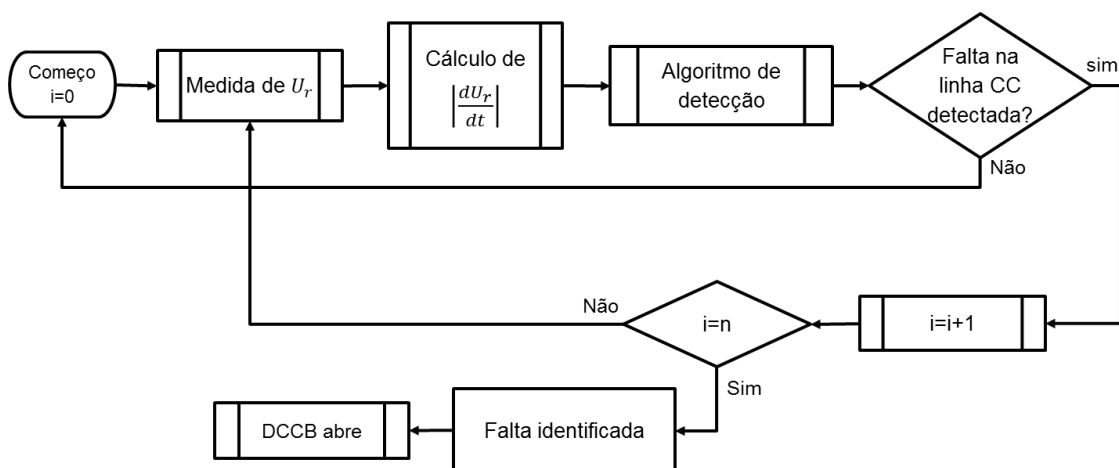
Como pode-se concluir a partir dos resultados apresentados a proteção proposta cumpriu o papel de detectar e isolar a falta cumprindo os pré-requisitos impostos pelos equipamentos envolvidos na supressão da falta. Um importante fato é que a proteção estudada também conseguiu cumprir o objetivo de ser seletiva, ou seja, apenas o componente defeituoso foi isolado. Nenhum disjuntor não envolvido na isolamento do equipamento em falta foi comandado a abrir, assim como, todas as faltas simuladas foram detectadas e isoladas pela proteção.

### 3.4 DESCRIÇÃO CONCEITUAL DA ESTRATÉGIA DE PROTEÇÃO

#### 3.4.1 PROTEÇÃO PRIMÁRIA

O diagrama de blocos criado pelo estagiário para ser seguido pelo sistema de proteção durante a detecção e identificação de uma falta é mostrado na Figura 18. O processo chamado algoritmo de detecção utilizado é semelhante ao exposto na Figura 14. A escolha de atuar somente quando a falta for detectada  $n$  vezes consecutivas deve-se ao fato de que algoritmos derivativos são sensíveis a ruídos. A análise de mais de uma amostra antes de comandar a abertura dos disjuntores diminui as chances de um comando desnecessário acontecer.

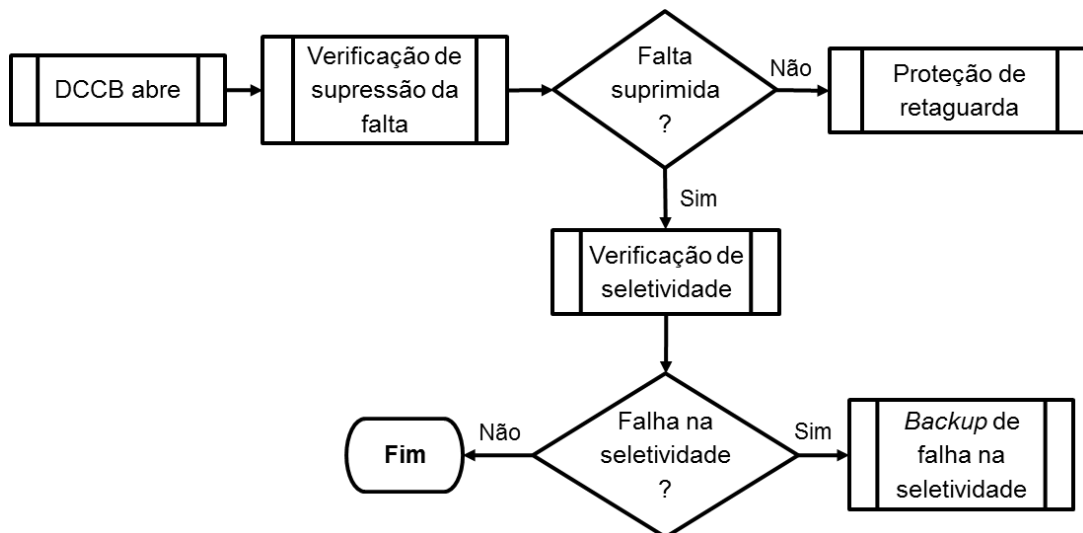
Figura 18 – Diagrama de blocos seguido na identificação de uma falta.



Fonte: o próprio autor.

Após o comando da abertura dos disjuntores, o sistema deve fazer um teste para verificar se a falta foi suprimida. Caso a corrente de curto-circuito continue, o sistema de proteção deve ativar a proteção de retaguarda pois, significa que o disjuntor que deveria atuar falhou. Em caso de o teste de proteção de falta acusar que o sistema isolou o componente defeituoso, pode ainda ocorrer o caso de que disjuntores não envolvidos na supressão da falta tenham sido comandados. Um teste de seletividade será feito no sistema pra identificar se disjuntores não envolvidos na eliminação da faltas estão abertos. Se o sistema verificar que a falta foi suprimida e que não houve aberturas desnecessárias de disjuntores, o processo de supressão de falta foi um sucesso. Os testes mencionados serão comentados posteriormente. A Figura 19 exibe o diagrama de blocos escolhido pelo estagiário para ser seguido pela proteção após o comando da abertura do disjuntor.

Figura 19 – Diagrama de bloco para ações a serem tomadas após o comando de abertura do DCCB.



Fonte: o próprio autor.

### 3.4.2 PROTEÇÃO DE RETAGUARDA

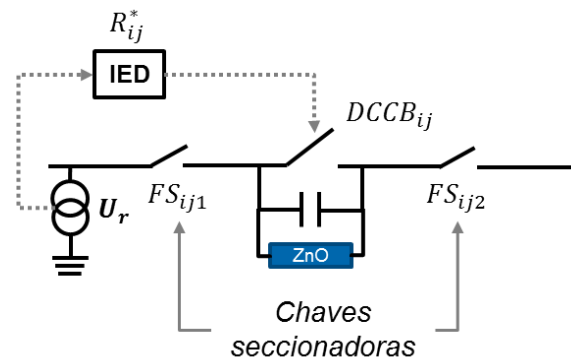
O projeto da proteção de retaguarda para a proteção primária exigiu algumas modificações nos componentes envolvidos na proteção outrora explicados. Em cada terminal, o estagiário teve de adicionar chaves seccionadoras rápidas para isolar o componente defeituoso em caso de uma falha na abertura do disjuntor. Para tornar possível a proteção de retaguarda, o conjunto de equipamentos antes como na Figura 10, foi modificado pelo estagiário para o conjunto de equipamentos mostrado na Figura 20.

Em caso de falha na abertura do disjuntor, o teste de supressão de falta deve indicar a presença da falta no sistema e a proteção de retaguarda ser ativada. O *backup* da



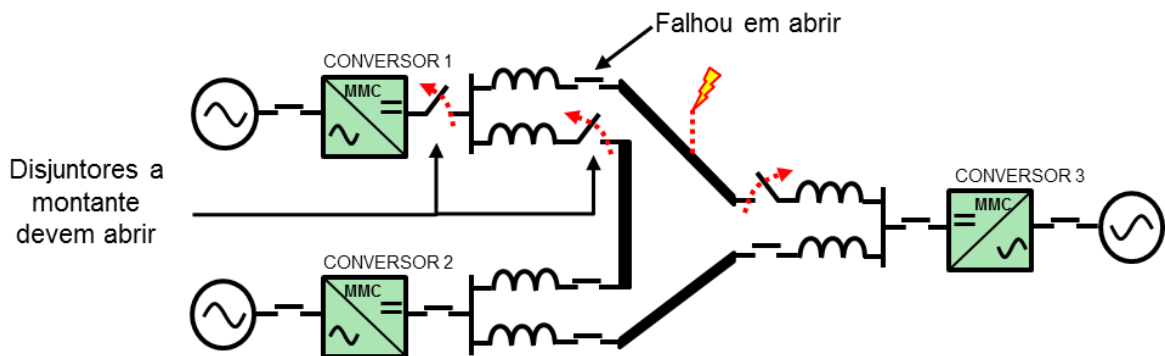
proteção proposta, ocorre como é exposto na Figura 21. Este consiste na abertura dos disjuntores a montante do disjuntor que falhou em abrir.

Figura 20 – Equipamento utilizado pelo sistema de proteção localizado em cada terminal das linhas de transmissão.



Fonte: o próprio autor.

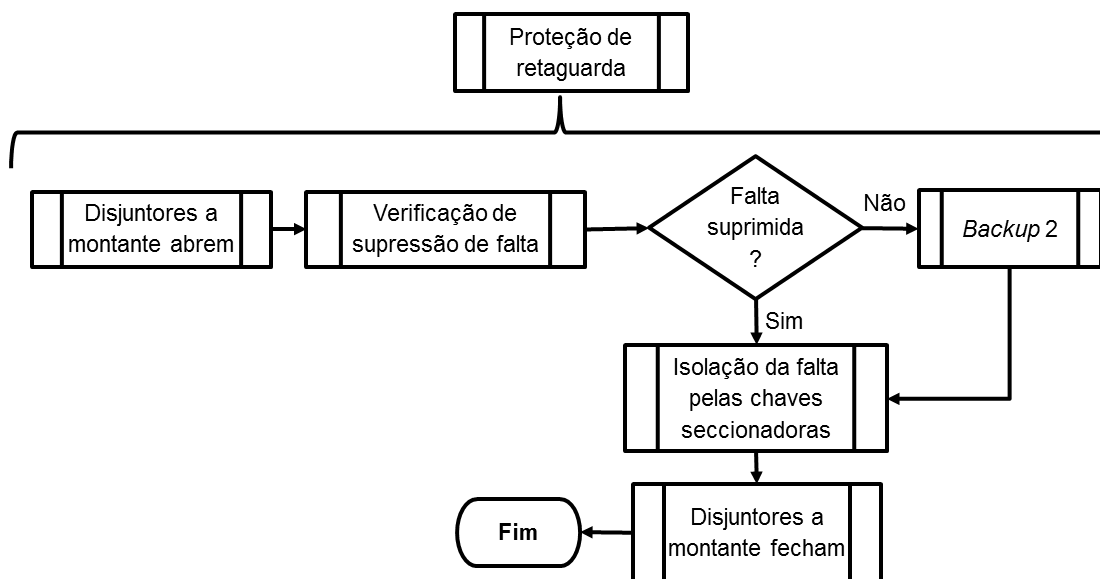
Figura 21 – Exemplo de backup em caso de falha na abertura de um disjuntor durante isolamento de uma falta.



Fonte: o próprio autor.

Após a abertura dos disjuntores a montante, uma verificação da supressão de falta deve ser feita, se a falta estiver sido suprimida e, não existe mais corrente na linha, as chaves seccionadoras serão comandadas para abrir e isolar a linha. Após a isolação pelas chaves seccionadoras, os disjuntores abertos durante o processo de *backup* devem ser fechados para dar continuação a entrega de potência às cargas. As ações escolhidas pelo estagiário para serem tomadas durante a atuação da proteção de retaguarda são expostas na Figura 22 em forma de diagrama de blocos. A existência do bloco *backup 2*, justifica-se para o caso de a proteção de retaguarda não eliminar a falta. Detalhes da atuação do *backup 2* não foram analisados durante o estágio.

Figura 22 – Diagrama de blocos para ações a serem seguidas pelo sistema de proteção em caso de falha na abertura de um disjuntor durante a supressão de uma falha.



Fonte: o próprio autor.

### 3.4.3 TESTE DE SUPRESSÃO DE FALTA E DE SELETIVIDADE

Testes de supressão de falha e de seletividade foram adicionados pelo estagiário nos diagramas de bloco apresentados, estes testes são pontos chave na correta operação do sistema de proteção proposto pelo estagiário.

O teste de supressão de falha pode ser feito a partir da observação de grandezas ligadas à existência de faltas como por exemplo, sobrecorrente. Após o comando do disjuntor, a corrente pode começar a ser observada e, caso ela não anule até o instante suposto de ser suprimida pela operação do disjuntor, significa que o disjuntor falhou na operação e a proteção de retaguarda deve ser ativada. Esse foi o princípio analisado pelo estagiário para realizar este teste. Hafner (2011) usa este princípio como gatilho para a função proativa de seus disjuntores.

O teste de seletividade, feito para identificar um comando de abertura desnecessário ao disjuntor, também pode ser realizado de diversas maneiras. Um exemplo seria a análise da tensão sobre o disjuntor. Em casos de abertura sem ocorrência de falha esse valor seria igual a zero. O teste de seletividade não foi analisado em simulações durante o estágio, o estagiário restringiu-se apenas à descrição conceitual de tal teste.

## 4 CONCLUSÃO

O estágio conseguiu cumprir todos os objetivos definidos seguindo o cronograma planejado. O estudo do impacto de indutâncias limitadoras na rede MTDC durante a falta realizado pelo estagiário contribuiu para o mesmo compreender o comportamento da corrente de curto-circuito e, de como conformá-la às restrições dos equipamentos. A proposição feita pelo estagiário de uma proteção seletiva para redes multiterminais em alta tensão em corrente contínua, satisfaz os requerimentos temporais e de nível de corrente impostos.

Redes multiterminais malhadas em HVDC ainda não existem devido limitações da tecnologia atual de proteção e de controle do fluxo de potência nessas redes. O estagiário estudou um assunto inovador e ainda recente na transmissão de energia elétrica. O desenvolvimento do trabalho exigiu extensa revisão bibliográfica sobre proteção em redes multiterminais em alta tensão em corrente alternada no intento de aplicar métodos semelhantes em redes HVDC. Também, foi necessário um estudo do estado da arte de equipamentos usados em subestações HVDC para definir os limites da tecnologia. As atividades desenvolvidas em muito ensinaram o estagiário sobre a metodologia do desenvolvimento tecnológico, modelagens e simulações, produção de textos científicos e trabalho em grupo; todas habilidades que serão úteis no decorrer da carreira de engenheiro do estudante.

Pode-se também afirmar que as disciplinas estudadas durante o curso que mais contribuíram para o bom desenvolvimento das atividades foram: proteção de sistemas elétricos, análise de sistemas elétricos e equipamentos elétricos.

## REFERÊNCIAS

ABB. 525 kV extruded HVDC cable system Doubling power transmission over longer distances. 2015. Disponível em: [https://library.e.abb.com/public/db10262e14b5414099c9ca721964adb1/150909\\_525kV%20brochure%20\(v%209\).pdf](https://library.e.abb.com/public/db10262e14b5414099c9ca721964adb1/150909_525kV%20brochure%20(v%209).pdf). Acessado em 17/08/2016

BUIGUES, G. et al. DC protection in modern HVDC networks: VSC-HVDC and MTDC systems. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'16)*, Madri, Espanha, 2016.

CALLAVIK, M. et al. Breakthrough! ABB's hybrid HVDC breaker, an innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids. *ABB Review*, n. 2, p. 7-13, 2013.

CHAUDHURI, N. et al. *Multi-terminal direct-current grids: Modeling, analysis, and control*. John Wiley & Sons, 2014.

DESCLOUX, J. *Protection contre les courts-circuits des réseaux à courant continu de forte puissance*. 2013. Tese de Doutorado. Université de Grenoble, França.

HÄFNER, J.; JACOBSON, B. Proactive Hybrid HVDC Breakers: a key innovation for reliable HVDC grids. *Proc. of Cigré Bologna*, v. 264, 2011.

LETERME, W.; VAN HERTEM, D. Classification of Fault Clearing Strategies for HVDC Grids. *Across borders-HVDC systems and markets integration*, Lund, Suécia, 2015.

LETERME, W.; BEERTEN, J.; VAN HERTEM, D. Nonunit Protection of HVDC Grids Inductive DC Cable Termination. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 2, p. 820-828, 2016.

LI, A. et al. Study on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protections for the HVDC line fault. *Power & Energy Society General Meeting*. IEEE, 2009. p. 1-5.

SIEMENS, A. G. High voltage direct current transmission-proven technology for power exchange. 2011. Disponível em: [http://www.siemens.com/sustainability/pool/en/environmental-portfolio/products-solutions/power-transmission-distribution/hvdc\\_proven\\_technology.pdf](http://www.siemens.com/sustainability/pool/en/environmental-portfolio/products-solutions/power-transmission-distribution/hvdc_proven_technology.pdf). Acessado em 17/08/2016

SPALLAROSSA, C. E. et al. A DC voltage control strategy for MMC MTDC grids incorporating multiple master stations. *IEEE PES T&D Conference and Exposition*. 2014. p. 1-5.

TANG, L. *Control and protection of multi-terminal DC transmission systems based on voltage-source converters*. 2003. Tese de Doutorado. Universidade McGill, Montreal, Canada.

WANG, J. et al. *Fault protection of HVDC transmission lines*. Patente US8749933 B2, 2014.