



**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELAGEM E SOLUÇÃO  
DE SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA TENSÃO  
NO PROGRAMA DE FLUXO DE POTÊNCIA CA MATPOWER**

**JEFFERSON CARLOS TAVARES OLIVEIRA DE LIMA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELAGEM E SOLUÇÃO  
DE SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA TENSÃO  
NO PROGRAMA DE FLUXO DE POTÊNCIA CA MATPOWER**

**JEFFERSON CARLOS TAVARES OLIVEIRA DE LIMA**

**Orientador: PROF. DR. FRANCISCO DAMASCENO FREITAS, ENE/UNB**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PUBLICAÇÃO PPGEE.DM - 818/24  
BRASÍLIA-DF, 10 DE JULHO DE 2024**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELAGEM E SOLUÇÃO  
DE SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA TENSÃO  
NO PROGRAMA DE FLUXO DE POTÊNCIA CA MATPOWER**

**JEFFERSON CARLOS TAVARES OLIVEIRA DE LIMA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

**APROVADA POR:**

Prof. Dr. Francisco Damasceno Freitas, ENE/UnB  
Orientador

Prof. Dr. Kleber Melo e Silva, ENE/UnB  
Examinador interno

Prof. Dr. Antonio Felipe da Cunha de Aquino, DEEL/UFSC  
Examinador externo

**BRASÍLIA, 10 DE JULHO DE 2024**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

JEFFERSON CARLOS TAVARES OLIVEIRA DE LIMA

**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELAGEM E SOLUÇÃO DE SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA TENSÃO NO PROGRAMA DE FLUXO DE POTÊNCIA EM CORRENTE ALTERNADA MATPOWER**

**2024xv, 90p., 201x297 mm**

(ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2024)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Elétrica

1. Fluxo de Carga 2. Elos CCAT  
3. Método de Newton-Raphson 4. MATPOWER

I. ENE/FT/UnB II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

JEFFERSON CARLOS TAVARES OLIVEIRA DE LIMA (2024) IMPLEMENTAÇÃO DE MODELAGEM E SOLUÇÃO DE SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA TENSÃO NO PROGRAMA DE FLUXO DE POTÊNCIA EM CORRENTE ALTERNADA MATPOWER. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-818/24, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: JEFFERSON CARLOS TAVARES OLIVEIRA DE LIMA

TÍTULO: IMPLEMENTAÇÃO DE MODELAGEM E SOLUÇÃO DE SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA TENSÃO NO PROGRAMA DE FLUXO DE POTÊNCIA EM CORRENTE ALTERNADA MATPOWER.

GRAU: Mestre ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor se reserva a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de Mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

JEFFERSON CARLOS TAVARES OLIVEIRA DE LIMA

*Ao meu pai, João Tavares de Lima,  
que está olhando por mim, com suas  
palavras que não esquecerei:  
"Deus lhe abençoe!".*

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha vida, por Ele estar sempre ao meu lado, me auxiliando em todos os momentos.

Aos meus pais, João e Luzinete, pelo esforço e confiança, e incentivo a dedicação em qualquer atividade.

A minha Esposa Renata, e meu filho Pedro, pelo apoio e companheirismo, e por tornarem os dias mais felizes.

A minha irmã Christiane, que me incentivou desde o início ao caminho da engenharia.

A Universidade de Brasília e ao Departamento de Engenharia Elétrica, pela oportunidade de desenvolvimento da pesquisa acadêmica.

Em especial ao professor Dr. Francisco Damasceno Freitas, por toda a importante contribuição e apoio no desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, pelo aprendizado compartilhado e experiência profissional adquirida nos últimos 18 anos.

Por fim, ao professor Dr. Antonio Felipe da Cunha de Aquino e ao professor Dr. Kleber Melo e Silva, pela composição na banca de defesa da dissertação.

*Confia ao SENHOR as tuas obras, e  
teus pensamentos serão estabelecidos.  
Provérbios 16:3*

# Resumo

Esta dissertação apresenta uma ferramenta computacional que, incorporada ao programa de solução de fluxo de potência CA MATPOWER, permite a resolução do problema de fluxo de potência (PFP) em redes integradas CA-CC. A integração foi possível através da incorporação de novos scripts desenvolvidos especificamente para possibilitar a interligação de redes CA e CC. A resolução do PFP utiliza uma abordagem alternada em que o método de Newton-Raphson é usado para determinação dos estados magnitude de tensão e ângulo em barras CA. A partir desses resultados, são calculadas iterativamente as variáveis do lado CC e vice-versa. Esse processo prossegue até a convergência final do PFP. Para demonstrar a eficácia da abordagem proposta, foi desenvolvido um procedimento adequado para a entrada de dados de modelagem relativos ao elo CC e leitura pelo programa MATPOWER adaptado. Além disso, foram implementados scripts com comandos para o cálculo da solução das equações dos elos CC, incorporação em outros scripts de comando do MATPOWER e apresentação dos resultados obtidos em formato apropriado. Por fim, os resultados dos testes no MATPOWER foram validados através de comparações de testes realizados no aplicativo ANAREDE, ficando comprovada a equivalência dos resultados.

**Palavras-chaves:** Fluxo de potência; Método de Newton-Raphson; elos CC; MATPOWER; ANAREDE.

# Abstract

This MSc dissertation introduces a computational tool designed to enhance the MATPOWER AC power flow tool by integrating DC links. This integration involved the development of new scripts to facilitate the connection of AC and DC networks. The power flow problem is resolved using an alternating scheme, with the Newton-Raphson method determining AC voltage magnitude and angle states. In this process, the variables on the DC side and vice-versa are calculated through an iterative approach, ensuring that the PFP converges effectively. To demonstrate the efficacy of the proposed method, a comprehensive procedure was developed for inputting modeling data related to the DC link into the adapted MATPOWER program. This involved the implementation of scripts with commands to not only calculate the solution of the DC link equations but also to incorporate them into other MATPOWER command scripts and present the results in a clear and user-friendly manner. To validate the proposal, extensive tests were conducted in MATPOWER and compared with tests carried out in the production-grade software ANAREDE. This rigorous validation process ensures the equivalence and reliability of the results obtained in this work.

**Keywords:** Power flow; Newton-Raphson method; HVDC; MATPOWER; ANAREDE.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	VISÃO GERAL E CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2	INCLUSÃO DA MODELAGEM E SOLUÇÃO DE SISTEMAS CCAT EM PROGRAMAS DE FLUXO DE POTÊNCIA CA CONVENCIONAIS.....	2
1.2.1	FORMULAÇÃO BÁSICA DO PROBLEMA .....	2
1.2.2	OS MÉTODOS DE SOLUÇÃO SEQUENCIAL E SIMULTÂNEO.....	3
1.3	MOTIVAÇÃO DE ESTUDO.....	7
1.4	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS.....	7
1.5	PUBLICAÇÕES RELACIONADAS .....	8
1.6	ORGANIZAÇÃO .....	9
<b>2</b>	<b>A TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA.....</b>	<b>10</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	10
2.2	CONTEXTO HISTÓRICO E PERSPECTIVAS FUTURAS .....	11
2.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS CCAT E CAAT .....	12
2.3.1	ASPECTOS TÉCNICOS .....	12
2.3.2	ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS.....	13
2.4	TECNOLOGIAS ASSOCIADAS À TRANSMISSÃO CCAT.....	15
2.4.1	O CONVERSOR FONTE DE CORRENTE - CSC OU LCC .....	16
2.4.2	O CONVERSOR FONTE DE TENSÃO - VSC .....	19
2.5	PRINCIPAIS COMPONENTES DA TRANSMISSÃO CCAT - CSC.....	21
2.5.1	ESTAÇÕES CONVERSoras.....	21
2.5.2	FILTRAGEM E COMPENSAÇÃO REATIVA EM SISTEMAS CCAT CSC .....	22
2.5.3	A LINHA DE TRANSMISSÃO CC E OS ELETRODOS DE TERRA .....	23
2.6	CONFIGURAÇÕES DA TRANSMISSÃO CCAT .....	24
2.7	A TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NO BRASIL.....	25
2.7.1	A TRANSMISSÃO ATRAVÉS DE ELOS CCAT .....	25
2.7.2	A TRANSMISSÃO ATRAVÉS DE CONVERSORES <i>back-to-back</i> .....	27
2.8	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	31
<b>3</b>	<b>A MODELAGEM DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA CSC/LCC .....</b>	<b>33</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	33
3.2	A FORMULAÇÃO E SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ..	34

3.2.1	MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA SOLUÇÃO DO PFP .....	36
3.2.2	MÉTODO DESACOPLADO-RÁPIDO PARA SOLUÇÃO DO PFP .....	37
3.3	A MODELAGEM E SOLUÇÃO DO PFP INCLUINDO A REDE DE CORRENTE CONTÍNUA .....	38
3.3.1	A MODELAGEM DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA .....	39
3.3.2	A REDE DE CORRENTE CONTINUA .....	40
3.3.3	O MODELO MATEMÁTICO DO RETIFICADOR .....	41
3.3.4	O MODELO MATEMÁTICO DO INVERSOR .....	42
3.3.5	OS MODOS DE CONTROLE E DE OPERAÇÃO DO ELO CC .....	42
3.4	O PROCESSO DE CÁLCULO DA REDE CC E CA .....	46
3.5	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	47
<b>4</b>	<b>INCLUSÃO DA REDE CC NO CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA CA .....</b>	<b>49</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	49
4.2	OS MÉTODOS DE FLUXO DE POTÊNCIA UTILIZADOS .....	49
4.3	O PROGRAMA DE FLUXO DE POTÊNCIA CA MATPOWER .....	50
4.3.1	OS DADOS DE ENTRADA E DE SAÍDA DO MATPOWER ORIGINAL .....	51
4.4	O MÓDULO DESENVOLVIDO PARA A SOLUÇÃO DA REDE CC-CA .....	52
4.4.1	A INCLUSÃO DO CÁLCULO DA REDE CC NO MÓDULO CA .....	52
4.4.2	ESTRUTURAÇÃO DOS DADOS BASE PARA SIMULAÇÃO .....	53
4.4.3	FUNÇÕES DESENVOLVIDAS PARA SOLUÇÃO DA REDE CA-CC NO MATPOWER .....	55
4.4.4	A FUNÇÃO <code>FLUXODC.M</code> .....	56
4.4.5	IMPLEMENTAÇÃO DOS MODOS DE OPERAÇÃO E DE CONTROLE DO ELO CC .....	57
4.4.6	O FORMATO DE APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	58
4.5	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	59
<b>5</b>	<b>TESTES E RESULTADOS .....</b>	<b>60</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	60
5.2	O PROGRAMA ANAREDE .....	61
5.3	O ELO DE CORRENTE CONTÍNUA DO SISTEMA TESTE .....	62
5.4	TESTE COM ELO CC EMBUTIDO NA REDE CA .....	64
5.4.1	O SISTEMA EQUIVALENTE DE 4 BARRAS CA .....	64
5.4.2	MODELAGEM, SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS .....	65
5.5	TESTES COM ELO CC INTERLIGANDO REDES ASSÍNCRONAS .....	72
5.5.1	REDE EQUIVALENTE CA-CC ASSOCIADA AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO CC DA UHE ITAIPU .....	72
5.5.2	MODELAGEM, SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS .....	73
5.5.3	TESTES DOS MODOS DE CONTROLE DO ELO CC .....	78
5.6	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	83

<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>84</b>
6.1	CONCLUSÕES GERAIS .....	84
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	85
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>86</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>91</b>
7.1	ARQUIVOS DE CASO BASE UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES .....	91

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Comparações de aspectos técnicos da transmissão CA x CC. ....	14
2.2	Comparações de aspectos da transmissão CA x CC. ....	15
2.3	Ponte retificadora trifásica de 12 pulsos (a), com as tensões de saída (b). ....	17
2.4	Deslocamento de fase entre tensão e corrente na fase A devido ao ângulo $\alpha$ . ...	17
2.5	Sistema CCAT com Conversor Fonte de Corrente - CSC.....	18
2.6	CCAT VSC monopolar simétrico baseado em um conversor de 2 níveis .....	20
2.7	Sistema CCAT com Conversor Fonte de Tensão - VSC .....	20
2.8	Componentes básicos de uma estação conversora.....	22
2.9	Compensação de potência reativa em uma estação conversora CCAT CSC.....	23
2.10	Configurações básicas da transmissão CCAT.....	24
2.11	Principais sistemas de transmissão em corrente contínua no Brasil.....	28
2.12	Sistema CCAT das usinas do rio Madeira - SE Coletora Porto Velho .....	31
3.1	Representação de uma barra genérica $i$ conectada a $N$ barras.....	34
3.2	Elo CC interligando duas barras infinitas.....	39
3.3	Fluxograma evidenciando a inclusão da rede CC no fluxo CA para o método iterativo .....	47
4.1	Exemplo da máscara de entrada de dados em caso base do MATPOWER original representando uma rede CA .....	51
4.2	Fluxograma do módulo CC, desenvolvido neste trabalho, acoplado ao módulo CA existente no MATPOWER.....	53
4.3	Nova seção DC Link Data na impressão de resultados do MATPOWER ...	58
5.1	Sistema teste do elo de transmissão CC.....	62
5.2	Diagrama unifilar representativa do “ <i>case4gs.m</i> ” original do MATPOWER, com os resultados gerais do fluxo de potência após convergência.....	64
5.3	Máscara de entrada de dados do elo CC na matriz da seção DC branch data .....	67
5.4	“ <i>case4gs.m</i> ” com elo CCAT de acordo com os critérios estabelecidos na simulação 1, sendo mostradas as grandezas, em geral, provenientes do MATPOWER modificado .....	68
5.5	“ <i>case4gs.m</i> ” com elo CCAT - simulação 1 - convergido - ANAREDE.....	69
5.6	“ <i>case4gs.m</i> ” com elo CCAT - simulação 2 - convergido - MATPOWER.....	70

5.7	“ <i>case4gs.m</i> ” com elo CCAT - simulação 2 - convergido - ANAREDE.....	71
5.8	Esquema simplificado do sistema de transmissão em corrente contínua associado à UHE Itaipu (50Hz/60Hz).....	72
5.9	Modelagem da rede equivalente do sistema de transmissão CC associado à UHE Itaipu (50 Hz/60 Hz) - saída padrão obtida do programa ANAREDE - Simulação 1 .....	74
5.10	Visualização dos resultados para a simulação da rede CA-CC no MATPOWER modificado, evidenciando os formatos de saída de dados do programa - Simulação 1 .....	77
5.11	Tensão CA do retificador, Tap do retificador ( $a : 1$ ) e corrente CC para o modo de controle normal e variação da tensão CA da rede suprida pelo retificador.....	80
5.12	Ângulo de disparo do retificador e ângulo de extinção do inversor para o modo de controle normal e variação da tensão CA da rede suprida pelo retificador .....	80
5.13	Potência CC no retificador (base 1575 MW) e potência reativa CA no retificador (base 787,5 MVA) para o modo de controle normal e variação da tensão CA da rede suprida pelo retificador .....	80
5.14	Tensão CA do lado inversor, tap do inversor ( $a : 1$ ), tensão CC do retificador para o modo de controle normal e variação da tensão CA da rede suprida pelo inversor .....	82
5.15	Potência CC no retificador (base 1575 MW), corrente CC e potência reativa CA no inversor (base 787,5 MVA) para o modo de controle normal e variação da tensão CA da rede suprida pelo inversor .....	82
7.1	Caso base do sistema 4 barras com elo CC no MATPOWER .....	92
7.2	Caso base do sistema Itaipu reduzido no MATPOWER - pág 1 .....	93
7.3	Caso base do sistema Itaipu reduzido no MATPOWER - pág 2 .....	94

# LISTA DE TABELAS

2.1	Sistemas de transmissão em CC no Brasil - Bipolos CSC/LCC .....	27
2.2	Sistemas de transmissão em CC no Brasil - conversores <i>Back-to-Back</i> .....	30
3.1	Modos de Operação do Retificador .....	44
3.2	Modos de Operação do Inversor .....	44
4.1	Matriz <code>DCbranch</code> incluída na máscara de entrada de dados do MATPOWER	54
4.2	Modos combinados do Retificador e Inversor .....	57
4.3	Descrição da seção <code>DC Link Data</code> .....	59
5.1	Parâmetros do modelo de elo CC de Itaipu .....	63
5.2	Parâmetros do elo CC característicos do sistema 4 barras.....	65
5.3	Dados característicos para o elo CC nas simulações 1 e 2.....	66
5.4	Simulação 1 e 2 - Número de iterações por ferramenta e método de solução ...	71
5.5	Dados característicos para cada elo CC nas simulações 1 e 2 .....	73
5.6	Descrição da seção <code>DC Link Data</code> incluída nos resultados do MATPOWER....	76
5.7	Comparativo de resultados entre as ferramentas MATPOWER e ANAREDE ..	78
5.8	Modos de operação simulados com ações do lado do retificador .....	79
5.9	Modos de Operação simulados no Inversor .....	81

# LISTA DE SÍMBOLOS e ABREVIATURAS

## Símbolos

$\bar{V}$	vetor da magnitude de tensão de todos os barramentos CA
$\bar{\theta}$	vetor dos ângulos de todos os barramentos CA
$\bar{x}$	vetor das variáveis do sistema CC
$P_{term}$	potência ativa injetada no terminal
$Q_{term}$	potência reativa injetada no terminal
$V\theta$	barra de referência angular do sistema CA
PV	barra do sistema CA onde a injeção de potência ativa e a magnitude da tensão são estabelecidas
PQ	barra do sistema CA onde as injeções de potências ativa e reativa são estabelecidas
I	magnitude da corrente
P	potência ativa
Q	potência reativa
S	potência aparente
V	magnitude da tensão
$\theta$	ângulo da tensão
$\phi$	defasagem angular entre dois pontos de medição indicados
Y	admitância nodal
$\Delta P_i$	<i>mismatch</i> de potência ativa na barra i
$\Delta Q_i$	<i>mismatch</i> de potência reativa na barra i
N	número total de barras
J	submatriz da matriz jacobiana
$\partial$	derivada parcial
$V_c$	fator tensão do primário do transformador conversor ( $V_r$ ou $V_i$ )
$E_c$	fator tensão do secundário do transformador conversor ( $E_r$ ou $E_i$ )
$a_c$	tap do transformador conversor ( $a_r$ ou $a_i$ )
$X_c$	reatância de comutação do conversor ( $X_r$ ou $X_i$ )

$R_c$	resistência de comutação do conversor ( $R_r$ ou $R_i$ )
$Vd_c$	tensão CC do polo do conversor ( $Vd_r$ e $Vd_i$ )
$I_c$	corrente CC injetada pelo conversor na linha CC ( $I_r$ ou $I_i$ )
$\delta_c$	ângulo de disparo/extinção do conversor
$\alpha$	ângulo de disparo do retificador
$\gamma$	ângulo de extinção do inversor
$\mu_c$	ângulo de comutação do conversor ( $\mu_r$ ou $\mu_i$ )
$\phi_c$	ângulo entre tensão e corrente da barra CA ( $\phi_{i_r}$ ou $\phi_i$ )
$k$	constante específica
$B$	número de pontes conectadas em série por polo

## Abreviaturas e Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCAT	Corrente Contínua em Alta Tensão
CCC	Capacitor Commutated Converter
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CSC	Current Source Converter
DC	Direct Current
DR	Desacoplado Rápido
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
HMC	High Mvar Consumption
HVDC	High-Voltage Direct Current
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LCC	Line Commutated Converter
MMC	Modular Multilevel Converter
NR	Newton-Raphson
NRDR	Newton-Raphson Desacoplado Rápido
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PFP	Problema de Fluxo de Potência
PWM	Pulse Width Modulation
RVO	Reduced DC Voltage Operation
SIN	Sistema Interligado Nacional
STATCOM	Static Synchronous Compensator
UHE	Usina Hidrelétrica
VSC	Voltage Source Converter

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Visão Geral e Contextualização

A transmissão de energia elétrica em Corrente-Contínua (CC) em Alta Tensão (CCAT ou em inglês *High-Voltage DC - HVDC*) é uma tecnologia que possibilita a transmissão de grandes montantes de potência através de longas distâncias com alta eficiência [1]. Além disso, permite a transmissão entre sistemas em corrente-alternada (CA) de diferentes níveis de frequência nominal.

Em comparação à transmissão de energia em corrente-alternada, a transmissão em corrente-contínua apresenta vantagens interessantes, a depender do projeto. As características da transmissão CC fazem com que esta seja muito utilizada, principalmente, na transferência de montantes significativos de potência, conexão entre sistemas de frequências diferentes, além da integração da geração de fontes renováveis à redes de grande porte, entre outros. Além das aplicações citadas, a conexão através de sistemas CCAT, quando comparadas a sistemas CA, podem contribuir também na redução do impacto ambiental com a redução ou eliminação da faixa ocupada pelas torres de transmissão [2].

A transmissão CCAT completou, em 2024, 70 anos de operação comercial. A primeira aplicação comercial, em 1954, conectou a ilha de Gotland ao sistema elétrico sueco, transmitindo até 20 MW por 90 km de cabos submarinos. Desde então, a utilização cresceu praticamente de forma linear, e experimentou um crescimento de forma exponencial a partir da virada do século. Esses e outros atributos tornam a transmissão CCAT uma tecnologia madura e amplamente utilizada em todo o mundo.

A abrangente utilização da transmissão de energia elétrica em Corrente Contínua eleva a necessidade de acesso da comunidade de sistemas de potência a ferramentas de análise de rede capazes de simular a operação dos elos CC. Existem programas comerciais que permitem a modelagem e simulação de redes contendo elos CC conectados a sistemas CA. Esses programas, porém, além de serem de alto custo financeiro, são de códigos fechados ao usuário, o que limita a sua utilização, principalmente pela comunidade acadêmica.

## 1.2 Inclusão da modelagem e solução de sistemas CCAT em programas de fluxo de potência CA convencionais

Para a resolução de problemas de fluxo de potência, incluindo a solução de elos CCAT conectados a sistemas de corrente alternada, além da modelagem dos equipamentos, é necessária a formulação do problema a ser solucionado e a utilização de um método de solução adequado da rede CA-CC [1]. Considerando os complexos modos de controle, os algoritmos existentes podem resultar em soluções inviáveis ou divergentes. O programa de fluxo de potência deve ser substancialmente modificado para ser capaz de modelar o estado operacional dos sistemas combinados de CA e CC. Para isto, determinadas condições específicas de carga, geração e estratégias de controle do sistema de CC devem ser estabelecidas [3].

### 1.2.1 Formulação básica do problema

A formulação apresentada é baseada em [1].

O estado operativo dos sistemas CA e CC combinados pode ser definido pelo vetor

$$\begin{bmatrix} \bar{V} \\ \bar{\theta} \\ \bar{x} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

onde:

$\bar{V}$  é o vetor da magnitude de tensão de todos os barramentos CA;

$\bar{\theta}$  é o vetor dos ângulos de todos os barramentos CA (exceto da barra de referência);

$\bar{x}$  é o vetor das variáveis do sistema CC.

Para a solução por um método iterativo, é necessária a obtenção de  $n$  equações independentes em termos de  $n$  variáveis. As equações que relacionam a rede CC com a rede CA, portanto, atuando como interface, são:

$$P_{term}^{sp} - P_{term}(ac) - P_{term}(CC) = 0 \quad (1.2)$$

$$Q_{term}^{sp} - Q_{term}(ac) - Q_{term}(CC) = 0 \quad (1.3)$$

onde:

$P_{term}^{sp}$  e  $Q_{term}^{sp}$  são a parte ativa e reativa da carga CA, respectivamente, no terminal onde está conectado o conversor de corrente contínua;

$P_{term}(ac)$  e  $Q_{term}(ac)$  são a potência ativa e reativa, respectivamente, injetadas no terminal CA, em função das variáveis CA;

$P_{term}(CC)$  e  $Q_{term}(CC)$  são a injeção de potência ativa e reativa, respectivamente, no terminal, em função das variáveis CC, ou seja, o fluxo de potência para o conversor.

As injeções de potência ativa e reativa,  $P_{term}(CC)$  e  $Q_{term}(CC)$ , são função da tensão CA da barra onde está conectado o conversor e das variáveis do sistema CC, ou seja:

$$P_{term}(CC) = f(V_{term}, \bar{x}) \quad (1.4)$$

$$Q_{term}(CC) = f(V_{term}, \bar{x}) \quad (1.5)$$

Ainda há outro conjunto de equações independentes derivado das condições do sistema CC:

$$\bar{R}(V_{term}, \bar{x})_c = 0 \quad (1.6)$$

onde  $c$  representa o número de conversores.

O problema de fluxo de potência CA-CC, portanto, pode ser resumido como a solução de um problema não-linear do tipo:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P}(\bar{V}, \theta) \\ \Delta \bar{P}_{term}(\bar{V}, \bar{\theta}, \bar{x}) \\ \Delta \bar{Q}(\bar{V}, \theta) \\ \Delta \bar{Q}_{term}(\bar{V}, \bar{\theta}, \bar{x}) \\ \bar{R}(V_{term}, \bar{x}) \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

onde  $_{term}$  se refere ao barramento CA onde um conversor está conectado.

## 1.2.2 Os métodos de solução Sequencial e Simultâneo

A partir da formulação do problema da rede CA-CC, é possível identificar dois métodos de solução do problema de fluxo de potência (PFP) com elos CCAT conectados a redes CA: o método sequencial e o método simultâneo [3].

No primeiro, as equações de CA e CC são resolvidas separadamente. Portanto, a integração em programas de fluxo de potência existentes é realizada de forma direta. O segundo método reconhece plenamente a interdependência entre as equações do sistema CA e CC e resolve simultaneamente o conjunto completo de equações [1].

### 1.2.2.1 Métodos Sequencial

A característica principal do método sequencial consiste na resolução de forma alternada da parte de corrente alternada e de corrente contínua, definidas em 1.7 a cada iteração. Na iteração CA são resolvidas as equações de injeção de potência, considerando o consumo/injeção de potência ativa e consumo de potência reativa dos conversores. No modo sequencial, o retificador é visto pelo sistema CA como uma carga e o inversor, como um gerador. Na iteração CC, as tensões nas barras CA de interface são considerando constantes. Assim, são resolvidas as equações de interconexão, de controle e as demais equações para cálculo das variáveis da rede de corrente contínua [1].

As variáveis dependentes e independentes na solução das equações do sistema de corrente contínua dependem do modo de controle adotado para o retificador e inversor. Este assunto será melhor detalhado no Capítulo 3. Devido à independência das equações da rede CC em relação à rede CA, para solução de cada rede podem ser utilizados métodos distintos.

A implementação do método sequencial pode ser efetuada usando uma ferramenta de solução de problema de fluxo de potência CA convencional, com poucas modificações no programa (basicamente para aquisição e retorno das variáveis da interface com a rede CA). Este método, no entanto, pode retardar a convergência da parte CA devido ao número de alterações nas injeções de potência a cada iteração CC. Este é o método de solução das redes CA e CC escolhido para as implementações realizadas neste trabalho, em função da sua simplicidade de implementação.

No método sequencial abordado em [4], a solução do sistema CC apresenta 5 variáveis para cada terminal, e utiliza um modelo simplificado para o elo CC. Métodos diferentes são utilizados para a solução do sistema CA e CC. Como as equações da rede CC são independentes, no sistema CA é utilizado o método de Newton, e no sistema CC (onde há um número reduzido de barramentos), o método de Gauss-Seidel. O trabalho destaca uma abordagem computacionalmente simples para a solução de sistemas CC multiterminais, sem diferenças significativas para o método simultâneo. O método segue passos básicos a cada iteração: partindo das condições iniciais do sistema são resolvidas as equações da rede de corrente contínua a depender do modo de controle selecionado. Em seguida, são calculadas as injeções de potência nas barras de interface na rede CA e, ao final, executado o fluxo de potência CA.

Em [5] é proposta a utilização de um algoritmo de resolução sequencial de sistemas CA e CC contendo conversores CCAT do tipo fonte de tensão VSC multiterminais. O algoritmo apresentado no artigo representa as perdas do conversor VSC usando um modelo de perdas generalizado, baseado em uma função de segunda ordem da corrente do reator CA conectado em série com o transformador conversor. Para a resolução do sistema de equações que modelam a rede CC de forma iterativa, assim como a rede CA, é utilizado o método de Newton. Na implementação, variáveis resultantes da rede CC são usadas como entrada para resolver as equações da rede CA e vice-versa. Os autores destacam o uso do método sequencial pela

facilidade de integração das redes CC em programas de fluxo de potência CA existentes, diferente do método simultâneo que também poderia ser utilizado, porém, com implementação mais complexa.

O método sequencial também é utilizado em [6] para solucionar o problema de fluxo de potência CC utilizando o método de Newton Raphson Desacoplado Rápido - NRDR para realizar a solução do sistema CA. O trabalho tem o objetivo de avaliar os impactos da inserção de sistemas CCAT em sistemas onde ocorrem fluxos indevidos na rede (*loop flow*). Os resultados são comparados com os de outras alternativas para controle do *loop flow*, como as que utilizam dispositivos flexíveis de transmissão em CA (*FACTS*), como os Capacitores em Série. Além da implementação do modelo do elo CC, são implementados 2 esquemas de controle. O modo 1, com retificador em controle de corrente e inversor em controle de ângulo de extinção. O modo 2, com retificador em controle do ângulo de disparo, e inversor em controle de corrente. São utilizados dois sistemas testes, efetuando simulações com a substituição ou adição de elos CCAT em pontos específicos da rede.

### 1.2.2.2 Métodos Simultâneos

A principal característica do método simultâneo é a solução conjunta das equações da rede de corrente contínua, da rede de corrente alternada, além das equações de interconexão entre as redes. Forma-se, assim, um único sistema de equações, como definidas em 1.7 [1]. O método unificado para resolução do PFP possui convergência quadrática e alta precisão, porque assume inexistência de simplificações relacionando redes CA e CC [7].

Na resolução simultânea, toda a implementação do programa precisa ser alterada para resolver os sistemas CA e CC juntos, o que pode exigir maior esforço computacional e complexidade na implementação [6].

No trabalho [8], o método de solução simultânea utilizado é equivalente a um método de solução de um sistema de corrente alternada. Nele, as equações CC são equações de controle, fazendo a solução do fluxo de potência convergir para um valor que depende dos parâmetros do sistema CC. A representação do sistema CC, assim como em outros trabalhos, é realizada de forma simplificada, sendo testado para a solução de sistemas CC de 2 terminais e multiterminais. Para a solução do problema de fluxo de potência foi utilizado o método de Newton desacoplado rápido, visando aumentar a rapidez de convergência.

Um algoritmo de fluxo de potência utilizando o método simultâneo, e baseado no método Newton-Raphson é proposto em [7] para obter uma solução para redes CA-CC com conversores fonte de tensão. Neste trabalho, o conversor é modelado com perdas detalhadas, incluindo os diferentes modos de controle. A matriz Jacobiana inclui em suas submatrizes a combinação dos sistemas de equações da rede CA, da rede CC e de condições do conversor, para serem solucionadas de forma simultânea.

Os trabalhos [3] e [9] também abordam a solução do problema de fluxo de potência

através de um método de solução simultâneo ou unificado. No primeiro, a representação do conversor fonte de corrente utiliza 12 variáveis, sendo 4 equações para o terminal retificador e 4 para o inversor, além de mais 4 equações relativas ao modo de controle. As equações compõem a matriz jacobiana em 4 blocos de submatrizes, sendo um bloco CA-CA (similar à matriz jacobiana original de um PFP CA) e outros três blocos CA-CC, CC-CA e CC-CC. O segundo trabalho utiliza uma abordagem semelhante ao primeiro, porém adequada para sistemas CC multiterminais, incluindo seus diferentes modos de controle.

### 1.2.2.3 Comparação entre os métodos sequenciais e simultâneos

Após apresentadas as principais características que utilizam os métodos de solução sequencial e simultâneo individualmente, a comparação de desempenho entre os métodos é analisada em algumas publicações.

No artigo [10], há uma avaliação comparativa entre os métodos simultâneos e sequencial, a qual é efetuada para conversores fonte de tensão multiterminal embutidos em um sistema CA (4 terminais conectados em um sistema CA de 15 barras). Após a apresentação da modelagem dos conversores e a realização de simulações em dois sistemas teste, são mencionadas as seguintes observações:

- O método sequencial tem a vantagem de ser implementado facilmente como uma extensão de programas de fluxo de potência CA existentes, enquanto o algoritmo simultâneo requer modificação de códigos de fluxo de potência CA existentes;
- Ambos os algoritmos podem convergir para a mesma solução com pequena diferença no número geral de iterações;
- O algoritmo sequencial tem dois *loops* de iteração internos (um para o lado CA e outro para o lado CC) e um *loop* de iteração externo (para garantir a convergência geral). Aparentemente, isso aumenta o número de cálculos;
- No algoritmo simultâneo, as equações CA e CC são resolvidas juntas na mesma iteração. No entanto, a matriz jacobiana do sistema CA-CC combinado tem que ser reconstruída, o que torna a implementação mais complexa em comparação ao método sequencial.

No artigo [11], as duas metodologias integradas de cálculo de fluxo de potência CA-CC (unificada e sequencial) são analisadas e então testadas. Os testes são realizados em dois sistemas teste com elos CC multiterminais (um sistema de 5 barras com uma rede CC embutida na rede CA e um sistema de 50 barras com duas redes CC interligando duas redes CA assíncronas). Como conclusão, a abordagem unificada mostra vantagens de desempenho devido a menos iterações quando comparada ao método sequencial. É destacado, no entanto, que a implementação do método sequencial é mais simples em comparação ao unificado.

Os autores indicam que um benefício da metodologia sequencial pode ser esperado quando ambas as abordagens são aplicadas a redes com um alto número de barramentos, incluindo um alto número de sub-redes CC. Isto é justificado, pois este acoplamento afeta a matriz jacobiana no método unificado. Em relação à precisão, o trabalho mostra que, para cada sistema teste, os resultados dos cálculos de fluxo de potência com base nas duas abordagens mostram os mesmos valores.

### **1.3 Motivação de Estudo**

A principal motivação para o desenvolvimento da presente investigação consiste na análise e implementação de modelagem em programa de computador conhecido. Em particular, que não possui módulos específicos que contemplam a representação do problema de fluxo de potência em regime permanente em redes integradas CA-CC contendo elos de corrente contínua.

Apesar de haver programas comerciais que permitam a modelagem de elos CC, além de serem de alto custo financeiro, seus códigos são fechados ao usuário. Portanto, além de permitir a modelagem, deseja-se ter a modelagem em um código aberto. Há aplicativos com códigos livres que possibilitam a modelagem de diversos componentes, sendo, por outro lado, limitados quanto ao alcance e diversidade dos modelos.

O bem conhecido programa MATPOWER [12] é um desses aplicativos em que a abrangência de simulações é limitada à rede CA. Em contrapartida, esse programa é baseado em um pacote de arquivos em código aberto, de licença gratuita, e é executado em MATLAB ou OCTAVE. Uma vantagem adicional do software OCTAVE é sua equivalência com o MATLAB e ser inteiramente gratuito, algo pouco explorado em utilização de simuladores por parte da comunidade de sistemas de potência.

No entanto, a falta de modelos de componentes, como elos CC, poderia ser preenchida no MATPOWER explorando-se justamente o fato do código do programa ser aberto. Assim, a incorporação de novos modelos visando à simulação de elos CC integrados aos sistemas CA preencheria esse hiato identificado ao se explorar os recursos do programa MATPOWER. Assim, haveria possibilidade para realização de estudos de redes mais abrangentes no setor elétrico, como a inclusão de longas interligações e exploração do escoamento de energia proveniente de fontes renováveis localizadas a grandes distâncias, entre outras tecnologias.

### **1.4 Objetivos Geral e Específicos**

O objetivo desta dissertação consiste em desenvolver uma ferramenta computacional que, incorporada ao programa de solução de fluxo de potência CA MATPOWER, permite a resolução do problema de fluxo de potência (PFP) em redes integradas CA-CC com conversores

comutados pela rede (*LCC*). A integração foi possível através da incorporação de novos *scripts* desenvolvidos especificamente para possibilitar a solução das redes CA e CC. A resolução do PFP CA-CC utiliza uma abordagem sequencial (alternada), em que o método de Newton-Raphson ou o método Desacoplado Rápido é usado para determinação dos estados magnitude de tensão e ângulo em barras CA. A partir desses resultados, são calculadas as variáveis do lado CC. Esse processo é repetido e prossegue até a convergência final do PFP [13].

Para demonstrar a abordagem proposta, os seguintes objetivos específicos são apresentados:

- Apresentação sobre um panorama da transmissão CCAT, incluindo informações acerca do cenário brasileiro atual e seu planejamento futuro, o processo de modelagem de elos de corrente contínua LCC em regime permanente e os métodos de solução de PFP com elos CCAT conectados a redes CA.
- Elaboração de um procedimento adequado para a entrada de dados de modelagem relativos ao elo CC LCC, que é acrescentado à leitura de dados CA do programa MATPOWER adaptado, sem que essa última entrada seja alterada;
- Implementação de *scripts* com comandos para o cálculo da solução das equações dos elos CC LCC, contemplando oito modos de controle; incorporação em outros *scripts* de comando do MATPOWER e apresentação dos resultados obtidos em formato de saída apropriada;
- Realização de simulações em sistemas testes CA-CC padrão e reais, incluindo testes comparativos nas ferramentas ANAREDE e MATPOWER adaptado com a utilização das funções propostas.

## 1.5 Publicações Relacionadas

As investigações relacionadas ao tema desta dissertação possibilitou a publicação dos artigos de pesquisa [14]:

- J. C. T. O. de Lima and F. D. Freitas, "Implementação de modelagem e solução de sistemas CCAT no programa de fluxo de potência CA MATPOWER" in *SBSE 2023 - 19th Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2023, [https://www.sba.org.br/open\\_journal\\_systems/index.php/sbse](https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse).
- J. C. T. O. de Lima and F. D. Freitas, "Modelagem e solução de 8 modos de operação de sistemas CCAT no programa MATPOWER" in *CBA 2024 - XXV Congresso Brasileiro de Automática*, 2024, [https://www.sba.org.br/open\\_journal\\_systems/index.php/cba](https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba).

## 1.6 Organização

Além do presente capítulo introdutório, esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

- Capítulo 2, onde é apresentada uma visão geral sobre a Transmissão em Corrente Contínua, incluindo o contexto histórico, a comparação entre os sistemas CCAT e CAAT, as principais tecnologias e componentes. Também é abordado o histórico brasileiro, o cenário atual e as perspectivas futuras sobre o tema;
- Capítulo 3, onde é apresentada a modelagem do conversor de corrente contínua em regime permanente, os modos de Controle e de Operação do elo CC, e o processo de cálculo utilizado na iteração do sistema CC com a rede CA no problema de fluxo de potência;
- Capítulo 4, onde são apresentados os métodos de fluxo de potência utilizados, o programa de fluxo de potência CA MATPOWER - base para este trabalho, a metodologia e funções desenvolvidas para a inclusão da rede CC no cálculo do fluxo de potência CA utilizando o método de Newton-Raphson para solução;
- Capítulo 5, no qual são apresentadas as simulações e testes efetuados em casos padronizados e em casos de sistemas reais com elos CC embutidos na rede CA ou interligando redes CA assíncronas, sendo comparados os resultados com uma ferramenta comercial visando demonstrar a eficácia;
- Capítulo 6, no qual são destacadas as conclusões deste trabalho e apresentadas sugestões para abordagens futuras sobre o tema.

# Capítulo 2

## A Transmissão em Corrente Contínua

### 2.1 Introdução

Em comparação com a transmissão de energia em corrente alternada (CA), a transmissão em corrente contínua (CC) apresenta vantagens interessantes, sem desconsiderar a maior complexidade e custos envolvidos de um sistema CCAT.

Mesmo com a corrente alternada sendo o método predominante para transmissão de energia elétrica no século XX, o CCAT demonstrou ser a melhor solução para muitas áreas de aplicação, e o número de instalações tem crescido constantemente. Transmitir grandes blocos de energia elétrica por longas distâncias de forma eficiente, conectar sistemas assíncronos, controlar rapidamente o fluxo de potência, além de reduzir o impacto ambiental na transmissão de energia com menor custo em longas distâncias são algumas vantagens de um sistema CCAT [15].

Entretanto, a implementação técnica e economicamente viável de sistemas CCAT deve considerar alguns pontos. Entre eles, há o desafio econômico do preço das estações conversoras, que constituem o fator de maior peso no balanço de custos do sistema. Na parte técnica, há a necessidade de um complexo sistema de controle para possibilitar uma coordenação precisa dos ciclos de chaveamento dos componentes de eletrônica de potência envolvidos [16].

O foco deste capítulo e da dissertação é voltado à transmissão CC através de conversores do tipo fonte de corrente -CSC, também conhecidos como conversores comutados pela rede - LCC. Entretanto, apresenta-se também, de forma simplificada, uma descrição sobre o conversor fonte de tensão - VSC.

O desenvolvimento contínuo das tecnologias, com projetos de corrente contínua atingindo o nível de tensão de  $\pm 1100 \text{ kV}$  e capacidade de transmissão de  $12 \text{ GW}$ , transmissão multiterminal, redes CCAT, transmissão híbrida com conversores CSC e VSC, entre outros, destacam a importância do tema.

O Brasil possui importantes sistemas de transmissão CCAT baseados em LCC, onde, em termos de extensão, estão localizados 2 dos 3 maiores projetos do mundo, além de ter sido pioneiro no uso da tensão em  $\pm 600 \text{ kV}$  em 1984, com o sistema associado à UHE Itaipu. Uma seção mais adiante está dedicada a explorar os projetos atuais e futuros do sistema elétrico brasileiro.

## 2.2 Contexto Histórico e Perspectivas Futuras

A tecnologia de transmissão em corrente contínua é utilizada, de forma comercial, desde 1954 onde a transmissão CCAT moderna começa com a instalação do projeto de 20 MW de capacidade e 100kV CC, que conectava através de 100 km de cabos submarinos a ilha de Gotland à Suécia continental [13]. Porém, deve-se destacar que a transmissão de energia elétrica em corrente contínua remete ao século XIX e os estudos iniciais da transmissão CCAT remetem ao início do século XX.

Os sistemas CCAT comerciais que entraram em operação até meados da década de 70 eram conversores comutados pela rede - LCC, baseados em válvulas de arco de mercúrio. Um avanço tecnológico significativo veio com a introdução dos tiristores, elevando a precisão e reduzindo os custos dos sistemas CCAT. Na primeira década do século XXI, houve um desenvolvimento muito rápido de novas tecnologias e uma crescente demanda pela transmissão CCAT.

A introdução de conversores fonte de tensão - VSC, a partir de 1997, foi possível a partir da tecnologia dos transistores bipolares de porta isolada, chamados IGBTs, inserindo novas possibilidades de chaveamento e também novas abordagens de proteção e controle. Além disso, os conversores multiníveis modulares surgiram como o conceito de conversor fonte de tensão mais econômico e moderno, que praticamente elimina as necessidades de filtragem do CCAT convencional e promove um amplo controle das tensões CA da estação conversora [15].

No ano 2000, entrou em operação o primeiro projeto de conversores do tipo comutados a capacitor - CCC, com uma interligação através de um *Back-to-back*, entre o Brasil e a Argentina.

Visando ampliar a capacidade de transmissão, os níveis de tensão da transmissão CCAT também permanecem em constante evolução. Enquanto a transmissão CC associada a UHE Itaipu no Brasil foi o primeiro projeto do mundo em  $\pm 600 \text{ kV}$ , a marca de  $\pm 800 \text{ kV}$  foi superada em 2012 em projetos na Índia e China e, a marca atual de  $\pm 1100 \text{ kV}$  foi alcançada em 2019 com o projeto chinês *Changji-Guquan* [2].

Além da evolução da tecnologia de conversão e de níveis de tensão, também é importante destacar que uma série de inovações foram realizadas em dispositivos associados à transmissão em corrente contínua, facilitando a sua expansão. Entre essas evoluções pode-se

destacar, entre outros, os desenvolvimentos realizados nos sistemas de filtragem de harmônicos, nos sistemas de proteção e controle, e dos disjuntores CC de alta tensão híbridos, que podem ajudar a moldar as redes em CC do futuro [17].

Atualmente, as redes em corrente contínua estão constantemente associadas à denominada "energia verde", como facilitadoras da integração de usinas de energia renovável em larga escala, principalmente em projetos *offshore*. Isso facilita ainda mais investimentos em grandes projetos. A CCAT é vista como uma tecnologia de menor impacto ambiental, pois reduzem ou evitam torres em troca de longos cabos subterrâneos, fortalecendo ainda mais os argumentos para futuros projetos em todo o mundo [15].

## 2.3 Comparação entre os sistemas CCAT e CAAT

A transmissão em corrente alternada compõe, de fato, a maioria dos sistemas de transmissão de energia elétrica existentes no mundo. Com tanto sucesso na transmissão em CA, as motivações para a escolha da transmissão em corrente contínua serão abordadas ao longo desta seção.

Com mais de 70 anos desde a primeira operação comercial, a utilização da transmissão através de Corrente Contínua em Alta Tensão - CCAT cresce significativamente em todo mundo, principalmente após a virada do século, e, já se aproxima de 400 GW de capacidade de transmissão instalada [17]. A utilização da transmissão em CCAT é impulsionada por uma série de características técnicas, econômicas e ambientais específicas, pelo desenvolvimento da tecnologia e ainda pela necessidade contínua de transformação das redes de transmissão de energia.

### 2.3.1 Aspectos Técnicos

Em relação aos aspectos técnicos, a comparação da transmissão de energia elétrica em corrente contínua de alta tensão - CCAT com a transmissão corrente alternada de alta tensão - CAAT, apresenta vantagens interessantes, sem desconsiderar a maior complexidade de um sistema CCAT [15]:

- Transmitir grande quantidade de energia elétrica por longas distâncias e com alta eficiência: grandes fontes de energia renovável normalmente não estão localizadas próximas aos centros de carga, e a transmissão em CC, comparada à corrente alternada, é capaz de transmitir com menores perdas elétricas e menor custo, como observado nas Figuras 2.1 e 2.2 [2];
- Conexão de sistemas assíncronos: a transmissão CCAT, diferente da CAAT pode conectar sistemas que não estão sincronizados e com frequências nominais diferentes.

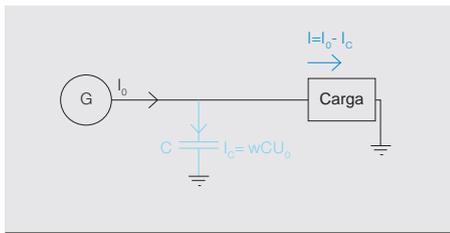
Esta é uma utilização muito empregada na integração de sistemas de transmissão de energia elétrica de países distintos;

- Controle direto e rápido do fluxo de potência: diferentemente dos sistemas CA onde o controle é efetuado através da defasagem angular, em sistemas CCAT o controle é efetuado através de ações que envolvem elementos baseados em eletrônica de potência, de forma rápida e precisa;
- Estabilização da rede de corrente alternada: em uma linha CA, a estabilidade é reduzida à medida que a distância e os ângulos das tensões aumentam. Já em CC, a característica de controle rápido do fluxo de potência pode proporcionar uma melhoria em regime transitório e na estabilidade dinâmica em redes CA conectadas através de sistemas CCAT;
- Facilidade no controle de tensão: em sistemas CAAT é necessário um controle de potência reativa para manutenção da tensão a cada terminal (subestação). Em sistemas CCAT, embora o controle de potência reativa também seja necessário para conversores do tipo fonte de corrente, ele acontece apenas no terminal retificador e inversor (não há subestações intermediárias). Os elos CC baseados em conversores fonte de tensão destacam-se nesse quesito, pela capacidade de controle da potência reativa ou tensão nos terminais.

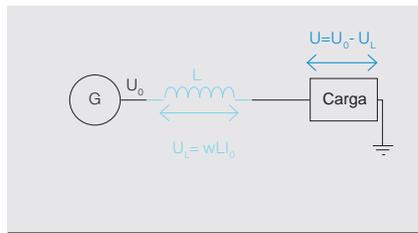
### 2.3.2 Aspectos Econômicos e Ambientais

Em relação aos aspectos econômicos e ambientais, embora, eles também estejam ligados aos aspectos técnicos, podem ser citados:

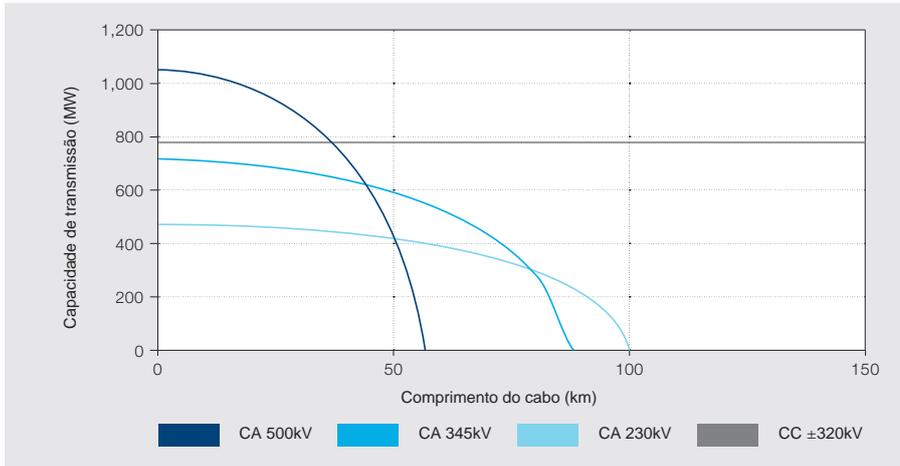
- Integração de fontes de energia renovável em grande escala: característica dos conversores fonte de tensão, que facilita o desenvolvimento dessas fontes, principalmente longe dos grandes centros de carga e *offshore*;
- Redução do impacto ambiental na transmissão de energia: como pode ser verificado na Figura 2.2.2 [2], em comparação aos sistemas CA, os sistemas de transmissão CCAT reduzem a quantidade de condutores necessários para a transmissão da energia elétrica, o que favorece a viabilidade financeira e ambiental. Com uma menor quantidade de condutores, será necessário menos torres e menor faixa de ocupação do solo para a transmissão da mesma potência;
- Menor custo na transmissão em longas distâncias: a transmissão CCAT possui um custo significativo relativo às estações conversoras, o que, a depender da distância de transmissão, pode inviabilizar economicamente o projeto. Porém, com o aumento da distância, existe um ponto crítico em que o custo da transmissão CCAT passa a ser



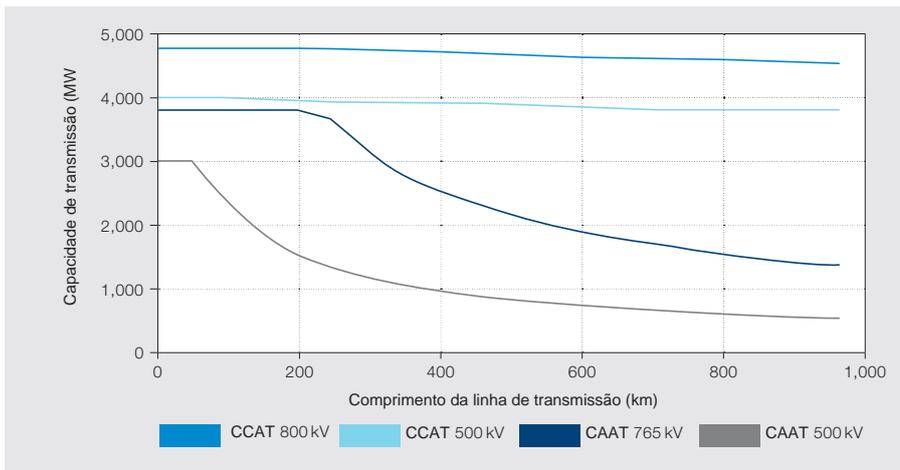
1a Cabos subterrâneos



1b Linhas aéreas



1c Capacidade de transmissão CA e CC utilizando cabos



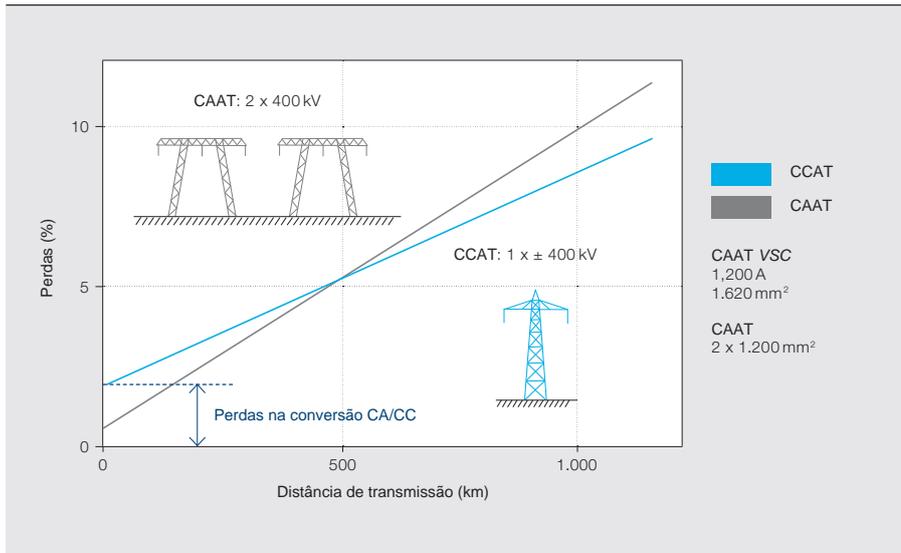
1d Capacidade de transmissão CA e CC utilizando linhas aéreas

Figura 2.1: Comparações de aspectos técnicos da transmissão CA x CC.

Fonte: [2]

inferior ou equivalente ao da transmissão CAAT. Essa distância crítica, embora apresentada em algumas fontes, varia com a tecnologia associada e com o projeto efetuado, pois, além de outros fatores, os custos das estações conversoras com tecnologia do tipo fonte de corrente e fonte de tensão são distintos. A comparação clássica é efetuada na Figura 2.2.3, onde a partir de determinada distância percebe-se a mudança da tecnologia de menor investimento.

## 2 Transmissão CC tem menores perdas em longas distâncias



## 3 Existe uma distância crítica na qual a transmissão CC se torna mais econômica

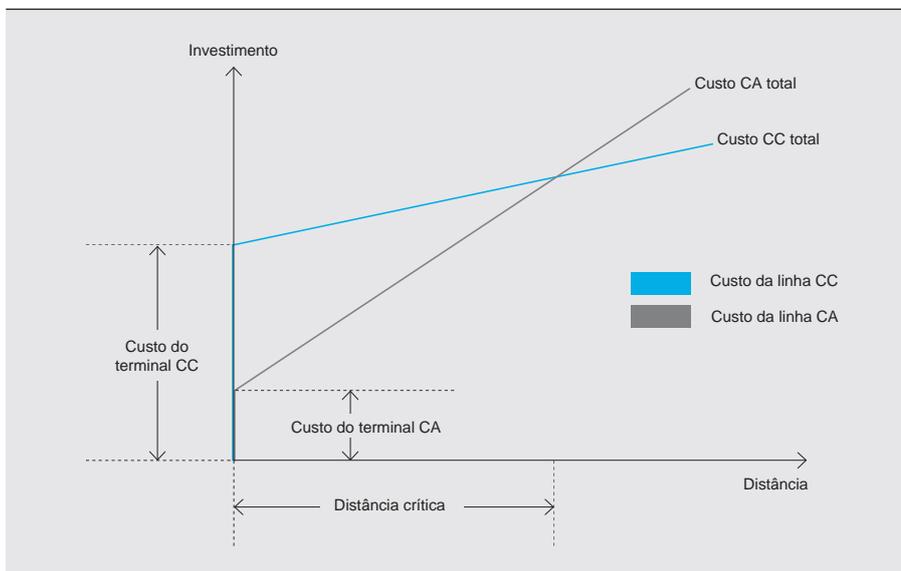


Figura 2.2: Comparações de aspectos da transmissão CA x CC.  
Fonte: [2]

## 2.4 Tecnologias associadas à transmissão CCAT

Como observado na Seção 2.2, o histórico das tecnologias de transmissão em corrente contínua começa, na década de 1950, com conversores CA-CC do tipo fonte de corrente - CSC baseados em válvulas de arco de mercúrio, e a partir da década de 1970 baseados em tiristores até chegar à introdução de conversores fonte de tensão - VSC, que utilizam transistores bipolares de porta isolada, chamados *IGBTs*, no final dos anos 1990.

Esta seção pretende apresentar, de forma resumida, os conversores do tipo fonte de corrente, comutado a capacitor e fonte de tensão, onde, os aspectos detalhados podem ser obtidos das referências [13], [15], [18], [19] e [20].

## 2.4.1 O conversor fonte de corrente - CSC ou LCC

A transmissão em CCAT considerada clássica é a que utiliza válvulas tiristorizadas comutadas pela rede. Esse tipo de conversor é conhecido como conversor fonte de corrente ou conversor comutado pela rede, de onde derivam as siglas (do inglês) *Current Source Converter - CSC* ou *Line Commutated Converter - LCC*. Eles precisam de uma fonte de tensão para operar, e a base da conversão é através de uma ponte de seis pulsos, denominada de *ponte de Graetz* [13].

O bloco do retificador de 6 pulsos pode ser ligado em série (ou em cascata) com outro retificador de 6 pulsos para formar um retificador de 12 pulsos, conforme ilustra a Figura 2.3 [18]. Se cada retificador for alimentado por transformadores Y-Y e Y- $\Delta$ , o que causa uma defasagem de  $30^\circ$  entre as saídas de cada transformador, as saídas de tensão e corrente sofrerão um cancelamento dos harmônicos característicos de ordem ímpar como o  $5^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $17^\circ$  e  $19^\circ$ , e atenuação dos demais [18], melhorando o desempenho.

Durante um período equivalente a  $360^\circ$ , cada uma das 6 combinações de tensão de linha da rede trifásica atinge um valor máximo durante um intervalo de  $60^\circ$ , período durante o qual um único par de chaves da ponte retificadora conduz corrente. Dessa forma, idealmente, o chaveamento alternado dos tiristores, com o ângulo de disparo das chaves entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , produz uma saída em CC. A magnitude da tensão de saída CC pode ser controlada através do ângulo de disparo  $\alpha$ .

No outro terminal do elo CCAT, há outra estação de válvulas chaveadas, mas com o ângulo de disparo das chaves entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ , de forma que a ponte no outro terminal funcione como um inversor e transmita potência CA para o resto da rede.

A condução unidirecional e a incapacidade de interrupção da condução pelos tiristores faz com que os pulsos de disparo só possam ser aplicados quando a tensão na válvula se torna positiva (no retificador) e tenham que ser removidos antes da tensão se tornar positiva (no inversor). Consequentemente, tem-se um atraso da forma de onda da corrente alternada em relação à tensão, conforme Figura 2.4 [20]. Este atraso é relacionado ao ângulo de disparo  $\alpha$  e de comutação  $\mu$  e resulta na absorção de potência reativa pelo retificador, se comportando como uma carga indutiva (lado CA). O mesmo acontece no inversor, relacionado ao ângulo de extinção  $\gamma$ , resultando na absorção de potência reativa pelo inversor. Em operação normal, a absorção de potência reativa nos terminais fica em torno de 50% da potência ativa transmitida [13].

A Figura 2.5 apresenta os principais componentes de uma estação conversora com base em conversores fonte de corrente, onde se destaca o maior número de filtros e compensação reativa quando comparado aos conversores do tipo fonte de tensão.

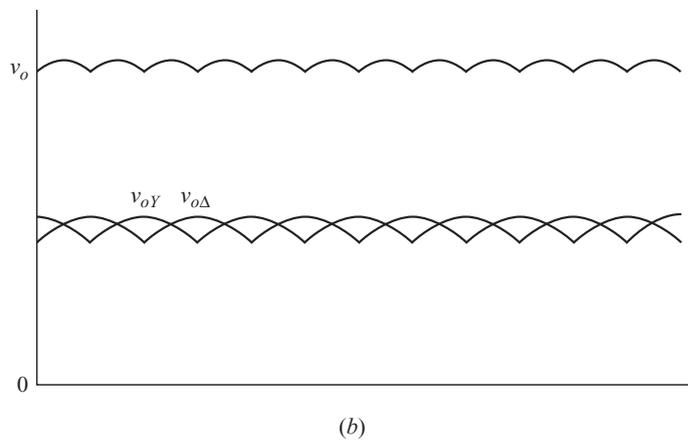
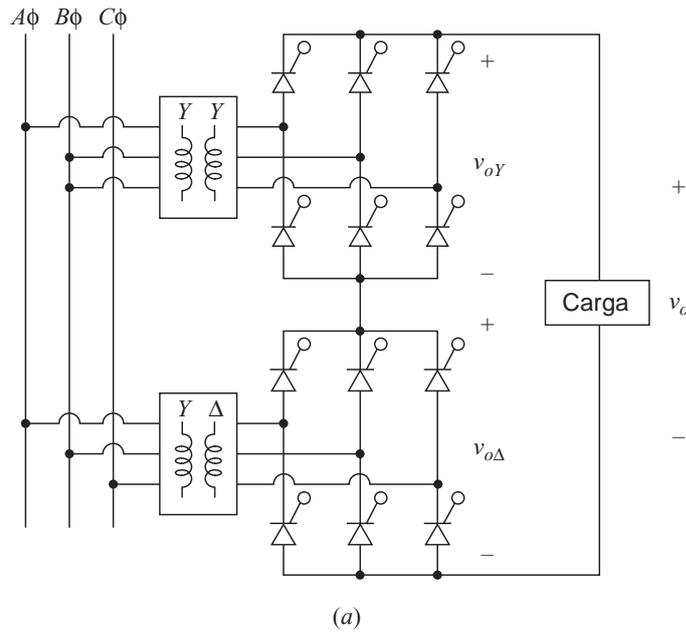


Figura 2.3: Ponte retificadora trifásica de 12 pulsos (a), com as tensões de saída (b).  
 Fonte: [18]

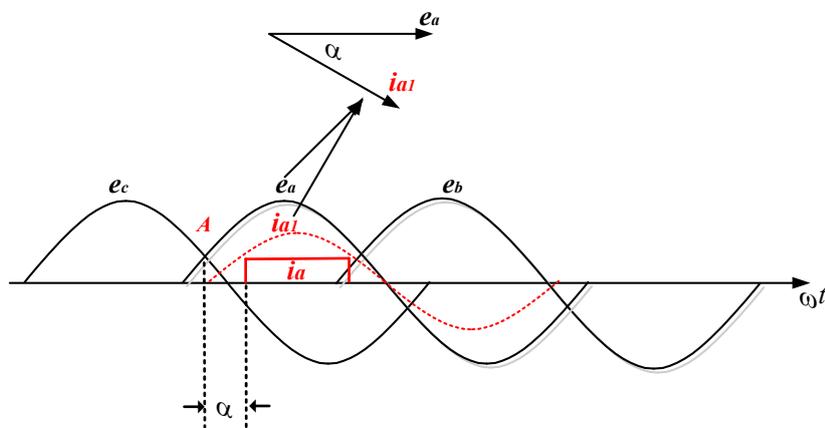


Figura 2.4: Deslocamento de fase entre tensão e corrente na fase A devido ao ângulo  $\alpha$ .  
 Fonte: [20]

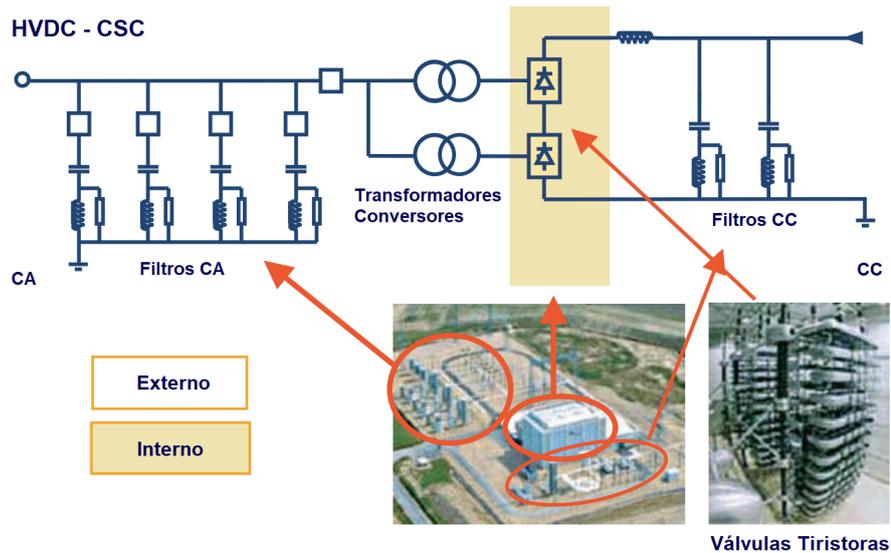


Figura 2.5: Sistema CCAT com Conversor Fonte de Corrente - CSC  
 Fonte: [21]

#### 2.4.1.1 O conversor comutado a capacitor - CCC

O conversor comutado a capacitor - CCC, de onde deriva a sigla (do inglês) *Capacitor Commutated Converter* - CCC, é um conversor CSC que utiliza capacitores série conectados no lado da válvula ou no lado da rede CA do transformador conversor, sendo o primeiro modo mais frequente

O capacitor em série fornece grande parte dos requisitos de compensação de potência reativa do conversor de forma automática conforme a corrente transmitida, o que é desejável, e fornece parte da tensão de comutação, melhorando a estabilidade da tensão [21].

Um destaque é a possibilidade de utilização em sistemas com baixos níveis de curto-circuito, eliminando assim a necessidade de utilização de compensadores síncronos na rede. Outra vantagem é que a probabilidade de falha de comutação é reduzida porque os capacitores fornecem uma tensão de comutação mais estável (que depende menos da condição da rede). Por outro lado, o CCC introduz maior estresse de tensão nas válvulas, exigindo maiores custos do conversor e produzindo mais harmônicos. No caso de falhas CC, a corrente de falha passará pelos capacitores, exigindo que sejam especificados para suportar tal estresse [15], [21].

O conceito de conversores comutados a capacitor foi implementado inicialmente em 2 projetos principais: 2002, 2200 MW,  $\pm 70$  kV, back-to-back Garabi (interconexão assíncrona entre Brasil e Argentina); 2003, 200 MW,  $\pm 13$  kV, back-to-back Rapid City (conexão entre duas redes americanas com baixos níveis de curto-circuito) [15].

## 2.4.2 O conversor fonte de tensão - VSC

Os Conversores Fonte de Tensão, de onde deriva a sigla (do inglês) *Voltage Source Converters - VSC*, são baseados em chaves autocomutadas, utilizando o transistor bipolar de porta isolada (*IGBT*), que tem vantagens em comparação a tiristores utilizados nos conversores *CSC*.

O uso de chaves semicondutoras autocomutadas permite a aplicação de técnicas de modulação de largura de pulso (PWM) de alta frequência. Com o uso de PWM, o VSC pode sintetizar uma tensão CA totalmente controlada, o que permite o controle preciso das potências ativa e reativa. Esta tensão aparece como uma função senoidal de frequência fundamental com harmônicos na frequência de comutação e seus múltiplos. O controle é muito rápido e, com feedback apropriado, o inversor fonte de tensão pode responder como uma fonte de corrente. Devido às frequências de comutação mais altas, os harmônicos são menores e, portanto, os requisitos de filtragem são reduzidos [15].

As principais vantagens dos conversores VSC, em comparação aos conversores CSC, de forma resumida, são [15]:

- A potência ativa e reativa podem ser controladas independentemente. O VSC é capaz de gerar potência reativa indutiva ou capacitiva e fornecer suporte de tensão à rede CA;
- Se não houver transmissão de potência ativa, as estações conversoras podem operar como compensadores síncronos estáticos independentes (*STATCOM*);
- O uso de PWM com frequência de comutação elevada separa a tensão fundamental das bandas laterais e suprime os componentes harmônicos e de frequência de comutação;
- O sentido da transmissão pode ser revertido instantaneamente (50–100 ms) sem a necessidade de reverter a polaridade da tensão CC (somente a direção da corrente CC);
- Boa resposta a falhas na rede CA. O VSC controla ativamente a tensão e corrente CA, de modo que a contribuição para a corrente de falha CA é limitada à corrente nominal;
- Capacidade de autorrestabelecimento ou *black-start*, que significa iniciar ou restaurar a energia para uma rede CA inativa (sem unidades geradoras);
- Conexão a sistemas CA passivos. Um conversor VSC pode gerar tensão CA usando um oscilador interno independente, facilitando a transição do modo rede para ilhado;
- É mais adequado para paralelismo no lado CC (desenvolvendo redes CCAT e CC multiterminais) devido à polaridade de tensão CC constante e melhor controle;
- Facilita o desenvolvimento modular, sendo que os mais recentes conversores modulares multiníveis (*MMC*) usam células de baixa tensão padrão com capacitores.

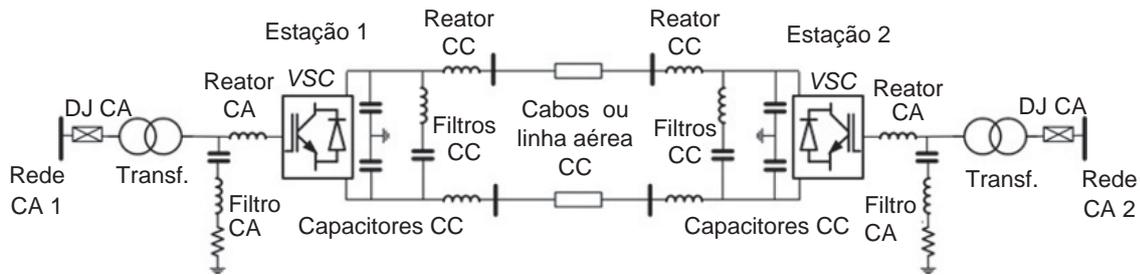


Figura 2.6: CCAT VSC monopolar simétrico baseado em um conversor de 2 níveis  
Fonte: [15]

A Figura 2.6 mostra o diagrama esquemático de um elo CC baseado em um conversor VSC de 2 níveis

Ao contrário do CSC, o VSC utiliza transformadores convencionais, pois não é necessário utilizar transformadores conversores nem defasagens entre os transformadores. Ainda em comparação ao CSC, no VSC não é necessário controle de tap nos transformadores e chaveamento de filtros do lado CA. O impacto de um conversor VSC em um sistema CA pode ser comparado à soma dos impactos de um CSC clássico e um compensador estático de reativos operando em paralelo [2]

O uso de conversores fonte de tensão em CCAT foi introduzido com o projeto de 3 MW,  $\pm 10$  kV em Hellsjön, Suécia, em 1997 [17].

A Figura 2.7 apresenta os principais componentes de uma estação conversora com base em conversores fonte de tensão, onde se destaca a necessidade reduzida de filtragem e compensação reativa, e que a maior parte dos componentes é instalada de forma abrigada.

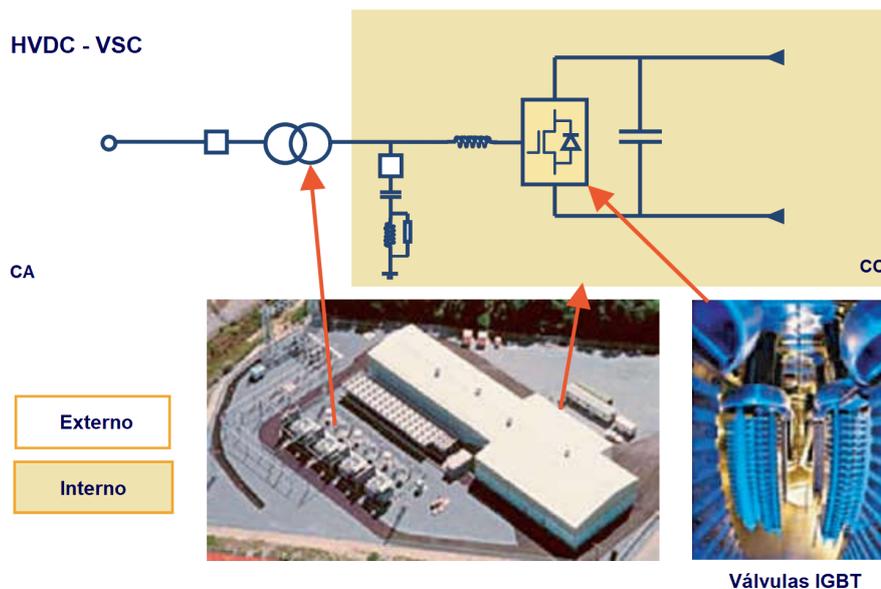


Figura 2.7: Sistema CCAT com Conversor Fonte de Tensão - VSC  
Fonte: [21]

## 2.5 Principais componentes da transmissão CCAT - CSC

Para que a transmissão em CCAT seja possível, além do processo de retificação e inversão da corrente de alternada para contínua e novamente para alternada, é necessário uma série de processos e seus respectivos componentes associados. Entre esses componentes, ou um conjuntos deles, destacam-se: as estações conversoras (onde estão localizados os transformadores conversores, as válvulas conversoras, além dos sistemas de filtragem e de compensação reativa); a linha de transmissão CC; os eletrodos de terra; além de chaves e disjuntores específicos.

### 2.5.1 Estações Conversoras

As estações conversoras são a parte central do funcionamento dos sistemas de transmissão CCAT, visto que têm a função de converter a tensão alternada da rede em tensão contínua. Entre os vários tipos de configurações do CCAT, há uma peça fundamental e comum a todas as estações conversoras, a ponte conversora.

A retificação é realizada por uma ponte trifásica de 6 válvulas chaveadas (ponte de Graetz), que pode ser constituída de válvulas tiristorizadas para tecnologias *LCC-HVDC (Line-Commutated Converter)*, conforme foi apresentado na Figura 2.3, ou de chaves transistorizadas IGBT, para tecnologias *VSC-HVDC (Voltage Source Converter)*. Em relação às válvulas de conversores fonte de corrente, elas são constituídas por um número adequado de tiristores conectados em série em busca de se atingir a tensão CC desejada para conduzir correntes elevadas e, também, bloquear tensões elevadas [15].

Outro componente de destaque é o transformador conversor, que tem como objetivos: manter uma tensão CA controlada do lado das válvulas; ser uma impedância limitando a corrente de curto-circuito nas válvulas; separar eletricamente os lados CA e CC [21]. Visando melhorar o desempenho harmônico, é normalmente utilizada uma configuração de 12 pulsos, com 2 pontes de 6 pulsos defasadas de  $30^\circ$ . Para isso, são utilizados 2 transformadores conversores, conectados em paralelo (ou um transformador de 3 enrolamentos), na configuração Y-Y e Y- $\Delta$ , cada um associado a uma ponte de 6 pulsos, como pode ser visto na Figura 2.8. Assim, haverá um cancelamento das primeiras harmônicas ímpares e atenuação das demais, melhorando o desempenho harmônico [19].

Ainda na estação conversora, estão localizados outros equipamentos auxiliares, destinados a melhorar o desempenho da rede CA ou da rede CC. Entre esses equipamentos estão os filtros CA, e CC, destinados a atenuar componentes harmônicas, e os capacitores em derivação, destinados a realizar a compensação da potência reativa consumida pelos conversores. Estes equipamentos são brevemente descritos na próxima sessão.

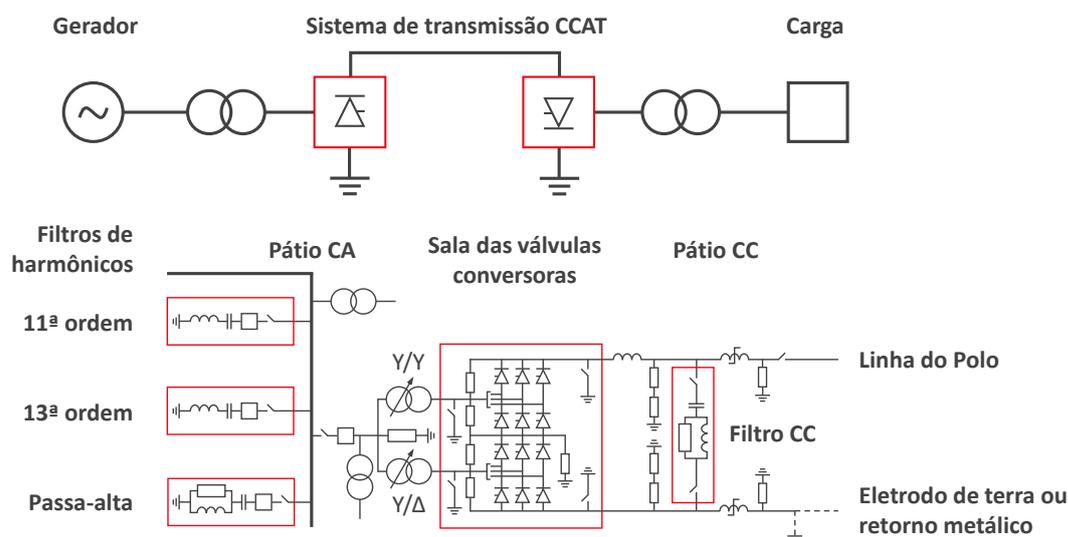


Figura 2.8: Componentes básicos de uma estação conversora  
 Fonte: [22]

## 2.5.2 Filtragem e compensação reativa em sistemas CCAT CSC

A operação de conversão nas estações CCAT resulta em formas de onda de saída que sempre apresentam algum grau de distorção. Dessa forma, é necessário realizar estratégias para lidar com a injeção de correntes harmônicas tanto na rede CA quanto na rede CC.

A eliminação ou atenuação de tais correntes é importante para a manutenção da qualidade do sistema elétrico, visto que são responsáveis por diversos efeitos negativos, além da conhecida distorção das formas de onda, como superaquecimento de componentes, perdas de potência ativa via correntes parasitas, etc. [18]

Uma das principais alternativas para a atenuação de harmônicas em sistemas CCAT é a utilização de filtros, que são componentes reativos projetados para atenuar as harmônicas geradas no sistema. Os filtros podem ser aplicados tanto no lado CC quanto no lado CA do sistema, e podem pertencer a diversas classes, como filtros sintonizados em frequência única, e múltiplas frequências além de filtros passa baixa [15]. Além da atenuação das correntes harmônicas, os filtros, por apresentarem um comportamento reativo capacitivo na frequência fundamental, contribuem para o fornecimento de parte da potência reativa consumida pelos conversores, reduzindo o intercâmbio de potência reativa da estação conversora com a rede CA em situações de transferência de potência próximas ao valor nominal e a exigência de um número maior de equipamentos de fornecimento de potência reativa.

A Figura 2.9 apresenta um diagrama do comportamento do consumo de potência reativa pelo conversor  $Q$ , em função da corrente CC  $I_d$  (destacado em verde). No mesmo diagrama podemos verificar que, em pu, o consumo de potência reativa se aproxima de 50% do valor de corrente transmitida. Para compensar o consumo, filtros e capacitores em derivação são ligados (destacado em vermelho), gerando uma variação do intercâmbio de potência reativa com a rede (destacado em laranja) [21].

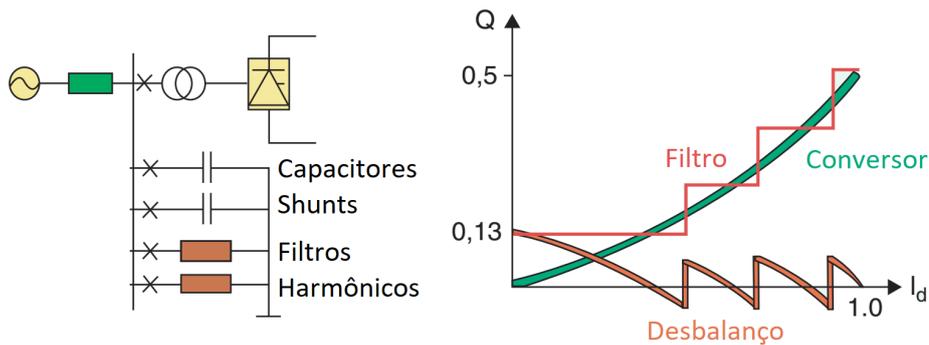


Figura 2.9: Compensação de potência reativa em uma estação conversora CCAT CSC  
Fonte: [21]

### 2.5.3 A linha de transmissão CC e os eletrodos de Terra

A transmissão em corrente contínua pode ser implementada utilizando linhas aéreas ou cabos subterrâneos/submarinos. Diferentemente dos sistemas de transmissão em corrente alternada, corrente contínua utiliza um número menor de condutores. Ainda em comparação com a CA, não há restrição física limitando a distância ou o nível de potência para os cabos CC, já em CA há uma queda na capacidade do cabo ao longo da distância devido ao seu componente reativo de corrente de carga [21]. Independentes da utilização de linhas aéreas ou cabos, podem ser utilizados dois cabos por polo (denominado retorno metálico) ou apenas um cabo (denominado retorno pela terra). As linhas aéreas são sujeitas a descargas atmosféricas, que no caso de conversores fonte de corrente, causam apenas distúrbios transitórios que podem ser gerenciados pelo sistema do conversor. No entanto, para os conversores fonte de tensão, falhas na linha CC causam distúrbios mais sérios [15].

Para a transmissão CC monopolar, utilizando apenas um cabo, o retorno da corrente (de forma contínua ou temporária) é realizado pela terra. Em sistemas bipolares, também é utilizado o retorno pela terra, porém com corrente próxima de zero para situações de correntes equilibradas, tendo em vista que para cada polo, a corrente flui em sentido oposto [21].

A utilização de retorno da corrente pela terra é possível porque a crosta da terra se comporta eletricamente como um condutor, porém com partes de alta resistividade. Logo, é necessário procurar por regiões onde se observa baixa resistividade e longe de áreas onde corrosão em estruturas metálicas enterradas e outros tipos de interferência podem ocorrer.

Alguns sistemas CCAT antigos operam normalmente com retorno pela terra/água do mar, mas a maioria dos operadores de rede dos países não permite mais correntes de solo permanentes, seja por razões ambientais ou de impacto em dutos e outros sistemas enterrados. Além disso, eletrodos de terra demandam custos de manutenção contínuos. A maioria dos sistemas bipolares podem operar com retorno pela terra por um curto período em caso de perda de um polo do sistema CCAT. Isso implica que eletrodos são projetados para corrente total, mas não conduzem corrente total em operação normal [15].

## 2.6 Configurações da transmissão CCAT

Os sistemas de transmissão em CCAT possuem as topologias básicas [21], [15], [13]:

**Topologia Monopolar:** nesta topologia, as duas estações conectadas por uma única linha condutora, que pode conduzir uma corrente em sentido positivo ou negativo, enquanto o retorno da corrente se dá por outro condutor (retorno metálico) ou pela terra.

**Conexão *back-to-back*:** esta topologia é semelhante à monopolar com retorno metálico, porém as estações retificadora e inversora geralmente se encontram na mesma localidade, ligadas por uma linha monofásica curta. Uma das principais aplicações da conexão *back-to-back* e a conexão entre dois sistemas AC assíncronos.

**Topologia Bipolar:** trata-se da topologia mais utilizada em sistemas CCAT, geralmente utilizando arranjos com pontes conversoras de 12 pulsos. Nesta topologia, duas interconexões de conversores independentes (polos) são feitas por meio de dois condutores de polaridades opostas. O retorno da corrente acontece no referencial de terra, compartilhado pelas interconexões. Com os polos transmitindo potencias similares, a corrente que circula pela terra e quase nula. Também pode operar como um sistema monopolar, com retorno pela terra, no caso de falha de uma das linhas.

**Topologia Multiterminal:** em linhas gerais, a topologia multiterminal é realizada através da conexão de 3 ou mais conversores a uma mesma rede CC. Os conversores podem ser conectados de forma paralela à tensão constante ou em série à corrente constante. Esta topologia pode utilizar conversores do tipo CSC, VSC ou ainda uma configuração híbrida.

A Figura 2.10 [17] apresenta um resumo de algumas configurações. É importante destacar, que além das configurações básicas apresentadas, existem outras configurações derivadas que se destinam a otimizar/possibilitar o funcionamento do sistema em situações de ausência de componentes como linhas ou conversores, e ainda, algumas configurações que não são economicamente viáveis e, portanto, normalmente não são utilizadas.

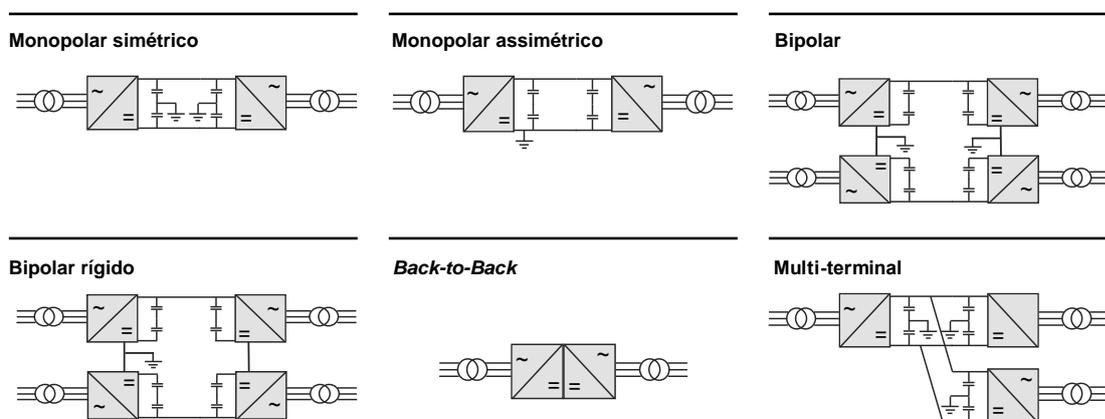


Figura 2.10: Configurações básicas da transmissão CCAT

Fonte: [17]

## 2.7 A transmissão em Corrente Contínua no Brasil

### 2.7.1 A transmissão através de elos CCAT

O esgotamento do potencial hidrelétrico próximo ao principal centro de carga na região Sudeste conduziu, a partir da década de 1980, a uma estratégia de exploração do potencial de outras regiões, que se tornariam exportadoras de eletricidade a partir da construção de usinas hidrelétricas - UHE de grande porte [23].

A usina binacional de Itaipu (PR) - 14.000 MW; a usina de Tucuruí (PA) - 8.370 MW; mais recentemente, as usinas de Santo Antônio e Jirau (RO) - somando 7.318 MW; e as usinas de Belo Monte e Pimental (PA) - somando 11.233 MW; entre outras, são exemplos de usinas hidrelétricas de grande porte localizadas longe dos centros de carga do país, sendo também as 5 maiores usinas do país em 2024 (considerando apenas a parte brasileira da UHE Itaipu) [24].

A localização desses empreendimentos, nas regiões sul e norte do país, levou à necessidade de transmitir elevados montantes de energia elétrica através de longas distâncias, o que, aliado às vantagens técnicas e econômicas da transmissão CCAT para as condições citadas, estimulou o desenvolvimento de sistemas de transmissão em corrente contínua no Brasil, o que será detalhado a seguir.

O primeiro sistema de transmissão em corrente contínua em alta tensão foi instalado no Brasil a partir de 1984 (concluído em 1990), com o objetivo de escoar o excedente da produção de energia, gerada em 50 Hz na parte paraguaia da UHE Itaipu, até o centro de carga na região sudeste do Brasil. O sistema é composto por dois bipolos com capacidade nominal total de 6300 MW, em  $\pm 600$  kV CC, e uma extensão de 792 km (para o Bipolo 1) e 820 km (para o bipolo 2), entre a subestação retificadora de Foz do Iguaçu, no Paraná, e a subestação inversora de Ibiúna em São Paulo. O sistema de transmissão CC associado à UHE Itaipu representou à época um avanço considerável em tecnologia em comparação com as estações CCAT da década de 1970. Foi o primeiro projeto do mundo em 600 kV CC e com a capacidade de 6300 MW, sendo superado apenas em 2010 pelo projeto Xiangjiaba-Shanghai na China, com 6400 MW de capacidade nominal em  $\pm 800$  kV CC e 1980 km de extensão [25].

Após um hiato de quase 30 anos, o segundo sistema de transmissão em corrente contínua foi instalado a partir de 2013, para transmitir a geração das usinas do rio Madeira - UHE Santo Antônio 3568 MW e UHE Jirau 3750 MW de Rondônia até o estado de São Paulo. Conhecido como Projeto Madeira, é composto por dois bipolos com capacidade nominal total de 6300 MW em  $\pm 600$  kV CC, assim como o sistema associado à UHE Itaipu, porém com uma extensão significativa de 2385 km entre a estação Coletora de Porto Velho, em Rondônia, e a estação conversora de Araraquara II, em São Paulo. As estações CA operam de forma assíncrona, pois a SE Coletora Porto Velho, embora opere em 60 Hz, está separada

do SIN por conversores CC *Back-to-Back* (detalhado na Seção 2.7.2) [26] [27]. Enfatize-se que o sistema CC do Madeira, em 2024, ainda é o maior projeto em extensão na tensão 600 kV CC no mundo.

Juntamente com a UHE Belo Monte, foi projetado, com reforços na rede CA, dois bipolos para transmitir uma parte da potência gerada pela usina até a região Sudeste. Esse sistema foi instalado a partir de 2017, e é composto por dois bipolos com capacidade total de 8000 MW em  $\pm 800$  kV CC. O primeiro Bipolo - Xingu-Estreito - transmite 4000 MW entre as subestações de Xingu, no Pará, e Estreito, em Minas Gerais, através de 2084 km de linhas CC. Já o segundo Bipolo - Xingu-Terminal Rio - transmite 4000 MW entre as subestações de Xingu, no Pará, e Terminal Rio, no Rio de Janeiro, através de 2543 km de linhas de transmissão CC [28] [29]. Além de ser o primeiro projeto CCAT em 800 kV no país, o Bipolo Xingu-Estreito, em 2024, possui a maior linha de transmissão em 800 kV CC no mundo, inferior apenas ao projeto Changji-Guquan na China, com 3324 km na tensão de  $\pm 1.100$  kV CC, inaugurado em 2019. Diferentemente dos bipolos citados anteriormente, que interligam redes CA assíncronas, os bipolos Xingu-Estreito e Xingu-Terminal Rio são do tipo Embutidos na rede CA, reforçando a interligação CA Norte/Sudeste, o que leva a condições particulares na operação em regime normal e durante contingências.

Estudos recentes desenvolvidos pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE recomendaram expansão das interligações, com ênfase na expansão da capacidade de exportação da região Norte/Nordeste do Brasil. O estudo é decorrente da larga expansão da Geração Variável Renovável (eólica e solar) dessa região. A expansão também tem como objetivo reforçar a interligação Norte-Sudeste em Corrente Alternada. A solução foi recomendada através de um bipolo de corrente contínua em  $\pm 800$  kV CC, potência nominal de 5000 MW, entre a nova subestação Graça Aranha (MA) e a subestação Silvânia (GO), distantes entre si em cerca de 1450 km, denominado bipolo Nordeste I. A Figura 2.11 ilustra a inserção do bipolo Nordeste I no Sistema Interligado Nacional (SIN). A alternativa recomendada para essa transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão (CCAT) foi de utilização da tecnologia *Line Commutated Converter* (LCC), já utilizada nos demais bipolos CCAT em operação no Brasil [30]. Como conclusão, no dia 15/12/2023 a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL realizou o Leilão de Transmissão N° 2/2023, onde o Lote 1 contemplava, entre outros, a construção do Elo CC Graça Aranha-Silvânia, com prazo para operação comercial de 72 meses a partir da assinatura do contrato, realizada em 03/04/2024, o que acontecerá em 2030 [31].

Os elos CCAT em operação, juntamente com o elo Graça Aranha-Silvânia, previsto para entrada em operação em 2030, além da utilização da tecnologia LCC, compartilham outra característica importante. Como pode ser visto de forma parcial na Figura 2.11, a proximidade elétrica entre as estações inversoras dos 5 elos CC citados (na região sudeste do país), é uma configuração denominada de *multi-infeed*. Estudos indicam que tal condição pode levar a degradação da estabilidade do sistema na ocorrência de falhas de comutação sucessivas nas estações inversoras, não abordado neste trabalho.

Tabela 2.1: Sistemas de transmissão em CC no Brasil - Bipolos CSC/LCC

Ano**	Sistema Associado	Subestações	Potência (MW)	Tensão (kV)	Ext. (km)	Embutido***
1984	ITAIPU 50 Hz	Foz do Iguaçu - PR / Ibiúna - SP	2 x 3150	±600	820	não
2013	MADEIRA 1 e 2	C. Porto Velho - RO / Araraquara II - SP	2 x 3150	±600	2385	não
2017	B. MONTE 1	Xingu - PA / Estreito - MG	1 x 4000	±800	2084	sim
2019	B. MONTE 2	Xingu - PA / Terminal Rio - RJ	1 x 4000	±800	2543	sim
2030 *	NORDESTE 1	Graça Aranha - MA / Silvana - GO	1 x 5000	±800	1468	sim

\* Leilão de Transmissão ANEEL N° 2/2023

\*\* As datas indicadas são referentes à entrada em operação do primeiro equipamento

\*\*\* sim = embutido na rede CA; não = interligando redes CA assíncronas

Fonte: [24] [32] [31] adaptado

A Tabela 2.1 sintetiza os principais dados dos sistemas de transmissão em corrente contínua em operação no Brasil, incluindo o elo CC Graça Aranha-Silvânia previsto para operação no ano de 2030. A Figura 2.11 apresenta a localização dos principais sistemas de transmissão em CCAT no país.

Além dos sistemas CC citados anteriormente, existem projetos de transmissão em corrente contínua em estudo pela EPE, ainda não licitados, entre os quais podem ser citados: um segundo corredor expresso de transmissão em corrente contínua, conectando a região próxima da fronteira dos estados Ceará e Rio Grande do Norte até a a região Sudeste, visando o escoamento da geração renovável [30] e Elos de transmissão em CC para o escoamento da geração associada ao projeto de construção de usinas no rio Tapajós. Em relação à tecnologia, destaca-se ainda, que no final de 2023, a EPE divulgou que realizaria uma Tomada de Subsídios para avaliar a possibilidade de aplicação em projetos futuros da tecnologia CCAT com conversores Fonte de Corrente (*Voltage Source Converter - VSC*) no sistema elétrico brasileiro.

## 2.7.2 A transmissão através de conversores *back-to-back*

Para melhor aproveitamento de recursos energéticos, países vizinhos buscam normalmente a integração de seus sistemas de transmissão de energia elétrica a partir de interligações internacionais. Este foi outro fator que estimulou o desenvolvimento de sistemas de transmissão em corrente contínua com países de fronteira com o Brasil, visando o intercâmbio de energia elétrica entre eles. A diferença de frequência da rede elétrica de países

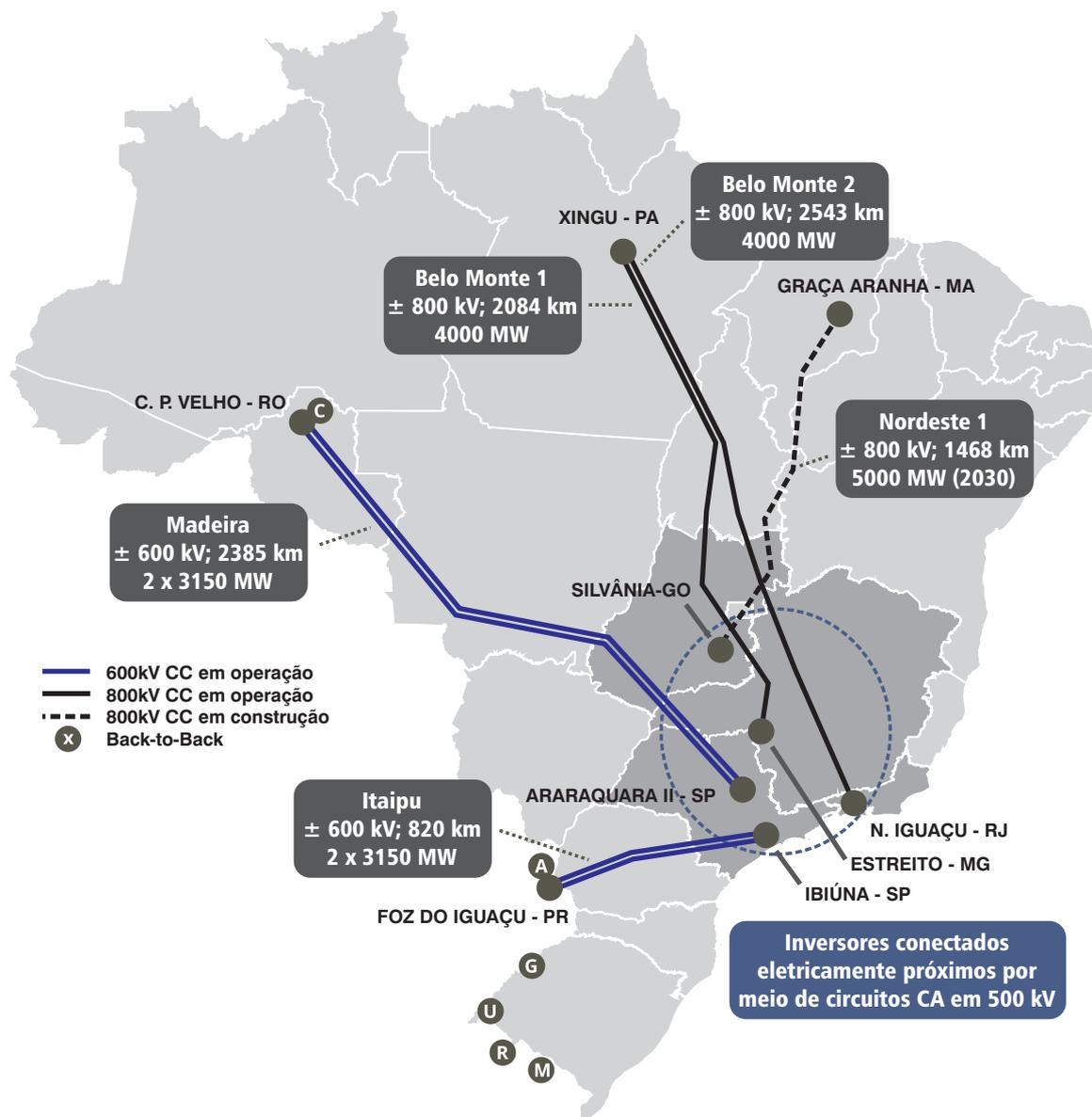


Figura 2.11: Principais sistemas de transmissão em corrente contínua no Brasil  
 Fonte: Elaborado pelo autor com base nas fontes: [24] [32] [33] [31]

como Argentina, Paraguai e Uruguai, que operam em 50Hz, impedem que sejam realizadas conexões síncronas entre os sistemas de corrente alternada dos dois países.

Como solução para conexão de duas redes CA de frequências diferentes, pode ser usada uma estação CC *back-to-back* para criar uma interconexão assíncrona entre duas redes de CA. Nestas instalações, ambos os conversores estão localizados na mesma estação e normalmente são utilizados para criar uma interligação assíncrona entre duas redes de CA, que podem ter frequências nominais iguais ou diferentes. Os sistemas de transmissão em corrente contínua do tipo *back-to-back*, que em alguns casos são conhecidos como conversoras de frequência, serão detalhados a seguir.

No Brasil, integração de seus sistemas de transmissão de energia elétrica a partir de

interligações internacionais aconteceu inicialmente com a interligação de Acaray, localizada entre a SE Foz do Iguaçu, no estado do Paraná, e a Central Hidrelétrica Acaray, no Paraguai, com o objetivo principal de atendimento à região de Foz do Iguaçu - PR, a partir do sistema paraguaio. A conversora de frequência Acaray, com capacidade instalada de 50 MW, de propriedade da *Administración Nacional de Electricidade - ANDE*, teve início de operação em 1981, com interrupção de uso por alguns anos, passando a operar comercialmente em 1999, mediante contrato firmado entre a Companhia Paranaense de Energia – Copel e a ANDE. Desde o dia 03 de setembro de 2007 a conversora Acaray encontra-se desligada devido a sinistro ocorrido nessa data [33].

Em 1994 foi inaugurada a estação conversora Uruguaiana, localizada no município de Uruguaiana, no oeste do estado do Rio Grande do Sul, na fronteira com a Argentina, com capacidade instalada de 50 MW. Esta estação conversora de frequência foi construída através de um acordo entre a Companhia de Geração e Transmissão de Energia Elétrica do Sul do Brasil - CGT Eletrosul e a empresa argentina *Águas Y Energia*, sendo de propriedade da CGT Eletrosul. A Conversora é utilizada para atendimentos emergenciais ao Brasil e à Argentina [33].

Em 2000 entrou em operação a estação conversora de frequência Garabi 1, com capacidade nominal de 1.100 MW, e em 2002 a conversora de Garabi 2, com mais 1.100 MW, localizadas no município de Garruchos-RS, sendo esta uma interligação internacional de grande porte entre a Argentina e o Brasil. As estações conversoras de frequência são de propriedade da Companhia de Interconexão Energética - CIEN (Brasil), assim como o sistema de transmissão em 500 kV de Garabi até a subestação Itá no Brasil. Os conversores são do tipo CCC - Conversor Comutado a Capacitor, mais robusto em sistemas CA "fracos", possuindo baixo consumo de potência reativa, minimizando o número de filtros. Essa interligação teve como objetivo principal a possibilidade de importação de energia elétrica pelo Brasil, assim como atendimentos frente a emergências no sistema brasileiro ou argentino. No entanto, já foi utilizada para atendimento à Argentina devido a dificuldades energéticas naquele país. Já houve também situação crítica de abastecimento energético no Uruguai, quando a interligação foi utilizada para atendimento àquele país por meio do sistema de transmissão da Argentina [33].

Em 2001, entrou em operação a estação conversora de frequência Rivera, mediante acordo entre a *Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas - UTE* (Uruguai) e a CGT Eletrosul, com capacidade nominal de 70 MW, localizada na fronteira do Município de Rivera, Uruguai, e Santana do Livramento, Brasil e interligada à subestação Livramento 2 no estado do Rio Grande do Sul. Esta estação conversora de frequência é de propriedade da UTE, sendo utilizada para atendimentos emergenciais ao Brasil e ao Uruguai, para atendimento a ambos os países devido a condições energéticas desfavoráveis ou para aproveitamento de oportunidades energéticas [33].

Em 2010, foi celebrado entre a Eletrobrás e a UTE o sobre a estação Melo, em que ficou definida a responsabilidade do empreendimento do lado brasileiro e do lado uruguaio, à

Eletrobrás e à UTE, respectivamente. Destaca-se que esse é o primeiro empreendimento integralmente implantado pela Eletrobrás na qualidade de proprietária da instalação. Em 2016 a conversora de frequência Melo, localizada no Município de Melo, no Uruguai, próximo da fronteira com o Município de Jaguarão, no Estado do Rio Grande do Sul, com capacidade nominal de 500 MW, foi integrada ao Sistema Interligado Nacional - SIN [33].

Tabela 2.2: Sistemas de transmissão em CC no Brasil - conversores *Back-to-Back*

<b>Ano*</b>	<b><i>Back-to-Back</i> (Nome - Local)</b>	<b>Terminais (Local - Tensão CA - Frequência)</b>	<b>Potência (MW)</b>	<b>Tensão CC (kV)</b>
1981	ACARAY ** Paraguai	Brasil - 138 kV - 60 Hz / Paraguai - 66 kV - 50 Hz	1 x 50	±25
1994	URUGUAIANA Brasil (RS)	Brasil - 230 kV - 60 Hz / Argentina - 132 kV - 50 Hz	1 x 50	±15
2000	GARABI I e II Brasil (RS)	Brasil - 500 kV - 60 Hz / Argentina - 500 kV - 50 Hz	2 x 1100	±70
2001	RIVERA Uruguai	Brasil - 230 kV - 60 Hz / Uruguai - 230 kV - 50 Hz	1 x 70	±20
2012	C. PORTO VELHO Brasil (RO)	C. Porto Velho - 500 kV - 60 Hz / C. Porto Velho - 230 kV - 60 Hz	2 x 400	±51
2016	MELO Uruguai	Brasil - 500 kV - 60 Hz / Uruguai - 500 kV - 50 Hz	1 x 500	±79

\* As datas indicadas são referentes à entrada em operação do primeiro equipamento

\*\* Desde 2007 a conversora Acaray encontra-se desligada devido a sinistro

Fonte: [24] [32] [31] adaptado

Diferente dos 5 sistemas de conversores *Back-to-Back* apresentados anteriormente - Acaray, Uruguaiana, Garabi, Rivera e Melo - que atuam como estações conversoras entre sistemas de frequência nominal diferentes, os conversores da SE Coletora Porto Velho atuam na conexão de sistemas assíncronos brasileiros de mesma frequência nominal (60Hz). Em 2012 e 2013, respectivamente, os conversores *Back-to-Back* 1 e 2 da SE Coletora Porto Velho entraram em operação, e estão localizados na cidade de Porto Velho - Rondônia, possuindo potência nominal de 400 MW cada. Os conversores são do tipo CCC - Conversor Comutado a Capacitor, mais robusto em sistemas CA fracos e com baixo consumo de potência reativa, e seu objetivo principal é conectar de forma assíncrona os barramentos de 500 kV (UHE Santo Antônio - 3568 MW, UHE Jirau - 3750 MW e Bipolos C. Porto Velho/Araraquara II - 6300 MW) e de 230 kV (sistema local dos estados do Acre e Rondônia, pertencentes ao Sistema Interligado Nacional) da SE Coletora Porto Velho - RO, conforme pode ser observado na Figura 2.12. Os conversores, em comparação a uma interligação em CA, restringem o impacto das unidades geradoras das usinas do rio Madeira para o sistema elétrico em 230kV do Acre e Rondônia [27].

A Tabela 2.2 apresenta uma síntese dos 6 conversores *Back-to-Back* citados, onde

destaca-se a baixa tensão CC utilizada, tendo em vista que os conversores estão localizados na mesma estação, o que reduz a necessidade de elevar a tensão visando a redução da corrente CC. Analisando as Tabelas 2.1 e 2.2, além da Figura 2.11, percebe-se que, embora já possua uma quantidade significativa de projetos em operação e em construção, o Brasil, com suas dimensões continentais e características específicas de volume e localização de geração e carga, pode se beneficiar ainda mais com a expansão da transmissão em Corrente Contínua.

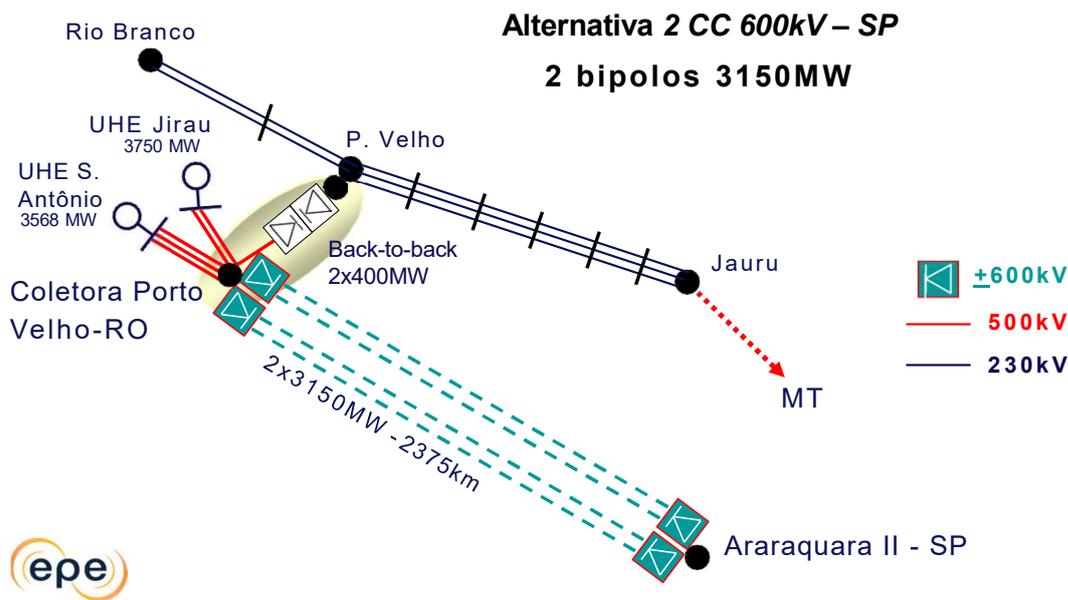


Figura 2.12: Sistema CCAT das usinas do rio Madeira - SE Coletora Porto Velho  
 Fonte: [27]

## 2.8 Conclusão do Capítulo

As vantagens da transmissão de energia em corrente contínua em relação à transmissão em corrente alternada foram exploradas neste capítulo, mas, percebe-se que, a depender de cada projeto associado, a complexidade técnica, os aspectos ambientais e os custos envolvidos serão decisivos na escolha de um dos sistemas.

Neste capítulo, foram apresentados, além da comparação entre as duas tecnologias, um breve contexto histórico da transmissão CCAT, as tecnologias de conversores fonte de corrente - CSC/LCC e fonte de tensão - VSC, e uma introdução aos componentes e configurações da transmissão CCAT. Ao final uma atenção especial foi dada ao abordar o contexto atual e futuro da transmissão em corrente contínua no sistema elétrico brasileiro.

Em relação à transmissão CCAT, este trabalho está focado na modelagem de conversores

fonte de corrente CSC/LCC, e as demais abordagens citadas, serão indicadas, ao final da dissertação, para trabalhos futuros.

# Capítulo 3

## A modelagem do Elo de Corrente Contínua CSC/LCC

### 3.1 Introdução

A incorporação da modelagem do sistema de transmissão em corrente contínua de alta tensão (CCAT) nos estudos de fluxo de potência das redes que utilizam essa tecnologia é de alta importância. Além da utilização e da importância da transmissão CCAT, como foi verificado no Capítulo 2, o seu impacto no desempenho da rede CA, mesmo em regime permanente, não pode ser negligenciado. Nesse sentido, destaca-se o consumo de potência reativa dos conversores fonte de corrente, e a contribuição para o controle da tensão CA dos conversores fonte de tensão. Logo, estudos de incorporação de modelagem, formulação da solução, desempenho de métodos de simulação, entre outros, são importantes para o tema.

Em estudos de integração de redes CA-CC, especificamente em relação à rede CC, alguns aspectos merecem destaque: o nível de detalhamento do modelo do conversor, a implementação dos modos de controle básicos e auxiliares e o método de solução iterativa das equações formuladas para as duas redes [13].

A metodologia para modelagem do conversor CC do tipo fonte de corrente utilizada, segue o que foi apresentado em [1, 34] e foi utilizada em [3] para desenvolver uma análise para solução simultânea do fluxo de potência CA-CC. Neste trabalho será implementada a solução sequencial para as iterações entre as redes CA e CC.

Este capítulo pretende apresentar a modelagem e solução da rede de corrente contínua, incluindo os modos de controle e o processo de integração entre a solução iterativa das redes CA e CC. Visando encadear o entendimento, no texto é apresentado, de forma sucinta, a formulação e solução do problema de fluxo de potência através do método de Newton-Raphson e do método Desacoplado-Rápido, que serão utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

## 3.2 A formulação e solução do problema de fluxo de Potência

O Problema de Fluxo de Potência - PFP (ou fluxo de carga) em uma rede de energia elétrica consiste na determinação do estado da rede, distribuição de fluxos e outras variáveis de interesse [35]. Tais cálculos são necessários para estudos de regime permanente e regime dinâmico [13]. O PFP utiliza métodos computacionais desenvolvidos para a resolução do sistema de equações e inequações algébricas que constituem o modelo estático da rede.

Na formulação do problema, a cada barra são associadas quatro variáveis, duas entram no problema como dados e duas como incógnitas: magnitude da tensão nodal de barra,  $|V|$ , ângulo de fase da tensão,  $\theta$ , potência ativa injetada na barra,  $P$ , e potência reativa injetada na barra,  $Q$ . Os tipos de barras, são categorizadas em função de quais variáveis entram como dados e quais são consideradas como incógnitas, definem-se três tipos de barras [35]:

- **Barra Slack -  $V\theta$** : neste tipo de barra são conhecidos a magnitude de tensão  $V$  e o ângulo de fase  $\theta$ , enquanto as potências ativa  $P$  e reativa  $Q$  injetadas são desconhecidas. O gerador dessa barra contribui para o balanço de potência ativa e fornece a referência angular do sistema.
- **Barra de Geração - PV**: a potência ativa injetada  $P$  e a magnitude da tensão  $V$  são conhecidas, enquanto a potência reativa injetada  $Q$  e o ângulo da tensão  $\theta$  são desconhecidos.
- **Barra de Carga - PQ**: neste tipo de barra, as potências ativa  $P$  e reativa  $Q$  injetadas são especificadas. A magnitude e o ângulo de fase das tensões  $V$  e  $\theta$ , por sua vez, são desconhecidos.

Considerando a representação simplificada de  $N$  barras de um sistema conectadas a uma barra genérica  $i$ , conforme Figura 3.1. Os ramos são representados por seus modelos  $\pi$  equivalentes onde as impedâncias séries foram convertidas em admitâncias em p.u. [36].

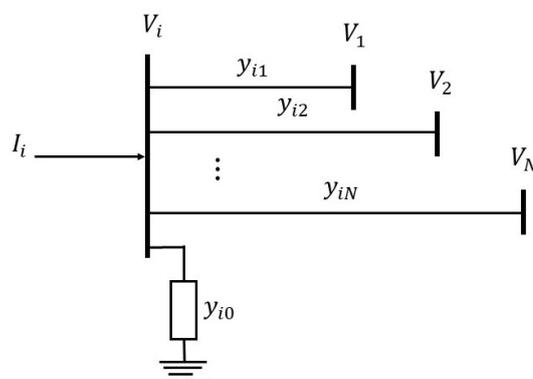


Figura 3.1: Representação de uma barra genérica  $i$  conectada a  $N$  barras.

Aplicando a Lei de Kirchhoff das Correntes à barra  $i$ , obtém-se de forma simplificada:

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^N y_{ij} - \sum_{j=1}^N y_{ij} V_j, j \neq i \quad (3.1)$$

A equação (3.1) pode ser reescrita em termos da matriz admitância conforme (3.2):

$$I_i = \sum_{j=1}^N Y_{ij} V_j \quad (3.2)$$

Expressando a equação (3.2) na forma polar, obtém-se (3.3):

$$I_i = \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| |V_j| \angle(\phi_{ij} + \theta_j) \quad (3.3)$$

A potência complexa na barra  $i$  é dada pela equação (3.4). Onde  $P_i$  e  $Q_i$  são as potências ativa e reativa injetadas na barra  $i$  e  $V_i^*$  é o valor complexo conjugado da tensão na barra  $i$ .

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (3.4)$$

Substituindo (3.3) em (3.4) para  $I_i$ , obtém-se a equação (3.5):

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle(-\theta_i) \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| |V_j| \angle(\phi_{ij} + \theta_j) \quad (3.5)$$

As equações básicas do PFP são obtidas separando-se a Equação (3.5) em partes real e imaginária. O PFP pode ser formulado como um conjunto de equações não-lineares do tipo:

$$P_i = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\phi_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad (3.6)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \text{sen}(\phi_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad (3.7)$$

ou, em termos dos *mismatches* de potência ativa e reativa:

$$\Delta P_i = P_i^{\text{esp}} - \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\phi_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad (3.8)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{\text{esp}} + \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \text{sen}(\phi_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad (3.9)$$

em que  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  correspondem aos *mismatches* de potência ativa e reativa na barra  $i$ ;  $P_i^{esp}$  e  $Q_i^{esp}$ , a potência ativa e reativa injetadas na barra  $i$ ;  $|V_i| \angle \theta_i$  é a tensão complexa na barra  $i$ ;  $|Y_{ij}| \angle \phi_{ij}$  é o  $ij$ -ésimo elemento da matriz de admitância de barra e  $N$  é o total de barras.

### 3.2.1 Método de Newton-Raphson para solução do PFP

As Equações (3.6) e (3.7) constituem um conjunto de equações algébricas não-lineares em termos das variáveis independentes. São duas equações para cada barra PQ, dadas pelas equações (3.6) e (3.7) e uma equação para cada barra PV, dada pela equação (3.6). Linearizando as equações básicas de balanço de potência em série de Taylor sobre a estimativa inicial e desprezando todos os termos de ordem superior, resulta no seguinte conjunto de equações lineares:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^{(k)}}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_1^{(k)}}{\partial \theta_n} & \left| \frac{\partial P_1^{(k)}}{\partial |V_1|} \right| & \cdots & \frac{\partial P_1^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_1|} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_1^{(k)}}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1^{(k)}}{\partial |V_1|} & \cdots & \frac{\partial Q_1^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_1|} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \theta_n^{(k)} \\ \Delta |V_1^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Assumindo a barra 1 como Barra *Slack*, a equação (3.10) é reescrita na equação (3.11) e as dimensões das submatrizes da matriz Jacobiana são apresentadas em (3.12), onde  $n_{PQ}$  e  $n_{PV}$  correspondem ao número total de barras PQ e PV. Na equação (3.10), a linha correspondente a  $\Delta P_1^{(k)}$  e a variável ângulo associada devem ser excluídas, por se tratar da equação da barra *slack*. Já em relação à  $\Delta Q_m^{(k)}$ ,  $m = slack$  ou PV, são excluídas linhas e variáveis associadas às barras *slack* e PV. Logo, o sistema resultante deve ter  $n = n_{PV} + 2n_{PQ}$  linhas e variáveis.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \theta_n} & \left| \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} \right| & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \theta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (3.11)$$



$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

A Equação (3.16) pode ser dividida em duas partes independentes, conforme (3.17) e (3.18). Estas duas equações desacopladas exigem menos tempo para resolução em comparação com (3.13). Além disso, uma simplificação pode ser realizada para eliminar a necessidade de se recalcular  $J_1$  e  $J_4$  durante cada iteração. Este procedimento resulta nas equações de fluxo de potência desacopladas desenvolvidas por Stott e Alsac [37].

$$\Delta P = J_1 \Delta \theta = \left[ \frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \Delta \theta \quad (3.17)$$

$$\Delta Q = J_4 \Delta |V| = \left[ \frac{\partial Q}{\partial |V|} \right] \Delta |V| \quad (3.18)$$

O formato desacoplado rápido é uma simplificação das equações (3.17) e (3.18):

$$\frac{\Delta P_i}{|V_i|} = -B_i' \Delta \theta, \quad i = 1, 2, \dots, (N - 1) \quad (3.19)$$

$$\frac{\Delta Q_i}{|V_i|} = -B_i'' \Delta |V|, \quad i = 1, 2, \dots, N_{PQ} \quad (3.20)$$

onde  $B_i'$  corresponde a uma linha da matriz  $B'$  e  $B_i''$ , uma linha da matriz  $B''$ , obtidas a partir da parte imaginária da matriz admitância  $\mathbf{Y}_{bus}$ , que corresponde à matriz de susceptância  $B$ . A diferença entre  $B'$  e  $B''$  é que  $B''$  é mantida como igual à parte imaginária de  $\mathbf{Y}_{bus}$ , enquanto  $B'$  considera desprezível o valor das resistências das interligações [35].

No método DR, as modificações em  $V$  e  $\theta$  são calculadas conforme (3.21) e (3.22).

$$\Delta \theta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P}{|V|} \quad (3.21)$$

$$\Delta |V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q}{|V|} \quad (3.22)$$

em que  $\frac{\Delta P}{|V|}$  e  $\frac{\Delta Q}{|V|}$  formam vetores cujos elementos são calculados em (3.19) e (3.20).

### 3.3 A modelagem e solução do PFP incluindo a rede de corrente contínua

Nesta seção, discute-se a modelagem do elo CC para inclusão na formulação do PFP.

### 3.3.1 A modelagem do Elo de corrente contínua

O modelo de Elo de corrente contínua do tipo fonte de corrente é descrito em [1, 34], em que o elo de transmissão em corrente contínua é representado pelo circuito da Figura 3.2 [3], com as variáveis listadas em seguida.

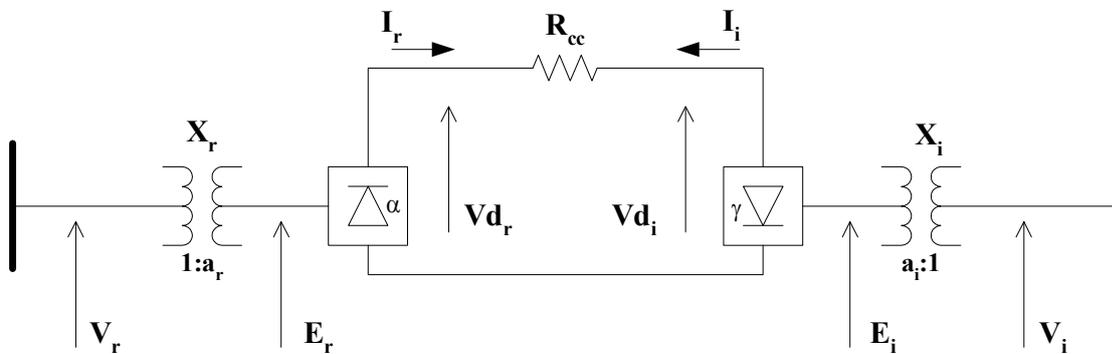


Figura 3.2: Elo CC interligando duas barras infinitas  
Fonte: [3]

- $V_c$ : Fator tensão do primário do transformador conversor ( $V_r$  ou  $V_i$ );
- $E_c$ : Fator tensão do secundário do transformador conversor ( $E_r$  ou  $E_i$ );
- $a_c$ : Tap do transformador conversor ( $a_r$  ou  $a_i$ );
- $X_c$ : Reatância de comutação do conversor ( $X_r$  ou  $X_i$ );
- $R_c$ : Resistência de comutação do conversor ( $R_r$  ou  $R_i$ );
- $V_{dc}$ : Tensão CC do polo do conversor ( $V_{d_r}$ : retificador,  $V_{d_i}$ : inversor);
- $I_c$ : Corrente CC injetada pelo conversor na linha CC ( $I_c = I_r$ : retificador ou  $I_c = I_i$ : inversor);
- $\delta_c$ : Ângulo de disparo/extinção do conversor, sendo:
  - $\alpha$ : Ângulo de disparo do retificador;
  - $\gamma$ : Ângulo de extinção do inversor;
- $\mu_c$ : Ângulo de comutação do conversor ( $\mu_c = \mu_r$ : retificador ou  $\mu_i$ : inversor);
- $\phi_c$ : Ângulo entre tensão e corrente da barra CA ( $\phi_c = \phi_r$ : lado do retificador ou  $\phi_c = \phi_i$ : lado do inversor);

O índice  $c$  em todas as variáveis representa o conversor, que pode ser retificador  $r$  ou inversor  $i$ , conforme a função utilizada no modelo.

As equações que modelam o retificador e o inversor do elo de corrente contínua são dadas por [1, 34] e podem ser verificadas em [8, 4, 13, 3, 6, 15] e outros.

A tensão CC do conversor, em pu, em função da magnitude da tensão CA referida para o lado secundário do transformador conversor é dada por:

$$Vd_c = k_c a_c V_c \cos(\delta_c) - R_c I_c \quad (3.23)$$

sendo as constantes:

$$k_c = k_r = k_i = B \left( \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right) \quad (3.24)$$

onde,  $B$  é o número de pontes conectadas em série por polo.

A resistência de comutação do conversor  $R_c$  é dada por:

$$R_r = \frac{3X_r}{\pi} \quad (3.25)$$

e

$$R_i = -\frac{3X_i}{\pi} \quad (3.26)$$

Os ângulos de disparo e comutação são obtidos de:

$$\mu_c = \arccos \left( \cos(\delta_c) - \frac{R_c I_c}{k_c a_c V_c} \right) - \delta_c \quad (3.27)$$

### 3.3.2 A rede de corrente contínua

A discussão que se segue refere-se à modelagem de um elo CC do tipo LCC, que é a utilizada neste trabalho para efeitos de simulações.

As equações 3.28 e 3.29 relacionam a tensão CC nos terminais do retificador e do inversor, e representam o modelo para a rede CC da Figura 3.2.

$$Vd_r - Vd_i - R_{cc} I_r = 0 \quad (3.28)$$

$$Vd_i - Vd_r - R_{cc} I_i = 0 \quad (3.29)$$

onde  $R_{cc}$  é a resistência da linha CC

$$I_r = -I_i \quad (3.30)$$

A magnitude, em p.u., da corrente fundamental no lado do conversor é relacionada à de corrente contínua pela Equação 3.31.

$$I_s = k \left( \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right) I_c \quad (3.31)$$

em que k é uma constante muito próxima da unidade. Para estudos de fluxo de potência, considera-se  $k = 0,995$ .

A transferência de potência complexa injetada no lado CA, é dada por:

$$S_c = V d_c I_c + j V d_c I_c \tan(\phi_c) = P_c + j Q_c, \quad (3.32)$$

em que

$$\tan(\phi_c) = \frac{2\mu_c + \text{sen}(2\delta_c) - \text{sen}(2(\delta_c + \mu_c))}{\text{cos}(2\delta_c) - \text{cos}(2(\delta_c + \mu_c))}, \quad (3.33)$$

A partir da equação 3.32, as potências ativa e reativa injetadas nas barras CA de interface do elo CC são dadas por [1]:

$$P_r^{ca} = V d_r I_r \quad (3.34)$$

$$Q_r^{ca} = V d_r I_r \tan(\phi_r) \quad (3.35)$$

$$P_i^{ca} = V d_i I_i \quad (3.36)$$

$$Q_i^{ca} = -V d_i I_i \tan(\phi_i) \quad (3.37)$$

### 3.3.3 O modelo matemático do retificador

As equações que modelam o retificador são [1, 34]:

$$V d_r - k_r a_r V_r \cos(\alpha) + \frac{3}{\pi} X_r I_r = 0 \quad (3.38)$$

$$\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu_r) - 2 \frac{R_r I_r}{k_r a_r V_r} = 0 \quad (3.39)$$

$$\frac{2\mu_r + \text{sen}(2\alpha) - \text{sen}(2(\alpha + \mu_r))}{\text{cos}(2\alpha) - \text{cos}(2(\alpha + \mu_r))} - \text{tg}(\phi_r) = 0 \quad (3.40)$$

### 3.3.4 O modelo matemático do inversor

As equações que modelam o inversor são [1, 34]:

$$Vd_i - k_i a_i V_i \text{cos}(\gamma) - \frac{3}{\pi} X_i I_i = 0 \quad (3.41)$$

$$\text{cos}(\gamma) - \text{cos}(\gamma + \mu_i) - 2 \frac{R_i I_i}{k_i a_i V_i} = 0 \quad (3.42)$$

$$\frac{2\mu_i + \text{sen}(2\gamma) - \text{sen}(2(\gamma + \mu_i))}{\text{cos}(2\gamma) - \text{cos}(2(\gamma + \mu_i))} - \text{tg}(\phi_i) = 0 \quad (3.43)$$

### 3.3.5 Os modos de Controle e de Operação do elo CC

As expressões indicadas nas seções anteriores possibilitam o cálculo das variáveis da rede CC e do acoplamento entre as redes CA e CC. No entanto, o impacto desse acoplamento, ocorre conforme o tipo de estratégia de controle adotado para o elo de corrente contínua, ou seja, atribuído ao retificador e ao inversor.

Conforme apresentado nas Equações 3.28 e 3.29, em um sistema de transmissão em CC, operando em regime permanente, a corrente na linha é determinada pela diferença de tensão CC entre os conversores. A Equação 3.23 mostra que as tensões CC, dependem dos módulos das tensões CA nas barras de interface, das reatâncias e da posição dos taps dos transformadores conversores, e dos ângulos de disparos e extinção do retificador e inversor respectivamente. Importante destacar que as tensões CA podem variar a partir de qualquer perturbação no sistema. Sabe-se que algumas características são fixas, como as reatâncias de comutação e resistência da linha CC. Então, as únicas variáveis que possibilitam o controle do fluxo de potência ou corrente através do elo CC são os ângulos de disparo dos conversores e os taps dos transformadores conversores [34]. Percebe-se que qualquer estratégia de controle a ser implementada utiliza a alteração de um ou mais das variáveis citadas.

A escolha do modo de controle do elo CC é influenciada pelos seguintes objetivos [13, 15]:

- Prevenção de grandes variações na corrente CC devido a variações no módulo das tensões do sistema CA, principalmente durante faltas;

- Manutenção da tensão CC próximo no valor especificado;
- Manutenção do fator de potência elevado nas barras de interface;
- Prevenção de falha de comutação no terminal inversor.

Os modos de operação podem ser selecionados ao longo do processo iterativo quando ocorre a violação de variáveis de controle do elo. Uma variável é mantida no seu limite quando ele é violado, e é liberada para variar quando é verificada que houve modificação na tendência de variação.

A seguir serão descritos os modos de controle *Normal* e *Alto consumo de potência reativa*, embora existam outros métodos não abordados.

### 3.3.5.1 Modo de Controle *Normal*

Neste modo, o elo de transmissão em corrente contínua atua segundo os seguintes modos de operação [3]:

- Controle de potência ou corrente no retificador.
- Controle do ângulo de extinção mínimo no inversor.
- Controle do tap do retificador para manter o ângulo de disparo em um valor especificado.
- Controle do tap do inversor para manter a tensão CC de referência em um valor especificado.

### 3.3.5.2 Modo de Controle *Normal* para o Retificador

Os modos de controle são definidos em função dos limites das variáveis do elo CC, e seus tratamentos são feitos automaticamente pela substituição de equações de controle no processo de solução. A Tabela 3.1 [3] mostra um resumo dos modos de operação que são relativos ao retificador, considerando o controle de corrente no elo CC.

A alteração dos modos de controle do retificador acontece da seguinte forma:

- Ponto inicial de operação:  
Neste caso, o tap do transformador no terminal que opera como retificador  $a_r$  varia com o objetivo de manter o ângulo de disparo do retificador  $\alpha$  em um valor especificado.
- Tap do transformador no limite:  
Caso o tap do transformador no terminal que opera como retificador  $a_r$  viole um de seus limites, o ângulo de disparo do retificador  $\alpha$  é liberado para variar, e o tap do transformador é mantido no seu limite.

Tabela 3.1: Modos de Operação do Retificador

Variável	Modos de Operação do Retificador			
	R1	R2	R3	R4
$a_r$	Varia	Limite	Limite	Limite
$\alpha$	Constante	Varia	Limite	Limite
$I_r$	Constante	Constante	Varia	Limite
$\gamma$	Constante	Constante	Constante	Varia

- Tap do transformador e ângulo de disparo do retificador no limite:  
Quando o ângulo de disparo  $\alpha$  atinge um determinado limite, a corrente CC  $I_{cc}$  deixa de ser controlada pelo retificador. Neste caso, a corrente é liberada para variar e o ângulo de disparo é mantido no seu valor limite, bem como o tap do transformador.
- Tap do transformador, ângulo de disparo do retificador e corrente do elo no limite:  
A corrente CC do elo passa a diminuir em relação ao valor especificado, até o ponto em que a "margem de corrente", que consiste em se ter a ordem de corrente no inversor menor que a do retificador, correspondendo de 10 a 15% da corrente nominal, no inversor é violada [34, 13]. Neste caso, a corrente passa a ser controlada pelo inversor e o ângulo de extinção do inversor é então liberado. A tensão CC será diminuída, através do aumento do ângulo de extinção do inversor, mantendo assim a diferença de potencial necessária para a transmissão da corrente desejada.

### 3.3.5.3 Modo de Controle *Normal* para o Inversor

A Tabela 3.2 mostra um resumo dos modos de operação relativos ao inversor, para este modo de controle [3].

Tabela 3.2: Modos de Operação do Inversor

Variável	Modos de Operação do Inversor	
	I1	I2
$a_i$	Varia	Limite
$Vd_{ref}$	Constante	Varia

A alteração dos modos de controle do inversor acontece da seguinte forma:

- Ponto inicial de operação:  
Neste caso, o tap do transformador do inversor  $a_i$  é inicialmente liberado para variar,

com o objetivo de controlar a tensão CC de referência  $Vd_{ref}$  no valor especificado. Esta tensão é a tensão CC do retificador ou do inversor [13].

- Tap do transformador no limite:

Caso o tap do transformador inversor  $a_i$  viole um de seus limites, a tensão de referência  $Vd_{ref}$  deixa de ser controlada e o tap do transformador é mantido constante.

#### 3.3.5.4 Modo de Controle "*Tensão CC reduzida*" e "*Alto consumo de potência reativa*"

A "*Operação com tensão CC reduzida*" - "*Reduced DC Voltage Operation*" (RVO) tem como objetivo estabelecer e manter uma tensão CC no polo menor que o valor nominal. É normalmente empregada quando há problemas de isolamento na linha ou no pátio CC. Este modo de operação pode ser acionado automaticamente pelo sistema de proteção ou manualmente por comando do operador. Enquanto a denominação e forma de implementação do RVO é quase padronizada, o termo "*Alto consumo de potência reativa*" - "*High Mvar Consumption*" (HMC) não é universal e alguns projetos não a utilizam. Podemos então chamar de HMC qualquer estratégia de controle ou modo de operação cujo objetivo seja aumentar intencionalmente o consumo de potência reativa pelos conversores, para auxiliar no atendimento aos requisitos de intercâmbio de potência reativa ou no controle de tensão do sistema CA [38].

Quando o sistema CA referente ao inversor está operando sob carga leve, sua tensão tende a ser elevada em relação às condições nominais de operação. Este fato, pode fazer com que o tap do transformador do inversor  $a_i$  atinja seu limite mínimo. Se o elo CC estiver em modo *normal* de operação, após o tap do transformador do inversor atingir seu limite, libera-se a tensão CC de referência  $Vd_{ref}$ , conforme Tabela 3.2.

Entretanto, no modo de controle HMC, ao atingir o tap mínimo do transformador do inversor, o ângulo de extinção  $\gamma$  é liberado para variar ao invés da tensão. Desta forma, o consumo de potência reativa do inversor  $Q_i^{cc}$  é aumentado. Logo, o conversor passa a se comportar como um grande reator, absorvendo um valor maior de potência reativa da rede CA em relação a seu modo normal de controle [3].

Já no modo de operação RVO, a redução da tensão é obtida através da ação intencional e coordenada do controle de tape e do controle de disparo dos conversores (normalmente, os polos podem reduzir individualmente a tensão CC  $Vd_c$  até um valor da ordem de 70% a 80% da tensão nominal). Quando o comutador de tape atinge o limite, a redução da tensão passa a ser obtida através do aumento do ângulo de extinção  $\gamma$ . Como consequência, há uma elevação significativa do consumo de potência reativa pelos conversores. Desta forma, também é possível utilizar o modo RVO para elevar intencionalmente o consumo de potência reativa dos conversores, e assim contribuir para o controle de tensão do sistema CA. Em geral, a operação em RVO resulta em ângulos de extinção e de disparo bastante elevados, o que não é ideal, pois aumenta as perdas e solicitações elétricas dos conversores [38].

### 3.4 O processo de cálculo da rede CC e CA

As equações na rede CA envolvem geração e carga, formando uma injeção de potência equivalente, que são bem estabelecidas através das equações de balanço de potência definidas em 3.6 e 3.7 [35] [13].

As equações da rede CC foram apresentadas nas Subseções 3.3.1 a 3.3.4 e estão associadas aos módulos das tensões CA nas barras de interface.

Uma vez definida a estratégia de controle e selecionado o modo de operação inicial do retificador e do inversor do elo CC, o processo de cálculo envolvendo a rede CA depende das contribuições de potência ativa e reativa demandadas pelo elo, definidas através das Equações 3.34 a 3.37, nas expressões 3.8 e 3.9, que estão apresentadas nas Equações 3.44 e 3.45

Neste caso, a barra CA, onde o retificador ou o inversor está conectado é chamada de *barra de interface* para o conversor. Nesta situação, as potências ativa e reativa do elo CC compõem as injeções  $P^{esp}$  e  $Q^{esp}$  das barras CA de interface. Uma vez que essas injeções de potência são calculadas a partir da iteração com os resultados das variáveis da rede CC (levando-se em consideração os modos de controle do retificador e inversor), elas são introduzidas no fluxo CA compondo as injeções de potência nas barras de interface do conversor, da seguinte forma:

$$P_i^{esp} = P_i^{esp(ca)} + P_c^{ca} \quad (3.44)$$

$$Q_i^{esp} = Q_i^{esp(ca)} + Q_c^{ca} \quad (3.45)$$

em que  $P_i^{esp}$  e  $Q_i^{esp}$  correspondem, respectivamente, às injeções líquidas de potência ativa e reativa na barra de interface do conversor. Aqui,  $P_i^{esp(ca)}$  e  $Q_i^{esp(ca)}$  correspondem, respectivamente, às injeções de potência ativa e reativa na barra de interface do conversor devido às próprias cargas CA conectadas ao barramento, enquanto  $P_c^{ca}$  e  $Q_c^{ca}$  são, respectivamente, a potência ativa e reativa absorvida pelo conversor de corrente contínua (retificador  $r$  ou inversor  $i$ ) na barra CA e que serão adicionadas à injeção de potência total da barra CA.

Na sequência, efetua-se a simulação do fluxo de potência CA, através de um método numérico escolhido, para determinação dos estados (magnitude e ângulo das tensões nas barras CA). Repete-se o processo até que as potências especificadas e as condições de controle do elo CC sejam atendidas.

A Figura 3.3 ilustra um esquema para a interface entre os módulos CA e CC para a modelagem e solução do problema de fluxo de potência (PFP). O módulo CC, destacado em cinza, recebe a cada iteração do fluxo de potência da rede CA o módulo da tensão das barras de interface. Após calcular as variáveis CC a partir da definição do modo de controle e operação do elo, o módulo CC repassa para o módulo CA as potências ativa e reativa nas barras do retificador e do inversor.

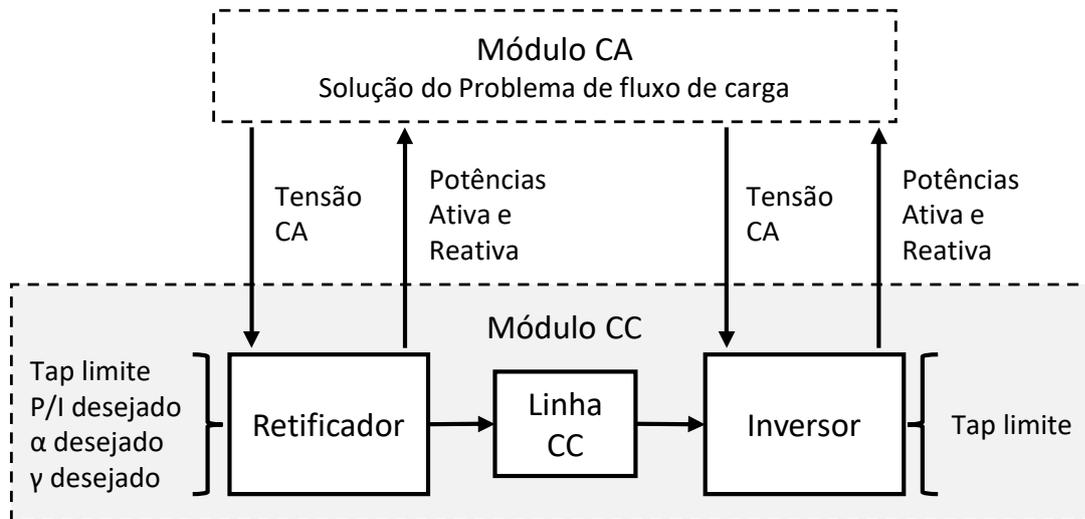


Figura 3.3: Fluxograma evidenciando a inclusão da rede CC no fluxo CA para o método iterativo

Esta forma de resolução do PFP com elos CC é a bem conhecida forma iterativa sequencial, apresentada no capítulo 1, na qual o sistema de equações da rede CA e da rede CC são calculados iterativamente de forma alternada até se obter convergência. Como, a cada iteração, a solução de cada rede é realizada de forma independente, apenas coletando resultados da iteração anterior da outra rede, diferentes métodos iterativos de solução podem ser utilizados em cada rede.

### 3.5 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo, foi apresentada, de forma simplificada, a formulação do problema de fluxo de potência e a solução através dos métodos de Newton-Raphson e Desacoplado-Rápido. A modelagem do conversor de corrente contínua do tipo fonte de corrente, da rede CC e seus modos de operação e de controle foi abordada de forma detalhada. A inclusão do resultado da rede CC no fluxo de potência CA, visando o estudo da rede CA-CC foi apresentada, de forma a subsidiar as implementações no ambiente do programa MATPOWER que serão apresentadas no Capítulo 4.

Embora o método de solução simultânea das equações CC e CA seja considerado por alguns autores de maior eficiência, o método de solução sequencial apresentado neste capítulo, e que será utilizado neste trabalho, é de implementação mais simples, auxiliando no desenvolvimento de técnicas de soluções de fluxo de potência em diversas plataformas.

No próximo capítulo, a implementação computacional do problema será apresentada em detalhes.

# Capítulo 4

## Inclusão da rede CC no cálculo do Fluxo de Potência CA

### 4.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo descrever a implementação computacional incorporando o elo CC cuja modelagem foi apresentada no capítulo 3. A principal finalidade é destacar a incorporação da modelagem da rede CC no PFP CA em um programa existente e de código aberto. Com isto, busca-se a execução de simulações e testes práticos de solução do PFP em rede CA-CC. Para a execução do PFP na rede CA-CC são destacados: a ferramenta utilizada, os métodos de solução, a forma de entrada e saída de dados e a integração com a rede CC.

Neste capítulo são descritos os métodos computacionais de fluxo de potência utilizados, o programa de fluxo de potência em CA MATPOWER, base para o trabalho dessa dissertação, e o módulo desenvolvido para execução do cálculo da rede CC e integração com a rede CA.

No módulo proposto, descreve-se como o problema de fluxo de potência com elo CC é resolvido e implementado computacionalmente, para ser executado utilizando a estrutura existente do MATPOWER. São apresentados o modo de inclusão do cálculo da rede CC no módulo CA, a estruturação dos dados base para simulação, o detalhamento das novas funções desenvolvidas e, ao final, o formato de apresentação dos resultados.

### 4.2 Os métodos de Fluxo de Potência utilizados

Para a inclusão da modelagem e solução da rede de corrente contínua no cálculo do fluxo de potência em corrente alternada, disponível no programa MATPOWER, foram selecionados para a implementação, simulação e testes deste trabalho, dois métodos iterativos de solução do problema de fluxo de potência disponíveis no programa MATPOWER: o método de Newton-Raphson e o método Newton-Raphson Desacoplado Rápido.

### 4.3 O programa de fluxo de potência CA MATPOWER

O MATPOWER [12] é uma ferramenta desenvolvida por pesquisadores da Universidade de Cornell, em Ithaca, NY, para resolver problemas de simulação e otimização de sistemas elétricos de potência em regime permanente, como:

- Fluxo de potência - *Power Flow* (PF) - utilizado nesse trabalho;
- Fluxo de potência continuado - *Continuation Power Flow* (CPF);
- Fluxo de potência ótimo - *Extensible Optimal Power Flow* (OPF).

A ferramenta é baseada em um pacote de arquivos de código aberto “.m” de licença gratuita, podendo ser utilizado nas plataformas MATLAB [39] ou OCTAVE [40]. Uma vantagem dessa última plataforma é sua equivalência com o MATLAB e o fato de ser inteiramente gratuita, algo que é pouco explorado em utilização de simuladores por parte da comunidade de sistemas de potência. No entanto, o pacote MATPOWER, na versão utilizada neste trabalho, não disponibiliza um modelo que permita a simulação de elos de corrente contínua em um sistema integrado CA-CC.

O programa pretende ser uma ferramenta de simulação para pesquisadores e educadores que seja fácil de usar e modificar. MATPOWER foi projetado para oferecer o melhor desempenho possível, mantendo o código simples de entender e modificar [41].

Os seguintes algoritmos de solução de fluxo de potência podem ser selecionados:

- Método de Newton-Raphson;
- Método de Newton-Raphson desacoplado rápido, versão XB e versão BX;
- Método de Gauss-Seidel;
- Método linear (CC).

Os resultados apresentados pelo programa podem ser filtrados conforme os interesses do usuário, como exemplo:

- Apresentar totalmente/parcialmente a informação geral da progressão das iterações realizadas pelo programa;
- Apresentar apenas a informação relativa ao fluxo de potência convergido de geradores, ramos e barramentos.

### 4.3.1 Os dados de entrada e de saída do MATPOWER original

Os dados de entrada do caso a ser simulado são definidos em um arquivo do tipo ".m" do programa MATLAB, conhecido como *MATPOWER case* e especificados no programa MATPOWER pela variável "mpc.var", em que *var* é uma das opções definidas como se segue, conforme o tipo de dado [42]:

- baseMVA: Valor escalar que indica a potência base do sistema, em MVA;
- bus: Matriz que apresenta os barramentos da rede a ser simulada e as respectivas injeções de potência ativa e reativa;
- branch: Matriz que define as linhas de transmissão, transformadores e transformadores defasadores, contendo os seus principais parâmetros;
- gen: Matriz que define os geradores presentes no caso base;
- gencost: Matriz que define os custos das potências ativa e reativa (opcional).

A Figura 4.1 apresenta o formato da máscara dos dados de entrada, e o detalhamento da formatação dos dados de cada matriz [42].

```
function mpc = case4gs
%CASE4GS Power flow data for 4 bus, 2 gen case from Grainger & Stevenson.
% Please see CASEFORMAT for details on the case file format.
%
% This is the 4 bus example from pp. 337-338 of "Power System Analysis",
% by John Grainger, Jr., William Stevenson, McGraw-Hill, 1994.

%% MATPOWER Case Format : Version 2
mpc.version = '2';

%%----- Power Flow Data -----%%
%% system MVA base
mpc.baseMVA = 100;

%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin
mpc.bus = [
    1 3 50 30.99 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
    2 1 170 105.35 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
    3 1 200 123.94 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
    4 2 80 49.58 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
];
%% generator data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pcl Pc2 ...
% Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30 ramp_q apf
mpc.gen = [
    4 318 0 100 -100 1.02 100 1 318 0 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0;
    1 0 0 100 -100 1 100 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0;
];
%% branch data
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status angmin angmax
mpc.branch = [
    1 2 0.01008 0.0504 0.1025 250 250 250 0 0 1 -360 360;
    1 3 0.00744 0.0372 0.0775 250 250 250 0 0 1 -360 360;
    2 4 0.00744 0.0372 0.0775 250 250 250 0 0 1 -360 360;
    3 4 0.01272 0.0636 0.1275 250 250 250 0 0 1 -360 360;
];
```

Figura 4.1: Exemplo da máscara de entrada de dados em caso base do MATPOWER original representando uma rede CA

## 4.4 O módulo desenvolvido para a solução da rede CC-CA

Para a integração da solução das redes CC e CA no programa de fluxo de potência MATPOWER, definido na seção anterior, foi necessário realizar o desenvolvimento de novos módulos para o programa e o ajuste de funções para possibilitar, principalmente o envio e recebimento dos dados de interesse entre o módulo desenvolvido neste trabalho e o programa original.

### 4.4.1 A inclusão do cálculo da rede CC no módulo CA

Conforme apresentado na Seção 1.2.2, a integração dos processos iterativos de solução das redes CC e CA é, em geral, efetuado utilizando a metodologia sequencial ou a metodologia simultânea, com suas respectivas características. Neste trabalho, foi realizada a adoção da metodologia sequencial, devido principalmente à sua facilidade de integração a uma ferramenta de solução de problema de fluxo de potência CA convencional, e em função da sua simplicidade de implementação.

A Figura 4.2 exibe um fluxograma para a resolução iterativa do PFP utilizando a metodologia sequencial, que consiste na obtenção, de forma alternada, de soluções para a rede CA (MATPOWER original) e para a rede CC, até que as variações das potências, entre iterações consecutivas, sejam menores que uma tolerância estabelecida.

O primeiro passo do processo de solução consiste na determinação do estado operativo do sistema CC para os módulos das tensões iniciais na rede CA e para as condições iniciais dos modos de controle estabelecidos para o sistema CC. Note-se que, a cada iteração, é necessário resolver o fluxo de potência da rede CA (módulo CA), ler e levar os resultados para a execução do módulo CC (*função fluxoDC.m*) a fim de calcular as grandezas dos elos de corrente contínua e verificar o atendimento das condições de controle mediante o cálculo dos resíduos, porém na parte CA.

As potências ativa e reativa do lado CA dos conversores são somadas nas injeções de potência das respectivas barras CA, antes de seguir para os próximos passos do fluxo de potência original, conforme definido na Seção 3.4.

Enquanto não houver convergência, as iterações do fluxo de potência CA são executadas novamente. O critério de convergência para os resíduos de potência é baseado no atendimento de uma tolerância, que neste trabalho está fixada em  $10^{-6}$  pu de potência para os dados da rede CA.

Após a convergência, é realizado o cálculo dos fluxos de potência nos ramos existentes, e da potência da barra *slack* do sistema, e finalizada a execução do Problema de Fluxo de Potência. Antes da apresentação dos resultados, os resultados correspondentes aos conversores CC são retirados da injeção de potência das respectivas barras CA para serem apresentados em relatório específico. O módulo CC em detalhes será apresentado na Seção 4.4.4.

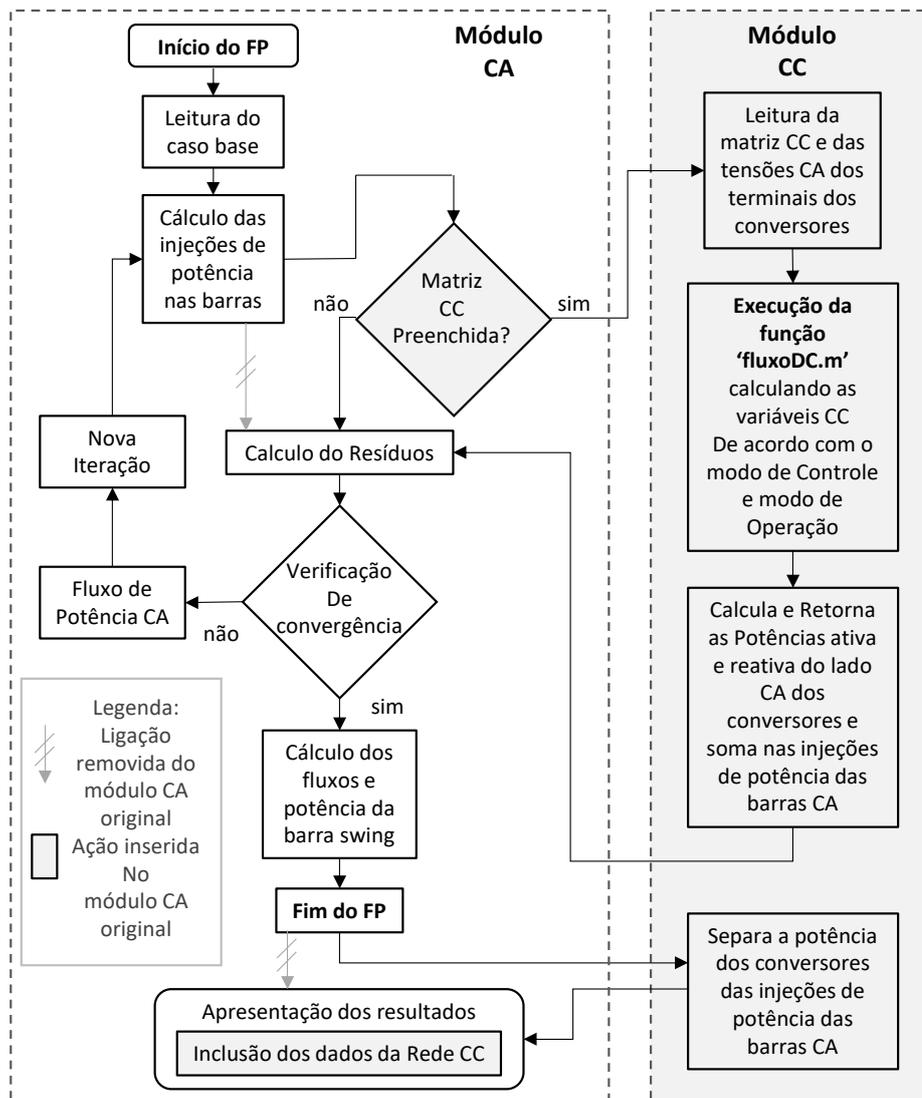


Figura 4.2: Fluxograma do módulo CC, desenvolvido neste trabalho, acoplado ao módulo CA existente no MATPOWER.

#### 4.4.2 Estruturação dos dados base para simulação

A inclusão da rede de corrente contínua no cálculo de fluxo de potência depende de informações adicionais que não estão previstas no programa MATPOWER original até a versão utilizada no trabalho. Buscando preencher essa lacuna, *propôs-se uma estrutura de dados suplementar* para atender esse requisito. Propôs-se que essa nova estrutura seja alocada ao final da estrutura de dados do arquivo original do programa, cujo padrão original foi apresentado na Seção 4.3.1. Essa estrutura requereu, portanto, o desenvolvimento de um novo *script* (na forma de matriz de dados padronizada do programa original) para ser inserida nos dados do caso base do MATPOWER, a qual se denominou *DCbranch*.

O novo *script* requer os dados a seguir para a representação do elo CC, e seleção do modo de operação, conforme definido no Capítulo 3. Enfatiza-se novamente que somente elos com tecnologias do tipo LCC foram previstos para implementação neste trabalho.

Tabela 4.1: Matriz DCbranch incluída na máscara de entrada de dados do MATPOWER

Nome	Coluna	Descrição
rbus	1	Nº do Barramento do retificador na rede CA (mpc.bus)
ibus	2	Nº Barramento do inversor na rede CA (mpc.bus)
basedc	3	Potência base do sistema CC (MW)
Pdr	4	Potência CC definida no retificador (pu)
STrn	5	Potência nominal do Transformador do retificador (pu)
STri	6	Potência nominal do Transformador do inversor (pu)
baseKVr	7	Tensão base CA do retificador (kV)
baseKVi	8	Tensão base CA do inversor (kV)
Vr1n	9	Tensão nominal do lado de alta do transf. do retif. (pu)
Vr2n	10	Tensão nominal do lado de baixa do transf. do retif. (pu)
Vi1n	11	Tensão nominal do lado de alta do transf. do inversor (pu)
Vi2n	12	Tensão nominal do lado de baixa do transf. do inversor (pu)
Xcr	13	Reatância de comutação do retificador (pu) <sup>1</sup>
Xci	14	Reatância de comutação do inversor (pu) <sup>1</sup>
baseKVd	15	Tensão base CC (kV)
Idr	16	Corrente CC setada no retificador (kA)
Rcc	17	Resistência da linha CC (ohms)
Bnum	18	Numero de pontes por polo (número)
Alpha	19	Valor (definido) do ângulo Alpha (graus)
AlphaMin	20	Valor Mínimo valor do ângulo Alpha (graus)
AlphaMax	21	Valor Máximo valor do ângulo Alpha (graus)
Gamma	22	Valor (definido) do ângulo Gamma (graus)
GammaMin	23	Valor Mínimo valor do ângulo Gamma (graus)
GammaMax	24	Valor Máximo valor do ângulo Gamma (graus)
Vdr	25	Tensão CC definida no retificador (pu)
Vdi	26	Tensão CC definida no inversor (pu)
ar	27	Valor (definido) para o Tap do transf. do retificador a:1
ai	28	Valor (definido) para o Tap do transf. do inversor a:1
arMin	29	Valor mínimo para o LTC do transformador do retificador a:1
arMax	30	Valor máximo para o LTC do transformador do retificador a:1
aiMin	31	Valor mínimo para o LTC do transformador do inversor a:1
aiMax	32	Valor máximo para o LTC do transformador do inversor a:1
OpMode	33	Modo de Operação 1=Normal, 2=High Mvar Consumption
RCtMode	34	Controle do Retificador <sup>2</sup> 1=Tap, 2=Alpha, 3=Ir, 4=Gamma
ICtMode	35	Controle do Inversor <sup>3</sup> 1=Tap, 2=Tensão CC

<sup>1</sup> - Base de impedância calculada na tensão base CC e na potência base do sistema CC

<sup>2</sup> <sup>3</sup> - Refere-se ao controle liberado para variar no retificador e inversor respectivamente

Cabe destacar que na Tabela 4.1, os taps dos transformadores estão no formato  $a_c : 1$ , indicando que estão no formato inverso ao apresentado no esquema da Figura 3.2. Este formato é o adotado no programa comercial ANAREDE, que será usado neste trabalho para

fins de comparação com o esquema proposto no MATPOWER adaptado.

### 4.4.3 Funções desenvolvidas para solução da rede CA-CC no MATPOWER

Além da elaboração da estrutura adicional de entrada de dados no caso base, denominada `DCbranch`, foram desenvolvidos ou adaptados um conjunto de funções / *scripts* do MATPOWER para implementar a abordagem de solução do PFP de redes CA-CC desse trabalho, conforme descrito a seguir (por ordem de utilização no fluxo de funções do programa MATPOWER).

- `idx_DCbrch.m`, função auxiliar desenvolvida para atribuir nomes às colunas da matriz de entrada de dados no caso base `DCbranch`. Esta função facilita a implementação das demais funções do programa por facilitar o acesso aos dados da matriz utilizando o seu nome, e não através da sua posição. É uma implementação já utilizada no MATPOWER;
- `runpf.m`, *script* de execução do fluxo de potência do MATPOWER original, que foi alterado para permitir: a leitura da matriz `DCbranch` do caso base, apresentada na Subseção 4.4.2); a leitura da magnitude das tensões das barras CA de interface dos conversores. Esses dados são encaminhados para o módulo CC na função `fluxoDC.m`, conforme indicado no fluxograma da Figura 4.2;
- `fluxoDC.m`, função do módulo CC objeto desse trabalho, desenvolvida para solucionar as equações de interconexão, de controle e as demais equações necessárias para o cálculo das variáveis dos elos CC da rede de corrente contínua. Esta função será detalhada na Seção 4.4.4;
- `newtonpf.m`, função nativa do método de Newton-Raphson, apresentado na Seção 3.2.1, alterada para permitir a chamada da execução da função `fluxoDC.m` após cada iteração do método até a convergência;
- `fdpf.m`, função nativa do método Desacoplado-Rápido, apresentado na Seção 3.2.2, alterada para permitir a chamada da execução da função `fluxoDC.m` após cada iteração de potência ativa e reativa do método até a convergência;
- `printpf.m`, *script* de impressão dos resultados, alterado para incluir os resultados da rede de corrente contínua na tabela de impressão de resultados ao final do processo de solução. Os dados da rede CC foram alocados em uma nova seção específica denominada `DC Link Data`, conforme apresentado na Seção 4.4.6 e observado nas Figuras 5.6 e 5.10), no capítulo seguinte.

Portanto, para obter a solução da rede CA-CC em um pacote MATPOWER convencional, será necessário que o usuário, além de modelar a rede CC conforme Seção 4.4.2, copie os novos arquivos `idx_DCbrch.m` e `fluxoDC.m` e substitua os arquivos originais pelos novos modificados `runpf.m`, `newtonpf.m`, `fdpf.m` e `printpf.m` na pasta `lib` dentro do diretório de arquivos do MATPOWER.

#### 4.4.4 A função `fluxoDC.m`

Apresenta-se a seguir uma breve descrição do *script* `fluxoDC.m`.

Sabe-se que a partir do código nativo de execução do *PFP*, são efetuadas a leitura do caso base da rede e inicializadas as variáveis a serem calculadas iterativamente. Caso a matriz `CC_DCbranch` não estiver preenchida, o fluxo de potência segue a rotina nativa do programa original. Caso a matriz `DCbranch` esteja preenchida, significa que existe(m) elo(s) CC modelado(s). Então, a cada iteração, executa-se também a nova função `fluxoDC.m`, elaborada para realizar os cálculos atribuídos a um elo CC, e cujo procedimento está detalhado na Figura 4.2 como *Módulo CC*.

Na Figura 4.2, no módulo CA, ocorre a execução do PFP nativo do MATPOWER. O mesmo foi modificado através de interrupções representadas pelas ligações em cores esmaecidas. Daí, então, foram incluídos no mesmo módulo os novos itens em fundo cinza. Também, foram efetuadas as ligações entre o módulo CA e o módulo CC, a fim de permitir a iteração com a função `fluxoDC.m` desenvolvida.

O módulo CC no fluxograma da Figura 4.2 permite o cálculo das seguintes variáveis, a partir dos dados da rede CA, a depender do modo de Operação e Controle selecionado, conforme apresentado na seção 3.4:

Corrente CC dos conversores:	$I_{dr}$
Tensão CC dos conversores	$V_{dr}$ e $V_{di}$
Potência CC do terminal retificador e inversor	$P_{dr}$ e $P_{di}$
Tap dos transformadores conversores	$a_r$ e $a_i$
Ângulo de disparo e extinção dos conversores	$\alpha$ e $\gamma$
Ângulo de comutação dos conversores	$\mu_r$ e $\mu_i$
Ângulo entre tensão e corrente na barra CA dos conversores	$\phi_r$ e $\phi_i$
Potência ativa e reativa CA do terminal retificador e inversor	$P_r, Q_r, P_i$ e $Q_i$

As equações utilizadas na função `fluxoDC.m` para o cálculo das variáveis indicadas estão detalhadas no Capítulo 3.

Importante destacar que os ângulos entre tensão e corrente na barra CA dos conversores,  $\phi_r$  e  $\phi_i$ , são necessários para calcular a potência reativa consumida nos terminais dos conversores  $P_c$  e  $Q_c$ . Esses dados de potências ativa e reativa do lado CA dos conversores retornam para o módulo CA e são somados às injeções de potência na respectiva barra CA, onde estão conectados os conversores. São formadas, assim, as injeções de potência  $P_k^{esp}$  e  $Q_k^{esp}$ . O

módulo CA nativo do MATPOWER prossegue com o processo iterativo normal até que seja verificada a convergência.

Ao fim da execução do fluxo de potência, as injeções dos barramentos CA onde estão conectados os conversores CC estão compostas da carga original mais a potência do conversor CC. Antes da apresentação dos resultados ao usuário, é efetuada a separação da potência que flui somente para os conversores das injeções de potência das barras CA de interface com o elo CC, como pode ser verificado ao final do fluxograma da Figura 4.2.

#### 4.4.5 Implementação dos modos de Operação e de Controle do Elo CC

Para iniciar a solução da rede de corrente contínua, o primeiro passo é definir qual o modo de operação do elo CC e o modo de controle do retificador e inversor, que, juntamente com outras variáveis, são consideradas as estimativas iniciais do PFP CA. A seção 3.4 apresentou a definição de alguns modos de operação e controle mais gerais de um elo CC com conversor do tipo fonte de corrente (CSC) ou comutado pela rede (LCC). O objetivo desta seção é apresentar quais equações entre as definidas nas seções 3.2 a 3.4 se aplicam para cada modo de operação e controle do elo CC, além de indicar quais variáveis são consideradas controladas e de controle.

Em relação aos modos de operação, neste trabalho será implementado o modo de operação normal com controle de potência ou corrente no retificador como objetivo principal, conforme indicado na Seção 3.4. No modo de operação normal, combinando os modos individuais apresentados para o retificador e inversor nas Tabelas 3.1 e 3.2, o elo CC poderá operar nos seguintes modos indicados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Modos combinados do Retificador e Inversor

Variável	Modos combinados do Retificador e Inversor							
	R1 I1	R2 I1	R3 I1	R4 I1	R1 I2	R2 I2	R3 I2	R4 I2
$a_r$	Varia	Limite	Limite	Limite	Varia	Limite	Limite	Limite
$\alpha$	Fixo	Varia	Limite	Limite	Fixo	Varia	Limite	Limite
$I_r$	Fixo	Fixo	Varia	Limite	Fixo	Fixo	Varia	Limite
$\gamma$	Fixo	Fixo	Fixo	Varia	Fixo	Fixo	Fixo	Varia
$a_i$	Varia				Limite			
$Vd_{ref}$	Fixo				Varia			

Na tabela 4.2, Tap do retificador  $a_r$  variável, Ângulo de disparo  $\alpha$  variável, Corrente CC  $I_r$  variável e Ângulo de extinção  $\gamma$  variável são modos relacionados ao terminal retificador. No terminal inversor são utilizados os modos Tap do inversor  $a_i$  variável e Tensão de referência CC  $Vd_{ref}$  variável.

Neste trabalho, a alteração de um modo de operação/controle para outro ao ser atingido o limite de uma variável, conforme apresentado na Seção 3.4 é realizada de forma manual com a alteração dos respectivos parâmetros na matriz `DCbranch` no caso base simulado, conforme evidenciado em 4.4.2.

Para a solução das variáveis da rede CC a partir das magnitudes das tensões das barras CA de interface e das variáveis de inicialização da rede CC, além da solução das variáveis de interface CA-CC, são utilizados o conjunto de equações de 3.23 até 3.43 apresentado ao longo da Seção 3.3.

#### 4.4.6 O formato de apresentação dos resultados

No MATPOWER, com as implementações para a solução da rede CA-CC efetuadas nesse capítulo, após o término do processo iterativo, a apresentação dos resultados da solução do PFP para o usuário é efetuada. Ao final da apresentação dos dados de saída da rede CA, mostrados pelo programa original, foram inseridos os dados de saída da rede de corrente contínua. Estes são apresentados em uma nova seção de resultados denominada `DC Link Data`.

A apresentação dos resultados, incluindo a rede CC, é efetuada através da alteração da função `printpf.m`, *script* de impressão dos resultados nativo do programa MATPOWER.

A Figura 4.3 apresenta o aspecto da impressão dos resultados da rede CC no programa MATPOWER, e a Tabela 4.3 apresenta a descrição de cada campo.

```

=====
|      DC Link Data - JEFFERSON LIMA 2024      |
=====
Link  Rect  Inv  Rect Bus Injection  Inv Bus Injection  ---DC Voltages---
#    Bus   Bus   P (MW)  Q (MVar)  P (MW)  Q (MVar)  Rect (kV)  Inv (kV)
-----
  1     2     3   100.00   43.95   -95.17   45.91   147.24   140.13

=====
Link  -----DC Angles (°)----- LTC Transf. a:1  Idr  Opmode  Rmode  Imode
#    Alpha  Gamma  Mu R  Mu I   aR    aI    (kA)  N or H  L,A,I,G  L,V
-----
  1   15.00  17.00  15.74  15.92  1.2142  1.2500  0.6792  NORMAL  LTC     VdREF

=====
>>

```

Figura 4.3: Nova seção `DC Link Data` na impressão de resultados do MATPOWER

Tabela 4.3: Descrição da seção DC Link Data

<b>Campo:</b>	<b>Descrição</b>
Link:	Número do elo CC
Rect Bus e Inv Bus:	Número das barras CA de conexão dos conversores
Rect Bus Injection	Potências ativa e reativa do Retificador em $MW$
Inv Bus Injection	Potências ativa e reativa do Inversor em $MW$
DC Voltages	Tensão CC nos terminais do Retificador e Inversor em $kV$
DC Angles	Ângulos $\alpha$ , $\gamma$ , $\mu_r$ e $\mu_i$ em graus
LTC Transf. a:1	Valor do comutador tap do retificador $a_r$ e inversor $a_i$
Idr	Corrente CC $I_{d_r}$ em $kA$
Opmode	Modo de controle (Normal ou HMC <sup>1</sup> )
Rmode	Modo de operação variável no retificador (LTC = Tap, ALPHA = $\alpha$ , IDR = corrente CC $I_{d_r}$ , GAMMA = $\gamma$ );
Imode	Modo de operação variável no inversor (LTC = Tap, VDR = Tensão CC $V_{d_r}$ variável);

<sup>1</sup> *High MVAr Consumption*

## 4.5 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo, primeiramente, comentou-se sobre o programa de fluxo de potência em corrente alternada MATPOWER, baseado em um pacote de arquivos de código aberto e de licença gratuita. O programa foi a ferramenta que serviu de base para as implementações propostas nessa dissertação, as quais foram executadas na plataforma MATLAB.

O foco principal desse capítulo foi apresentar o módulo desenvolvido para a solução da rede CC-CA, através da integração proposta da solução das redes CC e CA. Foi utilizado o método de sequencial, que consiste na obtenção, de forma alternada, de soluções para a rede CA e para a rede CC. Na descrição do módulo CC proposto, foi descrita a forma de inserção e saída de dados proposta, bem como as novas funções desenvolvidas e como foi implementado os modos de operação e de controle no Elo CC.

No próximo capítulo, são descritos testes e os resultados verificados para a aplicação efetuada no programa MATPOWER, através de simulações em duas redes elétricas com elo CC.

# Capítulo 5

## Testes e Resultados

### 5.1 Introdução

Neste capítulo, as abordagens propostas no Capítulo 4 para inclusão do cálculo da rede CC no fluxo de potência CA do programa MATPOWER são avaliadas. Ao longo do texto são apresentadas simulações detalhadas em diversos casos, bem como os respectivos resultados obtidos, fazendo-se uso da ferramenta computacional modificada proposta para o MATPOWER neste trabalho.

Para fins de validação dos resultados obtidos nas simulações na ferramenta apresentada, utiliza-se o programa comercial ANAREDE (quando possível) [43], que será apresentado na seção 5.2 a seguir. A preferência pelo programa ANAREDE justifica-se por ser uma ferramenta amplamente utilizado por empresas do setor elétrico brasileiro (também por institutos de pesquisa e universidades), para determinação de fluxos de potência em regime permanente e outras aplicações. No entanto, assim como outros programas comerciais, o seu código é fechado e o usuário tem acesso somente a entrada e a saída de dados. Por outro lado, o aplicativo MATPOWER, base para esse trabalho, é de acesso livre ao seu código, concebido em MATLAB ou OCTAVE, como foi citado na seção 4.3.

O desenvolvimento da ferramenta permitiu a implementação de testes em diferentes sistemas e diferentes configurações, contemplando a modelagem de elos CC, embutidos na rede CA (conectando barras de uma mesma rede CA) e elos CC conectando redes CA assíncronas. No presente trabalho, mostra-se inicialmente os testes e resultados relativos a um elo CC embutido na rede CA em um sistema padrão de 4 barras CA modificado - seção 5.4.1. Em seguida, apresentam-se estudos em uma rede real equivalente CA-CC associada ao sistema de transmissão CC da Usina Hidrelétrica (UHE) Itaipu (50Hz/60Hz) - seção 5.5.1.

## 5.2 O programa ANAREDE

Antes de descrever a apresentação dos testes e resultados, apresentam-se algumas informações breves a respeito do aplicativo comercial utilizado como ferramenta comercial para validação dos resultados.

O programa ANAREDE é utilizado para a determinação do ponto de operação de uma rede elétrica em sistemas elétricos de potência. É um software composto por um conjunto de funções para a análise do sistema elétrico. O programa foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Inicialmente concebido como um programa de fluxo de potência para centros de controle, o ANAREDE rapidamente se converteu no programa de análise de sistemas elétricos de potência mais utilizado do setor elétrico brasileiro, além de consultoras, institutos de pesquisa e universidades em geral.

O programa possui, além do Fluxo de Potência, módulos para:

- Equivalente de Redes;
- Análise de Contingências;
- Análise de Sensibilidade de Tensão;
- Análise de Sensibilidade de Fluxo;
- Fluxo de Potência Continuado;
- Análise de Corredores de Recomposição;
- Cálculo Automático de Margem de Transmissão;
- Avaliação de Segurança Estática.

O módulo de Fluxo de Potência, utilizado como base de comparação para as ferramentas implementadas nesse trabalho, conta com o método de solução de Newton-Raphson, Desacoplado Rápido e o método Linearizado. O programa possui modelos de diversos equipamentos, como geradores e compensadores síncronos, cargas com variação em função do módulo da tensão (ZIP), compensadores estáticos de reativos, compensadores série fixos e controláveis, bancos *shunt* chaveáveis automaticamente e elos de corrente contínua. Além disso, diversos parâmetros estão à disposição do usuário para ajustar as características de convergência do programa às particularidades das redes em estudo. Também está disponível um algoritmo de solução de fluxo de potência linearizado, aplicável em alguns tipos de estudos [43].

Conforme o manual do programa [43], em relação ao algoritmo do Programa de Fluxo de Potência ANAREDE, o processo iterativo do cálculo do estado operativo da rede elétrica para as condições impostas consiste na obtenção, de forma alternada, de soluções para o sistema

CA e para o sistema CC, até que as variações, entre iterações consecutivas, das potências injetadas na rede CA pela rede CC sejam menores que uma determinada tolerância.

O primeiro passo do processo de solução é a determinação do estado operativo do sistema CC para as condições iniciais estabelecidas. Nos passos seguintes os sistemas CA e CC são solucionados alternadamente, considerando os controles automáticos ativados, até a obtenção da convergência da interface entre estes sistemas.

O processo de solução do sistema CC consiste na determinação de valores das grandezas dos transformadores conversores, em função do estado calculado da rede elétrica CA, de tal forma que as condições estabelecidas de operação dos elos CC sejam atendidas. Se estes valores violarem os respectivos limites, estas grandezas são fixadas nos limites violados e é iniciado um processo iterativo para a determinação de níveis de tensão do sistema CC que satisfaçam as condições impostas de controle de potência ou de corrente.

Embora possua modelos e métodos de soluções para elos de corrente contínua, à data de realização desse trabalho, o programa ANAREDE na versão utilizada [44], possui apenas a modelagem de conversores fonte de corrente - *CSC/LCC*, estando em desenvolvimento a implantação da modelagem de conversores fonte de tensão - *VSC*.

### 5.3 O elo de corrente contínua do sistema teste

Para a realização das simulações deste trabalho foi modelado um elo de transmissão em corrente contínua para ser inserido nos sistemas testes. Para tal, foi escolhido o modelo do elo CC do sistema de transmissão em corrente contínua da Usina Hidrelétrica Itaipu, do fabricante ABB. O modelo padrão é indicado na Figura 5.1.

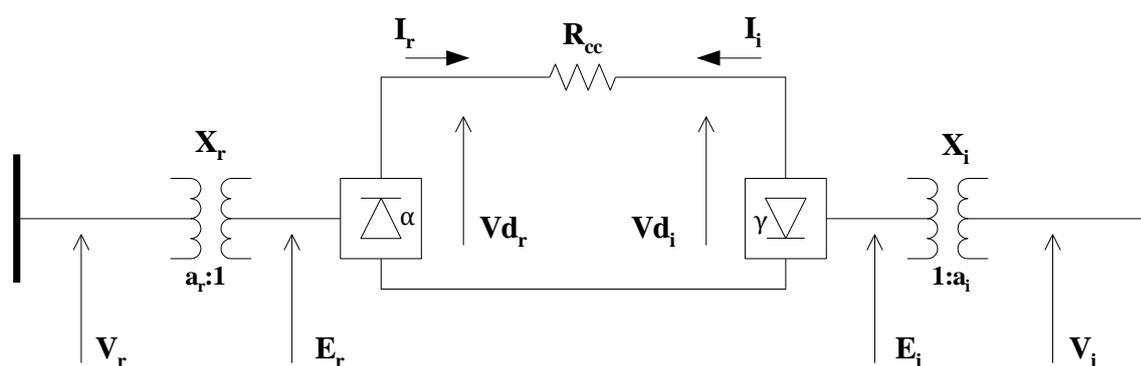


Figura 5.1: Sistema teste do elo de transmissão CC

Fonte: [3]

Os parâmetros para permitir a modelagem do elo de corrente contínua foram obtidos a partir dos *Casos de Referência para a Operação Elétrica com Horizonte Mensal - Março 2023* [45], disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros do elo CC de Itaipu que serão utilizados nas simulações, onde:

$B$  é igual ao número de pontes conectadas em série por polo;

$S_{Tr}$  é a potência nominal do transformador conversor do retificador;

$S_{Ti}$  é a potência nominal do transformador conversor do retificador;

$I_{margin}$  é máximo percentual admitido de variação para a ordem de corrente do inversor em relação à corrente estabelecida para o retificador [34];

$P_{cc}^{esp}$  Potência estabelecida para ser transmitida pelo elo CC no terminal retificador;

$P_{baseCC}$  Base de potência para a corrente contínua, que equivale à capacidade nominal de transmissão do elo CC do sistema teste;

Os valores de Potência CC estabelecida para o retificador  $P_{dr}$ , Tensão CC do terminal inversor  $V_{di}$  e Corrente CC  $I_r$  serão definidos em cada simulação, conforme o caso, pois irão depender da potência estabelecida para ser transmitida pelo elo CC.

Tendo em vista manter a equivalência da representação dos taps como padronizado no formato do programa ANAREDE, em que *o LTC está no lado da barra de interface CA*, na exibição de todos os resultados, os taps dos transformadores das conversoras serão sempre indicados no formato  $a : 1$ , sendo  $a$  o tap no lado da barra de interface CA.

Tabela 5.1: Parâmetros do modelo de elo CC de Itaipu

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$X_r$	0.178 p.u.	$B$	4
$X_i$	0.172 p.u.	$S_{Tr}$	4.71 p.u.
$E_r/V_r$	0.2548 p.u.	$S_{Ti}$	4.50 p.u.
$E_i/V_i$	0.3536 p.u.	$R_{cc}$	10.47 $\Omega$
$a_r^{min}$	0.925 p.u.	$I_{margin}$	10 %
$a_r^{max}$	1.250 p.u.	$V_{dr}$	1.000 p.u.
$a_i^{min}$	0.925 p.u.	$S_{base}$	100 MVA
$a_i^{max}$	1.250 p.u.	$P_{baseCC}$	1575 MW
$\alpha^{min}$	5.0 °	$V_{rbase}$	500 kV
$\alpha^{max}$	84.99 °	$V_{ibase}$	345 kV
$\gamma^{min}$	17.0 °	$V_{dbase}$	600 kV
$\gamma^{max}$	72.74 °		

## 5.4 Teste com elo CC embutido na rede CA

Inicialmente, realizaram-se testes em um elo CC embutido na rede CA (que interliga duas barras de uma rede CA). O objetivo é demonstrar de forma tutorial como os dados de entrada são inseridos no aplicativo proposto, interpretá-los e mostrar como são utilizados para realização dos cálculos que geram a saída de dados. Neste sentido, a manipulação dos parâmetros é discutida, assim como as ações de operação de controle. Como ilustração, dois exemplos são apresentados a fim de demonstrar como os cálculos são efetuados. Por fim, apresentam-se os resultados obtidos pelo usuário, a partir de telas de saída do aplicativo.

### 5.4.1 O sistema equivalente de 4 barras CA

Para verificação dos resultados obtidos com a implementação das funções apresentadas no Capítulo 4, foram realizadas simulações comparativas de um sistema equivalente de 4 barras CA, de nome “*case4gs.m*”, que é um exemplo oriundo do livro “*Power System Analysis*”, J. Grainger, W. Stevenson, McGraw-Hill, 1994 [46] e que tem sua entrada de dados disponíveis no pacote do programa MATPOWER [41].

A Figura 5.2 apresenta um diagrama unifilar que representa a rede elétrica do sistema original “*case4gs.m*”, com os resultados dos estados e do fluxo de potência convergido. Na rede em questão, a barra *slack* é a #1. Assume-se que a tensão CA nominal da rede seja 230 kV. Os dados em pu usados no MATPOWER foram referenciados à tensão nominal da rede e base de potência 100 MVA.

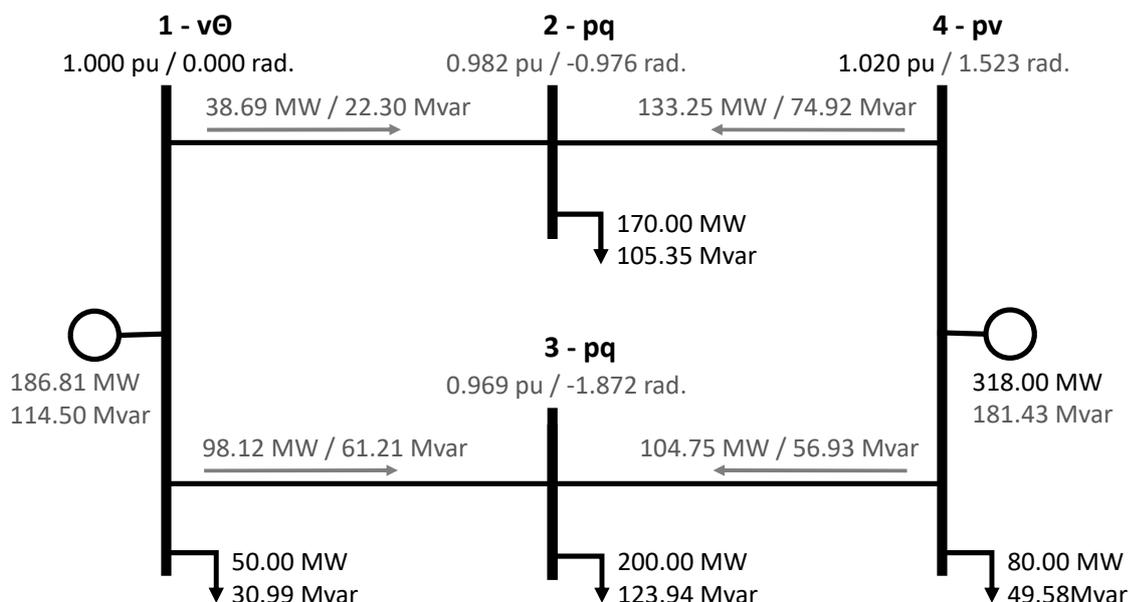


Figura 5.2: Diagrama unifilar representativa do “*case4gs.m*” original do MATPOWER, com os resultados gerais do fluxo de potência após convergência

O sistema foi modificado, a fim de incluir a modelagem de um elo CC monopolar conectando as barras #2 (retificador) e #3 (inversor), sendo nomeado de *case4gs\_EloCC*. Para a modelagem do elo CC, foram utilizados os parâmetros representativos de 1 polo do modelo de elo CC de Itaipu, conforme apresentado na Seção 5.3, mas com as adaptações de dados exibidas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Parâmetros do elo CC característicos do sistema 4 barras

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$X_r$	0.100 p.u.	$B$	1
$X_i$	0.100 p.u.	$S_{Tr}$	1.70 p.u.
$E_r/V_r$	0.6522 p.u.	$S_{Ti}$	1.60 p.u.
$E_i/V_i$	0.6522 p.u.	$R_{cc}$	10.47 $\Omega$
$a_r^{min}$	0.925 p.u.	$I_{margin}$	10 %
$a_r^{max}$	1.250 p.u.	$Vd_r$	1.000 p.u.
$a_i^{min}$	0.925 p.u.	$S_{base}$	100 MVA
$a_i^{max}$	1.250 p.u.	$P_{baseCC}$	100 MW
$\alpha^{min}$	5.0 °	$V_{rbase}$	230 kV
$\alpha^{max}$	84.99 °	$V_{ibase}$	230 kV
$\gamma^{min}$	17.0 °	$Vd_{base}$	150 kV
$\gamma^{max}$	72.74 °		

## 5.4.2 Modelagem, Simulações e Análise de Resultados

Com o objetivo de ilustrar o processo de entrada de dados, solução e apresentação dos resultados no aplicativo proposto para a simulação de redes CA-CC no programa de fluxo de potência MATPOWER, foram realizadas duas simulações. Nas duas simulações o elo CC opera em controle de potência. Na primeira o retificador e inversor estão com os taps liberados para variar. Na segunda simulação, foi fixado o tap do inversor em seu valor máximo, enquanto o tap no retificador ficou variável.

A Tabela 5.3 apresenta um resumo dos parâmetros de entrada do Elo CC para as duas simulações.

A diferença entre as simulações 1 e 2 é que na segunda o modo de controle do inversor é alterado, de tap do inversor  $a_i$  variável para tensão  $Vd_{ref}$  variável, pois se assume que o tap do inversor tenha atingido o seu valor máximo, perdendo assim a capacidade de controlar a tensão de referência CC.

Tabela 5.3: Dados característicos para o elo CC nas simulações 1 e 2

Dados	Valor (simulação 1)	Valor (simulação 2)
Modo de Operação	Normal	Normal
Modo de Controle do retificador	Tap $a_r$ variável	Tap $a_r$ variável
Modo de Controle do inversor	Tap $a_i$ variável	<b>Tensão <math>V_{d_{ref}}</math> variável</b>
Tensão no retificador $V_{dr}$	1.000 p.u.	<b>calcular</b>
Potência do retificador $P_r$	100MW	100MW
Ângulo de disparo do retificador $\alpha$	15°	15°
Ângulo de extinção do inversor $\gamma$	17°	17°
Tap do retificador $a_r$	variável	variável
Tap do inversor $a_i$	variável	<b>1.250 (máximo)</b>
Tensão da barra $V_{\theta}$ #1	1.000 p.u.	1.000 p.u.
Tensão da barra $PV$ #4	1.020 p.u.	1.020 p.u.
Potência ativa da barra $PV$ #4	318 MW	318 MW

Para realizar a simulação do sistema equivalente de 4 barras CA com a inserção do elo CC, os dados apresentados nas Tabelas 5.2 e 5.3 foram devidamente inseridos no aplicativo proposto para o MATPOWER.

A Figura 5.3 ilustra um esboço da máscara de entrada de dados e a respectiva legenda, apenas do elo CC, na matriz da seção DC branch data criada para o MATPOWER no caso base utilizado para a simulação 1. A partir dessas informações, consultando a matriz `mpc.DCbranch` ilustrada na Figura, observa-se que: `OpMode=1`, indica que o elo CC opera em modo normal; `RcMode=1`, indica o modo de controle do retificador R1; e `IcMode=1`, indica o modo de controle do inversor I1. Note-se que na matriz `mpc.DCbranch`,  $V_{rn} = V_{r1n}$  e  $E_{rn} = V_{r2n}$ . Similarmente,  $V_{in} = V_{i1n}$  e  $E_{in} = V_{i2n}$ .

Os demais arquivos de entrada de dados do MATPOWER foram preservados. Note-se que os dados e inicializações são utilizados, conforme o modo de operação selecionado (nesta dissertação, somente o modo de operação normal foi programado). Porém, no modo de operação normal, oito combinações com modos de controle do retificador e inversor são disponíveis.

#### 5.4.2.1 Simulação 1 - Modo de operação com taps variáveis no retificador e inversor

Nesta simulação, efetuaram-se testes considerando o elo CC operando em modo normal e com modo de operação em que os *taps* no inversor,  $a_i$ , e no retificador,  $a_r$ , são variáveis. Portanto, estas variáveis necessitam ser calculadas. Com isto, a tensão no retificador é controlada (modo de controle do inversor), assim como o ângulo de disparo do retificador  $\alpha$ ,

```

%% DC branch data - JEFFERSONC
%
% Define a localização do retificador e inversor na rede AC e os parâmetros
% dos TR conversores, conversores e linha CC
%
%   rbus   ibus   basedc  Pdr   STRn   STin   baseKVr   baseKVi
%   Vr1n   Vr2n   Viln    Vi2n   Xcr    Xci    baseKVd   Idr
%   Rcc    Bnum   Alpha   AlphMin AlphMax Gamma   GammaMin   GammaMax
%   Vdr    Vdi    ar      ai     arMin  arMax  aiMin     aiMax
%   OpMode RCTMode ICTMode
mpc.DCbranch = [
    2      3      100      1.00    1.70    1.60    230        230 ...
    1.0    0.6522  1.0      0.6522  0.100   0.100   150        0.6667 ...
    10.47  1       15       5       85      17      17         72 ...
    1.00000 0.95347 1.250    1.250   0.925   1.250   0.925     1.250 ...
    1      1      1
];
%% Legenda DC branch data - JEFFERSONC
% rbus           N° do Barramento do retificador na rede AC (mpc.bus)
% ibus           N° Barramento do inversor na rede AC (mpc.bus)
% basedc         Potência base do sistema CC (MW)
% Pdr            Potência CC definida no retificador (pu)
% STRn           Potência nominal do Transformador do retificador (pu)
% STin           Potência nominal do Transformador do inversor (pu)
% baseKVr        Tensão base ac do retificador (kV)
% baseKVi        Tensão base ac do inversor (kV)
% Vr1n           Tensão nominal do lado de alta do transf. do retif. (pu)
% Vr2n           Tensão nominal do lado de baixa do transf. do retif. (pu)
% Viln           Tensão nominal do lado de alta do transf. do inversor (pu)
% Vi2n           Tensão nominal do lado de baixa do transf. do inversor (pu)
% Xcr            Reatância de comutação do retificador (pu)
% Xci            Reatância de comutação do inversor (pu)
% baseKVd        Tensão base CC (kV)
% Idr            Corrente CC setada no retificador (kA)
% Rcc            Resistência da linha CC (ohms)
% Bnum           Numero de pontes por polo (número)
% Alpha          Valor (definido) do ângulo Alpha (graus)
% AlphaMin       Valor Mínimo valor do ângulo Alpha (graus)
% AlphaMax       Valor Máximo valor do ângulo Alpha (graus)
% Gamma          Valor (definido) do ângulo Gamma (graus)
% GammaMin       Valor Mínimo valor do ângulo Gamma (graus)
% GammaMax       Valor Máximo valor do ângulo Gamma (graus)
% Vdr            Tensão CC definida no retificador (pu)
% Vdi            Tensão CC definida no inversor (pu)
% ar             Valor (definido) para o Tap do transf. do retificador a:1
% ai             Valor (definido) para o Tap do transf. do inversor a:1
% arMin          Valor mínimo para o LTC do transformador do retificador a:1
% arMax          Valor máximo para o LTC do transformador do retificador a:1
% aiMin          Valor mínimo para o LTC do transformador do inversor a:1
% aiMax          Valor máximo para o LTC do transformador do inversor a:1
% OpMode         Modo de Operação 1=Normal, 2=High Mvar Consumption
% RCTMode        Modo de Controle do Retificador 1=ar variável, 2=Alpha ...
%               variável, 3=Ir variável, 4=Gamma variável
% ICTMode        Modo de Controle do Inversor ...
%               1=ai variável, 2=VdRef variável

```

Figura 5.3: Máscara de entrada de dados do elo CC na matriz da seção DC branch data

fixado em  $15^\circ$ , a potência no retificador  $P_{dr}$ , em 100 MW, e o ângulo de extinção,  $\gamma$ , fixado em  $17^\circ$ .

A Figura 5.4 apresenta os resultados da simulação 1, após a solução do fluxo de potência utilizando as novas funções e modelagem apresentada neste trabalho, no programa MATPOWER. A Figura 5.5 ilustra os resultados da mesma simulação efetuada no programa ANAREDE.

Com o elo CC em modo de operação *R1* para o retificador e *I1* para o inversor, conforme definido na Seção 3.3.5.2 e 3.3.5.3 e indicado nas Tabelas 5.8 e 5.9, em que os *taps* no inversor,  $a_i$ , e no retificador,  $a_r$ , são variáveis. Na simulação, verifica-se nas duas ferramentas de utilizadas, a atuação dos taps para manter a tensão no retificador controlada em 1 pu, com os ângulos de disparo  $\alpha$  e extinção  $\gamma$  fixados em  $15^\circ$  e  $17^\circ$  respectivamente.

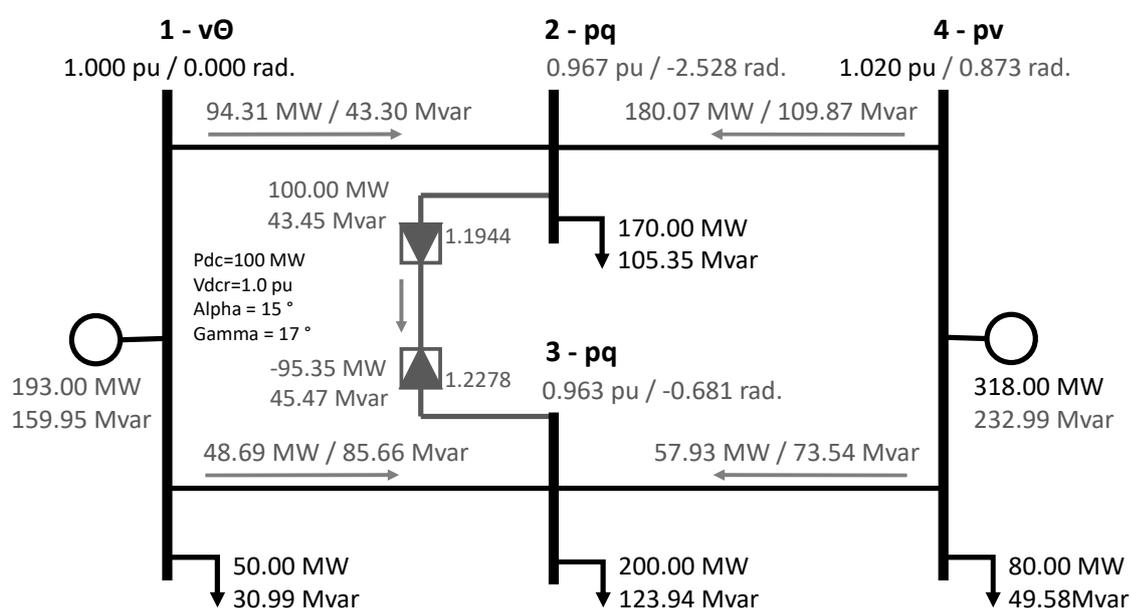


Figura 5.4: “*case4gs.m*” com elo CCAT de acordo com os critérios estabelecidos na simulação 1, sendo mostradas as grandezas, em geral, provenientes do MATPOWER modificado

Analisando os resultados obtidos nas simulações efetuadas no aplicativo proposto no programa de fluxo de potência CA MATPOWER e na ferramenta comercial ANAREDE, verificam-se que os dados resultantes na rede de corrente contínua e na rede de corrente alternada foram equivalentes.

Com relação aos resultados observados no elo CC, para esta simulação, os taps no retificador e no inversor foram calculados em 1.1944 pu e 1.2278 pu, respectivamente. Verifica-se que o retificador permitiu a transmissão dos 100 MW fixados, chegando no inversor 95.35 MW. Para tanto, houve consumo de reativo de 43.45 Mvar e 45.47 Mvar, respectivamente, no retificador e inversor. As magnitudes das tensões nas barras #2 e #3 foram ajustadas em 0.967 pu e 0.963 pu, respectivamente. Sem a presença do elo CC, ou seja, no sistema original do MATPOWER, as mesmas eram, respectivamente, 0.982 pu e 0.969 pu.

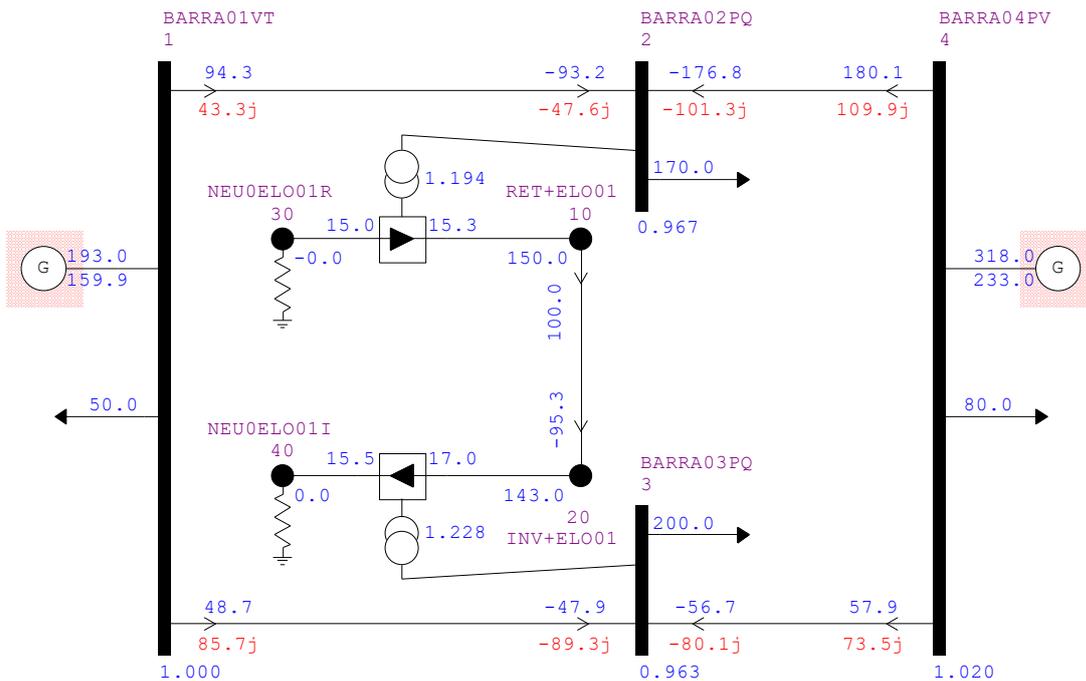


Figura 5.5: “case4gs.m” com elo CCAT - simulação 1 - convergido - ANAREDE

#### 5.4.2.2 Simulação 2 - Modo de operação com tap máximo no inversor e tap variável no retificador

Outra simulação foi efetuada com o elo de corrente contínua no *modo de controle normal* e os *modos de operação* com o tap no inversor  $a_i$  fixado em seu valor máximo e no retificador, havendo a fixação da corrente  $I_r$ , de  $\alpha$  e  $\gamma$ . Nestas condições, torna-se necessário calcular  $V_{dr}$  e  $a_r$ .

Foram utilizadas as mesmas condições iniciais da simulação 1, porém, com o objetivo de verificar a variação da tensão CC de referência,  $V_{dr}$ , o tap do inversor  $a_i$  foi fixado em seu valor máximo 1.250 pu, conforme Tabela 5.3, provocando um desvio da tensão CA do conversor no terminal inversor.

A Figura 5.6 apresenta os resultados da simulação 2, na implementação efetuada no programa MATPOWER, e a Figura 5.7 apresenta os resultados da mesma simulação efetuada no programa ANAREDE.

No resultado das duas ferramentas, verifica-se que a tensão  $V_{dr}$  passou a variar com a limitação do tap do inversor  $a_i$ . Neste caso, o inversor perdeu a capacidade de controlar a tensão CC de referência  $V_{dr}$ . A tensão de operação  $V_{dr}$  foi calculada igual a 147.24kV.

Em relação aos aspectos de convergência da solução do PFP, a tabela 5.4 apresenta o número de iterações em cada ferramenta utilizando diferentes métodos de solução. Cada

```

>> runpf ('case4gs_EloCCv2', mpooption('pf.alg', 'FDXB', 'pf.tol', 0.001))

MATPOWER Version 7.1, 08-Oct-2020 -- AC Power Flow (fast-decoupled, XB)

Fast-decoupled power flow converged in 3 P-iterations and 3 Q-iterations.

Converged in 0.00 seconds
=====
|      Bus Data      |
=====
Bus      Voltage      Generation      Load
#      Mag(pu) Ang(deg)      P (MW)  Q (MVA)  P (MW)  Q (MVA)
-----
  1  1.000  0.000*  193.17  160.49   50.00   30.99
  2  0.967  -2.528    -      -   170.00  105.40
  3  0.963  -0.683    -      -   200.00  123.90
  4  1.020  0.872   318.00  233.50   80.00   49.58
-----
                Total:  511.17  393.99  500.00  309.87
=====

|      Branch Data      |
=====
Brnch    From    To    From Bus Injection    To Bus Injection    Loss (I^2 * Z)
#        Bus    Bus    P (MW)  Q (MVA)  P (MW)  Q (MVA)  P (MW)  Q (MVA)
-----
  1      1      2      94.33   43.53   -93.20  -47.77    1.136   5.68
  2      1      3      48.83   85.97   -48.06  -89.55    0.778   3.89
  3      2      4     -176.82 -101.59  180.07  110.19    3.252  16.26
  4      3      4     -56.80  -80.27   58.00   73.73    1.201   6.00
-----
                                Total:    6.366   31.83
=====

|      DC Link Data - JEFFERSON LIMA 2024      |
=====
Link     Rect    Inv    Rect Bus Injection    Inv Bus Injection    ---DC Voltages---
#        Bus    Bus    P (MW)  Q (MVA)  P (MW)  Q (MVA)  Rect (kV)  Inv (kV)
-----
  1      2      3     100.00   43.95   -95.17   45.91   147.24   140.13
=====

Link     ---DC Angles(°)---    LTC Transf. a:1    Idr    Opmode    Rmode    Imode
#        Alpha  Gamma  Mu R    Mu I    aR      aI      (kA)  N or H  L,A,I,G  L,V
-----
  1     15.00  17.00  15.74  15.92  1.2142  1.2500  0.6792  NORMAL  LTC      VdREF
=====
>>

```

Figura 5.6: “case4gs.m” com elo CCAT - simulação 2 - convergido - MATPOWER

simulação foi realizada partindo-se da condição inicial *flat start* na rede CA, ou seja, estimativa inicial onde todos os ângulos são assumidos iguais a zero e as tensões nas barras de carga iguais a 1.0 pu. Nas duas ferramentas a tolerância adotada para os resíduos ou *mismatches* de potência foi igual a  $10^{-3}$  pu. Verifica-se que, nas simulações 1 e 2, não houve diferença no número de iterações entre as ferramentas ANAREDE e MATPOWER, tanto utilizando o método de solução Newton-Raphson quanto o método Desacoplado-Rápido

CONVERSAO DO CASE4GS.M DO MATPOWER PARA FORMATO PWF COM UM POLO BASEADO NO ELO CC I.

RELATORIO DE BARRAS CA DO SISTEMA \* AREA 1 \*

```

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
NUM.      BARRA      TENSÃO      GERACAO      INJECAO  EQUIV      CARGA
      NOME      TP  MOD  ANG      MW      Mvar\      MW      Mvar      MW      Mvar
              CE Mvar
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
1  BARRA01VT      2  1.000  -0.0  193.2  160.4  0.0  0.0  50.0  31.0
2  BARRA02PQ      0  0.967  -2.5   0.0   0.0  0.0  0.0  170.0  105.4
3  BARRA03PQ      0  0.963  -0.7   0.0   0.0  0.0  0.0  200.0  123.9
4  BARRA04PV      1  1.020   0.9  318.0  233.4  0.0  0.0  80.0  49.6
    
```

RELATORIO DE BARRAS CC DO SISTEMA \* ELO 1 \* ELOCC-B1-B2-P1 \*

```

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
NUM.      BARRA      MODULO DA TENSÃO CORRENTE INJETADA
      NOME      POLO TP      (PU)      (KV)      (PU)      (A)
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
10  RET+ELO01      +  1  0.982  147.2  1.019  679.2
20  INV+ELO01      +  0  0.934  140.1 -1.019 -679.2
30  NEU0ELO01R     N  0 -0.000 -0.0 -1.019 -679.2
40  NEU0ELO01I     N  0  0.000   0.0  1.019  679.2
    
```

RELATORIO DE LINHAS CC DO SISTEMA \* ELO 1 \* ELOCC-B1-B2-P1 \*

```

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
DA BARRA      P/ BARRA      CIRC CORRENTE      POTENCIA (MW)
NUM.      NOME      NUM.      NOME      NUM.      (A)      DA BARRA P/ BARRA PERDAS
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
10  RET+ELO01      20  INV+ELO01      1  679.2  100.00  -95.17  4.83
    
```

RELATORIO DE CONVERSORES DO SISTEMA \* ELO 1 \* ELOCC-B1-B2-P1 \*

```

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
CONV BARRAS      CA      CONTROLE      VALORES      UNID      VALOR      UN      TAP      ANGULO
NUM.      CC      ESTADO      ATUAIS      UNID      ESPEC      UN      ATUAL      DISP/EXT
TIPO NUM.      NEUTRA      ESTAD      COMUT.
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
1  2  BARRA02PQ      POTENCIA      100.0 MW      100.0 MW  1.214  15.00
RET  10  RET+ELO01      679.2 A
30  NEU0ELO01R      LIGADO      44.0 Mvar

2  3  BARRA03PQ      POTENCIA      -95.2 MW      -99.0 MW  1.250 I  17.00 I
INV  20  INV+ELO01      FOLGA      -679.2 A
40  NEU0ELO01I      LIGADO      45.9 Mvar
    
```

Figura 5.7: “case4gs.m” com elo CCAT - simulação 2 - convergido - ANAREDE

Tabela 5.4: Simulação 1 e 2 - Número de iterações por ferramenta e método de solução

Ferramenta	Método	Nº de Iterações Sim.1	Nº de Iterações Sim.2
MATPOWER	Newton-Raphson	2	2
ANAREDE	Newton-Raphson	2	2
ANAREDE	Desacoplado-Rápido	3	3
MATPOWER	Desacoplado-Rápido	3	3

Assim como na seção anterior, a partir dos resultados obtidos nas simulações efetuadas no aplicativo proposto no programa de fluxo de potência CA MATPOWER e na ferramenta comercial ANAREDE, verifica-se que os dados resultantes na rede de corrente contínua e na rede de corrente alternada foram equivalentes.

## 5.5 Testes com elo CC interligando redes assíncronas

### 5.5.1 Rede equivalente CA-CC associada ao sistema de transmissão CC da UHE Itaipu

O sistema de transmissão em corrente contínua da Usina Hidrelétrica Itaipu (50 Hz) é uma rede que interliga de forma assíncrona, o sistema elétrico brasileiro em 60 Hz e paraguaio em 50 Hz. A interligação é efetuada através de 2 bipolos ou 4 polos, cuja capacidade nominal total é 6.300 MW, conforme detalhado na Seção 2.7.1.

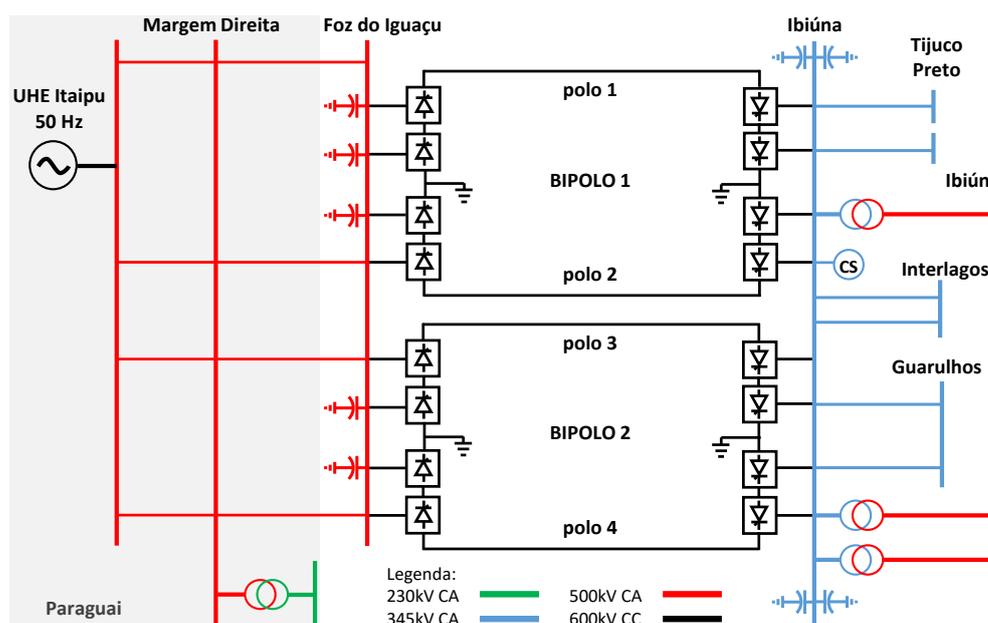


Figura 5.8: Esquema simplificado do sistema de transmissão em corrente contínua associado à UHE Itaipu (50Hz/60Hz).

A Figura 5.8 [47] exibe um diagrama esquemático simplificado ilustrando um recorte da ligação assíncrona, contendo os elos CCAT, as barras do entorno e os principais componentes associados. Destaca-se que a estação retificadora está conectada à rede CA do Paraguai em 50 Hz e a estação inversora está do lado brasileiro em 60 Hz. Esse sistema reduzido foi modelado no ANAREDE e no MATPOWER modificado, conforme apresentado a seguir.

Os dados da rede equivalente do sistema de transmissão em corrente contínua associado à UHE Itaipu foram obtidos a partir do recorte do Sistema elétrico brasileiro disponível no *Casos de Referência para a Operação Elétrica com Horizonte Mensal - Março 2023* [45], disponibilizados pelo ONS no formato *.pwf* do programa ANAREDE. A partir desse caso completo, o sistema foi reduzido através de um recorte de 9 barras CA, sendo 3 na rede de 50 Hz, do lado paraguaio, e 6 na rede de 60 Hz, do lado brasileiro, no qual foi introduzido uma barra *slack* fictícia, conforme pode ser observado na Figura 5.9. Os elos CCAT foram preservados, como 4 polos de transmissão CC entre as duas redes (correspondentes aos 2 bipolos), sendo nomeado para efeito de estudos como *case\_ITAIPU*.

## 5.5.2 Modelagem, Simulações e Análise de Resultados

O sistema de transmissão CC associado à UHE Itaipu, apresentado na Subseção 5.5.1, foi modelado no programa MATPOWER com as ferramentas desenvolvidas nesse trabalho. Foram utilizados os parâmetros indicados na Seção 5.3. Simultaneamente, para fins de validação, foi efetuada a modelagem do mesmo sistema no programa ANAREDE.

Utilizando as ferramentas mencionadas, foram efetuadas duas simulações em configurações distintas, conforme discriminadas a seguir:

- Simulação 1: os 4 polos CC foram ajustados em modo de Operação Normal e modo de controle com *tap* variável para os terminais retificador e inversor.
- Simulação 2: com base no resultado da primeira simulação, efetua-se o seguinte procedimento: altera-se o modo de controle do retificador de *tap* variável para o modo de controle com ângulo de disparo  $\alpha$  variável. Em seguida, realizou-se uma simulação na qual é provocada uma redução de 0.01 *p.u.* na tensão do gerador associado ao terminal retificador a fim de se verificar as implicações no controle com relação à atuação do ângulo de disparo.

A Tabela 5.5 exibe um resumo dos parâmetros utilizados como dados de entrada para as simulações 1 e 2 nas duas ferramentas indicadas.

Tabela 5.5: Dados característicos para cada elo CC nas simulações 1 e 2

Dados	simulação 1	simulação 2
Modo de Operação	Normal	Normal
Modo de Controle do retificador	Tap $a_r$ variável	<b>ângulo <math>\alpha</math> variável</b>
Modo de Controle do inversor	Tap $a_i$ variável	Tap $a_i$ variável
Tensão no retificador $V_{dr}$	1.000 <i>p.u.</i>	1.000 <i>p.u.</i>
Potência do retificador $P_{dr}$	625 MW	625 MW
Ângulo de disparo do retificador $\alpha$	15°	<b>variável</b>
Ângulo de extinção do inversor $\gamma$	17°	17°
Tap do retificador $a_r$	variável	<b>1.095</b>
Tap do inversor $a_i$	variável	variável
Tensão da barra <i>slack</i> do lado retificador	1.029 <i>p.u.</i>	<b>1.019</b> <i>p.u.</i>
Tensão da barra <i>slack</i> do lado inversor	1.040 <i>p.u.</i>	1.040 <i>p.u.</i>

A modelagem do sistema de transmissão CC associado à UHE Itaipu, é apresentada em diagrama do programa ANAREDE e cujo esboço de saída obtido do programa foi reproduzido através da Figura 5.9.

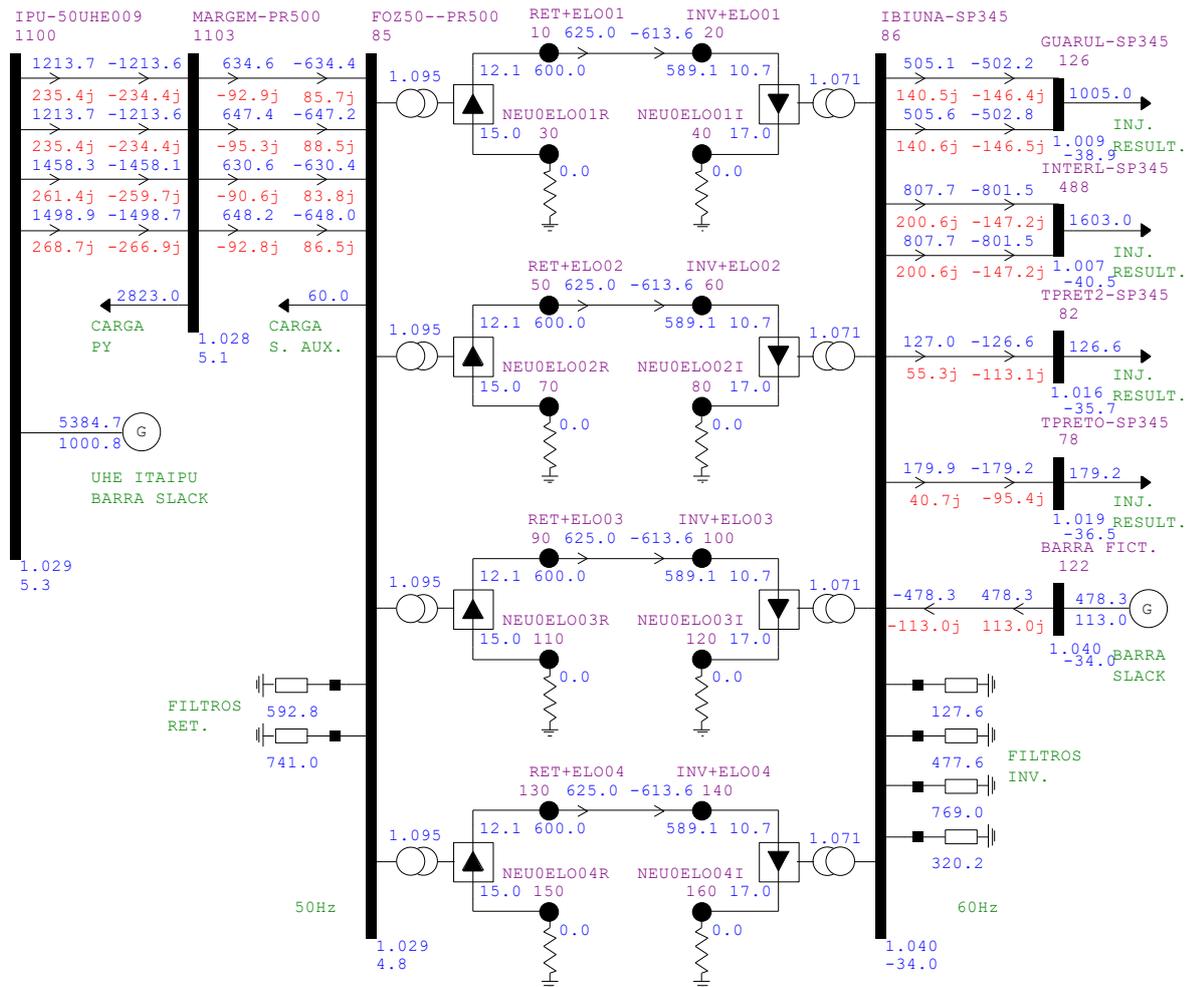


Figura 5.9: Modelagem da rede equivalente do sistema de transmissão CC associado à UHE Itaipu (50 Hz/60 Hz) - saída padrão obtida do programa ANAREDE - Simulação 1

O resultado obtido através do aplicativo MATPOWER modificado após a convergência do PFP com elo CC, utilizando o caso da rede equivalente do sistema de transmissão em corrente contínua associado à UHE Itaipu, está reproduzido na Figura 5.10.

As informações da rede CA fornecidas pela ferramenta original MATPOWER são apresentadas da seguinte forma:

- Os dados relativos aos barramentos da rede de corrente alternada estão apresentados na seção *Bus Data*, onde são indicadas a magnitude e ângulo das tensões dos barramentos, além das injeções de potências ativa e reativa em cada barra.
- Os dados relativos aos ramos são apresentados na seção *Branch Data*, onde estão indicados os fluxos de potência ativa e reativa, além das perdas de potência ativa e reativa em cada ramo.

O item *DC Link Data* apresenta, adicionalmente, em dois conjuntos de informações, o resultado detalhado da rede de corrente contínua fornecidas pela ferramenta proposta nesse trabalho. A Tabela 5.6 exibe uma descrição com mais detalhes dos itens comentados.

Para melhor compreensão, a Tabela 5.7 apresenta um comparativo dos resultados obtidos nas simulações 1 e 2 utilizando as duas ferramentas citadas. A primeira coluna da tabela apresenta: as variáveis de barras CA do retificador (85), inversor (86) e geradores associados ao terminal retificador (1100) e inversor (122); os dados de potência ativa, reativa, ângulos de disparo, extinção e comutação, além dos comutadores de tap sob carga de um dos elos de corrente contínua. Da segunda a quinta coluna, são apresentados os resultados obtidos no MATPOWER e ANAREDE, respectivamente, para as simulações 1 e 2 apresentadas na Tabela 5.5.

Primeiramente, uma comparação dos resultados obtidos pelas ferramentas MATPOWER e ANAREDE, nas simulações 1 e 2, são apresentadas na Tabela 5.7. A partir desses resultados, verifica-se a equivalência dos mesmos, tanto nos dados da rede de corrente contínua, quanto na rede de corrente alternada. Assim, constata-se a validação do desenvolvimento realizado na modelagem de elos CC no programa MATPOWER. Vale destacar que, para algumas variáveis, a pequena diferença observada está relacionada à quantidade de casas decimais do formato de saída previsto no programa ANAREDE.

Em complemento à análise dos resultados da Tabela 5.7, pode-se verificar o efeito de uma redução de  $0.01 pu$  na tensão da barra do retificador (85) entre a simulação 1 (com o modo de controle definido por  $a_r$  variável e  $a_i$  variável) e a simulação 2 (com o modo de controle  $\alpha$  e  $a_i$  variáveis). Com a alteração da tensão, na simulação 2, verifica-se a alteração dos ângulos de disparo  $\alpha$  e, conseqüentemente, do ângulo de comutação  $\mu$  do retificador, buscando assim manter o nível da tensão CC. As alterações nos ângulos citados (redução do ângulo de disparo do retificador) implica na redução do consumo de potência reativa, impactando na geração de potência reativa do gerador da barra CA 1100, conforme esperado.

As informações apresentadas nesta seção evidenciam a aderência dos resultados obtidos ao se comparar a implementação de testes na ferramenta proposta no MATPOWER e no programa comercial ANAREDE, como pode ser avaliado através da Tabela 5.7 e também através da comparação visual dos resultados de cada programa contido nas Figuras 5.9 e 5.10.

Tabela 5.6: Descrição da seção DC Link Data incluída nos resultados do MATPOWER

Item	Variável	Dados
Link	-	Numeração do Elo CC na ordem do caso base
Rect Bus	-	Número da barra associada ao retificador
Inv Bus	-	Número da barra associada ao inversor
Rect Bus Injection	-	Injeção de potência no lado CA do retificador
P (MW)	$Pa_r$	Potência ativa no terminal CA do retificador
Q (MVar)	$Qa_r$	Potência reativa no terminal CA do retificador
Inv Bus Injection	-	Injeção de potência no lado CA do inversor
P (MW)	$Pa_i$	Potência ativa no terminal CA do inversor
Q (MVar)	$Qa_i$	Potência reativa no terminal CA do inversor
DC Voltages	$Vd$	Tensões do lado CC do conversor
Rect (kV)	$V_{dr}$	Tensão CC do retificador
Inv (kV)	$V_{di}$	Tensão CC do inversor
DC Angles (°)	$\delta_c, \mu_c$	Ângulos relativos ao conversor do elo CC
Alpha	$\alpha$	Ângulo de disparo do retificador
Gamma	$\gamma$	Ângulo de extinção do inversor
Mu R	$\mu_r$	Ângulo de comutação do retificador
Mu I	$\mu_i$	Ângulo de comutação do inversor
LTC Transf. a:1	$a_c$	Comutador de tap do transformador conversor <sup>1</sup>
aR	$a_r$	Posição do comutador de tap do retificador
aI	$a_i$	Posição do comutador de tap do inversor
Idr (kA)	$Id_r$	Corrente CC
Opmode	-	Modo de Operação do Elo CC <sup>2</sup>
Rmode	-	Modo de Controle do retificador <sup>3</sup>
Imode	-	Modo de Controle do inversor <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Foi exibido o Tap como a : 1 para equivalência ao formato do programa ANAREDE

<sup>2</sup> Normal ou HMC (High Mvar Consumption)

<sup>3</sup> LTC, ALPHA, IDR ou GAMMA

<sup>4</sup> LTC ou VDR

```

=====
|          Bus Data          |
=====
Bus      Voltage      Generation      Load
#      Mag (pu) Ang(deg)      P (MW)      Q (MVA)      P (MW)      Q (MVA)
-----
78      1.019  -36.456      -          -          179.20      95.40
82      1.016  -35.703      -          -          126.60      113.10
85      1.029   4.794      -          -           60.00       -0.00
86      1.040  -34.000      -          -           0.00         0.00
122     1.040  -34.000*    478.33     112.97      -           -
126     1.009  -38.942      -          -          1005.00     292.90
488     1.007  -40.521      -          -          1603.00     294.40
1100    1.029   5.290*    5384.68    1000.77     -           -
1103    1.028   5.140      -          -          2823.00     1367.00
-----
Total:      5863.01    1113.74    5796.80    2162.80
=====

```

```

=====
|          Branch Data          |
=====
Brnch   From   To   From Bus Injection   To Bus Injection   Loss (I^2 * Z)
#       Bus   Bus   P (MW)   Q (MVA)   P (MW)   Q (MVA)   P (MW)   Q (MVA)
-----
1       86    78   179.85   40.75   -179.20  -95.40    0.652    9.07
2       86    82   127.01   55.30   -126.60 -113.10    0.412    5.74
3       86    122  -478.33  -112.97  478.33   112.97    0.002    0.00
4       86    126  505.08   140.50  -502.22 -146.40    2.856    47.84
5       86    126  505.64   140.65  -502.78 -146.50    2.862    47.90
6       86    488  807.65   200.58  -801.50 -147.20    6.154    97.29
7       86    488  807.65   200.58  -801.50 -147.20    6.154    97.29
8       85    1103 -634.35   85.72   634.58  -92.84    0.233    3.88
9       85    1103 -647.13   88.46   647.38  -95.31    0.242    3.96
10      85    1103 -630.25   83.78   630.47  -90.55    0.222    3.85
11      85    1103 -648.27   86.52   648.50  -92.81    0.228    3.96
12     1100   1103 1214.79   235.52 -1214.64 -234.53    0.145    3.33
13     1100   1103 1214.79   235.50 -1214.64 -234.55    0.145    3.33
14     1100   1103 1458.06   261.32 -1457.83 -259.71    0.230    3.98
15     1100   1103 1497.04   268.43 -1496.80 -266.71    0.236    4.09
-----
Total:      20.774    335.51
=====

```

```

=====
|          DC Link Data - JEFFERSON LIMA 2024          |
=====
Link    Rect   Inv   Rect Bus Injection   Inv Bus Injection   ---DC Voltages---
#       Bus   Bus   P (MW)   Q (MVA)   P (MW)   Q (MVA)   Rect (kV)   Inv (kV)
-----
1       85    86   625.00   247.32  -613.64  257.26    600.00    589.09
2       85    86   625.00   247.32  -613.64  257.26    600.00    589.09
3       85    86   625.00   247.32  -613.64  257.26    600.00    589.09
4       85    86   625.00   247.32  -613.64  257.26    600.00    589.09
=====

```

```

-----DC Angles(°)----- LTC Transf. a:l   Idr   Opmode   Rmode   Imode
#   Alpha Gamma Mu R   Mu I   aR     aI     (kA)  N or H  L,A,I,G  L,V
-----
1   15.00 17.00 12.07 10.68 1.0953 1.0714 1.0417  NORMAL  LTC     LTC
2   15.00 17.00 12.07 10.68 1.0953 1.0714 1.0417  NORMAL  LTC     LTC
3   15.00 17.00 12.07 10.68 1.0953 1.0714 1.0417  NORMAL  LTC     LTC
4   15.00 17.00 12.07 10.68 1.0953 1.0714 1.0417  NORMAL  LTC     LTC
=====

```

Figura 5.10: Visualização dos resultados para a simulação da rede CA-CC no MATPOWER modificado, evidenciando os formatos de saída de dados do programa - Simulação 1

Tabela 5.7: Comparativo de resultados entre as ferramentas MATPOWER e ANAREDE

Item	Simulação 1		Simulação 2	
	MATPOWER	ANAREDE	MATPOWER	ANAREDE
85 - Rect. V. Mag. ( $p.u.$ )	1.029	1.029	<b>1.019</b>	1.019
85 - Rect. V. Ang. ( $^{\circ}$ )	4.794	4.79	<b>4.784</b>	4.78
86 - Inv. V. Mag. ( $p.u.$ )	1.040	1.040	1.040	1.040
86 - Inv. V. Ang. ( $^{\circ}$ )	-34.00	-34.00	-34.00	-34.00
1100 - R. Gen. (MW)	5384.68	5384.7	5384.68	5384.7
1100 - R. Gen. (MVAr)	1000.77	1000.8	<b>990.25</b>	990.3
122 - I. Gen. (MW)	478.34	478.3	478.34	478.3
122 - I. Gen. (MVAr)	112.97	113.0	112.97	113.0
DC - Rect $P_{a_r}$ (MW)	625.00	625.0	625.00	625.0
DC - Inv. $P_{a_i}$ (MW)	-613.64	-613.6	-613.64	-613.6
DC - Rect. $Q_{a_r}$ (MVAr)	247.32	247.3	<b>228.40</b>	228.4
DC - Inv. $Q_{a_i}$ (MVAr)	257.26	257.3	257.26	257.3
DC - Rect. Volt. $V_{d_r}$ (V)	600.00	600.0	600.00	600.0
DC - Inv. Volt. $V_{d_i}$ (V)	589.09	589.1	589.09	589.1
DC - Rect. Ang. $\alpha$ ( $^{\circ}$ )	15.00	15.0	<b>12.74</b>	12.7
DC - Inv. Ang. $\gamma$ ( $^{\circ}$ )	17.00	17.0	17.00	17.0
DC - Rect. Ang. $\mu_r$ ( $^{\circ}$ )	12.07	12.1	<b>13.21</b>	13.2
DC - Inv. Ang. $\mu_i$ ( $^{\circ}$ )	10.68	10.7	10.68	10.7
DC - Rect. LTC $a_r$	1.095	1.095	1.095	1.095
DC - Inv. LTC $a_i$	1.071	1.071	1.071	1.071

### 5.5.3 Testes dos modos de controle do elo CC

Nesta seção, são realizados testes visando verificar a atuação dos modos de controle para o retificador e para o inversor implementados, que foram apresentados na Seção 3.4.

A partir da variação das tensões das barras de referência do lado retificador e do inversor, os testes foram conduzidos a fim de forçar o elo CC a operar com os seus modos de operação para cada terminal.

Os testes foram realizados utilizando o modelo de elo CC apresentado na Seção 5.3 e partindo do ponto de operação da Simulação 1, apresentado na Tabela 5.5, optando-se por um ajuste apenas da potência do retificador  $P_{d_r}$ . Com essa finalidade, utilizou-se o valor de 1575 MW, equivalente à potência máxima de transmissão de 1 polo do elo CC (1 pu).

#### 5.5.3.1 Variação da Tensão CA no lado Retificador

Neste teste, a tensão da barra do gerador associado ao terminal retificador (85) foi reduzida, para que a tensão CA do retificador  $V_{a_r}$ , fosse reduzida. Na simulação de variação da tensão CA do retificador, manteve-se o inversor no modo de controle (variável) do tap  $a_i$ ,

permanecendo assim a tensão de referência  $CC V_{d_{ref}}$  constante nas primeiras 7 simulações.

A Tabela 5.8 resume detalhadamente a sequência de ações. No total, foram realizadas 8 simulações, onde, em função da ação de variação da tensão CA do retificador, o elo CC operou nos modos: *R1* nas simulações 1, 2 e 3; *R2* nas simulações 4 e 5; *R3* nas simulações 6 e 7 e *R4* na simulação final.

Tabela 5.8: Modos de operação simulados com ações do lado do retificador

Variável	Modos de Operação do Retificador			
	R1	R2	R3	R4
$a_r$	Variável	Limite	Limite	Limite
$\alpha$	Constante	Variável	Limite	Limite
$I_r$	Constante	Constante	Variável	Limite
$\gamma$	Constante	Constante	Constante	Variável
<b>Simulações</b>	<b>1, 2 e 3</b>	<b>4 e 5</b>	<b>6 e 7</b>	<b>8</b>

Em função da atuação sobre a redução da tensão CA do lado do retificador, observaram-se as sensibilidades das variáveis, cujos resultados ficaram registrados através das Figuras 5.11, 5.12 e 5.13. A partir da Figura 5.11, verifica-se, nas simulações 1, 2 e 3, que o primeiro controle a variar é o *tap* do transformador do conversor do retificador (linha tracejada verde). Porém, quando o limite do *tap* é violado, este é fixado em valor constante igual ao seu valor limite mínimo. Na sequência, ao se visualizar os resultados nas simulações 4 e 5 destacadas na Figura 5.12, verifica-se que o ângulo de disparo  $\alpha$  passa a variar. Também, percebe-se na Figura 5.13 que a partir da variação do ângulo de disparo  $\alpha$ , a potência reativa consumida pelo elo retificador passa a variar. Quando o limite do ângulo de disparo do retificador atinge seu valor mínimo, na simulação 6, observa-se que ele é mantido no seu limite.

Nesta ocasião, a corrente CC do elo começa a ser alterada, sendo isto observado nas simulações 6 e 7 da Figura 5.11.

Quando a corrente CC é alterada, a potência CC do elo também varia, o que pode ser visto na Figura 5.13. Na última simulação, a corrente CC atinge seu valor limite definido pela margem de corrente ( $\pm 10\%$ ), sendo então mantida neste valor. Desta forma, o ângulo de extinção do inversor  $\gamma$  passa a ser variável na simulação 8.

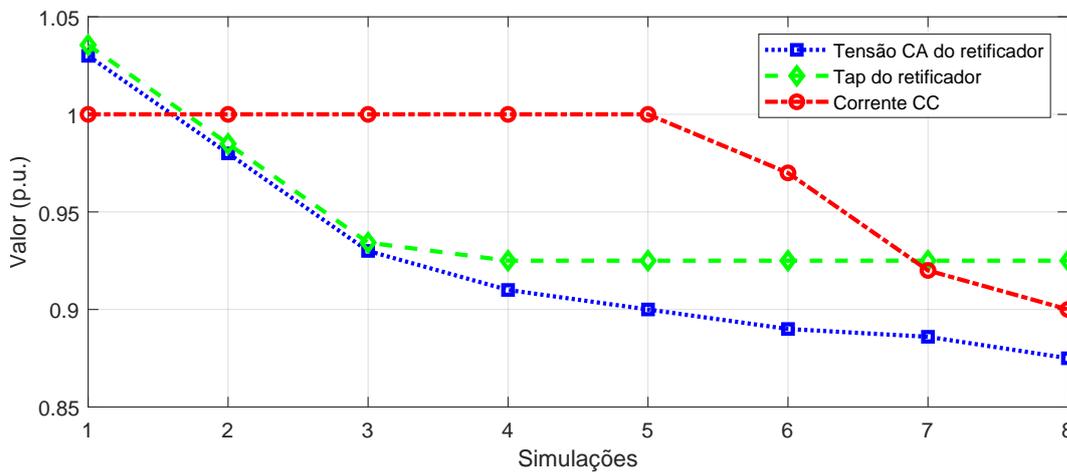


Figura 5.11: Tensão CA do retificador, Tap do retificador ( $a : 1$ ) e corrente CC para o modo de controle normal e variação da tensão CA da rede suprida pelo retificador

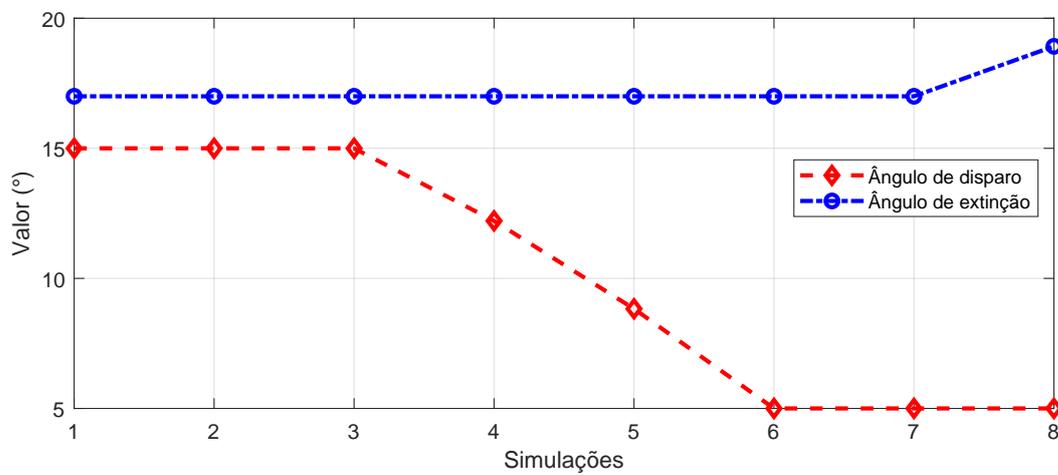


Figura 5.12: Ângulo de disparo do retificador e ângulo de extinção do inversor para o modo de controle normal e variação da tensão CA da rede suprida pelo retificador

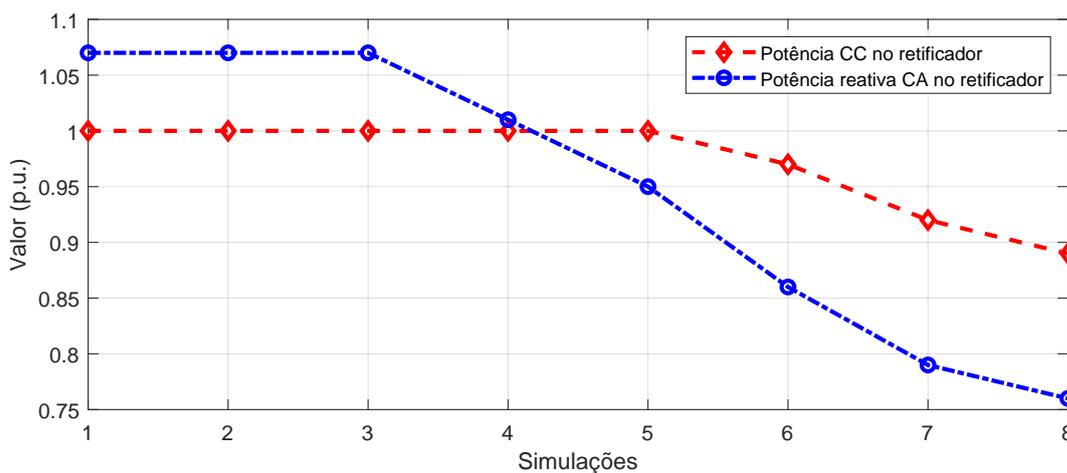


Figura 5.13: Potência CC no retificador (base 1575 MW) e potência reativa CA no retificador (base 787,5 MVA) para o modo de controle normal e variação da tensão CA da rede suprida pelo retificador

A base de potência ativa foi convenientemente considerada como a potência máxima de transmissão do elo CC, 1575 MW, e a base de potência reativa como a metade da potência máxima de transmissão do elo CC para facilitar a visualização e enquadramento nos gráficos das Figuras 5.13 e 5.15

Embora não apresentado nos gráficos citados, visando evitar a sobreposição de curvas iguais, simulações semelhantes foram realizadas no programa ANAREDE, para se obter uma base de comparação com um programa comercial. Os resultados nas duas ferramentas, como esperado, novamente mostraram-se equivalentes.

### 5.5.3.2 Variação da Tensão CA no lado Inversor

Neste teste, agora atuou-se sobre a tensão da barra do gerador associado ao terminal inversor (86). A mesma foi modificada a fim de reduzir o módulo da tensão CA do lado inversor  $V_{a_i}$  e avaliar a sensibilidade das variáveis do elo CC. Nestas condições, manteve-se o retificador no modo de controle (variável) do tap  $a_r$  e a potência  $P_{dr}$  do elo CC constante.

A Tabela 5.9 apresenta um esboço de um sumário com 8 simulações, em que as ações consistem em variar os modos de controle do inversor. Portanto, através de ações de variação da tensão CA do lado inversor, o elo CC foi forçado a operar nos modos: *I1*, nas simulações 1 a 4; e *I2*, nas simulações 5 a 8. Os resultados deste procedimento são ilustrados através de gráficos mostrados nas Figuras 5.14 e 5.15.

Tabela 5.9: Modos de Operação simulados no Inversor

Variável	Modos de Operação do Inversor	
	I1	I2
Simulação		
$a_i$	Variável	Limite
$V_{d_{ref}}$	Constante	Variável
<b>Simulações</b>	<b>1, 2, 3 e 4</b>	<b>5, 6, 7 e 8</b>

Havendo redução da magnitude da tensão CA do lado inversor, observa-se a partir da Figura 5.14 que, nas simulações 1, 2, 3, e 4, o primeiro controle a variar é aquele associado ao tap do transformador conversor do terminal inversor. Assim, a tensão CC é mantida constante. Quando o limite do tap é violado, este é mantido no seu valor limite (simulações 5, 6, 7 e 8), enquanto a tensão CC do retificador passa a variar. Também, percebe-se na Figura 5.15 que, a partir da variação da tensão CC do retificador (simulações 5, 6, 7 e 8), a corrente CC passa a variar, em sentido oposto, para manter a potência CC transmitida no retificador constante. Como consequência da elevação da corrente CC, a potência reativa CA do inversor passa a variar.

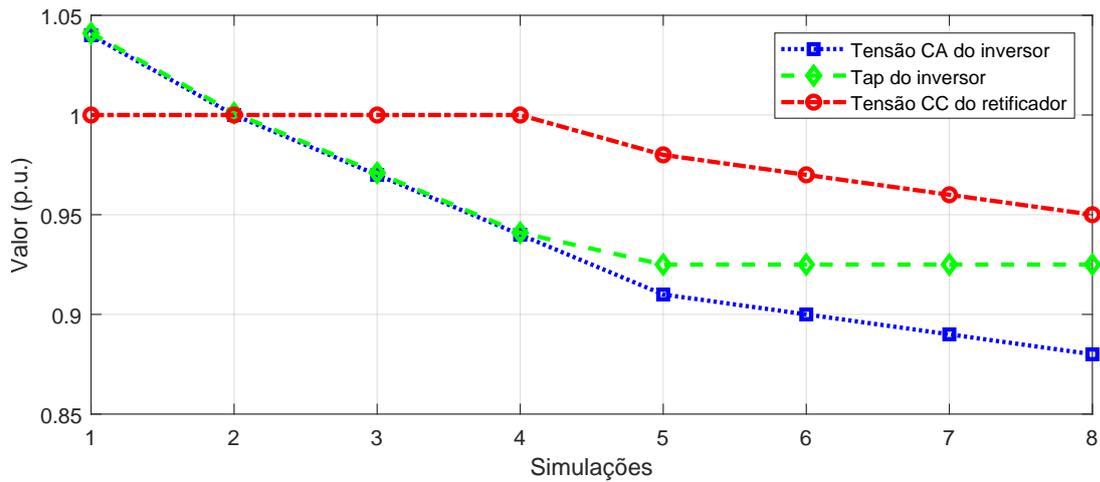


Figura 5.14: Tensão CA do lado inversor, tap do inversor ( $a : 1$ ), tensão CC do retificador para o modo de controle normal e variação da tensão CA da rede suprida pelo inversor

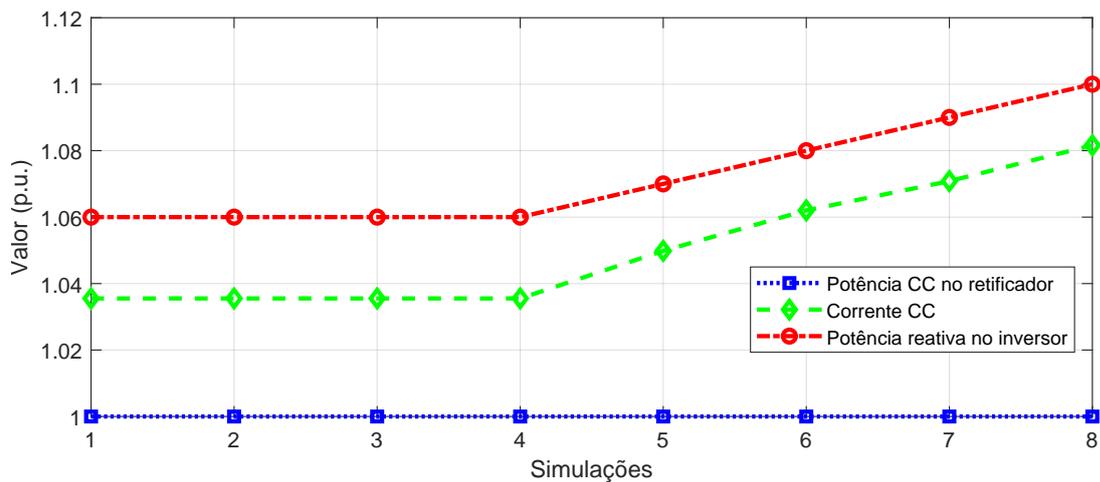


Figura 5.15: Potência CC no retificador (base 1575 MW), corrente CC e potência reativa CA no inversor (base 787,5 MVA) para o modo de controle normal e variação da tensão CA da rede suprida pelo inversor

Similarmente ao constatado nas simulações anteriores, embora não destacado nos gráficos, as mesmas simulações foram realizadas no programa ANAREDE. Os resultados nas duas ferramentas, obtiveram valores equivalentes, assim como já destacado nas Seções 5.4.2 e 5.5.2.

## 5.6 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo, foram realizadas simulações e testes para avaliar o desempenho da implementação de uma ferramenta computacional que oferece ao usuário opção para realizar simulações de redes em regime permanente, incluindo a presença de elos CC. Os testes incluíram os modos de controle do elo CC no retificador e inversor. As simulações foram realizados na ferramenta de fluxo de potência CA MATPOWER, com as modificações implementadas neste trabalho, e repetidos na ferramenta comercial ANAREDE para fins de comparação. As simulações consideraram elos CC embutidos na rede CA (conectando barras CA de um mesmo sistema síncrono) e elo conectando redes CA assíncronas. Foram realizados testes para um caso de uma rede padrão de 4 barras, incluindo um elo CC, e um caso em que se considerou a representação de um elo CC equivalente para dois bipolos do sistema brasileiro associados à UHE Itaipu.

O método de Newton-Raphson e o método Desacoplado Rápido foram utilizados na resolução do PFP na rede CA com elos CC. A metodologia de cálculo usou a técnica sequencial, que consiste em iterações alternadas entre procedimentos somente na rede CA (nativo do MATPOWER) e iterações na rede CC, como proposto nesta dissertação.

Os resultados das simulações efetuadas, mostraram equivalência entre o procedimento implementado no MATPOWER e no pacote comercial ANAREDE. A coerência dos modos de controle também foi verificada através de testes, em que se avaliou a sensibilidade da variação da tensão CA e observação do desempenho dos modos de controle do retificador e do inversor.

# Capítulo 6

## Conclusão

### 6.1 Conclusões gerais

Esta dissertação apresentou uma contribuição ao programa MATPOWER com a incorporação de módulo computacional do problema de fluxo de potência com Elos de transmissão em corrente contínua e seus modos de controle e operação. O programa original permite apenas a implementação de redes CA, o que gera uma limitação da ferramenta diante da necessidade de expansão das redes CA e conexão de interligação de redes CC. Ferramentas comerciais de análise de sistemas elétricos de potência em regime permanente, como o ANAREDE, permitem essa representação. No entanto, além de terem um custo financeiro significativo, são de código fechado, o que impede modificações propostas pelo usuário. Por outro lado, o MATPOWER, não só é de código aberto, como não depende apenas de um tipo de plataforma, podendo ser utilizado o MATLAB ou OCTAVE. Além disso, este último é de licença gratuita.

Foi apresentada a implementação de um ferramental que oferece ao usuário uma opção para realizar simulações de redes em regime permanente, incluindo a presença de elos de transmissão em corrente contínua.

O método de Newton-Raphson e o método Desacoplado Rápido foram utilizados na resolução do problema de fluxo de potência na rede CA contendo elos CC. A metodologia de cálculo consistiu na utilização no método sequencial, que consiste em iterações alternadas entre procedimentos na rede CA (existente no MATPOWER) e iterações na rede CC (desenvolvido neste trabalho). A ferramenta aborda elos CC e seus modos de controle e operação para o retificador e inversor. Para a validação dos resultados, foram realizadas simulações considerando elos CC embutidos na rede CA (conectando barras de uma mesma rede CA) e elos CC conectando redes CA assíncronas. Foram utilizados para testes um caso padrão de 4 barras incluindo um elo CC e um caso reduzido do sistema elétrico brasileiro, envolvendo a transmissão em corrente contínua associada à UHE Itaipu (50Hz/60Hz), contendo 4 elos CC monopolares.

Nas mesmas condições de simulação, os resultados mostraram total equivalência entre o ferramental implementado no MATPOWER e a ferramenta comercial ANAREDE. A coerência dos modos de controle também foi verificada através dos testes, com sucesso, de variação da tensão CA e verificação do desempenho dos modos de controle do retificador e do inversor.

## 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Diversas ideias e trabalhos podem ser abordados com base nos resultados relatados nesta dissertação. Essas ideias podem ser resumidas nas seguintes proposições:

- Tendo em vista o sucesso na implementação da modelagem e solução de elos de corrente contínua, e da inclusão dos modos de controle do retificador e inversor para a operação normal do elo, outros modos de controle do elo CC podem ser implementados, tais como: operação em alto consumo de potência reativa (*HMC - High Mvar Consumption*) e operação em tensão reduzida (*RVO - Reduced Voltage Operation*). Essas implementações possibilitarão que a ferramenta MATPOWER seja utilizada em análises ainda mais abrangentes quanto a outras possibilidades de operação dos elos CC;
- Após a aplicação do método sequencial para interação entre a solução das redes de corrente alternada e corrente contínua, a aplicação do método simultâneo ou unificado para solução de Problema de Fluxo de Potência com elos CCAT conectados a redes CA em programas de fluxo de potência pode ser avaliada;
- Modelagem, implementação de modos de controle, e testes de conversores do tipo fonte de tensão (VSC - Voltage Source Converters). Dada a importância observada para o tema, e o crescimento da utilização desse tipo de conversor, é necessário que o ferramental utilizado seja capaz de realizar simulações incluindo a operação de tais equipamentos;
- As implementações realizadas neste trabalho também podem ser utilizadas em outras ferramentas de análise de rede em regime permanente relacionadas, como: Fluxo de Potência Continuado, Fluxo de Potência Ótimo, Análise de Sensibilidade e Análise de Segurança. Essas ferramentas citadas incluem diversas análises específicas, que, em caso de serem implementadas apenas para redes de corrente alternada, podem ser adequadamente modificadas para ser possível a sua utilização em simulação de redes CA-CC.

# Referências Bibliográficas

- [1] ARRILLAGA, J.; P., A. C.; HARKER, B. J. *High Voltage Direct Current Transmission*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., 1998.
- [2] ABB. *review - The corporate technical journal - Special Report 60 years of HVDC*. Switzerland, jul 2014. 72 p. ISSN: 1013-3119. Disponível em: <[https://library.e.abb.com/public/aff841e25d8986b5c1257d380045703f/140818%20ABB%20SR%2060%20years%20of%20HVDC\\_72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/aff841e25d8986b5c1257d380045703f/140818%20ABB%20SR%2060%20years%20of%20HVDC_72dpi.pdf)>.
- [3] PASSOS FILHO, J. A. *Modelagem e Incorporação de Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência*. 143 p. Dissertação (Mestrado Eng. Elétrica) — UFJF, Juiz de Fora, 2000.
- [4] FUDEH, H.; ONG, C. M. A Simple and Efficient AC-DC Load-Flow Method for Multiterminal DC Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100, n. 11, p. 4389–4396, 1981.
- [5] BEERTEN, J.; COLE, S.; BELMANS, R. A sequential AC/DC power flow algorithm for networks containing multi-terminal VSC HVDC systems. In: *IEEE PES General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–7.
- [6] JOHNSON, T.; SHUBHANGA, K. N. Loop Flow performance of Interconnected Power Systems with HVDC links. In: *1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES-2016)*. [S.l.: s.n.], 2016.
- [7] CHAI, R. et al. Unified Power Flow Algorithm Based on the NR Method for Hybrid AC/DC Grids Incorporating VSCs. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 31, n. 6, p. 4310–4318, 2016.
- [8] EL-MARSAFAWY, M. M.; MATHUR, R. M. A New, Fast Technique for Load-Flow Solution of Integrated Multi-Terminal DC/AC Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-99, n. 1, p. 246–255, 1980.
- [9] VASCONCELOS, L. A. *Metodologia para Representação de Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua Multiterminais no Problema de Fluxo de Potência*. 206 p. Dissertação (Mestrado Eng. Elétrica) — UFJF, Juiz de Fora, 2014.

- [10] NARAYANAN, K. N.; MITRA, P. A comparative study of a sequential and simultaneous AC-DC power flow algorithms for a multi-terminal VSC-HVDC system. In: *2013 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6.
- [11] WIERNES, P. E. et al. Performance comparison of integrated AC/DC power flow calculation methodologies. In: *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- [12] ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SANCHEZ, C. E.; THOMAS, R. J. Matpower: Steady-state operations, planning and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, n. 1, p. 12–19, Feb. 2011.
- [13] KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. 1st. ed. New York: McGraw-Hill, EPRI, Power Engineering Series, 1994.
- [14] LIMA, J. C. T. O.; FREITAS, F. D. Implementação de modelagem e solução de sistemas CCAT no programa de fluxo de potência CA MATPOWER. SBSE 2023 - 19th Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, p. 6, oct 2023. Disponível em: <[https://www.sba.org.br/open\\_journal\\_systems/index.php/sbse](https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse)>.
- [15] JOVCIC, D. *High Voltage Direct Current Transmission - Converters, Systems and DC grids*. 2nd. ed. United Kingdom: John Wiley Sons, Ltd, 2019. ISBN 9781119566632.
- [16] HALDER, T. Comparative study of HVDC and HVAC for a bulk power transmission. In: *2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 139–144.
- [17] DUCENE, E. *HITACHI - High Voltage Direct Current - HVDC Transmission*. mai 2024. Disponível em: <<https://sut.org/wp-content/uploads/2024/03/HVDC-Transmission-Enabling-energy-transition-FINAL.pdf>>.
- [18] HART, D. W. *Power Electronics*. United States: Tata McGraw-Hill Education, 2011. ISBN 9780071321204.
- [19] MONTICELLI, A.; GARCIA, A. *Introdução a sistemas de energia elétrica*. 2nd. ed. São Paulo: Ed Unicamp, 2011.
- [20] YING, X. *Modelling and Control of Hybrid LCC HVDC System - Phd thesis*. [S.l.]: The University of Birmingham, 2016.
- [21] BAHRMAN, M. P.; JOHNSON, B. K. The ABCs of HVDC transmission technologies. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 5, n. 2, p. 32–44, 2007.
- [22] HITACHI ABB. *High Voltage Direct Current – HVDC Transmission Systems*. mai 2021. Disponível em: <<https://publisher.hitachienergy.com/documents>>.

- [23] TOLMASQUIM, M. T. *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. New York: EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2016. 452 p. ISBN: 978-85-60025-06-0. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-172/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>>.
- [24] ONS. *Portal de Dados Abertos do ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico*. maio 2024. Disponível em: <<https://dados.ons.org.br/>>.
- [25] HITACHI. *Customer Success Story: Xiangjiaba - Shanghai*. mai 2024. Disponível em: <<https://www.hitachienergy.com/br/pt/about-us/customer-success-stories/xiangjiaba---shanghai>>.
- [26] LIMA, J. C. T. O. et al. 4 anos de operação da geração e transmissão do rio Madeira: Desafios e Soluções. EDAO - Encontro para Debates de Assuntos da Operação. Cigré-Brasil, p. 14, nov 2016.
- [27] EPE. *Análise do Sistema de Integração das AHE do Rio Madeira e Reforços no SIN - Parte 1 - Definição das subestações coletoras*. Rio de Janeiro, abr 2023. EPE-DEE-RE-026/2006-rev0. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-83/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20EPE%20-%20Projeto%20de%20transmiss%C3%A3o%20do%20Rio%20Madeira.pdf>>.
- [28] EPE. *Expansão das Interligações Norte-Sudeste e Norte-Nordeste, Parte II, Detalhamento da Alternativa Recomendada, Relatório R1*. Rio de Janeiro, jul 2012. EPE-DEE-RE-063/2012-rev0. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-276/topico-623/EPE-DEE-RE-063\\_2012-rev0%20\(R1%20-%20Belo%20Monte%20parte%20II\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-276/topico-623/EPE-DEE-RE-063_2012-rev0%20(R1%20-%20Belo%20Monte%20parte%20II).pdf)>.
- [29] EPE. *Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste - Elo de Corrente Contínua  $\pm 800$  kV Xingu – Terminal Rio*. Rio de Janeiro, out 2014. EPE-DEE-RE-136/2014-rev0. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-276/topico-623/EPE-DEE-RE-136\\_2014-rev0%20\(Bipolo%20800%20kV%20Xingu-TRio\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-276/topico-623/EPE-DEE-RE-136_2014-rev0%20(Bipolo%20800%20kV%20Xingu-TRio).pdf)>.
- [30] EPE. *Estudos para Expansão da Transmissão - Elo de Corrente Contínua  $\pm 800$  kV Graça Aranha – Silvânia*. Rio de Janeiro, jan 2023. EPE-DEE-RE-002/2023-rev0. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-276/topico-667/EPE-DEE-RE-002-2023-rev0%20-%20R2%20Nordeste%20I%20-%20ParteII%20TEM\\_.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-276/topico-667/EPE-DEE-RE-002-2023-rev0%20-%20R2%20Nordeste%20I%20-%20ParteII%20TEM_.pdf)>.
- [31] ANEEL. Licitação para contratar concessões do serviço público de transmissão de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional - SIN. *Edital do Leilão 2/2023*, Agência Nacional de Energia Elétrica, n. 48577.000874/2023-00, p. 61, 2023. Disponível em:

- <[www2.aneel.gov.br/aplicacoes\\_liferay/editais\\_transmissao/documentos\\_editais.cfm?IdProgramaEdital=210](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/editais_transmissao/documentos_editais.cfm?IdProgramaEdital=210)>.
- [32] ESMERALDO, P. C. V. *Technical benefits of HVDC lines and experience of HVDC projects - International Seminar of HVDC Electrical Transmission Systems*. Chile, nov 2020. Disponível em: <<https://energia.gob.cl/mini-sitio/seminario-internacional-de-transmission-electrica-hvdc>>.
- [33] ONS. Relatório de Intercâmbio Internacional - novembro de 2021. Operador Nacional do Sistema Elétrico, p. 27, nov 2021. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Relat%C3%B3rio%20de%20Intercambio%20Internacional%20Agosto%202022.pdf>>.
- [34] PING, W. W. *Modelagem de elos CCAT*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1985.
- [35] MONTICELLI, A. J. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. [S.l.]: E. Blucher, 1983.
- [36] SAADAT, H. et al. *Power System Analysis*. [S.l.]: McGraw-hill, 1999.
- [37] STOTT, B.; ALSAC, O. Fast Decoupled Load Flow. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 3, p. 859–869, 1974.
- [38] JUSAN, F. C.; ZYMLER, R.; LIMA, J. C. T. O. Desenvolvimento de uma ferramenta para avaliação em tempo real da utilização dos bipolos HVDC no controle de tensão do SIN. XIX ERIAC - Encontro Regional Ibero-Americano do Cigre - CE C2, p. 8, mai 2023. Disponível em: <<https://www.xixeriac.com.br/themes/xixeriac/assets/files/pos-evento/XIX%20ERiac-trabalhos%20tecnicos-C2.zip>>.
- [39] MATHWORKS. *MATLAB R2022a*. Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks Inc., 2022. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/>>.
- [40] EATON, J. W. *GNU Octave 7.3*. 2022. Disponível em: <<https://octave.org/>>.
- [41] ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SANCHEZ, C. E. *Matpower Version 7.1*. 2020. Disponível em: <<https://matpower.org/>>.
- [42] ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SÁNCHEZ, C. E. *MATPOWER User's Manual, Version 7.1*. <https://matpower.org/>, 2020. Disponível em: <<https://matpower.org/docs/MATPOWER-manual-7.1.pdf>>.
- [43] CEPEL. *ANAREDE: Análise de sistemas elétricos de potência em regime permanente*. 2023. Disponível em: <<https://cepel.br/produtos/anared-2/>>.
- [44] CEPEL. *ANAREDE V10.1.0*. Rio de Janeiro - RJ: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2022.

- [45] ONS. *Casos de Referência para a Operação Elétrica com horizonte mensal - março*. 2023. Disponível em: <<https://sintegre.ons.org.br/sites/8/42/61/>>.
- [46] GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. *Power System Analysis*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994.
- [47] ONS. *Diagramas e Mapas do ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico*. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>.

# Capítulo 7

## Apêndice

### 7.1 Arquivos de Caso base utilizados nas simulações

Na figura 7.1 é apresentado o caso base modelado no formato da ferramenta MATPOWER proposta neste trabalho para as simulações efetuadas na seção 5.4.2 e nas figuras 7.2 e 7.3 é apresentado o caso base modelado no formato da ferramenta MATPOWER proposta neste trabalho para as simulações efetuadas na seção 5.5.2.

```

function mpc = case4gs_EloCCv2
% CASE4GS Power flow data for 4 bus, 2 gen case from Grainger & Stevenson.
Modified Including an EloCC
% Please see CASEFORMAT for details on the case file format.
% This is the 4 bus example from pp. 337-338 of "Power System Analysis",
% by John Grainger, Jr., William Stevenson, McGraw-Hill, 1994.
%% MATPOWER Case Format : Version 2
mpc.version = '2';
%%----- Power Flow Data -----%%
%% system MVA base
mpc.baseMVA = 100;
%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin
mpc.bus = [
1 3 50 30.99 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
2 1 170 105.4 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
3 1 200 123.9 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
4 2 80 49.58 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
];
%% generator data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2
Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30 ramp_q apf
mpc.gen = [
% 4 318 0 100 -100 1.02 100 1 318 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0;
4 318 0 100 -100 1.02 100 1 318 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0;
1 0 0 100 -100 1 100 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0;
];
%% branch data
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status
angmin angmax
mpc.branch = [
1 2 0.01008 0.0504 0.1025 250 250 250 0 0 1 -360 360;
1 3 0.00744 0.0372 0.0775 250 250 250 0 0 1 -360 360;
2 4 0.00744 0.0372 0.0775 250 250 250 0 0 1 -360 360;
3 4 0.01272 0.0636 0.1275 250 250 250 0 0 1 -360 360;
];
%% DC branch data - JEFFERSONC
%
% Define a localização do retificador e inversor na rede AC e os parâmetros
% dos TR conversores, conversores e linha CC
%
% rbus ibus basedc Pdr STrn STin baseKVr baseKVi
% Vrln Vr2n Viln Vi2n Xcr Xci baseKVd Idr
% Rcc Bnum Alpha AlphMin AlphMax Gamma GammaMin GammaMax
% Vdr Vdi ar ai arMin arMax aiMin aiMax
% OpMode RctMode ICtMode
mpc.DCbranch = [
2 3 100 1.00 1.70 1.60 230 230 ...
1.0 0.6522 1.0 0.6522 0.100 0.100 150 0.6667 ...
10.47 1 15 5 85 17 17 72 ...
1.00000 0.95347 1.250 1.250 0.925 1.250 0.925 1.250 ...
1 1 1

```

Figura 7.1: Caso base do sistema 4 barras com elo CC no MATPOWER

```

function mpc = case_ITAIPU
% CASEIPU is an equivalent network of the HVDC system associated with the
% Itaipu power station (50Hz/60Hz), with 9 AC buses and 4 DC poles
% case reduced from Brazilian Interconnected Power System (BIPS)
% Please see CASEFORMAT for details on the case file format.
% The original case is "ONS - MENSAL - Março 2023 - Média"
%% MATPOWER Case Format : Version 2
mpc.version = '2';
%%----- Power Flow Data -----%%
%% system MVA base
mpc.baseMVA = 100;
%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone
Vmax Vmin
mpc.bus = [
78 1 179.2 95.4 0 0 1 1.019 -37.0 345 1
1.1 0.9;
82 1 126.6 113.1 0 0 1 1.016 -36.0 345 1
1.1 0.9;
85 1 60.00 0.00 0 1260 2 1.022 -2.00 345 1
1.1 0.9;
86 1 0.00 0.00 0 1566.6 1 1.040 -34.0 345 1
1.1 0.9;
122 3 0.00 0.00 0 0 1 1.040 -34.0 345 1
1.1 0.9;
126 1 1005 292.9 0 0 1 1.009 -39.0 345 1
1.1 0.9;
488 1 1603 294.4 0 0 1 1.007 -41.0 345 1
1.1 0.9;
1100 3 0.00 0.00 0 0 2 1.029 5.29 500 1
1.1 0.9;
1103 1 2823 1367 0 0 2 1.022 -1.70 500 1
1.1 0.9;
];
%% generator data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin
Pc1 Pc2 Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30 ramp_q apf
mpc.gen = [
122 478.3 492.9 9999 -9999 1.040 100 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
1100 5385 1702 9999 -9999 1.029 100 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
];
%% branch data
% fbus tbus r x b rA rB rC ratio angle
status angmin angmax
mpc.branch = [
86 78 0.0018700 0.026020 0.60100 250 250 250 0 0
1 -360 360;
86 82 0.0018700 0.026020 0.60100 250 250 250 0 0
1 -360 360;
86 122 0.0000010 0.000001 0.00000 250 250 250 0 0
1 -360 360;
86 126 0.0010900 0.018260 0.51200 250 250 250 0 0
1 -360 360;
];

```

Figura 7.2: Caso base do sistema Itaipu reduzido no MATPOWER - pág 1

```

86      126      0.0010900  0.018240  0.51200 250 250 250  0  0 ✓
1      -360    360;
86      488      0.0009480  0.014987  0.41910 250 250 250  0  0 ✓
1      -360    360;
86      488      0.0009480  0.014987  0.41910 250 250 250  0  0 ✓
1      -360    360;
85      1103     0.0000600  0.001000  0.10400 250 250 250  0  0 ✓
1      -360    360;
85      1103     0.0000600  0.000980  0.10210 250 250 250  0  0 ✓
1      -360    360;
85      1103     0.0000580  0.001007  0.10040 250 250 250  0  0 ✓
1      -360    360;
85      1103     0.0000564  0.000979  0.09690 250 250 250  0  0 ✓
1      -360    360;
1100   1103     0.0000100  0.000230  0.02216 250 250 250  0  0 ✓
1      -360    360;
1100   1103     0.0000100  0.000230  0.02239 250 250 250  0  0 ✓
1      -360    360;
1100   1103     0.0000111  0.000192  0.02239 250 250 250  0  0 ✓
1      -360    360;
1100   1103     0.0000108  0.000187  0.02239 250 250 250  0  0 ✓
1      -360    360;
];
%% DC branch data - JEFFERSONC
% Define a localização do retificador e inversor na rede AC e os parâmetros
% dos TR conversores, conversores e linha CC
% rbus  ibus  basedc  Pdr    STrn   STin   baseKVr  baseKVi
% Vrln  Vr2n  Viln   Vi2n  Xcr   Xci   baseKVd  Idr
% Rcc   Bnum   Alpha  AlphMin AlphMax Gamma  GammaMin GammaMax
% Vdr   Vdi    ar     ai     arMin arMax  aiMin    aiMax
% OpMode RCTMode ICTMode
mpc.DCbranch = [
85      86      100      6.25    4.71    4.50    500      345 ...
1.0     0.2548  1.0     0.3536  0.178  0.172   600      1 ...
10.47   4       15      5       85     17     5        72 ...
1       1       1.0714  1.0417  0.925  1.250  0.925    1.250 ...
1       1       1
85      86      100      6.25    4.71    4.50    500      345 ...
1.0     0.2548  1.0     0.3536  0.178  0.172   600      1 ...
10.47   4       15      5       85     17     5        72 ...
1       1       1.0714  1.0417  0.925  1.250  0.925    1.250 ...
1       1       1
85      86      100      6.25    4.71    4.50    500      345 ...
1.0     0.2548  1.0     0.3536  0.178  0.172   600      1 ...
10.47   4       15      5       85     17     5        72 ...
1       1       1.0714  1.0417  0.925  1.250  0.925    1.250 ...
1       1       1
85      86      100      6.25    4.71    4.50    500      345 ...
1.0     0.2548  1.0     0.3536  0.178  0.172   600      1 ...
10.47   4       15      5       85     17     5        72 ...
1       1       1.0714  1.0417  0.925  1.250  0.925    1.250 ...
1       1       1

```

Figura 7.3: Caso base do sistema Itaipu reduzido no MATPOWER - pág 2