



Leandro Costa Ferreira Gomes

ESTUDO DA CONEXÃO DA USINA DE BELO MONTE AO SIN  
ATRAVÉS DA ALTERNATIVA DE TRANSMISSÃO EM MEIA ONDA

Campinas  
2014





Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Leandro Costa Ferreira Gomes

ESTUDO DA CONEXÃO DA USINA DE BELO MONTE AO SIN ATRAVÉS DA ALTERNATIVA DE  
TRANSMISSÃO EM MEIA ONDA

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Área de concentração: Energia Elétrica.

Orientador: Luiz Carlos Pereira da Silva

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À  
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFEN-  
DIDA PELO ALUNO LEANDRO COSTA  
FERREIRA GOMES E ORIENTADA PELO  
PROF. DR. LUIZ CARLOS PEREIRA DA  
SILVA

---

Campinas  
2014

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

G585e Gomes, Leandro Costa Ferreira, 1986-  
Estudo da conexão da usina de Belo Monte ao SIN através da alternativa de transmissão em meia onda / Leandro Costa Ferreira Gomes. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Luiz Carlos Pereira da Silva.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Energia Elétrica - Transmissão. 2. Linhas de transmissão de microondas. 3. Usinas hidrelétricas. I. Silva, Luiz Carlos Pereira da, 1972-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Half wavelegth transmission lines connecting Belo Monte power plant to the Brazilian interconnected system

**Palavras-chave em inglês:**

Electric power transmission

Microwave transmission lines

Hydroelectric power plants

**Área de concentração:** Energia Elétrica

**Titulação:** Mestre em Engenharia Elétrica

**Banca examinadora:**

Luiz Carlos Pereira da Silva [Orientador]

Marcos de Araujo Paz

Madson Cortes de Almeida

**Data de defesa:** 31-01-2014

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Elétrica

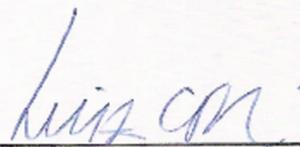
## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidato:** Leandro Costa Ferreira Gomes

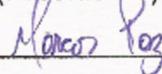
**Data da Defesa:** 31 de janeiro de 2014

**Título da Tese:** "Estudo da Conexão da Usina de Belo Monte ao SIN Através da Alternativa de Transmissão em Meia Onda"

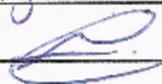
Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva (Presidente):



Prof. Dr. Marcos de Araujo Paz:



Prof. Dr. Madson Cortes de Almeida:





# Resumo

O presente trabalho está inserido num contexto de busca de novas fontes de energia elétrica e de aproveitamento de grandes potenciais energéticos localizados distantes dos principais centros de carga. Para estes, alternativas não convencionais de transmissão também são exigidas, nas quais se insere a transmissão em linhas de pouco mais de meio comprimento de onda, distância de pouco mais de 2500km no sistema brasileiro à 60Hz.

Como este tipo de transmissão nunca foi implementado, trata-se de uma proposta inovadora, pouco explorada e que exige ensaios elementares para testar-se a viabilidade, vantagens e desvantagens frente a outras alternativas de transmissão de energia elétrica.

Esta dissertação visa investigar alguns aspectos referentes à tal método de transmissão de grandes montantes de potência em distintos cenários de interligação entre as regiões Norte e Sudeste do Brasil do SIN (sistema interligado nacional). Três distintos corredores compostos por linhas de pouco mais de meio comprimento de onda foram ensaiados. Inseridos conectando a usina de Belo Monte no Pará a Assis-SP na rede de 500kV, percorrendo 2664 km. Cada um dos corredores é composto por: três linhas de 800 kV e 4846 MW de potência característica (SIL); um segundo com duas das mesmas linhas de 800kV e um terceiro com duas linhas de 1000 kV e 8100 MW de potência característica. Cada aspecto é ensaiado em seis diferentes situações de carregamento do SIN e de fluxo de potência pelo corredor, abrangendo cenários de alto, médio e baixo carregamento das linhas assim como mudanças no sentido do fluxo entre Norte e Sudeste.

Dentre os aspectos abordados estão: a avaliação e redução das perdas manipulando a potência característica operacional das linhas; o controle do carregamento do corredor através do uso de transformadores defasadores não convencionais; a inserção de cargas e geração em pontos intermediários deste e o controle do fluxo de potência reativa.

Por fim, o estudo não aborda aspectos transitórios e é realizado com o auxílio do ANAREDE, software elaborado pelo CEPEL.

Palavras-chave: linhas de transmissão, transmissão em pouco mais de meio comprimento de onda, Belo Monte, ANAREDE



# Abstract

This work is placed in a search for new sources of power and exploitation of large energy potential located far from major load centers. For the second scenarios, alternate non-conventional transmission are also required, in which half wavelength transmission lines are inserted, resulting in a distance of just over 2500km for the 60Hz brazilian electrical system.

Since this type of transmission has never been implemented, it is an innovative solution and few explored, requiring elementary studies to test the feasibility, advantages and disadvantages compared to other alternatives for bulk electric power transmission.

This thesis aims to investigate some aspects related to such transmission method for large amounts of power into distinct scenarios of interconnection between the North and Southeast of Brazil's SIN (Brazilian National grid). Corridors consisting of three distinct lines of just over half wavelength were tested. Inserted connecting Belo Monte hydro power plant in Para to Assis in São Paulo through the 500kV network, covering 2664 km, each corridor is composed: by three lines of 800 kV and 4846 MW of Surge Load Impedance (SIL), the second one by two of the same 800kV lines and a third by two lines of 1000 kV and 8100 MW SIL. Each aspect is tested in six different SIN load situations and power flowing through the corridor, covering scenarios of high, medium and low lines loading as well as changes in flow direction between North and Southeast.

Among the issues tackled are: evaluation and reduction of losses by manipulating operating lines SIL; line load controlling using non-conventional phase shift transformers; inserting loads and generation at intermediate points of the lines and control of reactive power flow.

Finally, the study does not handle with transient aspects and is accomplished with the aid of ANAREDE, software developed by CEPTEL.

Key-words: transmission lines, half wavelength transmission lines, Belo Monte, ANAREDE



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contexto e Motivação . . . . .	1
1.2	Estrutura da Dissertação . . . . .	3
1.3	Publicações . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Caracterização da Transmissão em Meio Comprimento de Onda</b>	<b>5</b>
2.1	Linhas de Transmissão Utilizando o Modelo de Parâmetros Distribuídos . . . . .	5
2.2	Características básicas de uma linha de meio comprimento de Onda . . . . .	9
2.2.1	Perfil de Tensão . . . . .	9
2.2.2	Perfil de Corrente . . . . .	11
2.2.3	Fluxo de Reativos . . . . .	12
2.2.4	Perdas . . . . .	14
2.2.5	Estabilidade . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Descrição do Modelo das Linhas e do Sistema de Teste</b>	<b>17</b>
3.1	Modelagem das Linhas . . . . .	17
3.2	Conexão da UHE Belo Monte ao SIN . . . . .	19
3.3	Conexão das linhas ao SIN . . . . .	20
3.4	Cenários Analisados . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Ensaio com linhas de 800 kV</b>	<b>23</b>
4.1	Controle da Eficiência Através da Variação da Tensão Operacional . . . . .	23
4.1.1	Três Linhas de 800 kV . . . . .	25
4.1.2	Duas Linhas de 800 kV . . . . .	32
4.2	Controle de Carregamento e Eficiência Através da Defasagem Angular . . . . .	36
4.3	Estudo do Transporte de Reativos . . . . .	38
4.3.1	Correlações entre as principais variáveis . . . . .	38
4.3.2	Perfil do Fluxo de Reativos . . . . .	41
4.4	Conclusões Parciais . . . . .	46

<b>5</b>	<b>Ensaaios com linhas de 1000 kV</b>	<b>49</b>
5.1	Metodologia . . . . .	49
5.2	Resultados por Cenário . . . . .	51
5.2.1	Cenário 1 . . . . .	51
5.2.2	Cenário 2 . . . . .	53
5.2.3	Cenário 3 . . . . .	55
5.2.4	Cenário 4 . . . . .	57
5.2.5	Cenário 5 . . . . .	60
5.2.6	Cenário 6 . . . . .	61
5.3	Impacto nas Tensões das Barras de Conexão . . . . .	63
5.3.1	Cenário 1 . . . . .	63
5.3.2	Cenário 2 . . . . .	64
5.3.3	Cenário 3 . . . . .	65
5.3.4	Cenário 4 . . . . .	65
5.3.5	Cenário 5 . . . . .	67
5.3.6	Cenário 6 . . . . .	67
5.4	Conclusões Parciais . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Inserção de Carga e Geração no intermediário das linhas</b>	<b>71</b>
6.1	Metodologia . . . . .	71
6.2	Conexão em Todas as Linhas . . . . .	73
6.2.1	Linhas de 800kV . . . . .	74
6.2.2	Linhas de 1000kV . . . . .	85
6.3	Conexão em Apenas uma Linha . . . . .	92
6.3.1	Linhas de 800kV . . . . .	92
6.3.2	Linhas de 1000kV . . . . .	102
6.4	Conclusões Parciais . . . . .	110
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>113</b>
7.1	Trabalhos Futuros . . . . .	115
	<b>Bibliografia</b>	<b>117</b>

À MINHA MÃE, MEU PAI E MEUS  
IRMÃOS



# Agradecimentos

Agradeço,

ao Prof. Luiz Carlos e à Profa. Maria Cristina pela orientação, solicitude e viva disposição nestes mais de três anos que somam desde a iniciação científica até a conclusão da presente dissertação.

aos meus pais, os quais sempre forneceram todo apoio emocional e financeiro, além do forte incentivo aos estudos desde os remotos tempos da infância.

aos amigos, parte indispensável na formação de nosso caráter, de apoio nos momentos de dúvidas e desânimo, além de insubstituíveis companhias nos momentos de alegria.

aos colegas de departamento pelos momentos de descontração, do café da tarde ao futebol semanal.

ao CNPq, pelo financiamento durante o período de mestrado e iniciação científica.

àqueles que muitas vezes são esquecidos, mas que são parte fundamental na tarefa de fazer da FEEC e a Unicamp instituições de excelência: do mais humilde e precarizado trabalhador terceirizado que limpa nossas instalações, passando pelos técnicos administrativo, os quais cotidianamente solucionam nossos problemas e finalmente chegando ao corpo docente, responsável por nossa formação acadêmica.



A universidade mandarinesca tem como função básica formar a mão de obra dócil que servirá à reprodução ampliada do capital, formar os 'doutores', 'técnicos' que agirão como comissionados do capital, produzindo um saber a serviço do poder.

Maurício Tragtenberg



# Lista de Figuras

2.1	Segmento infinitesimal de uma linha monofásica. . . . .	6
2.2	Perfil de tensão em função do carregamento e $V_{receptor}$ em $x = 0$ . . . . .	10
2.3	Perfil de tensão para diferentes fator de potência. . . . .	11
2.4	Perfil de corrente em função do carregamento e $I_{receptor}$ em $x = 0$ . . . . .	12
2.5	Eficiência em função do carregamento ( $P_r = n * SIL$ ) e do fator de potência. . .	14
2.6	Potências Ativas e Reativas numa HWL+. . . . .	15
3.1	Modelo de linha utilizado no ANAREDE. . . . .	18
3.2	Conexão da Usina de Belo Monte ao SIN. . . . .	19
3.3	Dependência angular entre os subsistemas e inserção dos PSTs. . . . .	20
4.1	Esquemático da varredura nos valores dos tapes. . . . .	25
4.2	Perfil de tensão para os 6 cenários com 3 linhas de 800kV e sem ajuste de $V_{op}$ . .	26
4.3	Perfil de corrente para os 6 cenários com 3 linhas de 800kV e sem ajuste de $V_{op}$ . .	27
4.4	Perfil de tensão para os 6 cenários com 3 linhas de 800kV e com ajuste de $V_{op}$ . .	28
4.5	Comparativo do perfil de tensão para dois cenários com 3 linhas de 800 kV. . . .	28
4.6	Comparativo do perfil de corrente para três cenários com 3 linhas de 800 kV. . .	29
4.7	Perfil de tensão para os 6 cenários com 2 linhas de 800kV e sem ajuste de $V_{op}$ . .	33
4.8	Perfil de corrente para os 6 cenários com 2 linhas de 800kV e sem ajuste de $V_{op}$ . .	34
4.9	Perfil de tensão para os 6 cenários com 2 linhas de 800kV e ajuste de $V_{op}$ . . . .	34
4.10	Fluxo de Reativos em uma das 3 linhas de 800kV no CEN1 (TE em $l = 0km$ ). . .	42
4.11	Fluxo de Reativos em uma das 3 linhas de 800kV no CEN3 (TR em $l = 0km$ ). . .	43
4.12	Fluxo de Reativos em uma das 3 linhas de 800kV no CEN5 (TR em $l = 0km$ ). . .	44
4.13	Fluxo de Reativos em uma das 2 linhas de 800kV no CEN6 (TE em $l = 0km$ ). . .	45
5.1	Perfil de tensão nos 15 ensaios do Cenário 1 (T.Altamira em $l = 0$ ). . . . .	52
5.2	Perfil de corrente nos 15 ensaios do Cenário 1 (T.Altamira em $l = 0$ ). . . . .	52
5.3	Perfil de tensão nos 15 ensaios do Cenário 2 (T.Altamira em $l = 0$ ). . . . .	54
5.4	Perfil de corrente nos 15 ensaios do Cenário 2 (T.Altamira em $l = 0$ ). . . . .	55
5.5	Perfil de tensão nos 15 ensaios do Cenário 3 (T.Altamira em $l = 0$ ). . . . .	56
5.6	Perfil de corrente nos 15 ensaios do Cenário 3 (T.Altamira em $l = 0$ ). . . . .	57
5.7	Perfil de tensão nos 15 ensaios do Cenário 4 (T.Altamira em $l = 0$ ). . . . .	59
5.8	Perfil de corrente nos 15 ensaios do Cenário 4 (T.Altamira em $l = 0$ ). . . . .	59

5.9	Perfil de tensão nos 15 ensaios do Cenário 5 (T.Altamira em $l = 0$ ). . . . .	61
5.10	Perfil de corrente nos 15 ensaios do Cenário 5 (T.Altamira em $l = 0$ ). . . . .	61
5.11	Perfil de tensão nos 15 ensaios do Cenário 6 (T.Altamira em $l = 0$ ). . . . .	62
5.12	Perfil de corrente nos 15 ensaios do Cenário 6 (T.Altamira em $l = 0$ ). . . . .	63
6.1	Duas formas de conexão de cargas em pontos intermediários. . . . .	72
6.2	Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 9 em 3 linhas de 800kV no cenário 1. . . . .	77
6.3	Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 18 em 3 linhas de 800kV no cenário 2. . . . .	78
6.4	Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 27 em 3 linhas de 800kV no cenário 3. . . . .	79
6.5	Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 27 em 3 linhas de 800kV no cenário 4. . . . .	80
6.6	Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 18 em 3 linhas de 800kV no cenário 5. . . . .	81
6.7	Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 9 em 3 linhas de 800kV no cenário 6. . . . .	82
6.8	Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 9 em 2 linhas de 1000kV no cenário 3. . . . .	88
6.9	Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 18 em 2 linhas de 1000kV no cenário 4. . . . .	89
6.10	Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 27 em 2 linhas de 1000kV no cenário 5. . . . .	90
6.11	Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 9 em uma linha de 800kV no cenário 1. . . . .	97
6.12	Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 9 em uma linha de 800kV no cenário 1. . . . .	97
6.13	Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 27 em uma linha de 800kV no cenário 2. . . . .	98
6.14	Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 27 em uma linha de 800kV no cenário 2. . . . .	98
6.15	Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 18 em uma linha de 800kV no cenário 3. . . . .	99
6.16	Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 18 em uma linha de 800kV no cenário 3. . . . .	99
6.17	Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 18 em uma linha de 800kV no cenário 4. . . . .	100
6.18	Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 18 em uma linha de 800kV no cenário 4. . . . .	100
6.19	Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 9 em uma linha de 1000kV no cenário 3. . . . .	106

6.20	Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 9 em uma linha de 1000kV no cenário 3. . . . .	106
6.21	Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 18 em uma linha de 1000kV no cenário 4. . . . .	106
6.22	Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 18 em uma linha de 1000kV no cenário 4. . . . .	107
6.23	Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 27 em uma linha de 1000kV no cenário 5. . . . .	107
6.24	Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 27 em uma linha de 1000kV no cenário 5. . . . .	107



# Lista de Tabelas

1.1	Distâncias das usinas aos grandes centros consumidores. Fonte:[2],[6]	2
2.1	Fluxo de Potência Reativa em relação ao fator $\zeta$ .	13
3.1	Parâmetros de linhas utilizados.	18
3.2	Descrição dos cenários analisados.	21
4.1	Tensões em p.u. nos terminais de conexão da linha nos cenários fornecidos pela EPE.	24
4.2	Valores dos tapes ideais para cada tronco de transmissão.	24
4.3	Comparativo de Perdas para 3 Linhas de 800 kV.	26
4.4	Carregamento do tronco CA para cenários com 3 linhas de 800kV e percentual de convergência.	30
4.5	Tensões nas barras de conexão em pu na configuração com 3 linhas de 800kV.	32
4.6	Comparativo de Perdas para 2 Linhas de 800 kV.	33
4.7	Carregamento do tronco AC para cenários com 2 linhas de 800kV e percentual de convergência.	35
4.8	Tensões nas barras de conexão em pu na configuração com 2 linhas de 800kV.	36
4.9	Valor das defasagens impostas pelo PST no terminal de Assis.	37
4.10	Carregamento e convergência após mudança de fase.	37
4.11	Comparativo de perdas antes e após mudança na defasagem dos PSTs.	37
4.12	Estudo do Transporte de Reativos para 3 linhas de 800kV.	38
4.13	Estudo do Transporte de Reativos para 2 linhas de 800kV.	39
4.14	Estudo do Transporte de Reativos para 3 linhas de 800kV com ajuste no defasador.	39
4.15	Estudo do Transporte de Reativos para 2 linhas de 800kV com ajuste no defasador.	40
4.16	Parte de sequência de dados usados para traçar correlação entre $ \zeta  - V_e/V_r$ e $Q_e$ .	40
4.17	Correlação entre amplitude do perfil de reativos e perdas na linha - configurações sem ajuste da defasagem.	46
4.18	Correlação entre amplitude do perfil de reativos e perdas na linha - configurações com ajuste da defasagem.	46
5.1	Valores de defasagem dos PST utilizadas nos ensaios.	50
5.2	Ensaio para o Cenário 1 com fase do defasador em $155^\circ$ .	51

5.3	Ensaio para o Cenário 1 com fase do defasador em 165° . . . . .	51
5.4	Ensaio para o Cenário 1 com fase do defasador em 170° . . . . .	51
5.5	Ensaio para o Cenário 2 com fase do defasador em 180° . . . . .	53
5.6	Ensaio para o Cenário 2 com fase do defasador em 187° . . . . .	53
5.7	Ensaio para o Cenário 2 com fase do defasador em 195° . . . . .	54
5.8	Ensaio para o Cenário 3 com fase do defasador em 220° . . . . .	55
5.9	Ensaio para o Cenário 3 com fase do defasador em 230° . . . . .	55
5.10	Ensaio para o Cenário 3 com fase do defasador em 240° . . . . .	56
5.11	Ensaio para o Cenário 4 com fase do defasador em 140° . . . . .	58
5.12	Ensaio para o Cenário 4 com fase do defasador em 147° . . . . .	58
5.13	Ensaio para o Cenário 4 com fase do defasador em 155° . . . . .	58
5.14	Tapes centrais que otimizariam a eficiência para cada defasagem ensaiada no cenário 4. . . . .	59
5.15	Ensaio para o Cenário 5 com fase do defasador em 180° . . . . .	60
5.16	Ensaio para o Cenário 5 com fase do defasador em 187° . . . . .	60
5.17	Ensaio para o Cenário 5 com fase do defasador em 195° . . . . .	60
5.18	Ensaio para o Cenário 6 com fase do defasador em 145° . . . . .	62
5.19	Ensaio para o Cenário 6 com fase do defasador em 150° . . . . .	62
5.20	Tensões nas barras de conexão em pu para os ensaios do Cenário 1. . . . .	64
5.21	Tensões nas barras de conexão em pu para os ensaios do Cenário 2. . . . .	64
5.22	Tensões nas barras de conexão em pu para os ensaios do Cenário 3. . . . .	65
5.23	Tensões nas barras de conexão em pu para os ensaios do Cenário 4. . . . .	66
5.24	Reativos gerados na barra de Assis (configurada como PV). . . . .	66
5.25	Tensões nas barras de conexão em pu para os ensaios do Cenário 5. . . . .	67
5.26	Tensões nas barras de conexão em pu para os ensaios do Cenário 6. . . . .	68
6.1	Perdas para Injeção/Extração na barra 9 em três linhas de 800kV. . . . .	74
6.2	Perdas para Injeção/Extração na barra 18 em três linhas de 800kV. . . . .	75
6.3	Perdas para Injeção/Extração na barra 27 em três linhas de 800kV. . . . .	75
6.4	Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 9 em três linhas de 800kV. . . . .	76
6.5	Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 18 em três linhas de 800kV. . . . .	76
6.6	Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 27 em três linhas de 800kV. . . . .	76
6.7	Tendência das tensões nos terminais conforme barra de extração e tipo de cenário. . . . .	83
6.8	Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 9 em três linhas de 800kV. . . . .	83
6.9	Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 18 em três linhas de 800kV. . . . .	84
6.10	Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 27 em três linhas de 800kV. . . . .	84
6.11	Perdas para Injeção/Extração na barra 9 em duas linhas de 1000kV. . . . .	85
6.12	Perdas para Injeção/Extração na barra 18 em duas linhas de 1000kV. . . . .	85
6.13	Perdas para Injeção/Extração na barra 27 em duas linhas de 1000kV. . . . .	86

6.14	Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 09 em duas linhas de 1000kV. . . . .	86
6.15	Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 18 em duas linhas de 1000kV. . . . .	87
6.16	Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 27 em duas linhas de 1000kV. . . . .	87
6.17	Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 9 em duas linhas de 1000kV.	91
6.18	Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 18 em duas linhas de 1000kV. . . . .	91
6.19	Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 27 em duas linhas de 1000kV. . . . .	92
6.20	Perdas para Injeção/Extração na barra 9 em apenas uma linha de 800kV. . . . .	93
6.21	Perdas para Injeção/Extração na barra 18 em apenas uma linha de 800kV. . . . .	93
6.22	Perdas para Injeção/Extração na barra 27 em apenas uma linha de 800kV. . . . .	94
6.23	Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 9 em apenas uma linha de 800kV. . . . .	95
6.24	Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 18 em apenas uma linha de 800kV. . . . .	95
6.25	Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 27 em apenas uma linha de 800kV. . . . .	96
6.26	Tendência do carregamento nas linhas conforme barra de extração e tipo de cenário.	96
6.27	Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 9 em uma linha de 800kV.	101
6.28	Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 18 em uma linha de 800kV.	101
6.29	Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 27 em uma linha de 800kV.	102
6.30	Perdas para Injeção/Extração na barra 9 em apenas uma linha de 1000kV. . . . .	103
6.31	Perdas para Injeção/Extração na barra 18 em apenas uma linha de 1000kV. . . . .	103
6.32	Perdas para Injeção/Extração na barra 27 em apenas uma linha de 1000kV. . . . .	104
6.33	Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 9 em apenas uma linha de 1000kV. . . . .	104
6.34	Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 18 em apenas uma linha de 1000kV. . . . .	105
6.35	Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 27 em apenas uma linha de 1000kV. . . . .	105
6.36	Tensões na barra intermediária conectada na barra 27 em uma linha de 1000kV.	108
6.37	Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 9 em uma linha de 1000kV.	108
6.38	Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 18 em uma linha de 1000kV.	109
6.39	Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 27 em uma linha de 1000kV.	109



# Nomenclatura

SIN	Sistema Interligado Nacional
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
HVDC	High Voltage Direct Current
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
PST	Phase Shift Transformer
CA	Corrente Alternada
EHV	Extra High Voltage
UHV	Ultra High Voltage
HWL+	Half Wavelength Plus (Meia Onda Mais)

$Z_c$ ou $Z_{SIL}$	Impedância Característica
$P_{SIL}$	Potência Característica



# Introdução

## 1.1 Contexto e Motivação

As peculiaridades da distribuição do potencial hidroelétrico brasileiro ainda não aproveitados em contraste com a concentração do consumo principalmente no Sul, Sudeste e litoral do Nordeste fazem com que novas grandes usinas hidrelétricas sejam instaladas a grandes distâncias dos principais centros consumidores. Segundo dados da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) destaca-se o grande potencial da bacia Amazônica, estimado em 106GW, dos quais apenas 1 % foi aproveitado, e seguido do potencial da bacia do Tocantins/Araguaia com cerca de 28GW e 44 % aproveitado [1]. Apesar de políticas de incentivo à produção de combustíveis a partir de biomassa e de diversificação da matriz energética - o potencial instalado em hidrelétricas passou de mais de 90% da capacidade total na década de 80 para 73,09 % em 2011 <sup>1</sup> [1] – estão previstas até o ano de 2017 a instalação de cerca de 32,5GW em Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE, geração acima de 30 MW) apenas nas duas bacias acima citadas [2]. Dentro desta previsão estão incluídas as usinas de Santo Antônio e Jirau, no rio Madeira, cada uma com cerca de 3000MW de capacidade instalada, Belo Monte no Xingu com 11.000MW e São Luiz de Tapajós no rio Tapajós com mais de 8000MW.

Chama-se atenção ao montante de capacidade instalada a ser adicionada: até final de 2011 o Brasil tinha cerca de 115 GW instalados [1], ou seja, o aumento previsto apenas em grandes usinas nas tais duas bacias representa mais de um quarto da capacidade instalada atualmente. Torna-se óbvio que a energia gerada na região Norte deverá exportada aos grandes centros consumidores, nomeadamente o Sudeste, que junto com a região Centro-Oeste <sup>2</sup> tiveram um consumo de cerca de 44.497MWh/h todos os meses do ano de 2011, enquanto a região Norte apresentou um consumo de cerca de 4.687MWh/h [3]. Vale ressaltar que tais dados referem-se a energia provinda do SIN (Sistema Interligado Nacional), e que grande parte da região Norte encontra-se isolada da rede nacional, no entanto, em 2011 o consumo de energia elétrica na região Norte foi de 35,11TWh, apenas uma fração dos 302,71TWh consumidos no Sudeste e Centro-Oeste somados [1].

A situação brasileira não é única. A concentração de potencial gerador distante dos centros

---

<sup>1</sup>Sendo 6,64% representado pela parte da Itaipu Binacional comprada do Paraguay.

<sup>2</sup>No site do ONS não se consegue visualizar a região SE isoladamente.

consumidores também é característica presente na Rússia, China, Índia, e no continente Africano. No caso da Rússia, grande parte das reservas energéticas encontram-se na parte Asiática, enquanto as principais cargas na parte Europeia, havendo a possibilidade de exportação da energia para Coreia do Sul, China e Japão e os circuitos podendo alcançar mais de 3000 km na interligação leste-oeste [4]. Na África existe grande potencial hidrelétrico na região do Inga, na República Democrática do Congo (cerca de 5 % do potencial hidrelétrico mundial está neste país [5]) e na região de Kwanza, em Angola, ambos com possível consumo na África do Sul e transmissão com distâncias de milhares de quilômetros [4].

Outra problemática colocada por pesquisadores italianos é que "a maioria dos recursos hidroenergéticos e das reservas de carvão de baixa qualidade em distâncias entre 1000 km e 1500 km das maiores cargas já foram exploradas na maioria dos países"[5]<sup>3</sup>, levando então a algumas escolhas, entre elas: a energia nuclear e termelétrica lidando com seus altos custos de reposição de combustíveis (inclusive devido ao transporte) e/ou aproveitamento dos potenciais distantes e lidar com os problemas da transmissão em longa distância.

Como visto anteriormente, o Brasil irá seguir majoritariamente com a segunda opção e, assim como quando da construção de Itaipu, novos desafios de engenharia se colocam, principalmente no que se refere à transmissão de grandes blocos de potência em longas distâncias, nomeadamente (para as duas maiores usinas a serem construídas na região norte):

Tabela 1.1: Distâncias das usinas aos grandes centros consumidores. Fonte:[2],[6]

	Belo Monte	São Luís de Tapajós
São Paulo	2550km	2540km
Recife	2080km	2360km

A solução preferencial nestes casos, tendo em vista a opção feita no tronco de transmissão das Usinas do Rio Madeira e, a provável escolha para o de Belo Monte, é a transmissão em HVDC (High Voltage Direct Current), já que a transmissão convencional em CA acarretaria gastos desproporcionais em compensações "shunt" e série para manutenção de um nível adequado de tensão nos terminais da linha. No entanto, outra forma de transmissão é viável e justifica o presente trabalho. Quando trata-se com linhas de comprimento um pouco maiores que meio comprimento de onda (no Brasil, o sistema é 60Hz, logo  $\lambda/2 \approx 2500$  km) obtém-se resultados "bastante diferentes daqueles esperados pela simples extrapolação da experiência com transmissão em médias distâncias" [7]<sup>4</sup>. Basicamente, obtém-se uma linha que comporta-se como uma linha curta sem a necessidade de compensações, tornando a transmissão CA viável economicamente e competitiva com a transmissão em HVDC. Segundo estudos comparativos, uma linha de pouco mais de meio comprimento de onda (a partir de agora chamada de HWL+<sup>5</sup>) para interligação Belo Monte-Sudeste teria um custo 24% menor que a transmissão em HVDC [2] enquanto outro estudo, cujo foco é a interligação entre as Usinas Hidrelétricas de Uchur na Rússia com a Coreia do Sul, afirma que a economia para o caso pode chegar a 20% em relação ao HVDC comparado [8].

<sup>3</sup>tradução própria.

<sup>4</sup>tradução própria.

<sup>5</sup>Half-Wavelength plus.

Fora a questão do custo, outros aspectos devem ser levados em conta quando se planeja a expansão da transmissão no porte da conexão Norte-Sul de que trata este trabalho. Os transitórios de energização; os níveis de curto-circuito; os transitórios eletromecânicos; a controlabilidade do sistema; a eficiência, estabilidade e robustez em regime permanente e a maleabilidade para retirada de carga quando se trata de soluções de transmissão costumeiramente ponto a ponto são características de suma importância. Boa parte destes aspectos tem estudos realizados e em grande medida com resultados positivos à HWL+ e que justificam a continuidade da investigação neste campo.

O trabalho aqui proposto tem por objetivo somar ao arcabouço de estudos já realizados neste campo de pesquisa com um diferencial: a bibliografia já produzida até então trata majoritariamente da HWL+ isolada de qualquer sistema real enquanto que a investigação em questão insere tal linha dentro do SIN na sua perspectiva para 2019, quando acredita-se que Belo Monte – a maior obra de geração prevista para a região amazônica - já esteja concluída. Além disso, o presente trabalho é a continuação de estudos realizados durante iniciação científica realizada no período de agosto de 2010 a julho de 2011. A quantidade de resultados obtidos e a percepção da necessidade de aprofundar a pesquisa como da potencialidade da continuação dos estudos no tema, incentivaram a realização desta dissertação de mestrado. O estudos a serem abordados nesta dissertação estão listados abaixo e desenvolvidos nos capítulos que seguem:

- Melhora do perfil de tensão da linha nos diferentes cenários pela alteração da tensão operacional da linha e conseqüente otimização das perdas;
- Ajuste do carregamento da linha por um transformador defasador de conexão da linha com o terminal de chegada;
- Estudo do impacto de elementos para suporte de reativos nos terminais da linha e métodos de controle do transporte de reativos pela linha;
- Inserção e extração de pequenas cargas em pontos intermediários da linha;

## 1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em 7 capítulos

No Capítulo 1 (Introdução) é feita uma contextualização do tema abordado. Tendo esta em vista, apresentam-se as motivações deste trabalho e os estudos desenvolvidos.

No Capítulo 2 (Caracterização da Transmissão em Meio Comprimento de Onda) é apresentada a formulação que justifica teoricamente a transmissão em meia onda. Com tal base teórica também é feita uma caracterização desta em quesitos relevantes para qualquer sistema de transmissão como eficiência, estabilidade, perfis de tensão e corrente entre outros. Tal caracterização serve de suporte essencial para o entendimento dos ensaios, resultados e análises apresentadas. No final deste capítulo faz-se uma retrospectiva da transmissão em meia onda no mundo e a situação atual da investigação neste tema.

No Capítulo 3 (Descrição do Modelo das Linhas e do Sistema Teste) é descrito o procedimento utilizado na modelagem dos troncos de transmissão e a forma de conexão deste ao SIN para inserção em software de fluxo de carga. Além disso, também é descrita a forma como a UHE de Belo Monte é conectada ao SIN e os caminhos elétricos para escoamento da potência gerada nesta. Enfim, apresentam-se os cenários do SIN recebidos pela EPE utilizados de base para todos os estudos que seguem.

O Capítulo 4 (Ensaio com linhas de 800 kV) é o primeiro capítulo a apresentar resultados de fato. Nele é apresentada a metodologia utilizada para os ensaios com os troncos de 800kV. Os estudos realizados neste capítulo são do controle da eficiência da linha através da variação da tensão operacional e os impactos no carregamento, tensões terminais, dentre outros parâmetros. Em seguida aborda-se a eficiência e os impactos do método de controle do fluxo de potência ativa através da defasagem dos PSTs de conexão das linhas. Por último aborda-se o transporte de reativos pela linha, e de que maneira o controle deste pode-se dar pelo mesmo método utilizado para o ajuste da tensão operacional.

No Capítulo 5 (Ensaio com linhas de 1000 kV) são apresentados os resultados para este tronco de transmissão. Entendendo esta configuração como a mais viável, e após a análise dos resultados para os troncos anteriores resolveu-se abordar de forma mais aprofundada alguns aspectos estudados anteriormente. Neste capítulo o estudo da defasagem do PST para controle do carregamento é melhor estudado, realizando uma quantidade maior de ensaios. Além deste, a influência de reatores terminais para suporte de reativos é analisada.

No Capítulo 6 (Inserção de Carga e Geração no intermediário das linhas) são apresentados ensaios que visam explorar um ponto interessante da transmissão em meia onda que é a possibilidade de conexão de pequenas cargas e unidades geradoras no intermediário de uma linha tida como essencialmente ponto-a-ponto. Aborda-se nele a conexão em 3 diferentes pontos do tronco com duas formas diferentes de conexão e 4 diferentes níveis de potência injetada/extraída

Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do conjunto de investigações deste trabalho, apontando para possíveis estudos a serem realizados no intuito de entender tal técnica de transmissão em longa distância e ponderar os pontos positivos e negativos de sua implementação.

### 1.3 Publicações

Parte dos resultados apresentados nesta dissertação foram utilizados na confecção de artigo “*Half-wavelength transmission lines for connecting power plants in Amazon region to the Brazilian system*” apresentado pelo autor em congresso internacional. O congresso em questão foi o Powertech 2013 organizado pela PES do IEEE (Power and Energy Society) e realizado entre os dias 16 a 20 de junho de 2013 na cidade de Grenoble, França.

## Caracterização da Transmissão em Meio Comprimento de Onda

A ideia de transmissão em meia onda advém de uma conclusão teórica resultante da modelagem de linhas de transmissão em parâmetros distribuídos. Basicamente, o fato de, em uma linha sem perdas, o efeito capacitivo da linha compensar o efeito indutivo da mesma quando esta atinge o comprimento elétrico de  $\pi$  radianos, resultando em uma tensão terminal igual à inicial. Sem compensações de reativos, isto é, sem a inserção de capacitores ou reatores na linha (seja em série ou derivação), tal comprimento elétrico equivale a meio comprimento de onda, em 60Hz como é o caso do sistema brasileiro, 2500km.

Este capítulo desenvolve e descreve tal modelo. Através deste é feita uma análise de uma linha com pouco mais de meio comprimento de onda para perfis de tensão e corrente ao longo da linha para diferentes condições de carregamento. Uma análise do fluxo de reativos pela linha, determinado por uma relação entre as tensões terminais, também é apresentada. A dependência do carregamento da linha para o nível de perdas é explicitada, característica essa fundamental para o trabalho que segue. Por fim, são feitas considerações sobre condições construtivas e operacionais para garantia da estabilidade da linha.

### 2.1 Representação de Linhas de Transmissão Utilizando o Modelo de Parâmetros Distribuídos

A figura 2.1 é a representação de um elemento infinitesimal de uma linha monofásica:

Em que  $R$  representa a resistência série por unidade de comprimento em  $(\Omega/km)$ ;  $L$  a indutância por unidade de comprimento em  $(H/km)$ ;  $C$  a capacitância transversal por unidade de comprimento em  $(F/km)$  e  $G$  a condutância transversal por unidade de comprimento em  $(\Omega^{-1}/km)$

Aplicando a lei de Kirchoff ao circuito, temos as seguintes equações

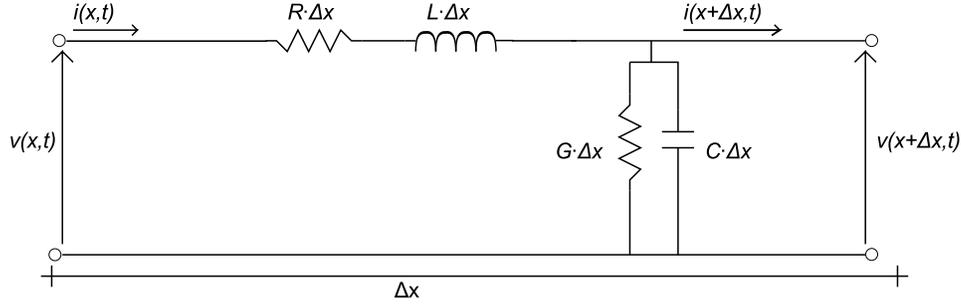


Figura 2.1: Segmento infinitesimal de uma linha monofásica.

$$v(x, t) = v(x + \Delta x, t) + R\Delta x \cdot i(x, t) + L\Delta x \cdot \frac{\partial(i(x, t))}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$i(x, t) = i(x + \Delta x, t) + G\Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) + C\Delta x \cdot \frac{\partial(v(x + \Delta x, t))}{\partial t} \quad (2.2)$$

Manipulando e fazendo com que o seguimento seja infinitesimal, isto é, fazendo  $\Delta x \rightarrow 0$ , tem-se:

$$\frac{\partial(v(x, t))}{\partial x} = - \left( R \cdot i(x, t) + L \cdot \frac{\partial(i(x, t))}{\partial t} \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial(i(x, t))}{\partial x} = - \left( G \cdot v(x, t) + C \cdot \frac{\partial(v(x, t))}{\partial t} \right) \quad (2.4)$$

Passando do domínio do tempo para o domínio da frequência, obtêm-se as seguintes equações:

$$\frac{dV(x)}{dx} = - (R + j\omega L) \cdot I(x) \quad (2.5)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = - (G + j\omega C) \cdot V(x) \quad (2.6)$$

Derivando-se novamente em relação a  $x$ , tem-se:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = - (R + j\omega L) \cdot \frac{dI(x)}{dx} \quad (2.7)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = - (G + j\omega C) \cdot \frac{dV(x)}{dx} \quad (2.8)$$

Substituindo (2.6) em (2.7) e (2.5) em (2.8) obtém-se:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = (R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C) \cdot V(x) \quad (2.9)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = (R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C) \cdot I(x) \quad (2.10)$$

Definindo  $\gamma^2 = (R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C) = \alpha + j\beta$  nas equações acima, conhecida como constante de propagação e para a qual  $\alpha$  representa a constante de atenuação e  $\beta$  a constante de fase, têm-se:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = \gamma^2 \cdot V(x) \quad (2.11)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = \gamma^2 \cdot I(x) \quad (2.12)$$

A solução das equações diferenciais acima, equações de segunda ordem tais que a segunda derivada de cada função equivale à própria função ponderada por uma constante, é da maneira que segue:

$$V(x) = K_1e^{\gamma x} + K_2e^{-\gamma x} \quad (2.13)$$

$$I(x) = K_3e^{\gamma x} + K_4e^{-\gamma x} \quad (2.14)$$

Assumindo a convenção de corrente fluindo do gerador para a carga, a posição inicial  $x = 0$  representa o terminal emissor e  $x = x_0$  - tal que  $x_0$  seja o comprimento da linha - o terminal receptor, têm-se então as seguintes condições de contorno:

$$V_e(0) = K_1 + K_2 \quad (2.15)$$

$$I_e(0) = K_3 + K_4 \quad (2.16)$$

sendo  $V_e(0)$  e  $I_e(0)$ , respectivamente, a tensão e corrente no terminal emissor.

Derivando as equações (2.13) e (2.14) em  $x$  e igualando a (2.5) e (2.6), respectivamente, obtêm-se:

$$\frac{dV(x)}{dx} = K_1\gamma e^{\gamma x} - K_2\gamma e^{-\gamma x} = -(R + j\omega L) \cdot I(x) \quad (2.17)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = K_3\gamma e^{\gamma x} - K_4\gamma e^{-\gamma x} = -(G + j\omega C) \cdot V(x) \quad (2.18)$$

Substituindo os valores de  $V(x)$  e  $I(x)$ , têm-se:

$$K_1e^{\gamma x} - K_2e^{-\gamma x} = -\frac{(R + j\omega L)}{\gamma} \cdot (K_3e^{\gamma x} + K_4e^{-\gamma x}) \quad (2.19)$$

$$K_3e^{\gamma x} - K_4e^{-\gamma x} = -\frac{(G + j\omega C)}{\gamma} \cdot (K_1e^{\gamma x} + K_2e^{-\gamma x}) \quad (2.20)$$

Definindo  $Z_c = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$ , conhecida como impedância característica ou SIL (surge impedance loading), e para  $x = 0$  obtêm-se:

$$K_1 - K_2 = -Z_c \cdot (K_3 + K_4) \quad (2.21)$$

$$K_3 - K_4 = -\frac{1}{Z_c} \cdot (K_1 + K_2) \quad (2.22)$$

As equações acima, (2.15) e (2.16) formam um conjunto de quatro equações linearmente independentes para quatro variáveis a serem encontradas  $K_1, K_2, K_3$  e  $K_4$  em função dos parâmetros  $Z_c, V_e(0)$  e  $I_e(0)$  das quais se obtém:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{2} \cdot (V_e(0) - Z_c I_e(0)) \\ K_2 &= \frac{1}{2} \cdot (V_e(0) + Z_c I_e(0)) \\ K_3 &= \frac{1}{2} \cdot \left( I_e(0) - \frac{V_e(0)}{Z_c} \right) \\ K_4 &= \frac{1}{2} \cdot \left( I_e(0) + \frac{V_e(0)}{Z_c} \right) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Substituindo em (2.13) e (2.14) as constantes encontradas têm-se as seguintes soluções para  $V(x)$  e  $I(x)$ :

$$V(x) = \left( \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) \cdot V_e(0) - Z_c \cdot \left( \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) \cdot I_e(0) \quad (2.24)$$

$$I(x) = \left( \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) \cdot I_e(0) - \frac{1}{Z_c} \cdot \left( \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) \cdot V_e(0) \quad (2.25)$$

Dado que:

$$\begin{aligned} \sinh(\alpha) &= \frac{e^\alpha - e^{-\alpha}}{2} \\ \cosh(\alpha) &= \frac{e^\alpha + e^{-\alpha}}{2} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Pode-se escrever  $V(x)$  e  $I(x)$  como segue:

$$V(x) = \cosh(\gamma x) \cdot V_e(0) - Z_c \cdot \sinh(\gamma x) \cdot I_e(0) \quad (2.27)$$

$$I(x) = \cosh(\gamma x) \cdot I_e(0) - \frac{1}{Z_c} \cdot \sinh(\gamma x) \cdot V_e(0) \quad (2.28)$$

Expresso em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_c \cdot \sinh(\gamma x) \\ -\frac{1}{Z_c} \cdot \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_e(0) \\ I_e(0) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Se, ao invés de assumir  $x = 0$  como o terminal emissor, fosse dado como o terminal de carga, o sentido das correntes na figura 2.1 se inverteria e o resultado obtido seria como expresso abaixo:

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & Z_c \cdot \sinh(\gamma x) \\ \frac{1}{Z_c} \cdot \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_r(0) \\ I_r(0) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Finalmente, a conclusão que motiva esta investigação. Assumindo uma linha sem perdas têm-se:

$$R = G = 0 \quad \rightarrow \quad Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{e} \quad \gamma = j\omega\sqrt{LC} = j\beta \quad (2.31)$$

Dado que:

$$\begin{aligned} \text{sen}(\alpha) &= \frac{e^{j\alpha} - e^{-j\alpha}}{2j} \\ \text{cos}(\alpha) &= \frac{e^{j\alpha} + e^{-j\alpha}}{2} \end{aligned} \quad (2.32)$$

então:  $\cosh(j\alpha) = \cos(\alpha)$  e  $\sinh(j\alpha) = j \text{sen}(\alpha)$ . A equação para  $V(x)$  em função de  $V_e$  pode ser escrita como:

$$V(x) = \cos(\beta x) \cdot V_e - Z_c j \text{sen}(\beta x) \cdot I_e \quad (2.33)$$

Claramente, se  $\beta x = \pi$  então  $|V_e| = |V_r|$ . Como  $\beta$  representa a constante de fase e é dada por  $\beta = 2\pi/\lambda$ , na qual  $\lambda$  é o comprimento de onda, então temos que tal condição é satisfeita quando:

$$\beta x = \frac{2\pi x}{\lambda} = \pi \quad \rightarrow \quad x = \frac{\lambda}{2} \quad (2.34)$$

e que, para o sistema elétrico brasileiro, em 60Hz, resulta em uma distância física de aproximadamente 2500km.

## 2.2 Características básicas de uma linha de meio comprimento de Onda

De posse de um modelo adequado para linhas longas pode-se obter o comportamento de uma linha de meio comprimento de onda num sistema radial, isto é, com o gerador num terminal da linha e a carga em outro.

A seguir serão descritas as características básicas, em regime permanente, de uma linha de meia onda, como o perfil de tensão, corrente para diferentes valores de fator de potência e perfil de perdas em função do carregamento da linha. Os gráficos foram obtidos com os parâmetros de linha utilizados nos ensaios desta dissertação para linhas de 800kV e descritos no capítulo seguinte.

### 2.2.1 Perfil de Tensão

A figura 2.2 ilustra o perfil de tensão ao longo da linha para cinco diferentes condições de carregamento, sendo  $x$  a distância em relação ao terminal receptor, tomado como tensão base, tal que  $V_r = 1pu$ . A carga  $Z_r$  no terminal da linha é dada em função da potência característica e segue de cima para baixo as seguintes relações:

$$Z_r = 0,5Z_c \quad , \quad Z_r = 0,75Z_c \quad , \quad Z_r = Z_c \quad , \quad Z_r = 2Z_c \quad , \quad Z_r = 4Z_c \quad ,$$

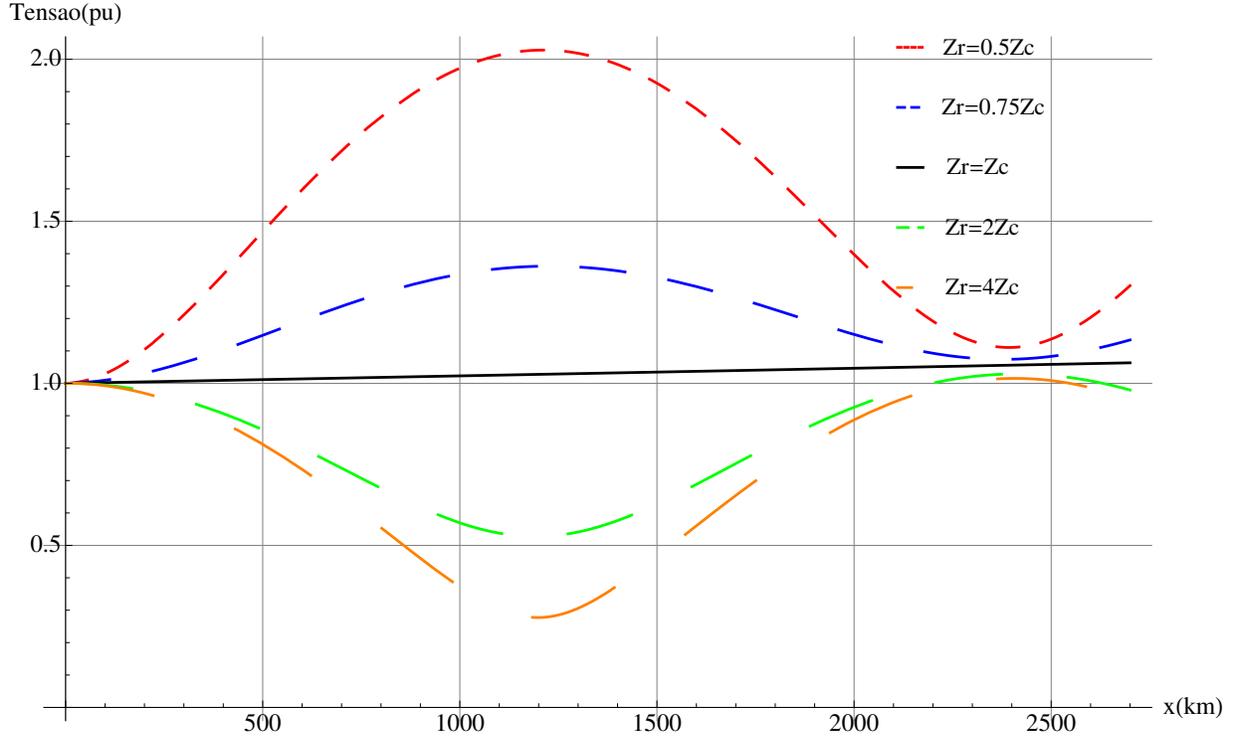


Figura 2.2: Perfil de tensão em função do carregamento e  $V_{receptor}$  em  $x = 0$ .

sabendo que a potência característica depende da tensão terminal e é dada por <sup>1</sup>

$$P_{SIL} = P_c = \frac{V_r^2}{Z_c} \quad (2.35)$$

e que a potência exigida no terminal receptor é dada por

$$P_r = \frac{V_r^2}{Z_r} \quad (2.36)$$

então as relações entre as impedâncias podem ser dadas como relações de potência, tal que, seguindo a mesma ordem têm-se:

$$P_r = 2P_{SIL} \quad , \quad P_r = 1,33P_{SIL} \quad , \quad P_r = P_{SIL} \quad , \quad P_r = 0,5P_{SIL} \quad , \quad P_r = 0,25P_{SIL} \quad ,$$

Dado que para um curto-circuito no terminal receptor a carga é máxima e  $Z_r = 0$  e para o circuito aberto a linha está sem carga e  $Z_r = \infty$ , na figura 2.2 o carregamento da linha vai aumentando conforme a impedância terminal diminui. Percebe-se na figura acima o efeito *Ferranti*, para o qual uma linha média (cerca de 500km) com baixo carregamento apresenta aumento da tensão terminal em relação ao terminal de envio, assim como o efeito contrário, de queda da tensão terminal em caso de alto carregamento da linha. Para a situação em que

<sup>1</sup>Uma linha de tensão possui uma potência característica que é especificada em função de sua tensão nominal e será chamada de  $P_c$  para os casos em que a tensão de operação não seja  $V_{nominal}$ ; a potência característica para este caso será chamada de  $P_{cop}$ .

$Z_r = Z_c$  o efeito capacitivo da linha é anulado pelo efeito indutivo da mesma e o perfil de tensão varia apenas de acordo com as perdas ôhmicas.

Vale notar que a tensão no meio da linha tem um comportamento peculiar, ultrapassa as tensões terminais no caso de carregamento maior que  $P_c$  (ou  $P_{SIL}$ ), atingindo valores tanto maiores quanto maior for o carregamento da linha; e tem o efeito inverso, a tensão cai no meio da linha, caso o carregamento seja inferior à potência característica da linha, diminuindo quanto menor for o carregamento da linha em relação à SIL. Cabe consideração que pode ser importante para projeto de uma linha real quanto ao critério de redundância; apesar de mostrado na figura 2.2 um carregamento de  $P_r = 2P_c$ , segundo [9], o efeito *corona* na região central da linha limita seu carregamento em  $1,4SIL$ .

Por fim, na figura 2.3 são traçados perfis de tensão para fator de potência diferente do unitário para uma carga de módulo igual à SIL. Desta figura pode-se notar que o fator de potência diferente do unitário para uma carga igual à SIL implica em sobretensões nas proximidades do primeiro ou terceiro quarto de linha e possíveis cuidados com isolamento indicando que a operação em tal condição não é conveniente. Além deste fato, não espera-se que um tronco de transmissão de tal dimensões seja utilizado para intercâmbio de potência reativa entre as áreas por ele conectadas e o suporte de reativos, se necessário, deve-se dar em seus terminais.

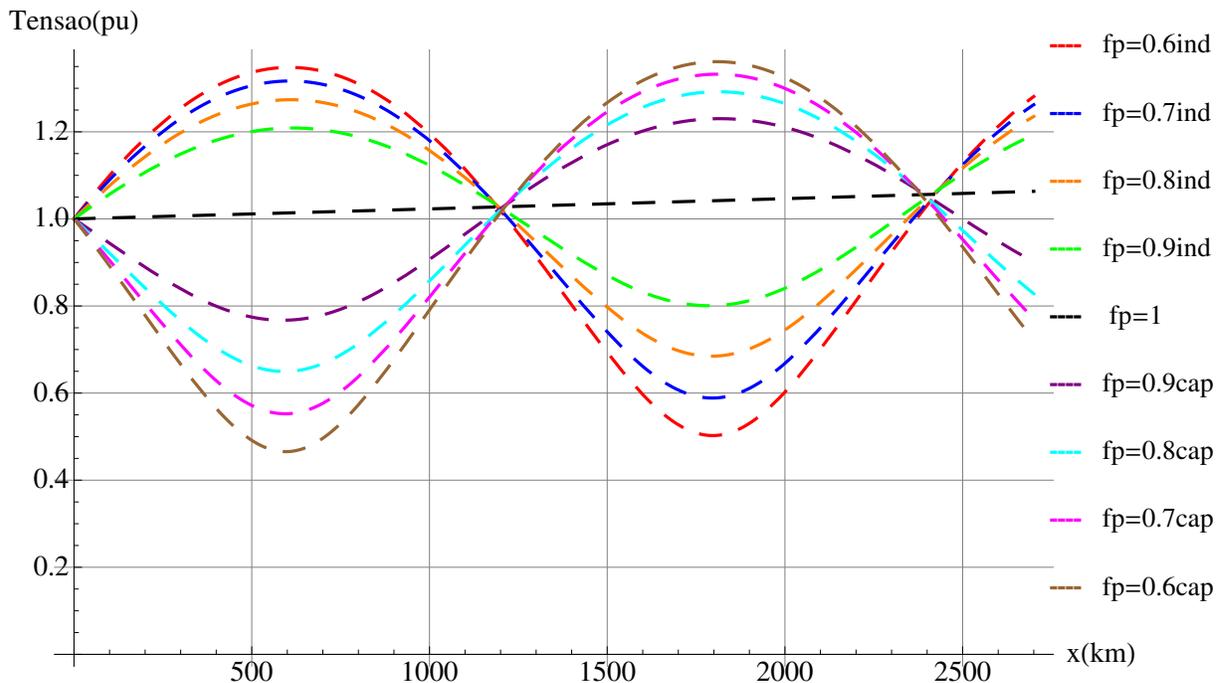


Figura 2.3: Perfil de tensão para diferentes fator de potência.

## 2.2.2 Perfil de Corrente

A figura 2.4 ilustra o comportamento da corrente ao longo da linha dependendo do carregamento. Novamente o terminal receptor é colocado em  $x = 0$  e valor de corrente em pu neste

é dado em função dos valores base de tensão e impedância para os quais foram escolhidos  $V_r$  e  $Z_c$ , respectivamente.

Da figura percebe-se que os picos de corrente ocorrem nos terminais da linha, diferentemente da tensão, cujos picos encontram-se no meio desta. Nota-se, igualmente ao comportamento tensão, que quanto maior o carregamento da linha em função da SIL, maiores os picos, valendo a relação inversa, isto é, quanto menor o carregamento em relação à SIL, maior o afundamento da corrente. Ponto peculiar é que a corrente na região intermediária da linha é praticamente constante. Nas referências [4], [10], [11] podem ser encontradas soluções com uso de eletrônica de potência para retirada e injeção de potência em pontos intermediários da linha aproveitando de tal característica e fazendo com que esta deixe de ser uma conexão exclusivamente ponto-a-ponto.

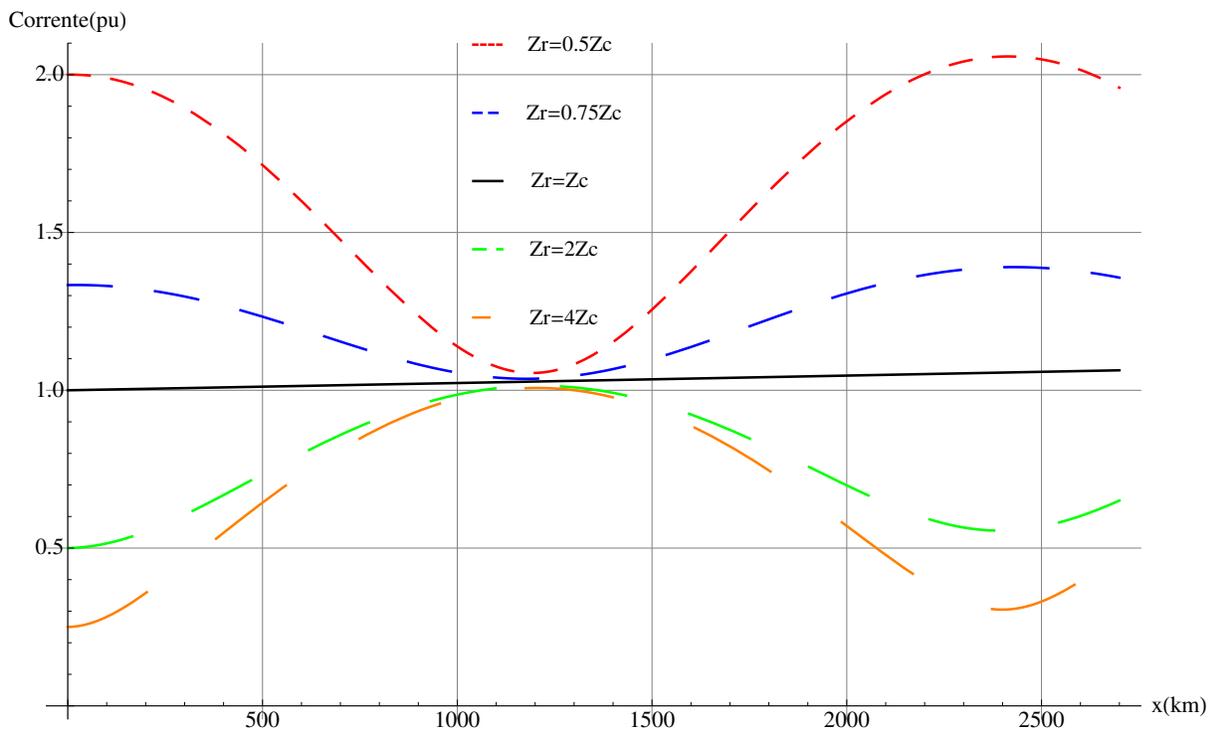


Figura 2.4: Perfil de corrente em função do carregamento e  $I_{receptor}$  em  $x = 0$ .

### 2.2.3 Fluxo de Reativos

Uma linha de meio comprimento de onda, conforme visto, tem como propriedade o fato dos efeito capacitivos e indutivos praticamente se anularem, fazendo com que a linha praticamente não gere ou absorva potência reativa. No entanto, a linha conectando dois sistemas ou sub-sistemas está sujeita a transferência de potência reativa de um para outro. Foi anteriormente mostrado que a linha com fator de potência diferente do unitário implica em sobretensões em certas regiões desta além de reduzir sua eficiência, por tais motivos um tronco de transmissão deste tipo não deve trabalhar com fator de potência muito diferente do unitário, não sendo apropriada para a transferência de potência reativa entre duas regiões. Métodos de suporte de

pequena quantidade de reativos nos terminais devem ser utilizados a fim de evitar tal transferência de reativos.

O fluxo de potência reativa está diretamente associado com a relação dos módulos das tensões terminais [12]. Uma maneira simplificada de obter um parâmetro de comparação e referência para ajuste é descrito a seguir. O montante e o sentido dependerão da comparação com o parâmetro  $\zeta_{otimo}$  que é dado pela relação entre as tensões terminais para a situação de máxima eficiência  $P_t = P_{SIL}$ . Das equações dadas por (2.29) pode-se obter uma expressão para um  $\zeta$  genérico:

$$\zeta = \frac{V_e}{V_r} = \frac{V_r \cdot \cosh(\gamma l) + Z_c \cdot I_r \cdot \sinh(\gamma l)}{V_r} \quad (2.37)$$

em que  $l$  é o comprimento total da linha em questão, em quilômetros. Simplificando e dado que  $I_r = V_r/Z_r$  tem-se:

$$\zeta = \cosh(\gamma l) + \left( \frac{Z_c}{Z_r} \right) \cdot \sinh(\gamma l) \quad (2.38)$$

Assumindo que tanto  $Z_c$  como  $Z_r$  são aproximadamente resistivas e são dadas por:

$$Z_c = \frac{V_r^2}{P_{cop}} \quad (2.39)$$

$$Z_r = \frac{V_r^2}{P_r} \quad (2.40)$$

em que  $P_{cop}$  é a potência característica, em MW, para uma determinada tensão de operação (ou potência característica operacional) e pode ser escrita em função de  $P_c$  e  $V_{nominal}$  tal que:

$$P_{cop} = P_c \cdot \left( \frac{V_r}{V_{nominal}} \right)^2 \quad (2.41)$$

pode-se simplificar a equação (2.38) obtendo:

$$\zeta = \cosh(\gamma l) + \left( \frac{P_r}{P_c} \right) \cdot \left( \frac{V_{nominal}}{V_r} \right)^2 \cdot \sinh(\gamma l) \quad (2.42)$$

Ou seja, dada uma situação de operação da linha, conhecidos os parâmetros da equação acima e  $V_e$  pode-se estabelecer uma comparação conforme tabela 2.1, dado que quanto mais a relação entre as tensões se afasta do valor de  $\zeta$  maior o fluxo de potência reativa no sentido indicado pela mesma tabela.

Tabela 2.1: Fluxo de Potência Reativa em relação ao fator  $\zeta$ .

Relação entre as tensões terminais	Sentido do Fluxo de Potência
$>  \zeta $	Emissor $\rightarrow$ Receptor
$=  \zeta $	Nulo
$<  \zeta $	Receptor $\rightarrow$ Emissor

### 2.2.4 Perdas

A figura 2.5 traça a eficiência da linha em função da potência atravessando o terminal receptor dada em proporção à  $SIL$ . A eficiência máxima atinge valores teóricos de cerca de 88% quando a potência no terminal receptor é igual à potência característica; varia pouco em torno deste valor e tem uma diminuição para valores inaceitáveis quando abaixo de  $0,5SIL$ . O gráfico também mostra que a eficiência é levemente impactada pelo fator de potência, diminuindo quanto menor for este, dependendo apenas do módulo e não de ser indutivo ou capacitivo.

Essa propriedade é de fundamental importância para o presente trabalho, pois assumindo que a variação do carregamento de uma linha é inerente ao seu funcionamento e demandas do sistema em que está inserido, para atingir limites aceitáveis de perdas, a linha deve ou ter seu carregamento limitado em uma faixa operacional restrita, ou varia-se a  $SIL$ , dada pela equação (2.35) variando a tensão operacional desta.

Por fim, tanto o gráfico de eficiência como os gráficos anteriores tratam de valores de carregamento da linha de até  $2P_{SIL}$ , no entanto, vale ressaltar que em [9] mostra-se que o carregamento fica limitado em cerca de  $1,4P_{SIL}$  devido ao efeito corona.

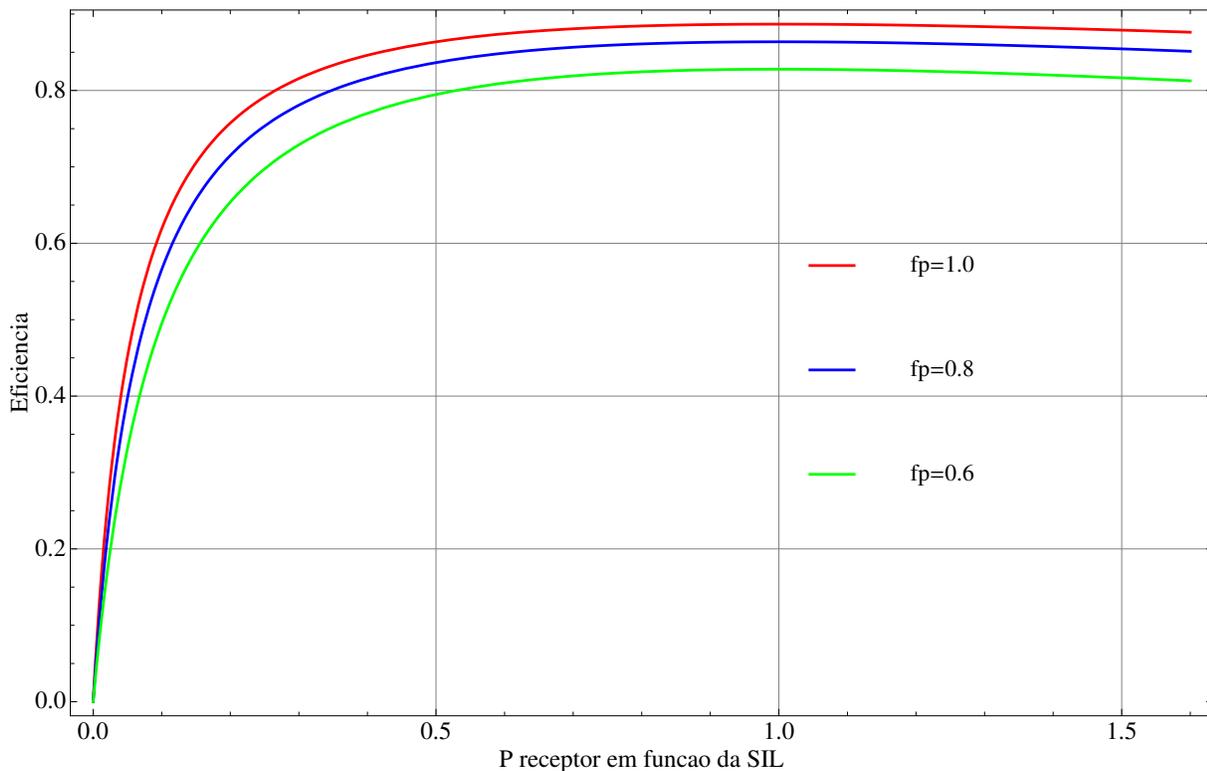


Figura 2.5: Eficiência em função do carregamento ( $P_r = n * SIL$ ) e do fator de potência.

### 2.2.5 Estabilidade

Assim como uma linha de transmissão convencional ou um gerador, uma linha de meio comprimento de onda exige adequação de alguns parâmetros construtivos e operacionais para funcionar dentro de uma margem de estabilidade. As equações de potência para um linha ideal

(sem perdas) a seguir e o gráfico obtido por elas permitem tirar conclusões importantes sobre tais parâmetros [13]:

$$\frac{P}{P_{SIL}} = \frac{\text{sen}(\delta)}{\text{sen}(\theta)} \quad (2.43)$$

$$\frac{\Delta Q}{P_{SIL}} = 2 \cdot \left( \cot(\theta) - \frac{\cos(\delta)}{\text{sen}(\theta)} \right) \quad (2.44)$$

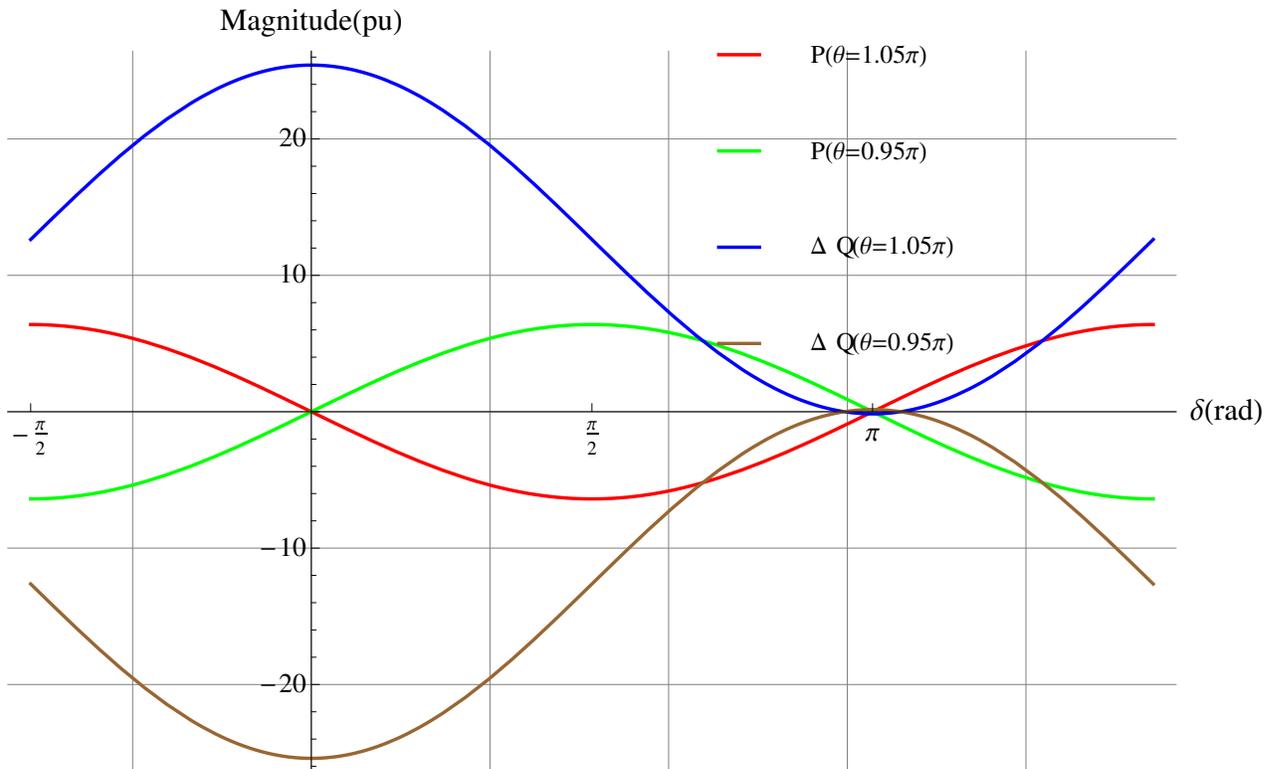


Figura 2.6: Potências Ativas e Reativas numa HWL+.

Em que  $P$  é a potência transmitida pela linha;  $\Delta Q$  é o balanço de potência reativa entre os terminais;  $\theta$  é o comprimento elétrico da linha também dado por  $\gamma l$  conforme as equações dadas em (2.29) e  $\delta$  o ângulo de potência.

Sabe-se que uma linha com aproximadamente 2500km sem compensação série ou shunt terá comprimento elétrico de cerca de  $\pi$  rad. A figura 2.6 traça o comportamento da potência ativa e balanço de potência reativa em relação ao ângulo de potência para um valor de comprimento elétrico pouco maior e um pouco menor que  $\pi$  rad, lembrando que das equações (2.43) e (2.44) temos que  $\theta = \pi \text{ rad}$  é um ponto singular e deve ser evitado. A figura mostra que o balanço de potência reativa é próximo de zero quando o ângulo de carga é próximo de  $\pi$  rad, indicando que a operação deve se dar próximo desta condição. Já quanto ao comprimento elétrico, percebe-se que a derivada  $\partial P / \partial \delta$ , fator que define a estabilidade do sistema, é positiva próxima de  $\delta = \pi$  rad apenas se  $\theta > \pi$  rad. Por este motivo a linha deve ter pouco mais de meio comprimento elétrico de onda, isto é, a 60Hz e sem compensação deve ter pouco mais de 2500km; no caso de haver compensações, estas são feitas de tal maneira que  $\gamma l = \theta > \pi$  rad. As referências

[9], [14],[15] e [16] indicam que, estabelecida uma margem de segurança, a linha deve operar preferencialmente próximo de  $190^\circ$  elétricos. Deve-se notar que esta análise vale para uma linha conectada num sistema não radial, isto é, ela está sujeita às aberturas angulares entre as barras nas quais seus terminais serão conectados.

## Descrição do Modelo das Linhas e do Sistema de Teste

O presente capítulo descreve o modelo das linhas utilizadas durante as simulações realizadas para a elaboração desta dissertação e os cenários nos quais foram inseridas. Como descrito anteriormente, este estudo investiga alguns aspectos necessários para a viabilização da implementação desta tecnologia e limitou-se à análise destes em regime permanente com o uso da ferramenta computacional desenvolvida pelo CEPEL, o ANAREDE.

Vale frisar que tanto o modelo de linha como os cenários estudados não foram montados no âmbito desta dissertação, mas sim obtidos à priori. Estes foram criados para um conjunto de estudos a nível de investigação de planejamento feito pela EPE e utilizado também em estudos acadêmicos com a mesma temática. Apenas a retirada de uma linha de 800kV dos cenários obtidos previamente com três linhas e a substituição por linhas de 1000kV (utilizando-se do mesmo modelo e alterando-se apenas os parâmetros) foram trabalhos parte desta pesquisa.

### 3.1 Modelagem das Linhas

Antes de aprofundar no modelamento utilizado, é importante ressaltar alguns aspectos dos troncos de transmissão ensaiados. Apesar do foco deste trabalho - e da concepção de uma linha de transmissão que conecte a região amazônica nas regiões próximas à Usina de Belo Monte - ser o transporte dos grandes montantes de energia a serem gerados nesta usina e em futuras instalações hidrelétricas na região, não se resume apenas a isto. Sabe-se que o SIN é altamente dependente da hidrologia e que, em alguns períodos do ano o subsistema do Norte - normalmente exportador de energia - é importador. Tanto assim que sempre constam nos ensaios futuros da EPE cenários com intercâmbios de potência nos dois sentidos entre os subsistemas Norte e Sudeste/Centro-Oeste. Dado isto, frisa-se que os troncos simulados não são meros corredores de exportação de energia, mas interligações entre os subsistemas citados, permitindo também a importação de energia pelo Norte.

A ideia da transmissão em meio comprimento de onda surge de conclusões teóricas derivadas da modelagem das linhas em parâmetros distribuídos, isso porque em linhas longas o modelo de parâmetros concentrados não contempla os efeitos na variação da tensão e corrente na linha.

Dado tal, o modelo de linha utilizado para os ensaios aqui propostos tem de se aproximar ao modelo teórico, sabendo que o software utilizado (ANAREDE) trabalha apenas com a descrição de linhas usando o modelo de parâmetros concentrados. Para tanto, cada linha de 2644km dos troncos estudados foram divididas em 35 trechos  $\pi$  iguais entre si com 75,54km, resultando em 36 barras por circuito incluindo os terminais emissor e receptor conforme esquema da figura 3.1. Este modelo permite a monitoração da tensão e corrente ao longo da linha visto que o programa de fluxo de carga tem como saída tais grandezas referentes às barras e trechos de linhas, respectivamente.

Nota-se que quatro ensaios no ANAREDE para diferentes tipos de carregamento e fator de potência utilizando este modelo foram obtidos e comparados, para as mesmas situações de carregamento, com o resultado que se obteria com o uso das equações (2.29). Em todos os casos o erro absoluto da tensão não ultrapassou  $\pm 10^{-3} pu$  em relação àquela obtida a partir das equações diferenciais [12].

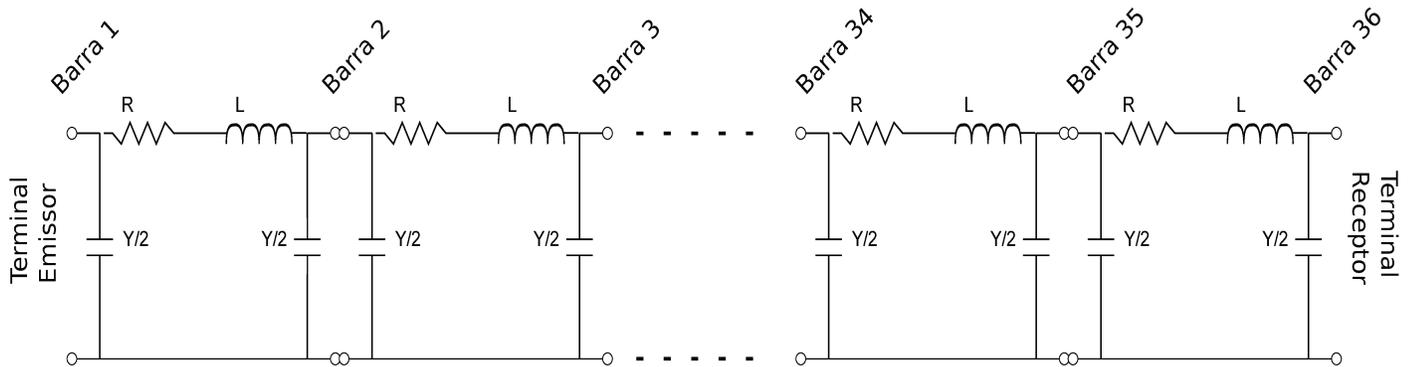


Figura 3.1: Modelo de linha utilizado no ANAREDE.

Foram simulados três tipos de corredores com dois tipos de linhas de meia onda. Um corredor com três linhas de 800kV; outro com duas das mesmas linhas e um terceiro com duas linhas de 1000kV. Abaixo seguem os valores dos parâmetros de cada tipo de linha.

Tabela 3.1: Parâmetros de linhas utilizados.

Tensão	Resistência( $\Omega/km$ )	Reatância( $\Omega/km$ )	Susceptância ( $\mu S/km$ )	SIL (MW)	Zsil ( $\Omega$ )
800 kV	0,00660	0,17248	9,902	4846,56	132,05
1000 kV	0,006425	0,16110	10,640	8100,00	123,46

Como salientado em 2.2.1, o carregamento da linha é limitado por um fator de  $1,4SIL$  tornando esta característica extremamente importante para o dimensionamento de uma linha de meia onda que pretende integrar dois subsistemas e com a pretensão de servir para exportação de grandes montantes de energia de instalações hidrelétricas em construção e previstas. Deste ponto de vista e, já adiantando o que segue, deu-se mais atenção para os troncos de 1000kV dada sua maior capacidade de carregamento.

## 3.2 Conexão da UHE Belo Monte ao SIN

A principal fonte de energia para simular o tronco de transmissão em questão é a UHE de Belo Monte. Na época da obtenção dos cenários aqui trabalhados diversas definições não tinham sido tomadas. O cenário aqui utilizado é anterior às definições de conexão da UHE de Belo Monte ao SIN e é descrito em seguida. A figura 3.2 ilustra a forma de conexão da UHE Belo Monte ao SIN.

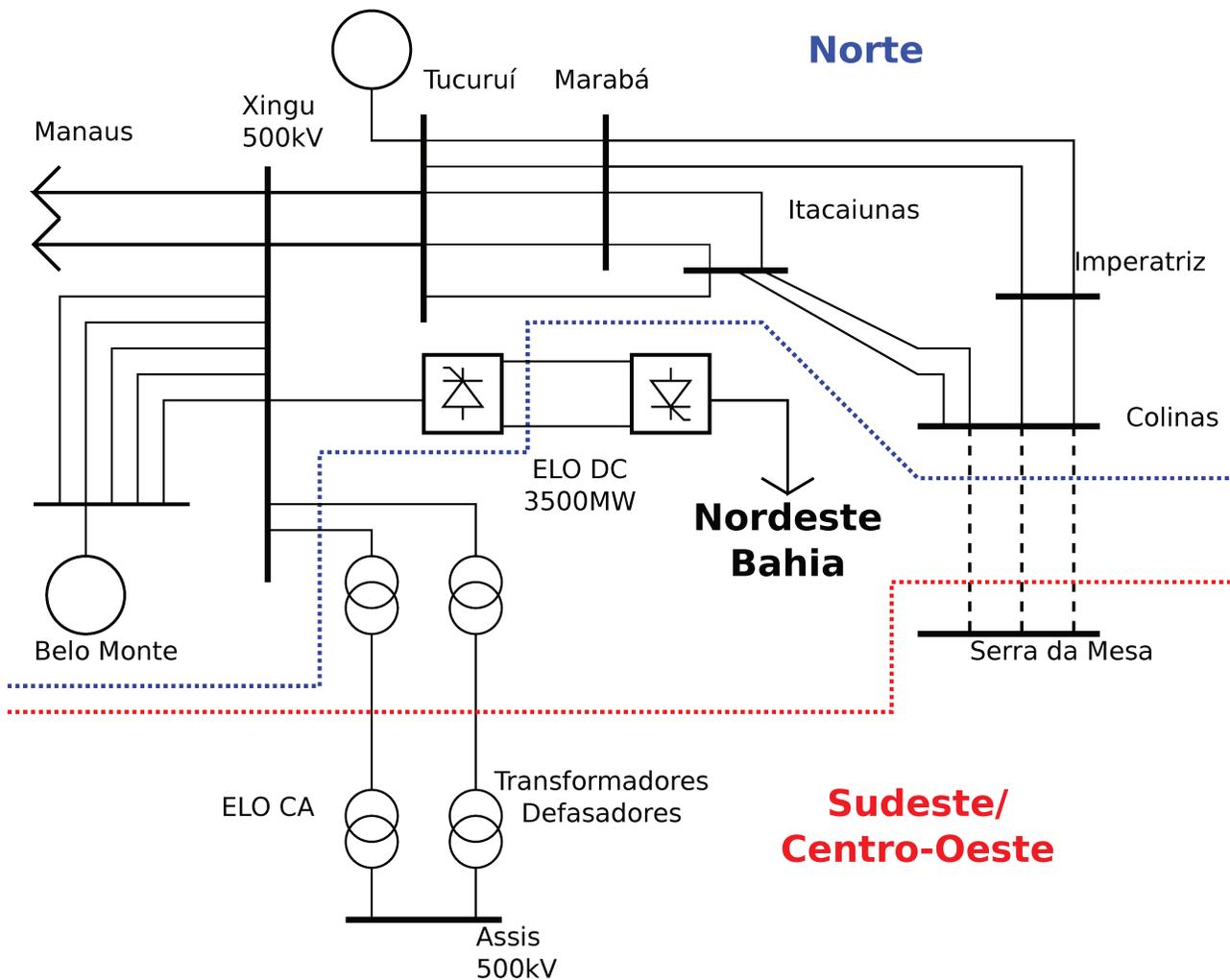


Figura 3.2: Conexão da Usina de Belo Monte ao SIN.

Basicamente, se conectará na barra Xingu, de 500kV e pertencente à extensão da "Norte-Sul" que ligará Manaus ao SIN, podendo então fluir parte da energia por esta linha, tanto para Manaus e pontos intermediários, como para o Sul. Da barra de Xingu partem dois elos, o primeiro em HVDC com potência de até 3500 MW conectando no estado da Bahia e um segundo elo em CA via troncos de meia onda com potência variando segundo o número de linhas utilizadas e a SIL destas ligado ao estado de São Paulo.

### 3.3 Conexão das linhas ao SIN

Os troncos simulados partem da extensão da rede de 500kV que conectará Manaus ao SIN, mais especificamente da barra de Xingu de 500kV localizada no município de Altamira no estado do Pará e se conecta a um forte nó, também na rede de 500kV, no município de Assis no estado de São Paulo.

A primeira característica relevante da linha de meia onda que influencia na opção da conexão desta ao SIN é o fato de sua eficiência ser máxima quando seu carregamento for igual à potência característica operacional. No intuito de manipular potência característica  $P_c$ , dada pela equação (2.35) optou-se por manipular a tensão operacional da linha através de transformadores não convencionais com grande faixa de variação dos seus tapes. Do ponto de vista de modelagem no ANAREDE, não há diferenças em relação a um transformador normal, apenas pelo fato de que os limites mínimo e máximo são deixados bastante flexíveis. Aqui não foi feita a discussão das características de construção de tal transformador, da viabilidade de chaveamento do tap em carga e nem das características transitórias que tal chaveamento acarretaria.

Outra propriedade a se dar importância na conexão de uma linha de meia onda a um sistema malhado é a defasagem angular. Conforme visto em na equação (2.33), no caso de uma linha ideal de exato meio comprimento de onda, tem-se um comprimento elétrico de  $\pi rad$  e a relação entre a tensão terminal e a inicial é dada por

$$V_r = -V_e \quad (3.1)$$

ou seja, há uma inversão de fase, ou  $180^\circ$  de defasagem entre as tensões.

Os troncos simulados não foram testados num simples sistema radial, mas inseridos no SIN. Como a conexão entre os subsistemas Norte e Sudeste\Centro-Oeste já existe com a chamada linha "Norte-Sul" ou "linhão" de 500kV, as referências angulares dos dois sistemas não são independentes e alguma estratégia deve ser tomada para anular tal defasagem tendo em conta que as aberturas angulares nas barras do SIN não costuma ultrapassar  $30^\circ$  em relação à barra de referência.

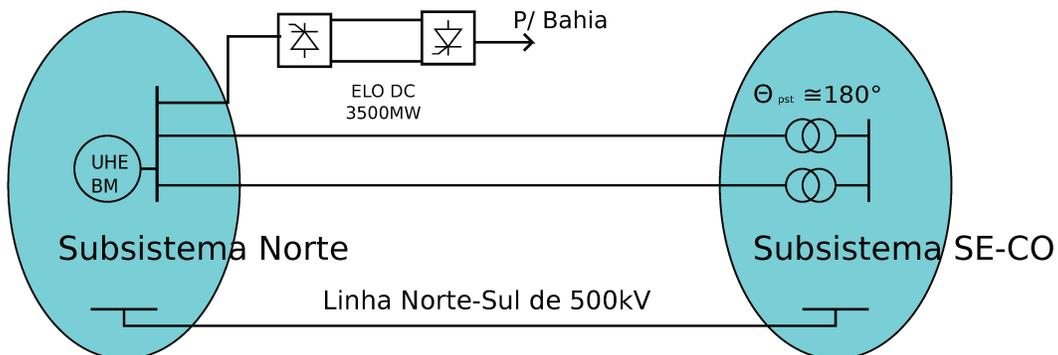


Figura 3.3: Dependência angular entre os subsistemas e inserção dos PSTs.

A solução adotada <sup>1</sup> foi a inserção de transformadores defasadores (PST), e assim como os

<sup>1</sup>Neste trabalho não serão discutidas as diferentes possibilidades de conexão das linhas ao SIN, mas tal discussão pode ser encontrada em [12].

tapes, permitiu-se uma larga variação de fase em torno dos  $180^\circ$ , mostrada esquematicamente na figura 3.3. O intuito com tal variação é não apenas fazer o ajuste da abertura angular imposta naturalmente pela linha, mas ter uma opção para o controle do carregamento da linha. Para este transformador tampouco serão feitas considerações detalhadas sobre sua construção, mas uma possível solução para obter a defasagem desejada seria a associação em série de um transformador que faça apenas a inversão da polaridade da tensão obtendo então uma defasagem de  $180^\circ$  com outro defasador convencional de  $\pm 30^\circ$ . Sabe-se que, tanto este último tipo de transformador como sua aplicação para controle do carregamento de linhas de transmissão são bastante conhecidos em sistemas de potência [17].

Por fim, outra característica importante do sistema simulado e fonte de exploração nos ensaios que seguem é a inserção de um reator shunt na barra de Assis de 500kV de conexão das linhas de meia onda. O reator inserido pela EPE tem o valor de 95MVAR para a tensão nominal, variando com a tensão aplicada sobre ele.

### 3.4 Cenários Analisados

Neste trabalho foram analisados seis cenários diferentes. Em geral, com exceção do último, todos são de carga pesada. Com o intuito de simular o tronco de meia onda conforme o que foi dito anteriormente, levando em conta o fato de ser um link Norte-Sul, a potência varia tanto em quantidade quanto em sentido de fluxo entre os subsistemas. Por fim, trata-se também a alta variação da geração de Belo Monte durante os diversos períodos do ano, sabendo-se que trata-se de uma usina à fio d'água e que em alguns períodos do ano a geração desta está prevista para menos de 1GW apesar dos 11GW a serem instalados.

Tabela 3.2: Descrição dos cenários analisados.

CENÁRIOS FORNECIDOS PELA EPE						
	Carregamento	Ger. BM	EloCA	Sentido	EloCC	Amazônia
<b>CEN1</b>	Pesado	11 GW	6808 MW	N→S	3500 MW	664 MW
<b>CEN2</b>	Pesado	11 GW	7303 MW	N→S	3500 MW	172 MW
<b>CEN3</b>	Pesado	500 MW	2173 MW	S→N	-397 MW	2545 MW
<b>CEN4</b>	Pesado	2 GW	881 MW	N→S	-348 MW	1465 MW
<b>CEN5</b>	Pesado	0 GW	4440 MW	S→N	3200 MW	663 MW
<b>CEN6</b>	Leve	11 GW	7150 MW	N→S	3300 MW	523 MW

Tendo em vista a figura 3.2, a tabela 3.2 ilustra os caminhos da energia gerada na usina de Belo Monte nos diferentes cenários de carregamento do SIN e quanto de energia parte do Sudeste através do elo CA nos cenários em que o subsistema Norte é importador.

Vale ressaltar que os valores da tabela 3.2 foram obtidos através de um fluxo de carga sem nenhum tipo de ajuste para otimização da linha ou controle de seu carregamento utilizando os dados fornecidos pela EPE, sendo o elo CA composto de três linhas de meia onda de 800 kV. Como é visto nos capítulos seguintes, foram feitas modificações que alteraram significativamente alguns destes valores, sendo estes valores ponto de partida e também referência para comparações dos ajustes realizados nos estudos apresentados em seguida.

## Ensaio com linhas de 800 kV

Neste capítulo apresenta-se a metodologia para ensaio e os resultados referentes a duas das configurações de tronco em meia onda estudados, daquelas com linhas de 800kV. Majoritariamente, aborda-se aqui um dos aspectos da transmissão em meia onda quando inserida em um sistema interligado, malhado e com grande variação do intercâmbio de potência entre os subsistemas conectados via elo CA aqui ensaiado: o controle da eficiência da linha.

Também neste capítulo, como consequência dos resultados obtidos nos ensaios de controle de eficiência, faz-se um estudo inicial do uso da defasagem dos transformadores de conexão no terminal de Assis para controle do carregamento das linhas. Este estudo servirá de apoio aos testes realizados no tronco com linhas de 1000kV, descritos no próximo capítulo e no qual este mesmo aspecto da transmissão em meia onda é melhor explorado.

Por fim, é apresentada a análise dos fatores que influenciam o fluxo de reativos pela linha, entendendo que tal transporte mostra-se indesejado sabendo que diminui sutilmente a eficiência das linhas.

### 4.1 Controle da Eficiência Através da Variação da Tensão Operacional

O estudo baseou-se na redução das perdas para valores próximo do ótimo teórico dado pela figura 2.5. Como visto anteriormente, as perdas são mínimas quando:

$$P_{cop} = P_t \tag{4.1}$$

dado que:

$$P_{cop} = \frac{V_{op}^2}{Z_{SIL}} \tag{4.2}$$

sendo  $P_{cop}$  a potência característica operacional, a qual depende da tensão operacional no terminal de recepção e da impedância característica da linha.

Dado o exposto acima, adotou-se um método de se manipular a tensão operacional da linha de maneira que a equação (4.1) fosse satisfeita para cada cenário estudado exposto no capítulo 3, cujas características estão descritas na tabela 3.2. Basicamente, o método consiste

em simular transformadores conectando os terminais em 500kV do SIN com os terminais da linha na tensão operacional desejada, assumindo que tais transformadores possuem capacidade de grande variação dos tapes. Isto é, assumindo que o SIN é muito mais robusto que a linha, a tensão seria fixa nos terminais do SIN nas quais a linha se conecta e o valor escolhido para o tap em cada terminal impõe uma tensão nos respectivos terminais da linha. Vale ressaltar que, como foram utilizados cenários que são perspectivas futuras, há relaxamento nas violações de tensão e, em alguns casos as barras nas quais se conectam os transformadores já estão em valores pouco diferente dos nominais como mostra a tabela a seguir:

Tabela 4.1: Tensões em p.u. nos terminais de conexão da linha nos cenários fornecidos pela EPE.

	MAGNITUDE DA TENSÃO (P.U.)					
	CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	CEN5	CEN6
<b>ASSIS - SP</b>	0,9969	1,0657	1,0986	1,0800	1,0737	0,9984
<b>ALTAMIRA - PA</b>	1,0229	1,0837	1,0726	1,0891	1,0623	1,0487

Tendo-se em conta a tensão base  $V_b = 500kV$  para as barras de 500 kV, de  $V_b = 800kV$  ou  $V_b = 1000kV$  para as linhas em meia onda (dependendo do tronco estudado) e um transformador com relação de transformação  $a : 1$  considerando o lado de 500kV como o primário, os valores de tensão operacional da linha e os respectivos tapes para cada tronco de transmissão com igual distribuição de potência pelas linhas são mostrados na tabela 4.2

Tabela 4.2: Valores dos tapes ideais para cada tronco de transmissão.

	3 x 800 kV		2 x 800 kV		2 x 1000 kV	
	Tensão (kV) p/ $P_{cop} = P_t$	Tap (pu)	Tensão (kV) p/ $P_{cop} = P_t$	Tap (pu)	Tensão (kV) p/ $P_{cop} = P_t$	Tap (pu)
<b>CEN1</b>	547,42	1,461	670,45	1,193	648,26	1,543
<b>CEN2</b>	566,98	1,411	694,41	1,152	671,43	1,489
<b>CEN3</b>	309,29	2,587	378,80	2,112	366,26	2,730
<b>CEN4</b>	196,90	4,063	241,15	3,317	233,17	4,289
<b>CEN5</b>	442,04	1,809	541,38	1,478	523,47	1,910
<b>CEN6</b>	561,02	1,426	687,11	1,164	664,37	1,505

Nota-se que, principalmente nos casos de baixo carregamento da linha, nomeadamente os cenários 3 e 4, os valores operacionais da linha são bastante inferiores aos valores nominais. A tensão aumenta - e por consequência o valor em pu dos tapes diminuem - quanto mais próximo o carregamento da linha se encontra da SIL.

A ideia de alterar a tensão operacional não é nova e pode ser vista, em contexto e forma diferentes em [8]. Nesta referência, no entanto, adotam-se apenas dois valores de tensão operacional que variam conforme a estação do ano, deixando o fluxo de potência pela linha aproximadamente constante com valores distintos em cada estação. O trabalho não trata de uma margem ampla de mudança do carregamento das linhas de meia onda.

No sentido de explorar ampla variação da tensão operacional, após calcular um valor de tap para cada cenário, chamado aqui de "tap ideal", estabeleceram-se limites inferiores e superiores,

10% abaixo e 12% acima do tap ideal, respectivamente e o intervalo entre estes limites foi dividido em onze intervalos menores, resultando em 12 valores para os tapes. Com estes valores iniciou-se um processo iterativo: mantendo-se constante o tap do transformador em um dos terminais mudava-se o valor do tap no outro terminal varrendo os 12 valores possíveis; alterava-se o valor de tap no primeiro terminal e voltava-se a varrer no segundo. Isto foi realizado resultando em 144 casos de fluxo de potência para cada cenário simulado em cada tronco de transmissão. A figura 4.2 ilustra esquematicamente o procedimento.

Algumas ideias motivaram a realização deste procedimento. A primeira era obter uma quantidade razoável de casos convergidos para cada cenário com o intuito de fazer uma pequena análise estatística do valor das perdas próximas ao valor ideal calculado; a outra era ter-se uma ideia da excursão do nível de perdas conforme o valor da tensão operacional variasse em cada terminal e entre terminais e, por fim, explorar a necessidade de coordenação entre as tensões nos dois terminais da linha.

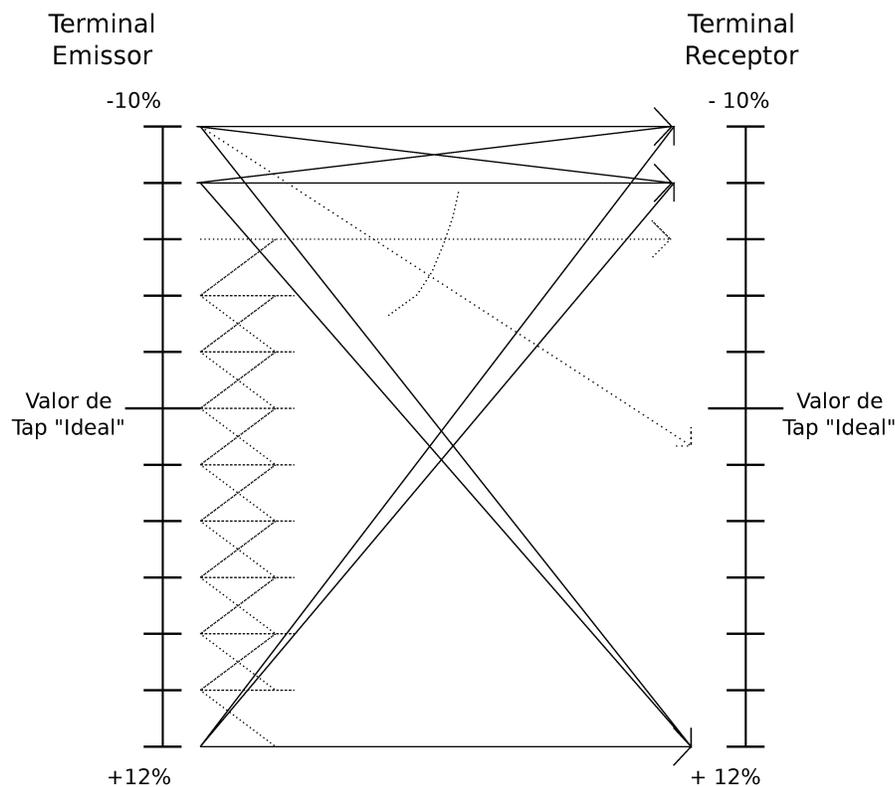


Figura 4.1: Esquemático da varredura nos valores dos tapes.

#### 4.1.1 Três Linhas de 800 kV

Esta seção apresenta os resultados dos ensaios para o conjunto cenários utilizando um tronco AC com três circuitos de 800kV em paralelo.

#### 4.1.1.1 Perdas e Perfis de Tensão e Corrente

Abaixo apresenta-se a tabela com o nível de perdas obtidas com os casos convergidos para cada cenário, apresentando o pior caso, o melhor e a média, entendendo que a última pode representar pouco caso a variância da variável estudada seja muito grande. Na mesma tabela compara-se com as perdas obtidas sem um ajuste adequado da tensão operacional, usando os tapes dos transformadores terminais entre os valores de 0.75 e 1.25 pu.

Tabela 4.3: Comparativo de Perdas para 3 Linhas de 800 kV.

		PERDAS PARA 3 LINHAS DE 800 kV					
		CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	CEN5	CEN6
<b>SEM AJUSTE</b>		13,18%	12,80%	24,10%	56,33%	14,01%	12,40%
<b>Com Ajuste de <math>V_{op}</math></b>	<b>MELHOR</b>	12,38%	12,43%	12,45%	15,52%	12,43%	12,38%
	<b>PIOR</b>	12,72%	12,84%	14,66%	19,56%	13,42%	12,61%
	<b>MÉDIA</b>	12,47%	12,63%	13,25%	16,91%	12,84%	12,45%

Abaixo apresenta-se o perfil de tensão das linhas sem ajuste da tensão operacional:

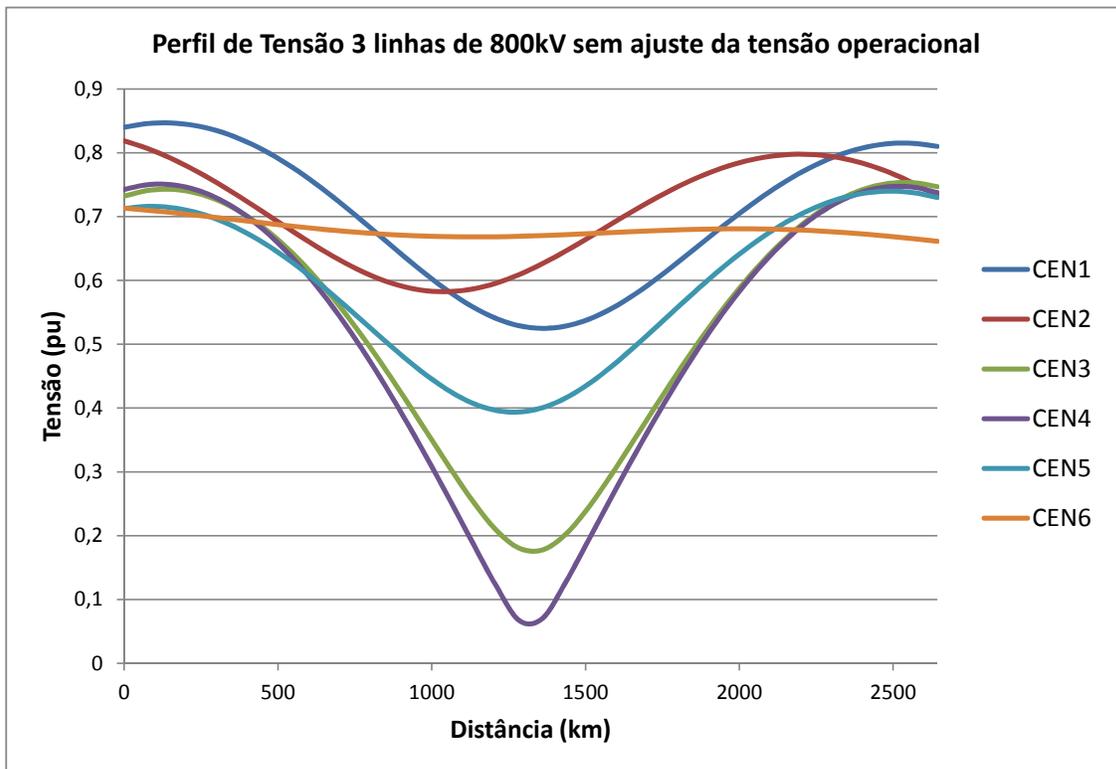


Figura 4.2: Perfil de tensão para os 6 cenários com 3 linhas de 800kV e sem ajuste de  $V_{op}$ .

Percebe-se que quanto mais carregadas as linhas (o que pode ser visto na tabela 4.2) e mais próximas da potência característica, mais plano é o perfil de tensão. Os cenários de menor carregamento das linhas são os que apresentam os maiores afundamentos de tensão no meio da linha, com destaque para os cenários 3 e 4. Como era de se esperar, nestes cenários o nível de perdas é maior na ausência de ajuste da tensão operacional, atingindo valores inaceitáveis.

A seguir apresenta-se o perfil de corrente para a mesma situação sem ajustes da tensão operacional, mostrada na figura 4.3.

O gráfico que segue aquele da corrente, o 4.4, ilustra como ficam os perfis de tensão tomando a média das tensões nas 36 barras fictícias para o total de casos convergidos entre os 144 simulados em cada cenário.

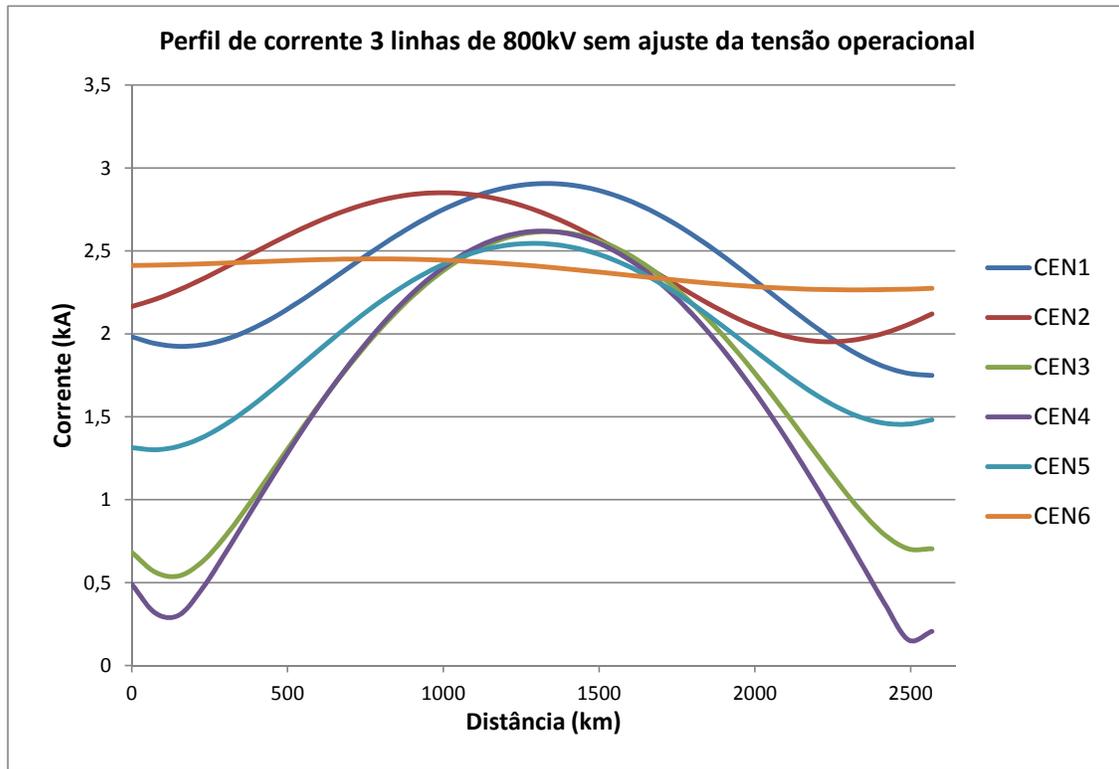


Figura 4.3: Perfil de corrente para os 6 cenários com 3 linhas de 800kV e sem ajuste de  $V_{op}$ .

O gráfico 4.5 é um comparativo da situação das tensões para os cenários 1 e 3 com e sem ajustes da tensão operacional,<sup>1</sup> com mesmos cenários representados na mesma cor, sendo a linha tracejada àquela correspondente ao cenário com ajuste de  $V_{op}$ .

Pode-se reparar sem dificuldade que com o ajuste de  $V_{op}$  o perfil da tensão fica mais plano e aproxima-se da situação teórica na qual as perdas são mínimas. Repara-se que o valor da tensão nos terminais da linha, para ambos os cenários, diminui e que quanto mais afastado o carregamento da linha encontra-se de  $P_{cop}$  mais o ajuste da tensão operacional impacta no sentido de aplinar o perfil desta e de afastar as tensões terminais da nominal.

O gráfico 4.6 segue a mesma filosofia do anterior, só que para o perfil de correntes. Neste caso pode-se observar claramente o motivo da diminuição das perdas após o ajuste de  $V_{op}$ . O aumento da corrente no centro da linha nos cenários sem ajustes faz com que esta atinja valores muito mais elevados do que nos casos com ajustes, aumentando consideravelmente as perdas por efeito Joule. A diferença entre os valores das correntes no centro da linha é tanto maior quanto maior for a diferença do carregamento da linha em relação a  $P_{cop}$ , atingindo, no pior caso (CEN4), um fator maior que 3.

<sup>1</sup>Foram escolhidos dois cenários específicos, um com alto e outro com baixo carregamento do tronco.

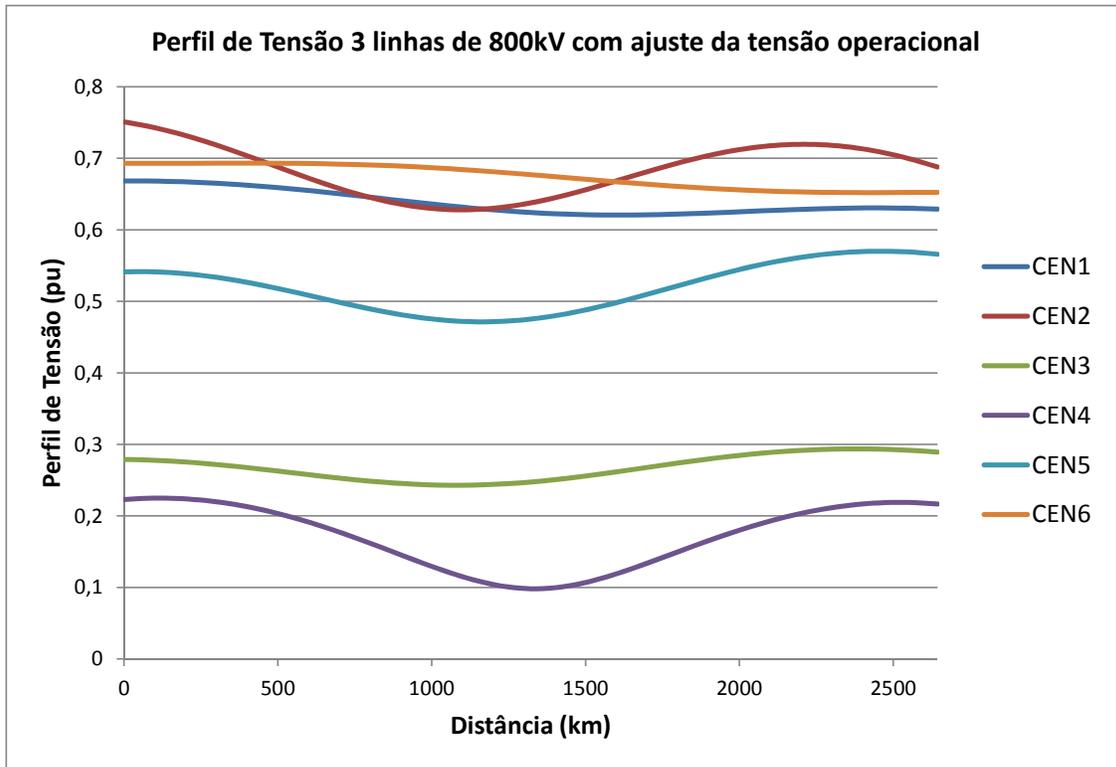


Figura 4.4: Perfil de tensão para os 6 cenários com 3 linhas de 800kV e com ajuste de  $V_{op}$ .

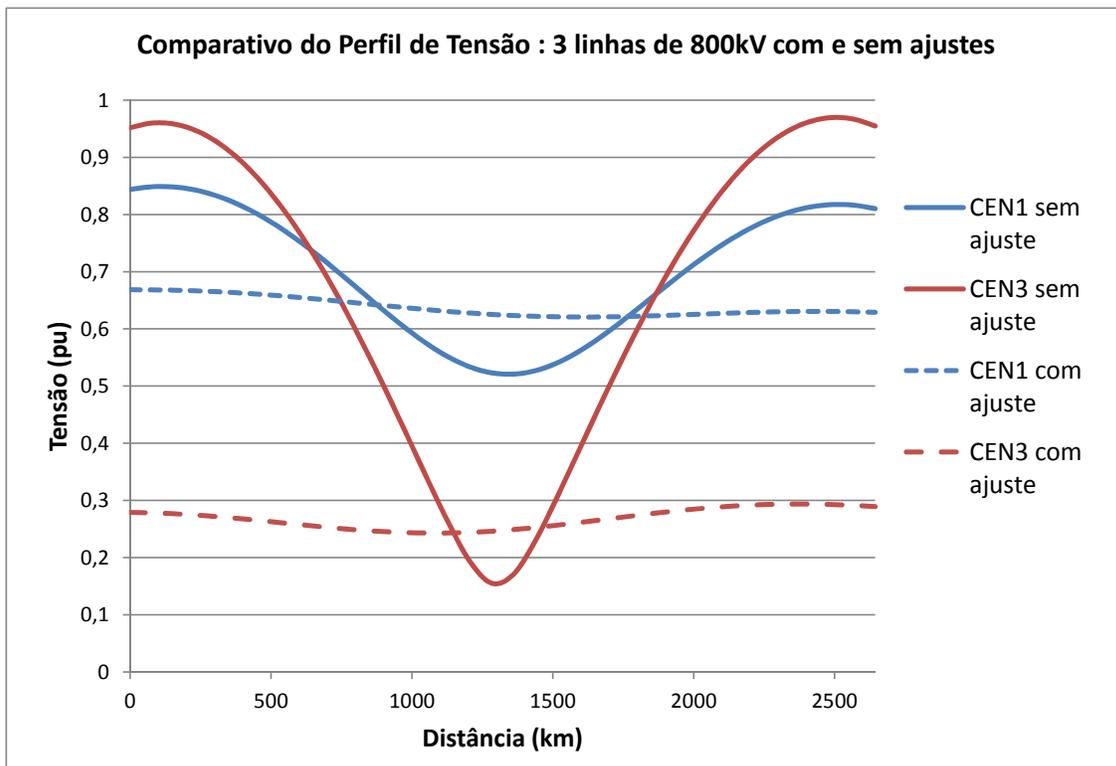


Figura 4.5: Comparativo do perfil de tensão para dois cenários com 3 linhas de 800 kV.

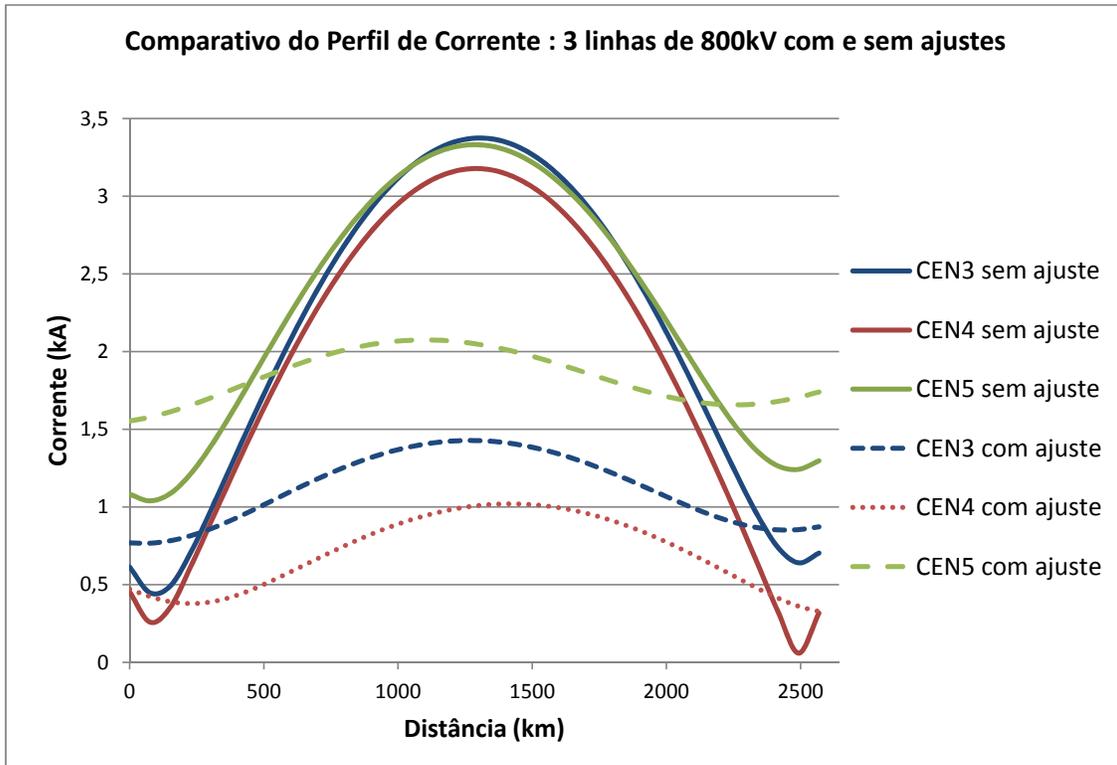


Figura 4.6: Comparativo do perfil de corrente para três cenários com 3 linhas de 800 kV.

#### 4.1.1.2 Influência do tap sobre o carregamento e convergência

Normalmente, nos livros de sistemas de energia elétrica costuma-se afirmar que o valor do tap do transformador tem pouca influência no fluxo de potência ativa entre duas barras conectadas por ele [18]. A equação (4.3) é a relação que quantifica o fluxo de potência ativa entre duas barras  $k$  e  $m$  conectadas por um transformador com relação de transformação  $a : 1$ :

$$P_{km} = \left( \frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 g_{km} - \left( \frac{V_k}{a_{km}} \right) V_m g_{km} \cos(\theta_{km} + \phi_{km}) - \left( \frac{V_k}{a_{km}} \right) V_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \phi_{km}) \quad (4.3)$$

sendo:  $V_k$  e  $V_m$  as tensões no terminal emissor e receptor, respectivamente;  $g_{km}$  e  $b_{km}$  a condutância e susceptância série, respectivamente, entre as barras  $k$  e  $m$ ;  $\theta_{km}$  a abertura angular entre as barras  $k$  e  $m$ ;  $\phi_{km}$  a defasagem entre os terminais do transformador defasador e  $a_{km}$  o tap do transformador.

No caso de transformadores convencionais o valor do tap varia pouco, em geral não passa de 10% do valor nominal para cima ou para baixo, fazendo com que  $0.9pu \leq a_{km} \leq 1.1pu$  e que a relação  $V_k/a_{km} \approx V_k$ , não sendo o fator  $a_{km}$  de grande impacto para  $P_{km}$ . No entanto, o caso aqui proposto é diferente, pois não se está preocupado em garantir tensões na linha em meia onda próximas à nominal, mas sim reduzir perdas e os transformadores aqui propostos constituem uma solução não convencional com valores pouco convencionais de tap.

Nos ensaios percebeu-se que, principalmente nos cenários de baixo carregamento da linha, onde os valores dos “tapes ideais” são maiores, o fluxo de potência ativa cai consideravelmente,

chegando a menos da metade do valor inicial. Desta maneira o artifício usado para fazer com que a equação (4.1) fosse obedecida passa a não mais valer dado que  $P_t$  assumiu outro valor, consideravelmente diferente do usado para cálculo do “tap ideal”. Agrava-se o fato do problema ser cíclico, um novo aumento do tap diminuiria outra vez a potência ativa transmitida. No entanto, se a equação (4.3) for aproximada considerando  $b_{km} \gg g_{km}$ <sup>2</sup> então pode-se escrevê-la como:

$$b_{km} = -\frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \approx -\frac{1}{x_{km}} \rightarrow P_{km} = \frac{V_k V_m \text{sen}(\theta_{km} + \phi_{km})}{a_{km} \cdot x_{km}} \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial a_{km}} = -\frac{V_k V_m \text{sen}(\theta_{km} + \phi_{km})}{a_{km}^2 \cdot x_{km}} \quad (4.5)$$

Chega-se à conclusão que o carregamento da linha é proporcional ao inverso do tap do transformador e a derivada de  $P_{km}$  é proporcional do inverso ao quadrado do tap. Ou seja, apesar da diminuição do carregamento com o aumento do tap, quanto mais se aumenta o mesmo, menos a potência passa a variar. Para os cenários de menor carregamento, em especial o 3 e 4, a solução adotada sem alterar a fase do transformador foi convergir um fluxo de carga com o “tap ideal” calculado inicialmente. Com o valor do carregamento das linhas obtido após a mudança do tap recalculou-se novamente o tap que faz a equação (4.1) ser obedecida.

Outro problema encontrado com a grande alteração do carregamento das linhas, é que o sistema foi consideravelmente perturbado, causando baixo percentual de convergência nos cenários já citados. Esta situação impulsionou a exploração do uso da defasagem dos transformadores de conexão como reguladores do carregamento das linhas, mais à frente trabalhado.

Abaixo apresenta-se a tabela que indica o percentual de convergência dos 144 casos para cada cenário e o carregamento médio das linhas após a convergência do fluxo de carga.

Tabela 4.4: Carregamento do tronco CA para cenários com 3 linhas de 800kV e percentual de convergência.

		CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	CEN5	CEN6
<b>Fluxo de P(MW) no terminal emissor</b>	Sem Aj. de $V_{op}$	6807,9	7303,3	2046,9	880,8	4405,0	7150,5
	Com Aj. de $V_{op}$	6300,2	7254,6	1354,2	401,5	4086,9	7216,5
<b>Variação Percentual</b>		-7,46%	-0,67%	-33,84%	-54,42%	-7,22%	0,91%
<b>Variação Absoluta (MW)</b>		- 507,7	-48,7	-692,7	-479,3	-318,1	66
<b>Percentual de Convergência</b>		56,79%	53,09%	19,30%	98,25%	66,67%	100%

Nota-se novamente que os cenários 3 e 4, de baixo carregamento das linhas, são os que possuem maior variação percentual do fluxo de potência pelos motivos já apresentados aqui e também pela considerável diminuição das perdas, dado que a tabela indica a potência no terminal emissor. Os outros apresentam pouca variação em relação ao valor de carregamento das linhas sem o ajuste da tensão operacional, não ultrapassando os 8%.

Quanto à convergência, o cenário 6 tem alta convergência pois trata-se de um caso de carga leve do SIN. Os cenários 1,2 e 5 tem percentual de convergência parecidos e estes números se

<sup>2</sup>Aproximação válida para linhas de EHV e UHV, como no caso em questão.

relacionam com o aumento da diferença relativa do valor das tensões terminais implicar em problemas de convergência. Como foi feita uma varredura, em geral, casos rodados com tap no limite inferior em um terminal e valores mais próximos do limite superior no outro implicavam em não convergência ou mesmo divergência.

Não se conseguiu encontrar nenhuma correlação entre quanto de diferença entre os valores de tensões terminais implicavam em não convergência. No entanto, acompanhou-se que quanto mais distantes estavam os valores dos tap, maior era a probabilidade de não convergência e esta situação repete-se na maioria dos cenários, com exceção do 6, indicando que necessita-se de uma certa coordenação entre os transformadores de conexão das linhas para evitar o distanciamento acentuado das tensões terminais.

No cenário 3 obteve-se baixa convergência. Atribui-se inicialmente por ser um caso mais sensível, tratando-se de um cenário em que o subsistema Norte importa energia do Sul e sabendo-se que na perspectiva estudada existem dois caminhos por quais esta importação pode ocorrer: pelo tronco estudado e pela linha “Norte-Sul”<sup>3</sup>. Além disso, o sistema foi altamente perturbado pela grande variação do carregamento das linhas, podendo este resultado não ser consequência de problemas elétricos, mas numéricos.

Por fim, o cenário 4, de intercâmbio zero, mostra que a alteração no carregamento da linha tem pouco impacto na convergência do fluxo de carga e, muito provavelmente na operação deste dado que cada subsistema depende essencialmente da energia gerada internamente a este.

#### 4.1.1.3 Impacto nas Tensões das Barras de Conexão

Ao se estabelecer a metodologia para o estudo tratado neste capítulo assumiu-se a hipótese do resto do SIN ser muito mais robusto que as linhas de meia onda em paralelo. Com tal assunção poderia-se entender que o valor do tap dos transformadores de conexão iriam afetar essencialmente o valor de tensão operacional das linhas, mantendo a tensão nas barras de conexão destas sem alterações significativas.

No intuito de verificar se tal premissa se concretiza, apresenta-se a tabela 4.5, na qual são discriminados os valores de tensões nas barras em Assis e em Altamira em cada cenário, novamente com o valor médio, mínimo e máximo e a comparação deste valores com os valores de tensões terminais sem o ajuste de tap, mostrados na tabela 4.1.

Uma primeira análise a ser feita é se de fato a presunção de que a tensão da rede de 500kV, na qual são conectadas os dois terminais das linhas, se mantém em valores próximos de 1pu se verifica. O maior desvio, de 11,2%, ocorre no cenário 2 no terminal de envio, um cenário de alto carregamento das linhas e do SIN, numa perspectiva futura do SIN para mais de 9 anos<sup>4</sup> e que, na situação sem ajuste da tensão operacional, já inicia alta (1,0657pu). Ao analisarmos as médias, percebe-se que os desvios se dão, em geral para valores acima de 1pu, sendo maiores nos terminais de envio e o maior desvio também ocorre no cenário 2 em Altamira, com desvio de 9,7% em relação à tensão nominal. Boa parte das tensões terminais nas suas médias está situada entre valores que vão de em torno de 5% acima de 1pu até pouco mais de 2% abaixo de

---

<sup>3</sup>Há também a ligação HVDC com o Nordeste, mas como verifica-se na tabela 3.2 apenas 400MW são importados de lá, sendo bem mais significativo o valor pelo tronco de meia onda.

<sup>4</sup>Contando da data na qual os cenários foram concebidos e não de defesa da confecção da dissertação.

1pu, valores de tensão costumeiramente aceitos para cenários futuros.

Uma segunda análise refere-se à comparação com os cenários sem o ajuste da tensão operacional, mostrada na segunda metade da tabela ( $\Delta V(\%)$ ). Percebe-se que nas médias as variações raramente ultrapassam 3% em módulo, indicando que a técnica de ajustar a tensão operacional para redução de perdas não é em si uma geradora de desvios significativos na tensão das barras de conexão das linhas.

Tabela 4.5: Tensões nas barras de conexão em pu na configuração com 3 linhas de 800kV.

					$\Delta V(\%)$		
		MIN	MAX	MÉDIA	MIN	MAX	MÉDIA
<b>CEN1</b>	Altamira	0,984	1,032	0,998	-3,80%	0,89%	-2,43%
	Assis	0,952	1,035	0,987	-4,50%	3,82%	-0,99%
<b>CEN2</b>	Altamira	1,081	1,112	1,097	-0,25%	2,61%	1,19%
	Assis	0,966	1,069	1,020	-9,35%	0,29%	-4,32%
<b>CEN3</b>	Altamira	1,037	1,051	1,041	-3,31%	-2,06%	-2,97%
	Assis	1,017	1,075	1,056	-7,39%	-2,17%	-3,91%
<b>CEN4</b>	Altamira	1,059	1,069	1,063	-2,77%	-1,89%	-2,38%
	Assis	1,080	1,080	1,080	0,00%	0,00%	0,00%
<b>CEN5</b>	Altamira	0,996	1,059	1,033	-6,28%	-0,36%	-2,80%
	Assis	0,966	1,102	1,048	-7,28%	2,65%	-2,43%
<b>CEN6</b>	Altamira	1,040	1,067	1,055	-0,82%	1,75%	0,60%
	Assis	0,920	1,069	0,996	-7,85%	7,07%	-0,23%

## 4.1.2 Duas Linhas de 800 kV

Esta subseção segue os mesmos passos da anterior e, como poderá ser percebido, boa parte dos problemas e análises feitos anteriormente valem para estes cenários. Vale notar que esta configuração limita a capacidade de transmissão de potência em dois terços da configuração anterior e, apesar de exigir menor margem de mudança dos tapes dos transformadores terminais, pode ser uma pior opção para longo prazo.

### 4.1.2.1 Perdas e Perfis de Tensão e Corrente

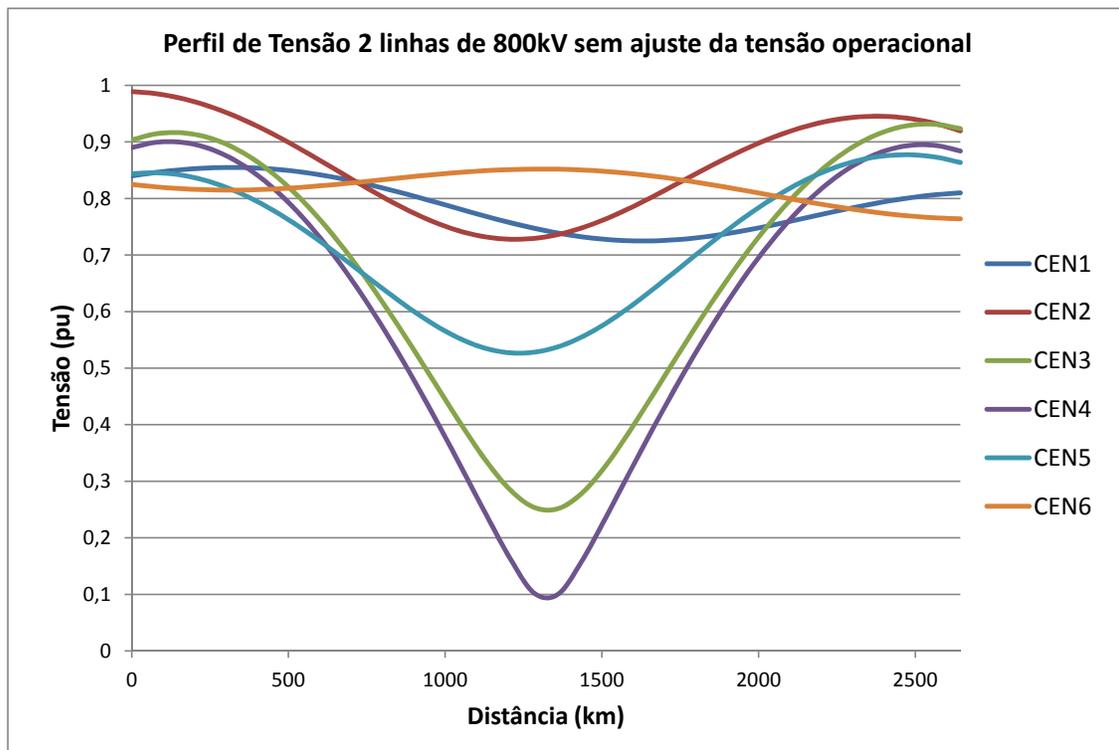
A tabela 4.6 compara as perdas para os cenários estudados com um elo CA composto por duas linhas de 800kV nas situações com ajustes na tensão operacional e sem eles.

Pode-se conferir que, novamente, no quesito perdas, os cenários 3 e 4 configuram-se como os mais críticos ao não se fazer nenhum ajuste da tensão operacional. As perdas nestes cenários sem ajustes têm uma leve redução em relação à configuração com 3 linhas de 800kV, pois a potência transmitida por cada uma aproxima-se pouco mais da potência característica do que na primeira configuração. As perdas são reduzidas drasticamente neste dois cenários. Nos outros cenários poucas modificações podem ser percebidas, dado que, com exceção do 5, todos os outros tem seus valores de "tap ideal" dentro da faixa que vai de 0,75 e 1,25 usada na configuração sem ajuste.

Tabela 4.6: Comparativo de Perdas para 2 Linhas de 800 kV.

		PERDAS PARA 2 LINHAS DE 800 kV					
		CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	CEN5	CEN6
<b>SEM AJUSTE</b>		12,44%	12,60%	21,69%	46,27%	13,34%	12,53%
<b>Com Ajuste de <math>V_{op}</math></b>	<b>MELHOR</b>	12,38%	12,40%	12,43%	14,78%	12,44%	12,38%
	<b>PIOR</b>	12,67%	12,99%	13,95%	19,07%	13,00%	12,62%
	<b>MÉDIA</b>	12,48%	12,67%	12,94%	16,21%	12,63%	12,45%

Apresenta-se aqui os perfis de tensão e corrente para a situação sem ajustes da tensão operacional nas figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.

Figura 4.7: Perfil de tensão para os 6 cenários com 2 linhas de 800kV e sem ajuste de  $V_{op}$ .

A figura 4.9 ilustra como ficaram os perfis de tensão para cada cenários com ajuste da tensão operacional, sendo a tensão em cada uma das 36 barras dada pela média do total de casos convergidos dentre os 144 rodados por cenário. Percebe-se que, mesmo os cenários com alto carregamento tiveram seus perfis de tensão aplainados. Outra vez, a tensão operacional para os cenários de mais baixo carregamento atingem valores bem inferiores aos nominais, com as tensões terminais atingindo entre 20% e 30% dos 800kV nominais.

#### 4.1.2.2 Influência do tap sobre o carregamento e convergência

Assim como para os cenários com 3 linhas de 800kV em paralelo, faz-se aqui a mesma análise da mudança do fluxo de potência ativa pela linha e da convergência dos cenários simulados. A

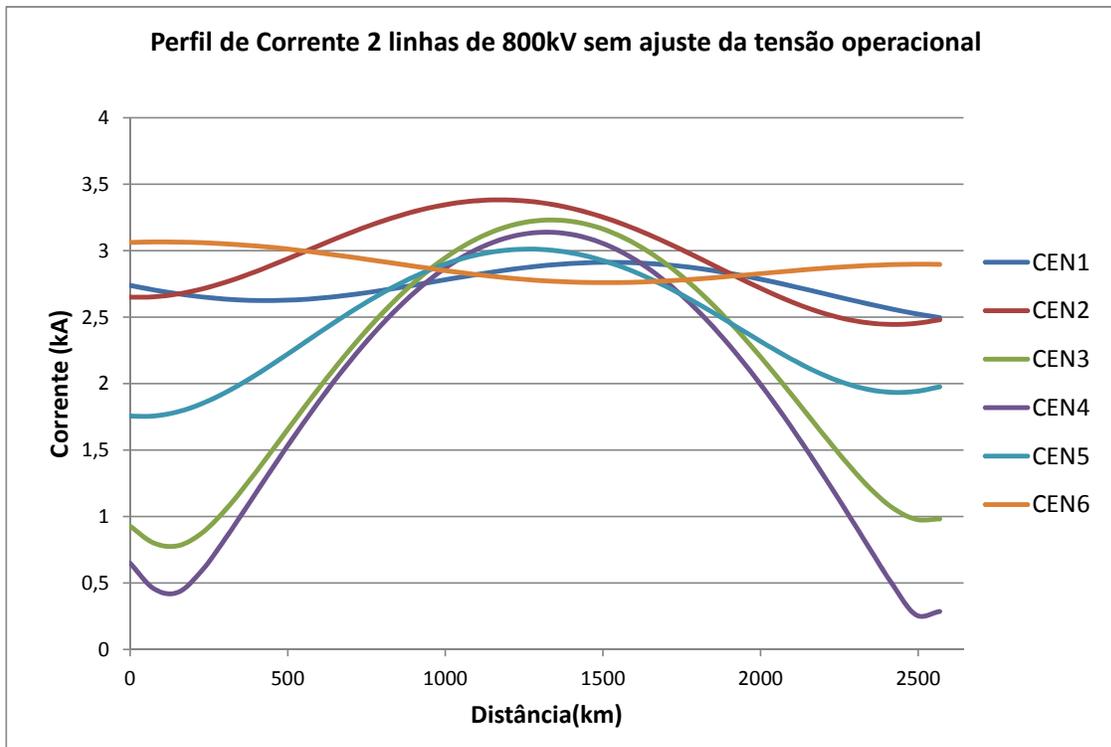


Figura 4.8: Perfil de corrente para os 6 cenários com 2 linhas de 800kV e sem ajuste de  $V_{op}$ .

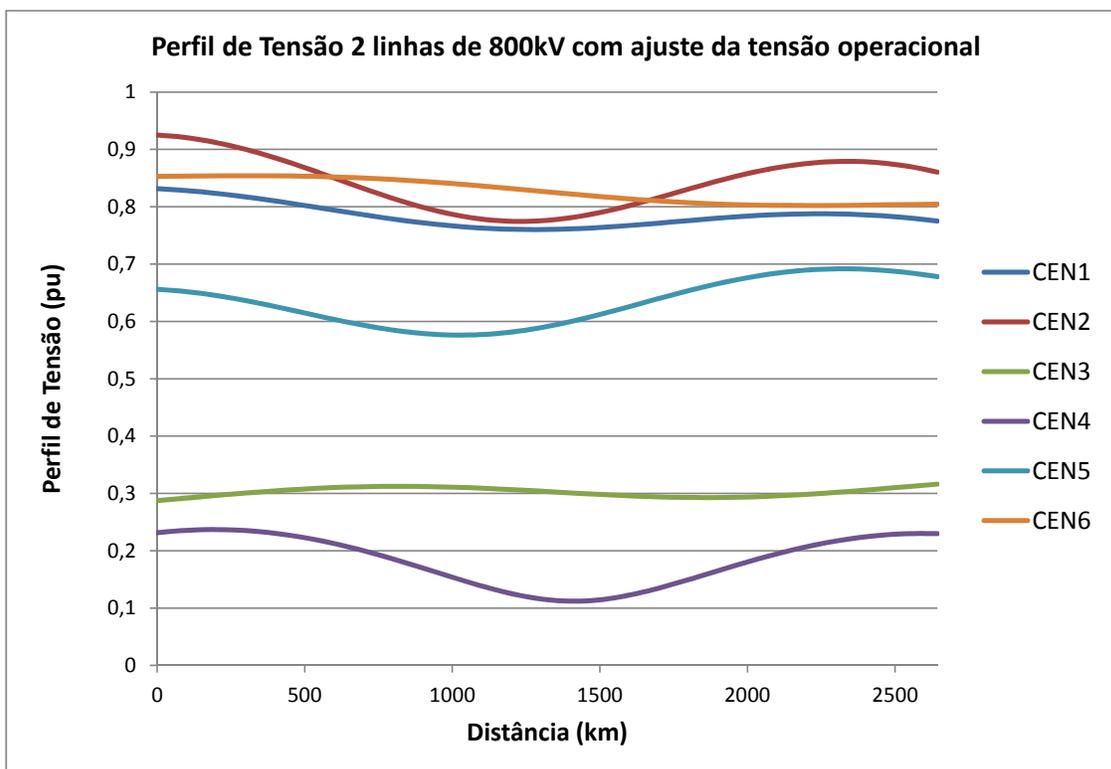


Figura 4.9: Perfil de tensão para os 6 cenários com 2 linhas de 800kV e ajuste de  $V_{op}$ .

situação em geral se repete: cenários nos quais o carregamento das linhas de meia onda são próximos da potência característica da linha tiveram pouca alteração da potência saindo do terminal emissor dado que os tapes dos transformadores são mantidos em valores próximos de 1pu e as perdas são muito próximas nas situações com e sem ajustes de  $V_{op}$ ; nos cenários em que tal situação não se verifica a potência ativa no terminal emissor reduz drasticamente devido tanto à influência do tap na equação (4.3) como à redução das perdas.

A convergência nos cenários 4 e 6 foi alta, acredita-se que pelo motivos já apresentados (o primeiro de intercâmbio zero, fazendo com que a grande variação percentual do carregamento implicasse em pouca perturbação em relação à situação inicial e o segundo por ser um cenário do SIN de carga leve). Os cenários restantes apresentaram a mesma característica de divergir quando a diferença entre as tensões terminais se acentuava.

Por fim, para esta configuração também foi um cenário no qual o Norte importa energia do Sudeste o com menor percentual de convergência, mostrando serem cenários mais críticos.

Tabela 4.7: Carregamento do tronco AC para cenários com 2 linhas de 800kV e percentual de convergência.

		CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	CEN5	CEN6
<b>Fluxo de P(MW) no terminal emissor</b>	Sem Aj. de $V_{op}$	6325,1	7262,3	2503,2	1032,1	4730,4	6999,4
	Com Aj. de $V_{op}$	6416,4	7264,1	1194,0	365,6	4047,9	7182,6
<b>Varição Percentual</b>		1,45%	0,02%	-52,30%	-64,58%	-14,43%	2,62%
<b>Varição Absoluta (MW)</b>		91,52	1,83	-1309,25	-666,54	-682,48	183,21
<b>Percentual de Convergência</b>		40,28%	39,58%	40,28%	85,96%	21,53%	100%

#### 4.1.2.3 Impacto nas Tensões das Barras de Conexão

A análise feita para três linhas de 800kV pode ser praticamente transposta para esta configuração:

- o maior desvio se dá no cenário 2, com uma tensão 11,6% maior que a nominal; a reincidência desta situação indica uma particularidade deste cenário já descrita anteriormente;
- os desvios nas médias se dá, em geral acima de 1 pu, a maioria dos valores entre 5% acima de 1pu e 2% abaixo deste valor, valores aceitos para fluxo de potência em previsões futuras;
- com exceção do CEN1 na barra de Assis, os desvios de tensão da média, na configuração com ajuste da tensão operacional, em relação à configuração sem este ajuste, são menores que 3% indicando que este procedimento tem pouco impacto na tensão das barras terminais;
- o CEN6 é o que possui a maior excursão do  $\Delta V(\%)$  entre o desvio mínimo e máximo. Ou seja, neste cenário o procedimento de ajuste da tensão operacional é o que tem maior impacto, provavelmente porque este cenário, leve e com uma convergência de 100% dos casos permite uma maior variação das tensões terminais garantindo a convergência;

Tabela 4.8: Tensões nas barras de conexão em pu na configuração com 2 linhas de 800kV.

						$\Delta V$ (%)		
		MIN	MAX	MÉDIA	SEM AJUSTE	MIN	MAX	MÉDIA
CEN1	Altamira	0,996	1,016	0,995	1,012	-1,62%	0,42%	-1,65%
	Assis	0,919	1,035	0,982	0,903	1,73%	14,58%	8,77%
CEN2	Altamira	1,091	1,116	1,093	1,103	-1,08%	1,19%	-0,89%
	Assis	0,947	1,081	1,026	1,008	-6,01%	7,21%	1,75%
CEN3	Altamira	1,028	1,046	1,038	1,069	-3,84%	-2,14%	-2,90%
	Assis	1,013	1,076	1,050	1,096	-7,59%	-1,82%	-4,18%
CEN4	Altamira	1,057	1,062	1,068	1,087	-2,73%	-2,32%	-1,78%
	Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	0,00%	0,00%	0,00%
CEN5	Altamira	1,010	1,047	1,032	1,054	-4,18%	-0,68%	-2,09%
	Assis	1,006	1,073	1,042	1,059	-5,00%	1,29%	-1,60%
CEN6	Altamira	1,041	1,065	1,053	1,046	-0,53%	1,85%	0,72%
	Assis	0,918	1,064	0,992	0,971	-5,48%	9,58%	2,12%

## 4.2 Controle de Carregamento e Eficiência Através da Defasagem Angular

A motivação desta seção foram os resultados obtidos nos cenários de baixo carregamento no que diz respeito ao fluxo de potência. Na subseção 4.1.1.2 foi descrito o que ocorria com o carregamento da linha ao se fazer o ajuste da tensão operacional, no intuito de fazer com que o primeiro não ficasse completamente dependente do segundo, resolve-se explorar o efeito da defasagem do transformador de conexão no terminal de Assis para o carregamento.

Será visto que os efeitos são basicamente os esperados na teoria de sistemas elétricos: a potência entre duas barras inseridas num sistema malhado possui grande influência da abertura angular entre elas.

O estudo consistiu basicamente em repetir a metodologia utilizada anteriormente para os cenários de menor carregamento (cenários 3,4 e 5), mas alterando-se a defasagem imposta pelo transformador defasador. As novas defasagem foram escolhida de forma mais ou menos aleatória dado que inicialmente não se conhecia os efeitos de tal alteração. Para o cenário 4, como apresentou maior variação percentual do carregamento das linhas após o ajuste da tensão operacional, como mostrado nas tabelas 4.4 e 4.7 foi escolhida uma diminuição de  $-15^\circ$  na defasagem para ambas as configurações do elo CA; para os cenários 3 e 5 optou-se por um aumento de  $10^\circ$  na defasagem. Estas alterações levam em conta que nos cenários em que o Norte é exportador de energia (cenários 3 e 5) o aumento do valor da defasem implica em aumento do carregamento da linha e vice-versa. Além disso, como a ideia era aumentar o carregamento para fazer com que a equação (4.1) fosse melhor atendida do que no caso sem alteração da fase, deixou-se o tap dos transformadores nos valores anteriormente calculados como “ideais” e que constam na tabela 4.2. A tabela 4.9 indica o valor original da defasagem imposta pelo PST em cada cenário e os valores após a modificação destas.

A tabela 4.10 mostra os resultados do carregamento das linhas após as modificações das

Tabela 4.9: Valor das defasagens impostas pelo PST no terminal de Assis.

	<b>CEN3</b>	<b>CEN4</b>	<b>CEN3</b>
<b>FASE INICIAL</b>	210°	180°	180°
<b>FASE MODIFICADA</b>	220°	165°	190°

fases e o percentual de convergência dos 144 casos para cada situação. Fica claro que houve um aumento do carregamento das linhas, mais acentuado quanto menor o carregamento inicial das linhas. O percentual de convergência também aumentou consideravelmente em cada um dos cenários com o ajuste da fase. Isso provavelmente deve-se menos a uma possível estabilidade em regime do que ao fato do sistema numérico ter sido menos perturbado em relação à situação inicial.

A tabela seguinte, 4.11, indica o que ocorre com as perdas após o ajuste de fase. Para o cenário 4, de menor carregamento, a melhora é visível, atingindo mais de 3% em cada uma das configurações de tronco. Nos outros, a melhora é sutil, chegando até a piorar, também de forma sutil. O que entende-se é que o ajuste no cenário 4 faz com que a equação (4.1) seja melhor atendida com o ajuste de fase, necessitando de um ajuste mais fino nos outros.

Tabela 4.10: Carregamento e convergência após mudança de fase.

		<b>P (MW) NO TE</b>		<b>PERCENTUAL DE CONVERGÊNCIA</b>	
		<b>3 x 800kV</b>	<b>2 x 800kV</b>	<b>3 x 800kV</b>	<b>2 x 800kV</b>
<b>CEN3</b>	$\phi_{inicial}$	1354,2	1194,0	19,30%	40,28%
	$\phi_{modif}$	1515,8	1247,2	73,39%	56,14%
<b>CEN4</b>	$\phi_{inicial}$	401,5	365,6	98,25%	85,96%
	$\phi_{modif}$	632,2	579,4	100%	99,71%
<b>CEN5</b>	$\phi_{inicial}$	4086,9	4047,9	66,67%	21,53%
	$\phi_{modif}$	4310,2	4264,2	89,58%	55,56%

Tabela 4.11: Comparativo de perdas antes e após mudança na defasagem dos PSTs.

		<b>3 x 800kV</b>			<b>2 x 800kV</b>		
		<b>CEN3</b>	<b>CEN4</b>	<b>CEN5</b>	<b>CEN3</b>	<b>CEN4</b>	<b>CEN5</b>
$\phi_{Inicial}$	<b>MELHOR</b>	12,45%	12,52%	12,43%	12,43%	14,78%	12,44%
	<b>PIOR</b>	14,66%	19,56%	13,42%	13,95%	19,07%	13,00%
	<b>MÉDIA</b>	13,25%	16,91%	12,48%	12,94%	16,21%	12,63%
$\phi_{Modif}$	<b>MELHOR</b>	12,38%	12,70%	12,39%	12,38%	12,64%	12,39%
	<b>PIOR</b>	13,55%	14,87%	13,71%	13,53%	14,80%	13,41%
	<b>MÉDIA</b>	12,72%	13,32%	12,82%	12,67%	13,20%	12,75%

## 4.3 Estudo do Transporte de Reativos

Em 2.2.3 expõe-se brevemente parâmetros que servem para determinar como se dá o fluxo de reativos através da linha de meia onda, assim como na subseção 2.2.4 cita-se que as perdas tem certa dependência, mesmo que pouco acentuada, do fator de potência da linha.

No intuito de aprimorar o entendimento dos fatores dos quais o transporte de reativos é dependente e nos quais ele impacta, usaram-se os dados obtidos com os milhares de casos de fluxo de carga convergidos para tentar traçar correlações entre certas grandezas. Adicionalmente, é traçado um perfil de fluxo de reativos pela linha, a variação deste perfil gradualmente com a variação dos tapes terminais e como se relacionam com a variação de perdas.

### 4.3.1 Correlações entre as principais variáveis

As variáveis escolhidas para se observar relações e impactos foram:

- fluxo de potência reativa no terminal emissor;
- fluxo de potência reativa no terminal receptor;
- fluxo de potência ativa no terminal emissor;
- perdas ativas na linha (referidas nas tabelas apenas como “Perdas”);
- perdas reativas na linha (referidas nas tabelas como “Perdas Q”);
- razão entre as tensões terminais;
- diferença entre as tensões terminais;
- diferença entre a razão  $V_e/V_r$  e  $\zeta$  conforme exposto em 2.2.3;

Foram obtidas as seguintes correlações lineares, mostradas nas tabela 4.12 a 4.15:

Tabela 4.12: Estudo do Transporte de Reativos para 3 linhas de 800kV.

	Correlação entre:	<b>CEN1</b>	<b>CEN2</b>	<b>CEN3</b>	<b>CEN4</b>	<b>CEN5</b>	<b>CEN6</b>
1	$Q_e$ e Perdas	-0,50332	0,17099	-0,71415	-0,82530	0,35084	-0,20599
2	$Q_e$ e $P_e$	-0,14468	-0,16005	-0,66041	0,76352	-0,22086	0,01089
3	$(V_e/V_r -  \zeta )$ e Perdas Q	-0,24299	0,22038	0,14124	-0,09911	-0,30747	-0,47153
4	$(V_e - V_r)$ e Perdas	-0,23952	0,37485	0,00845	-0,78045	-0,63784	-0,14907
5	$(V_e/V_r)$ e Perdas	-0,37346	0,24458	-0,18488	-0,77209	-0,67296	-0,17227
6	$(V_e - V_r)$ e $P_e$	0,16785	0,01786	0,08928	0,84925	-0,09695	0,34745
7	$(V_e/V_r)$ e $P_e$	0,00559	-0,12273	-0,12054	0,85722	-0,14659	0,17955
8	$(V_e/V_r -  \zeta )$ e $Q_e$	<b>0,71594</b>	<b>0,92784</b>	<b>0,93762</b>	<b>0,98254</b>	<b>0,91505</b>	<b>0,69790</b>
9	$(V_e/V_r -  \zeta )$ e $-Q_r$ <sup>5</sup>	<b>0,98517</b>	<b>0,99880</b>	<b>0,55709</b>	<b>0,99851</b>	<b>0,99736</b>	<b>0,98222</b>
10	$(V_e - V_r)$ e $Q_e$	<b>0,95075</b>	<b>0,99044</b>	<b>0,92979</b>	<b>0,98993</b>	<b>0,93037</b>	<b>0,94058</b>
11	$(V_e/V_r)$ e $-Q_r$	<b>0,98671</b>	<b>0,99878</b>	<b>0,88895</b>	<b>0,98740</b>	<b>0,95046</b>	<b>0,98252</b>

Tabela 4.13: Estudo do Transporte de Reativos para 2 linhas de 800kV.

	Correlação entre:	CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	CEN5	CEN6
1	$Q_e$ e Perdas	0,38805	0,30053	0,70083	-0,82530	0,84732	-0,01296
2	$Q_e$ e $P_e$	-0,45075	-0,27982	-0,39751	0,76352	-0,60519	-0,01698
3	$(V_e/V_r -  \zeta )$ e Perdas Q	0,30105	0,44269	-0,35751	-0,09911	-0,73812	-0,49863
4	$(V_e - V_r)$ e Perdas	0,45767	0,40047	-0,76661	0,34891	-0,91979	-0,14520
5	$(V_e/V_r)$ e Perdas	0,45748	0,29781	-0,78412	0,37054	-0,92848	-0,06586
6	$(V_e - V_r)$ e $P_e$	-0,31919	-0,17828	0,27822	-0,30448	0,44554	0,33352
7	$(V_e/V_r)$ e $P_e$	-0,42700	-0,30502	0,23283	-0,28525	0,42202	0,15169
8	$(V_e/V_r -  \zeta )$ e $Q_e$	<b>0,89408</b>	<b>0,94823</b>	<b>0,97943</b>	<b>0,98734</b>	<b>0,95202</b>	<b>0,66769</b>
9	$(V_e/V_r -  \zeta )$ e $-Q_r$	<b>0,99260</b>	<b>0,99671</b>	<b>0,99816</b>	<b>0,63925</b>	<b>0,99892</b>	<b>0,97951</b>
10	$(V_e - V_r)$ e $Q_e$	<b>0,98895</b>	<b>0,99363</b>	<b>0,98285</b>	<b>0,97794</b>	<b>0,97593</b>	<b>0,93602</b>
11	$(V_e/V_r)$ e $-Q_r$	<b>0,99644</b>	<b>0,99671</b>	<b>0,99138</b>	<b>0,97715</b>	<b>0,98167</b>	<b>0,98241</b>

Tabela 4.14: Estudo do Transporte de Reativos para 3 linhas de 800kV com ajuste no defasador.

	Correlação entre:	CEN3	CEN4	CEN5
1	$Q_e$ e Perdas	0,02605	-0,83004	0,95666
2	$Q_e$ e $P_e$	-0,43328	0,08204	-0,19802
3	$(V_e/V_r -  \zeta )$ e Perdas Q	-0,41115	-0,17338	-0,56379
4	$(V_e - V_r)$ e Perdas	-0,29720	-0,79078	-0,95788
5	$(V_e/V_r)$ e Perdas	-0,37414	-0,79233	-0,95475
6	$(V_e - V_r)$ e $P_e$	0,16068	0,23946	-0,05662
7	$(V_e/V_r)$ e $P_e$	0,06840	0,22868	-0,05873
8	$(V_e/V_r -  \zeta )$ e $Q_e$	<b>0,99514</b>	<b>0,96379</b>	<b>0,98039</b>
9	$(V_e/V_r -  \zeta )$ e $-Q_r$	<b>0,92874</b>	<b>0,98950</b>	<b>0,81881</b>
10	$(V_e - V_r)$ e $Q_e$	<b>0,92375</b>	<b>0,97531</b>	<b>0,96204</b>
11	$(V_e/V_r)$ e $-Q_r$	<b>0,95762</b>	<b>0,97837</b>	<b>0,96603</b>

Deve-se ter claro, antes de se fazer a análise, o fundamento da estatística que diz que o fato do módulo da correlação linear ser próxima de 1 não significa relação causal entre as duas grandezas. Além disso, buscou-se aqui uma correlação linear, podendo estas se darem de outras formas.

As tabelas 4.12 a 4.15 deixam explícito que não se pode traçar nenhuma relação linear entre as grandezas relacionadas nos itens 1 a 7 destas. Os valores obtidos nestes itens não resultam em valores de correlação forte (próximo de 1 ou -1) e tampouco seguem algum padrão, isto é, para a mesma configuração de elo CA obtêm-se valores completamente diferentes de correlação para cada cenário (variando inclusive o sinal deste), assim como para configurações diferentes os valores divergem entre si. Algumas destas correlações foram traçadas para tentar monitorar, por exemplo, se um possível controle no fluxo de reativos pelo ajuste das relações de tensões terminais teria impacto nas perdas e carregamento da linha. Quanto ao carregamento não se pode concluir isto; já sobre as perdas sabe-se da dependência de um fator de potência próximo do unitário para melhora da eficiência, mesmo sabendo que o impacto não é linear e muito

Tabela 4.15: Estudo do Transporte de Reativos para 2 linhas de 800kV com ajuste no defasador.

	Correlação entre:	CEN3	CEN4	CEN5
1	$Q_e$ e Perdas	0,76662	-0,75720	0,96624
2	$Q_e$ e $P_e$	-0,49623	0,03541	-0,54693
3	$(V_e/V_r -  \zeta )$ e Perdas Q	-0,50400	-0,8640	-0,76438
4	$(V_e - V_r)$ e Perdas	-0,72419	-0,70121	-0,93310
5	$(V_e/V_r)$ e Perdas	-0,66639	-0,69310	-0,93034
6	$(V_e - V_r)$ e $P_e$	0,28370	0,18431	0,33374
7	$(V_e/V_r)$ e $P_e$	0,15736	0,16942	0,31333
8	$(V_e/V_r -  \zeta )$ e $Q_e$	<b>0,85707</b>	<b>0,97463</b>	<b>0,87062</b>
9	$(V_e/V_r -  \zeta )$ e $-Q_r$	<b>0,98849</b>	<b>0,99494</b>	<b>0,99096</b>
10	$(V_e - V_r)$ e $Q_e$	<b>0,97071</b>	<b>0,98790</b>	<b>0,97097</b>
11	$(V_e/V_r)$ e $-Q_r$	<b>0,92728</b>	<b>0,98860</b>	<b>0,96398</b>

menos significativo do que o ajuste da potência operacional característica próxima ao valor do carregamento como mostrado na figura 2.5.

O mesmo não se pode dizer das correlações traçadas e mostradas nos itens 8 a 11. Os valores são coerentes do ponto de vista de sinal e, em sua grande maioria estão muito próximos de 1. Isto era de se esperar tendo em vista o descrito na seção 2.2.3. No entanto, para as correlações nos itens 8 e 9, ao se observar apenas a diferença proposta, os resultados não resultavam exatamente como esperado. Ao invés do valor de referência de  $V_e/V_r - |\zeta|$  ser nula, tendo que acima disto o fluxo é do TE para o TR e abaixo no sentido contrário, os resultados apareciam com uma espécie de *offset*, a tabela 4.16 mostra uma sequência de resultados obtidos para o cenário 2 com 3 linhas de 800kV.

Tabela 4.16: Parte de sequência de dados usados para traçar correlação entre  $|\zeta| - V_e/V_r$  e  $Q_e$ .

$V_e/V_r -  \zeta $	$Q_e$ (MVA <sub>r</sub> )
⋮	⋮
0,062811	122,0103
0,060521	65,6619
0,057616	55,3817
0,051445	26,3899
0,046169	12,7788
0,046099	-39,5585
0,041417	-49,0771
⋮	⋮

Percebe-se que à medida que a diferença diminui o sentido do fluxo de reativos vai mudando, ou seja, a correlação se estabelece, o sentido do fluxo de reativos muda, mas sem que a diferença  $V_e/V_r - |\zeta|$  passe por zero. Tal situação verificou-se em todos os cenários, mas não muda o fato da dependência descrita se estabelecer.

Além da correlação entre a diferença  $V_e/V_r - |\zeta|$  e o fluxo de potência reativa, a diferença entre as tensões terminais, assim como a razão entre elas tem alto índice de correlação com o fluxo de potência reativa.

### 4.3.2 Perfil do Fluxo de Reativos

Da mesma forma que o perfil de corrente e de tensão foram traçados, traçou-se também o perfil do fluxo de potência reativa ao longo da linha, o que permitiu observar outros padrões de comportamento.

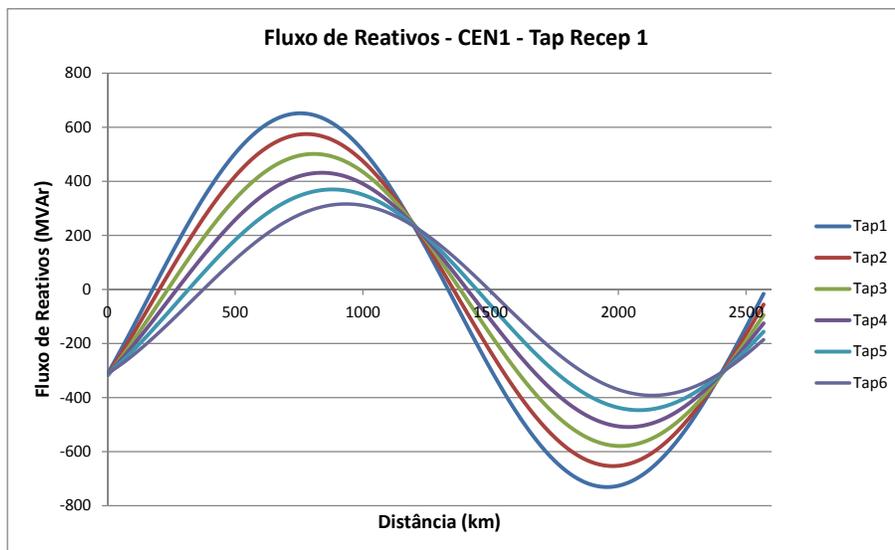
Antes de se mostrar os resultados, vale a ressalva de que para os cenários em que o Norte é exportador de potência, o terminal de Assis é receptor, sendo o de Altamira o emissor; a situação obviamente se inverte para o caso em que o Norte é importador. Como o processo de mudança no valor dos tapes foi realizado por *scripts* executados pelo ANAREDE, escritos uma vez e adaptados para os cenários subsequentes, o esquemático mostrado na figura 4.1 vale para os cenários em que o Norte é importador, invertendo-se os terminais quando o Norte é exportador.

As figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 mostram, cada uma, três conjuntos de perfis de fluxo de reativos para os cenários 1,3,5 e 6 respectivamente. Cada conjunto de perfis do fluxo de reativos refere-se a um valor fixo de tap no terminal de Assis e cada curva é traçada para um valor de tap no terminal de Altamira. Assim, por exemplo, o conjunto na figura 4.10a refere-se ao tap do terminal receptor na posição 1 e um valor de tap no emissor para cada curva até a não convergência do caso; as figuras 4.10b e 4.10c mostram a mesma sequência para os tapes do terminal receptor na posição 4 e 8, respectivamente.

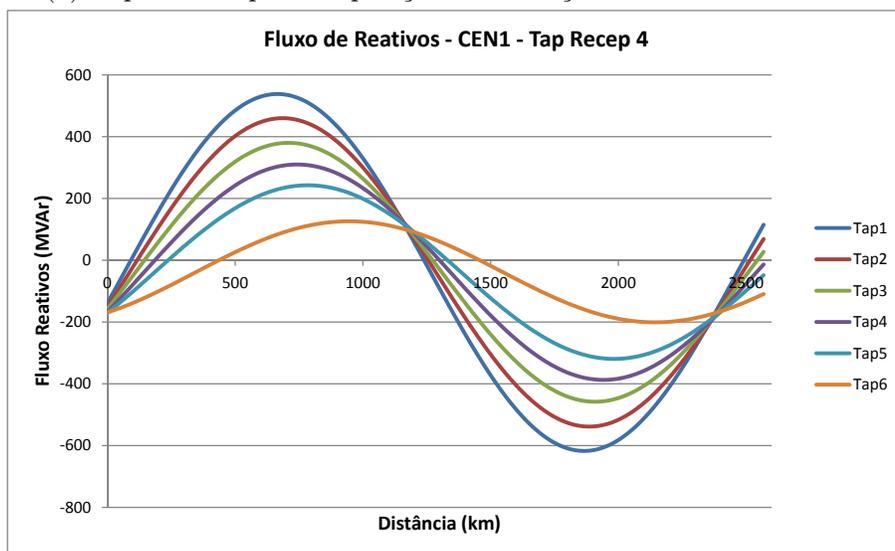
Vale notar que, dado um valor fixo de tap no receptor, o aumento do tap no emissor faz com que a tensão neste diminua, diminuindo a diferença de tensão entre os terminais; chega-se um determinado momento que tal diferença faz com que o fluxo de carga não convirja, por tal motivo alguns conjuntos de perfis de fluxo de reativos têm mais curvas que outros.

É visível que o comportamento segue uma forma que se assemelha a uma senóide e que a amplitude desta diminui conforme aumenta-se um degrau no tap do transformador do terminal de envio nos cenários em que o subsistema Norte é exportador e no terminal receptor no caso contrário. A mudança do tap na outra extremidade, também tem um efeito parecido, conforme avança-se estágios no tap diminui-se a amplitude, o que pode ser acompanhado pelas sequências de três gráficos referentes a cada cenário.

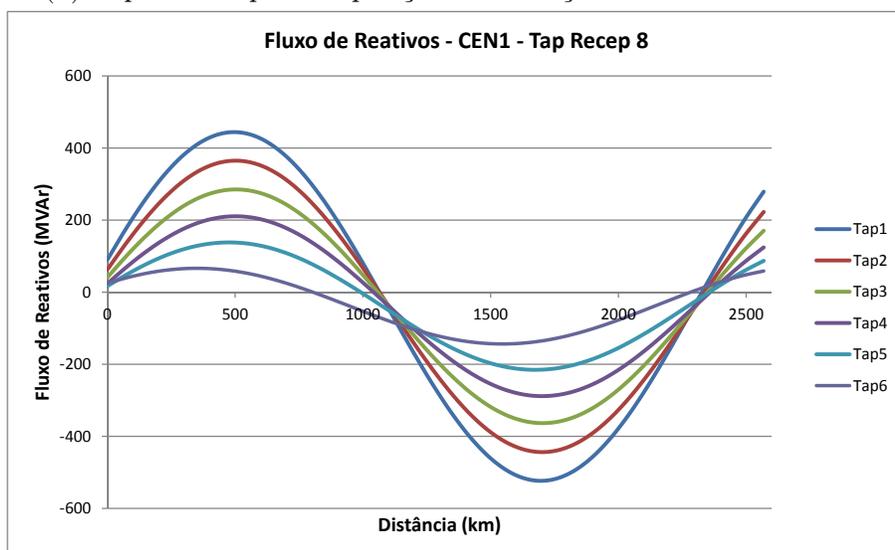
A atenção para a amplitude do perfil de reativos não é em vão, existe forte correlação entre esta e o nível de perdas ativas na linha, mostradas nas tabelas 4.17 e 4.18. A exceção é para o cenário 6, o qual é um cenário mais flexível e os perfis dos fluxos de reativos fogem parcialmente do padrão anterior, além da correlação com as perdas ser muito baixa.



(a) Tap no Receptor na posição 1 e variação no terminal emissor.

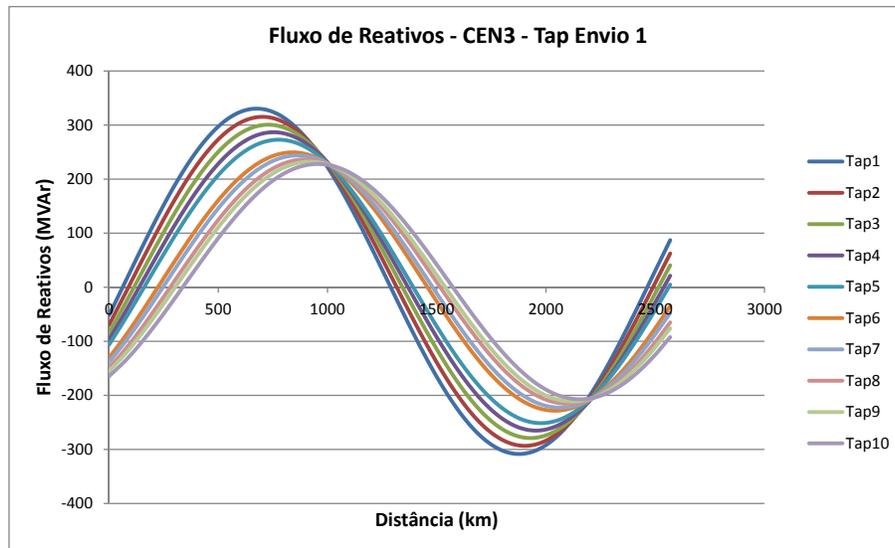


(b) Tap no Receptor na posição 4 e variação no terminal emissor.

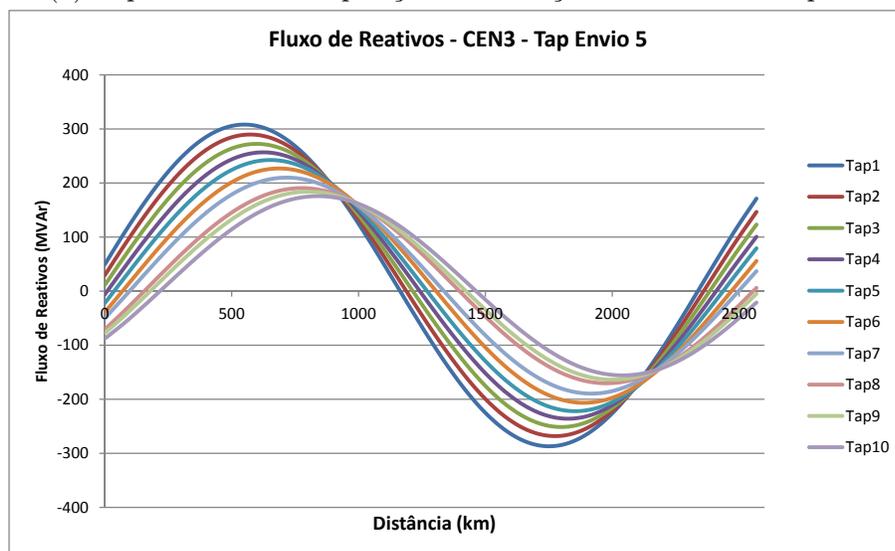


(c) Tap no Receptor na posição 8 e variação no terminal emissor.

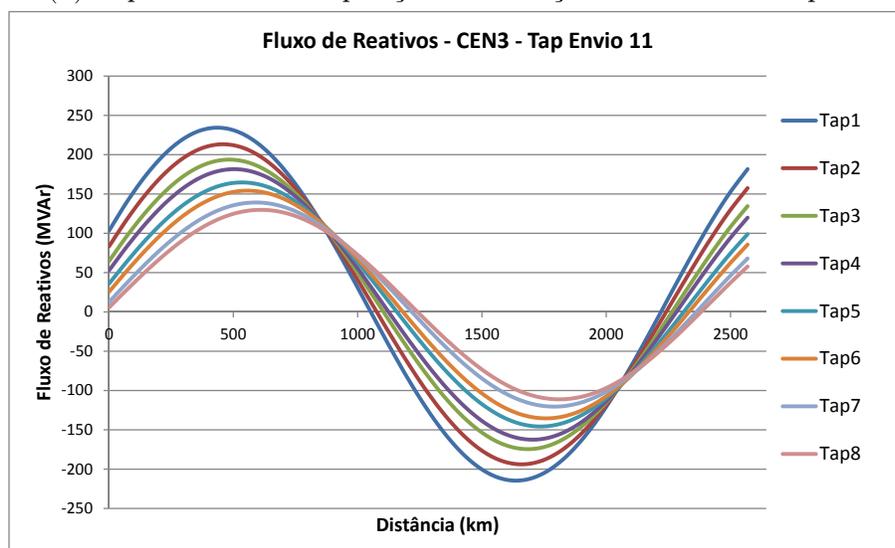
Figura 4.10: Fluxo de Reativos em uma das 3 linhas de 800kV no CEN1 (TE em  $l = 0km$ ).



(a) Tap no Emissor na posição 1 e variação no terminal receptor.

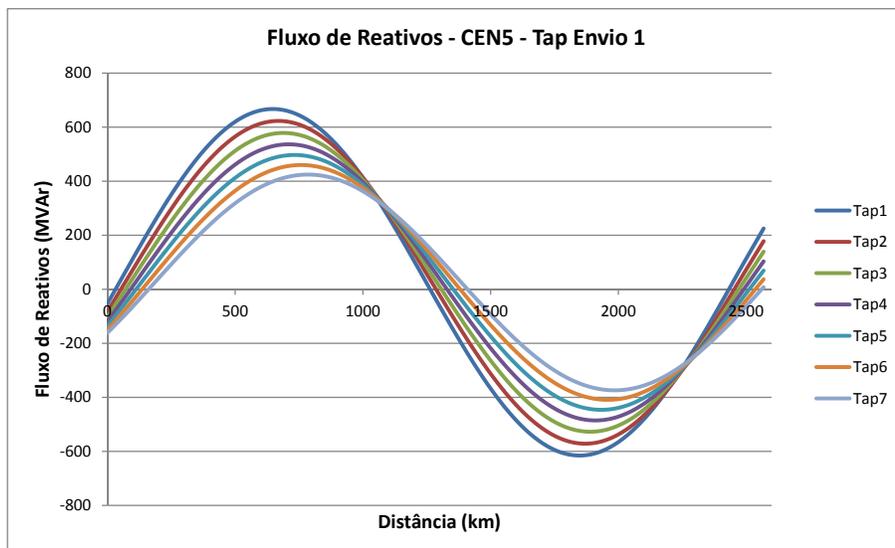


(b) Tap no Emissor na posição 5 e variação no terminal receptor.

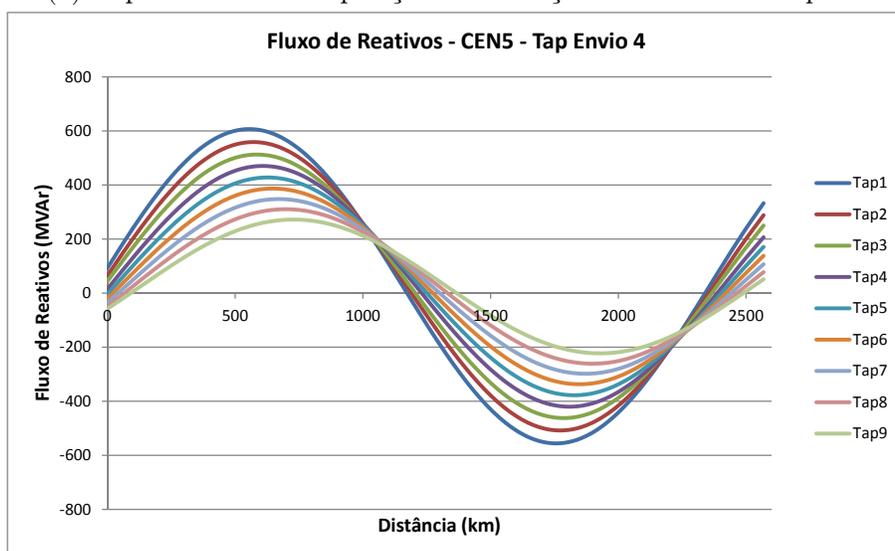


(c) Tap no Emissor na posição 11 e variação no terminal receptor.

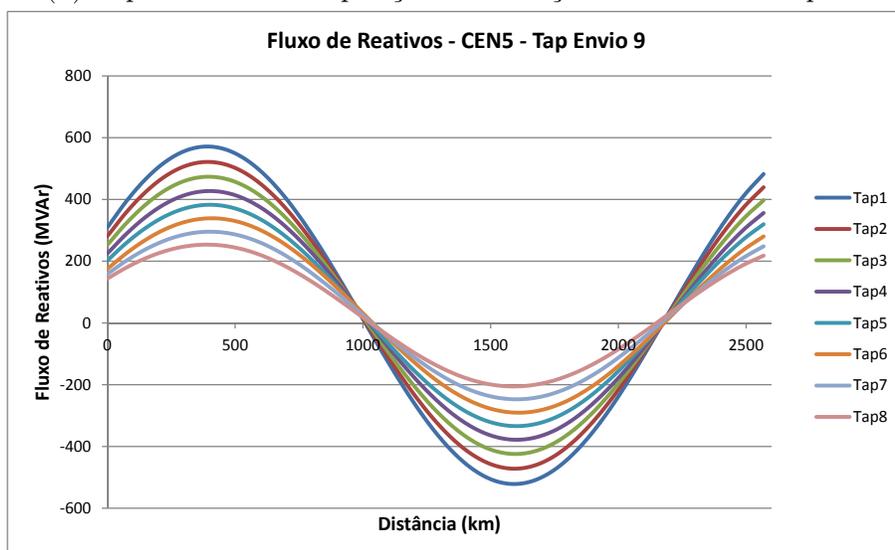
Figura 4.11: Fluxo de Reativos em uma das 3 linhas de 800kV no CEN3 (TR em  $l = 0\text{km}$ ).



(a) Tap no Emissor na posição 1 e variação no terminal receptor.

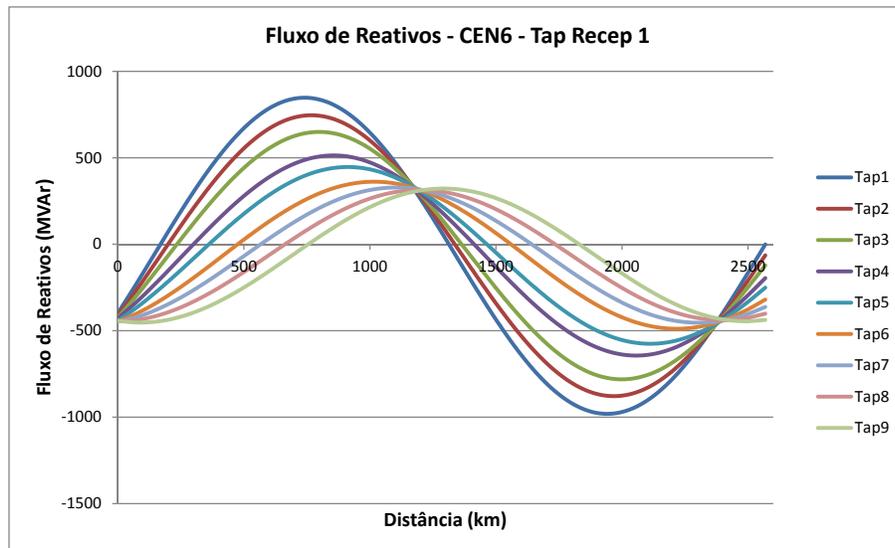


(b) Tap no Emissor na posição 4 e variação no terminal receptor.

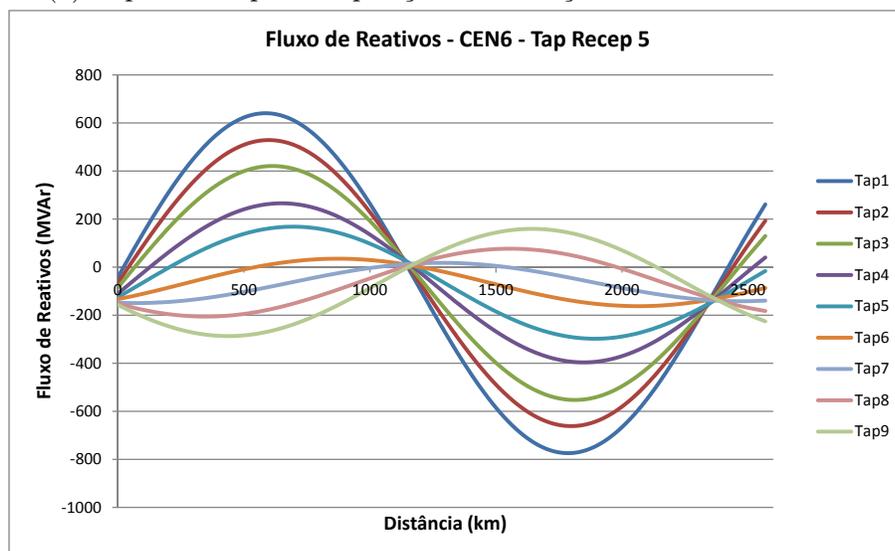


(c) Tap no Emissor na posição 9 e variação no terminal receptor.

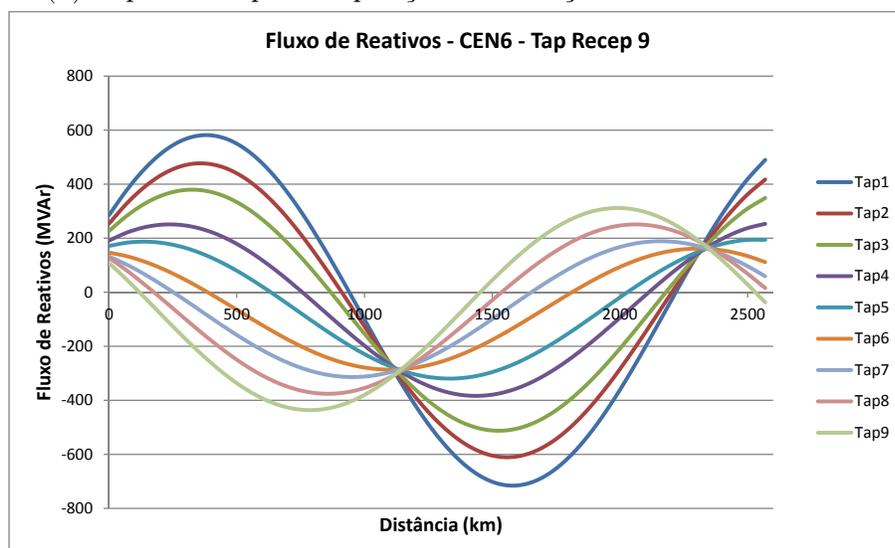
Figura 4.12: Fluxo de Reativos em uma das 3 linhas de 800kV no CEN5 (TR em  $l = 0km$ ).



(a) Tap no Receptor na posição 1 e variação no terminal emissor.



(b) Tap no Receptor na posição 5 e variação no terminal emissor.



(c) Tap no Receptor na posição 9 e variação no terminal emissor.

Figura 4.13: Fluxo de Reativos em uma das 2 linhas de 800kV no CEN6 (TE em  $l = 0km$ ).

	<b>CEN1</b>	<b>CEN2</b>	<b>CEN3</b>	<b>CEN4</b>	<b>CEN5</b>	<b>CEN6</b>
<b>3 x 800kV</b>	0,91615	0,96961	0,99391	0,95246	0,95725	0,47298
<b>2 x 800kV</b>	0,74845	0,92601	0,92445	0,93170	0,80846	0,09713

Tabela 4.17: Correlação entre amplitude do perfil de reativos e perdas na linha - configurações sem ajuste da defasagem.

	<b>CEN3</b>	<b>CEN4</b>	<b>CEN5</b>
<b>3 x 800kV</b>	0,96418	0,90365	0,87836
<b>2 x 800kV</b>	0,78544	0,90340	0,89382

Tabela 4.18: Correlação entre amplitude do perfil de reativos e perdas na linha - configurações com ajuste da defasagem.

## 4.4 Conclusões Parciais

Da série de ensaios e resultados apresentados acima pode-se tirar algumas conclusões e indicações de estudos necessários numa possível implantação desta tecnologia de transmissão.

Inicialmente, fica claro a necessidade de um ajuste da tensão operacional conforme o carregamento das linhas e mesmo do carregamento para uma melhor eficiência. Este ajuste torna-se necessário no caso de um tronco como este em questão, que visa não apenas escoar a potência gerada numa usina com grande variação da potência gerada ao longo do ano, mas suprir o subsistema Norte nos períodos de seca, ligando dois subsistemas que possuem atualmente apenas uma conexão. Justamente esta situação que agrava a operacionalidade da linha e talvez uma alternativa com carregamento mais constante da linha teria de ser pensado. Tal alternativa, inclusive, tende a se concretizar à longo prazo tendo em vista a perspectiva de aumento da potência instalada na região amazônica que, dado que não há perspectiva de grande crescimento econômico na região, a potência gerada fluirá prioritariamente para outras regiões.

Outra situação possível, pensando na variação hídrica dos rios da região Norte - os quais apresentam duas estações bem definidas ao longo do ano - seria o estabelecimento de dois valores possíveis de carregamento do tronco. Desta maneira poderia-se trabalhar com dois tipos de transformadores com menor faixa de variação do tap, cada tipo com relação de transformação diferente, um para cada período, o que implicaria, no entanto, no desligamento do tronco para troca. De todas as formas, os transformadores também teriam de trabalhar com uma faixa não convencional de variação dos tapes para otimizar a eficiência da linha tendo em conta as variações diárias de carregamento, no entanto a variação passaria para valores bem menores dos aqui propostos.

Outro problema desta configuração é que não se pode trabalhar com redundância n-1 no caso de perda de uma das linhas do tronco, exigindo o desligamento de carga. Como o ajuste da tensão operacional faz com que a potência transmitida se aproxime da SIL e o carregamento máximo da linha, conforme literatura [9], é de  $1,4 \cdot \text{SIL}$ , mesmo no caso com três linhas em paralelo, cada uma das linhas sãs deveria assumir  $0,5 \cdot \text{SIL}$ , ultrapassando levemente o valor teórico.

Em termos de estudos adicionais quanto a esse método de aumento da eficiência seria fundamental o estudo de transitórios num chaveamento do tap em carga e das características construtivas de tal transformador, viabilidade técnica, custo, expectativa de vida, confiabilidade, proteções específicas, dentre outros. A necessidade de coordenação dos transformadores nos dois terminais mostra-se necessária apesar de alguma flexibilidade, devendo tal coordenação observar também a necessidade de se regular o fluxo de reativos pela linha.

Sobre a utilização da defasagem do PST, as conclusões foram mostradas durante os ensaios e apresenta-se como um método interessante de alterar o carregamento das linhas além de mostrar-se um método alternativo de realizar um “ajuste fino” da eficiência das linhas, alterando a defasagem ao invés de se alterar a relação de transformação, tendo-se em vista que a alteração da defasagem se dá apenas em um terminal da linha e não dos dois, como no caso do ajuste da tensão operacional. Além disso, como exposto anteriormente, uma defasagem de  $\pm 30^\circ$  em torno dos  $180^\circ$  do transformador inversor, não fugiria muito da tecnologia atualmente existente para transformadores defasadores. De qualquer maneira os mesmos estudos necessários para os transformadores abaixadores/elevadores de tensão deveriam ser realizados para o PST em questão.

Por fim, o conjunto de ensaios referentes ao fluxo de reativos pelo tronco indicam que este pode ser controlado lançando-se mão do mesmo método usado para controle da tensão operacional, o próprio tap dos transformadores de conexão, dispensando o uso de elementos de eletrônica de potência.

Do ponto de vista operacional é de se questionar até que ponto é mais vantajoso técnica e economicamente fazer alterações constantes nos tapes de maneira a ter uma leve melhora da eficiência, sabendo que essas alterações podem implicar em diminuição da vida útil dos transformadores e pouco se sabe se o chaveamento destes se daria em carga, o que implicaria transitórios na linha. É de se lembrar que - apesar da influência do fluxo de potência reativa pela linha na eficiência desta - nos cenários de mais alto carregamento a diferença entre o maior valor de perdas e o menor após o ajuste da tensão operacional é de menos de 0,6%, atingindo valores pouco maiores nos cenários 3, 4 e 5 nos quais tal controle poderia ser considerado.



## Ensaaios com linhas de 1000 kV

Este capítulo apresenta os ensaios para o tronco com linhas de 1000 kV. Entende-se que esta opção, por cada linha possuir maior potência característica, seria mais interessante do ponto de vista de capacidade de carregamento. Com 8100MW de capacidade em cada linha, somando 16200MW no total, e comparado aos 14540MW do tronco com três linhas de 800kV, esta opção de elo CA seria mais econômica e permitiria suprir a demanda de intercâmbio de energia para prazos maiores, dado que a potência característica é o principal parâmetro para a determinação da capacidade de carregamento das linhas de meia onda.

Tendo em vista o acima exposto e após estudos nas linhas de 800kV, os quais permitiram melhor entendimento do problema a ser tratado, resolveu-se aprofundar os ensaios para a configuração com duas linhas de 1000kV, a seguir expostos.

### 5.1 Metodologia

A metodologia utilizada para os ensaios destas linhas repete em boa parte o que já foi realizado anteriormente. A diferença está no número de ensaios além de outros aspectos abordados. Diferentemente do capítulo anterior, no qual abordam-se as configurações com linhas de 800kV, neste o estudo da defasagem do PST de conexão das linhas deixa de ser apenas uma tentativa de explorar tal grandeza e faz-se uma tentativa de encontrar um ponto ótimo, experimental e empírico, não teórico.

O valor do reator inserido na barra de Assis, antes não abordado passa a ser explorado na mesma perspectiva dos outros estudos, verificar o que ocorre com a eficiência do tronco, percentual de convergência e carregamento das linhas.

Basicamente, o estudo para esta configuração do tronco CA consiste em realizar os 144 casos de fluxo de carga variando os tapes dos transformadores. No entanto, ao invés de apenas uma sequência de 144 casos para cada cenário realizaram-se ao menos 15 delas (com exceção do cenário 6, de baixo carregamento do SIN e menos representativo). Essas 15 sequências resultam da combinação de 3 valores diferentes de defasagem angular do PST para 5 valores diferentes do valor de reativos fornecidos pelo reator shunt na barra de Assis.

## Escolha da defasagem dos PSTs

Inicialmente, vale notar que, ao se alterar os parâmetros das linhas, partindo daquelas de 800kV para 1000kV, os cenários tiveram alterações quanto ao carregamento destas. Sendo assim, para manter certo parâmetro de comparação, resolveu-se alterar a fase dos PSTs de tal maneira que no tronco CA na configuração de 1000kV dos cenários base o carregamento fosse parecido aos dos cenários recebidos pela EPE e mostrados na tabela 3.2. O valor do “tap ideal” para cada cenário foi então obtido a partir deste carregamento; após obtido um primeiro valor de “tap ideal”, novo fluxo de carga foi rodado com este valor inicial e um segundo valor de tap foi obtido. Lembrando que no capítulo anterior este foi o procedimento utilizado apenas para os cenários de baixo carregamento das linhas, na configuração de 800kV, procedimento explicitado em 4.1.1.2.

Para o valor da defasagem usou-se como critério uma excursão de 15° para os cenários 1, 2, 4 e 5; 20° para o cenário 3 e apenas 5° para o cenário 6. Nos quatro primeiros casos acima citados usa-se o valor base e mais dois outros de maneira que a diferença entre o primeiro e o último resulte nos 15° citados; no cenário 3 o mesmo procedimento é usado, mas resultando em 20° de diferença entre o primeiro e o último e no cenário 6 apenas dois valores com 5° de diferença. A tabela 5.1 apresenta os valores utilizados e os compara com os valores base nas configurações com linhas de 800kV

Tabela 5.1: Valores de defasagem dos PST utilizadas nos ensaios.

	CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	CEN5	CEN6
<b>800kV</b>	180°	200°	210°	180°	180°	150°
<b>1000kV</b>	155°	180°	220°	140°	180°	145°
	165°	187°	230°	147°	187°	150°
	170°	195°	240°	155°	195°	-

Como a investigação aqui proposta é apenas teórica e as dificuldade de construção de um transformador com tais características deve ser abordada numa possível opção por implantação deste modelo de linha, não se ateuve aos limites de  $180^\circ \pm 30^\circ$  conforme proposição de montagem apresentada no capítulo 3.

## Escolha dos valores do reator

O reator inserido na barra de Assis tem valor nominal de 95MVar, ou seja, consome tal valor se a barra no qual está conectado estiver em 1pu. Para o estudo em questão usaram-se dois degraus de 5MVar para cima e dois para baixo, totalizando 5 valores para ensaio.

Novamente, o estudo apresentado nesta dissertação contém bastante de empirismo e experimentação, então a escolha destes valores para o reator, assim como das defasagens tem um tanto de aleatoriedade.

Como será visto, em alguns casos o resultado obtido com tais escolhas implicarão na realização de novos ensaios para obtenção de conclusões mais definitivas.

## 5.2 Resultados por Cenário

### 5.2.1 Cenário 1

Abaixo apresenta-se os resultados para o primeiro cenário, em tabelas condensadas. Cada uma apresenta os ensaios para um dos valores escolhidos de fase.

Neste primeiro cenário, assim como outros que seguem, o valor do “tap ideal” em torno do qual realizam-se as iterações é levemente alterado para cada valor de fase, tendo em conta o carregamento obtido com um primeiro fluxo de carga convergido para cada valor de fase para qual é novamente calculado outro valor de “tap ideal”.

Tabela 5.2: Ensaios para o Cenário 1 com fase do defasador em 155°.

CENÁRIO 1 - FASE 155°						
Shunt (MVA <sub>r</sub> )		115	105	95	85	75
Tap ideal (pu)		1,412				
Convergência		60,42%	59,03%	61,81%	59,72%	59,03%
PERDAS	MÉDIA	13,13%	13,14%	13,13%	13,14%	13,13%
	MÍN	12,97%	12,97%	12,97%	12,97%	12,97%
	MÁX	13,65%	13,65%	13,65%	13,66%	13,66%
Fluxo no TE (MVA)		6938,4	6950,5	6934,3	6943,2	6934,8

Tabela 5.3: Ensaios para o Cenário 1 com fase do defasador em 165°.

CENÁRIO 1 - FASE 165°						
Shunt (MVA <sub>r</sub> )		115	105	95	85	75
Tap ideal (pu)		1,462				
Convergência		52,78%	51,39%	52,08%	50,69%	50,00%
PERDAS	MÉDIA	13,08%	13,12%	13,12%	13,11%	13,11%
	MÍN	12,97%	12,97%	12,97%	12,97%	12,97%
	MÁX	13,33%	13,54%	13,55%	13,55%	13,55%
Fluxo no TE (MVA)		6574,2	6632,4	6631,1	6619,9	6628,2

Tabela 5.4: Ensaios para o Cenário 1 com fase do defasador em 170°.

CENÁRIO 1 - FASE 170°						
Shunt (MVA <sub>r</sub> )		115	105	95	85	75
Tap ideal (pu)		1,512				
Convergência		31,94%	30,56%	29,17%	31,25%	30,56%
PERDAS	MÉDIA	13,09%	13,10%	13,10%	13,10%	13,10%
	MÍN	12,97%	12,98%	12,98%	12,98%	12,98%
	MÁX	13,34%	13,35%	13,35%	13,35%	13,35%
Fluxo no TE (MVA)		6464,5	6471,2	6475,5	6467,6	6459,4

Neste cenário, de alto carregamento das linhas, a influência da fase do transformador de conexão no nível de perdas é praticamente nula e estas se mantêm em torno de 13,1% na média,

variando pouco entre os valores mínimos e máximos. Seu impacto se sente mais no percentual de convergência e carregamento; novamente, percebe-se que quanto mais o carregamento do tronco se distancia do seu valor inicial, menor o percentual de convergência, o que leva a acreditar que trata-se de uma estabilidade numérica que pouco tem a ver com o tronco em meia onda.

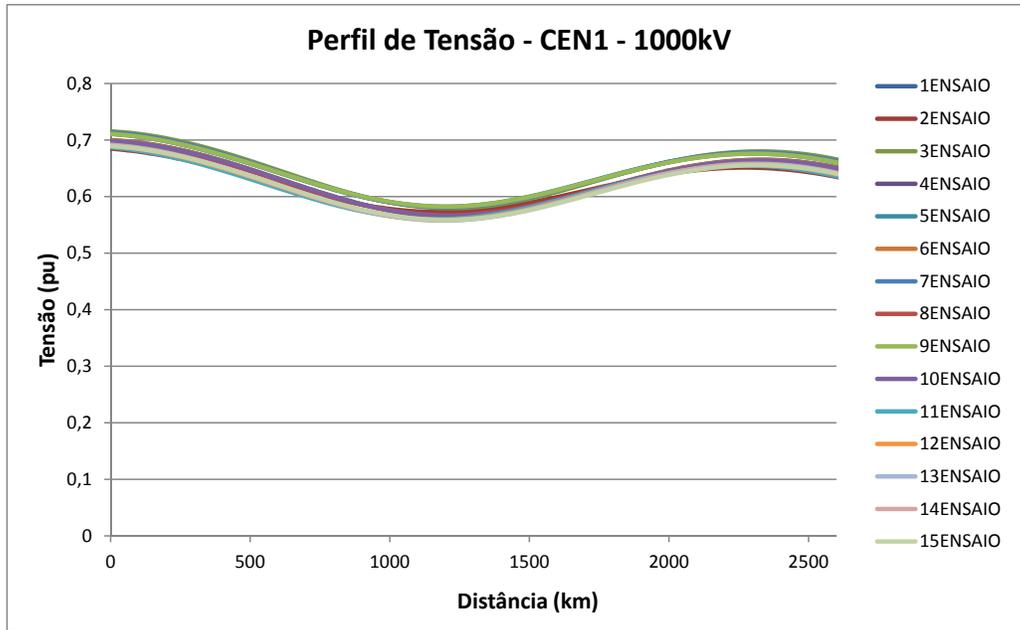


Figura 5.1: Perfil de tensão nos 15 ensaios do Cenário 1 (T.Altamira em  $l = 0$ ).

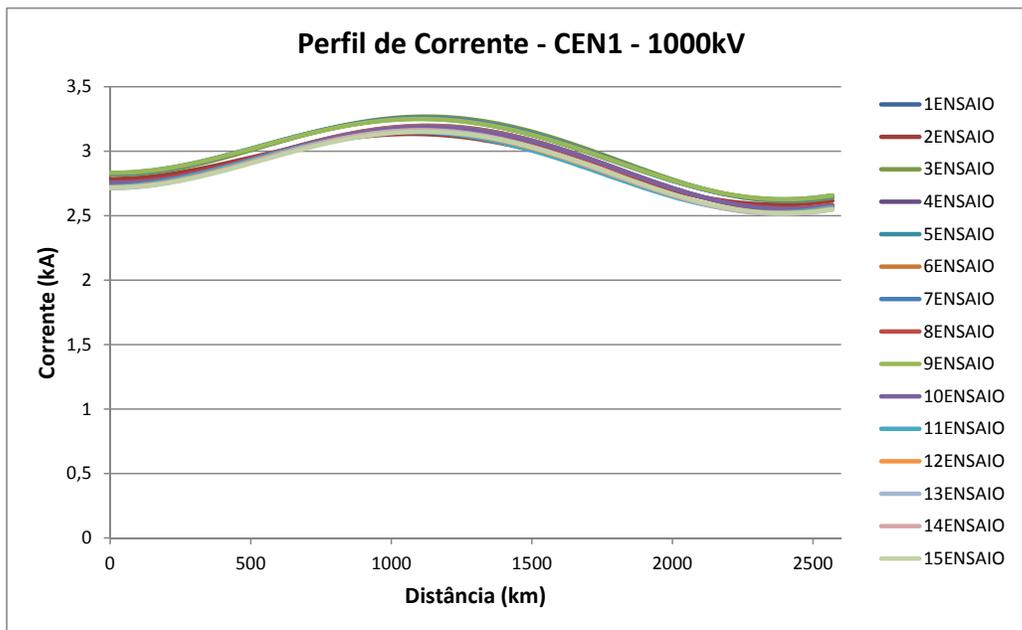


Figura 5.2: Perfil de corrente nos 15 ensaios do Cenário 1 (T.Altamira em  $l = 0$ ).

Quanto à influência do reator, não se verifica nenhuma influência significativa na eficiência da linha. No quesito convergência, para um mesmo valor de fase a diferença entre o maior

percentual de convergência e o menor situa-se entre 2% e 3%; como esta diferença também não segue uma tendência - por exemplo, diminui conforme diminui-se o valor do reator - é pouco provável que tal diferença se dê pela influência do reator. No quesito carregamento também não observa-se nenhuma tendência e a diferença entre os valores obtidos nos ensaios com mesma defasagem está na ordem das dezenas de MW, desprezível se comparado ao carregamento global das linhas.

As figuras 5.1 e 5.2 mostram os perfis de tensão e corrente nas linhas em cada um dos 15 ensaios. O perfil de cada ensaio é obtido com a média dos cenários convergidos dentro dos 144 rodados em cada ensaio. Percebe-se que estes 15 ensaios tiveram resultados bem próximos e os perfis praticamente se sobrepõem. Apesar do carregamento das linhas mudarem devido ao ajuste de fase, como o “tap ideal” para cada fase também foi alterado, o nível de perdas e os perfis de tensão e corrente se mantiveram bem próximos.

### 5.2.2 Cenário 2

Abaixo apresenta-se as tabelas referentes aos ensaios do segundo cenário

Tabela 5.5: Ensaios para o Cenário 2 com fase do defasador em 180°.

<b>CENÁRIO 2 - FASE 180°</b>						
<b>Shunt (MVar)</b>		115	105	95	85	75
<b>Tap ideal (pu)</b>		1,331				
<b>Convergência</b>		72,92%	72,92%	75,00%	77,08%	77,08%
<b>PERDAS</b>	<b>MÉDIA</b>	13,45%	13,44%	13,44%	13,44%	13,44%
	<b>MÍN</b>	13,00%	12,99%	12,99%	13,01%	12,99%
	<b>MÁX</b>	14,27%	14,22%	14,27%	14,27%	14,28%
<b>Fluxo no TE (MVA)</b>		7652,0	7658,8	7646,9	7647,0	7644,9

Tabela 5.6: Ensaios para o Cenário 2 com fase do defasador em 187°.

<b>CENÁRIO 2 - FASE 187°</b>						
<b>Shunt (MVar)</b>		115	105	95	85	75
<b>Tap ideal (pu)</b>		1,381				
<b>Convergência</b>		61,81%	63,89%	60,42%	64,58%	63,19%
<b>PERDAS</b>	<b>MÉDIA</b>	13,49%	13,48%	13,50%	13,47%	13,48%
	<b>MÍN</b>	13,08%	13,07%	13,07%	13,07%	13,07%
	<b>MÁX</b>	14,22%	14,22%	14,22%	14,23%	14,23%
<b>Fluxo no TE (MVA)</b>		7458,9	7453,2	7466,3	7452,5	7457,7

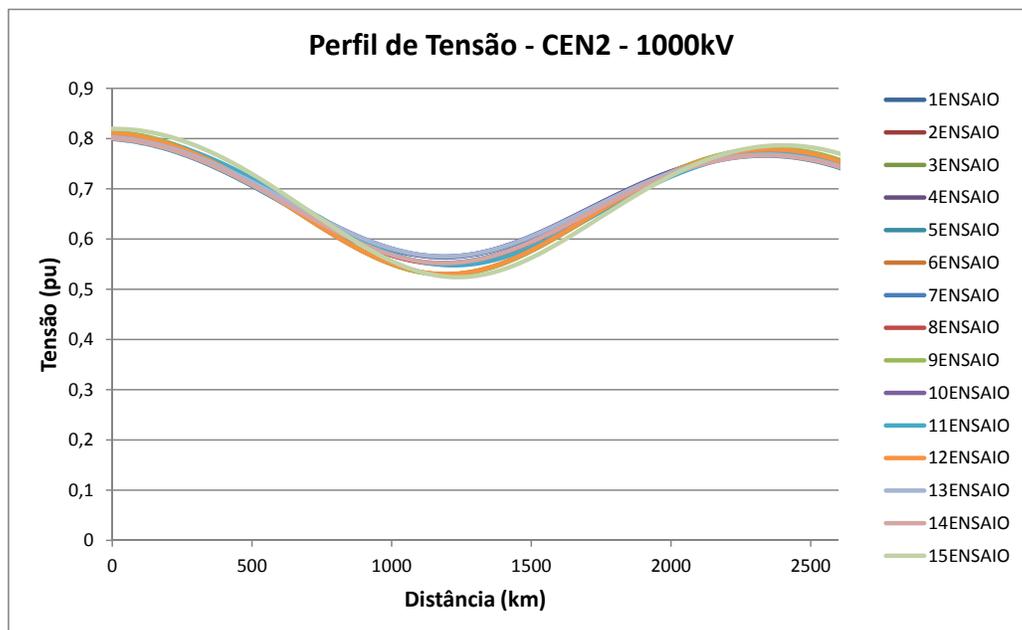
Tabela 5.7: Ensaios para o Cenário 2 com fase do defasador em  $195^\circ$ .

CENÁRIO 2 - FASE $195^\circ$						
Shunt (MVAr)		115	105	95	85	75
Tap ideal (pu)		1,406				
Convergência		40,97%	41,67%	39,58%	41,67%	41,67%
PERDAS	MÉDIA	13,66%	13,65%	13,67%	13,65%	13,65%
	MÍN	13,29%	13,30%	13,30%	13,30%	13,22%
	MÁX	14,27%	14,27%	14,28%	14,28%	14,28%
Fluxo no TE (MVA)		7279,7	7278,7	7283,7	7279,0	7280,6

Neste cenário o primeiro valor da defasagem do transformador foi o que fez obter melhor nível de perdas e maior percentual de convergência, sendo aquele em que o carregamento da linha era maior.

Novamente, a comparação entre valores diferentes para o reator não demonstra tendência em nenhum dos aspectos analisados: convergência, perdas e carregamento das linhas; tampouco pode-se verificar influência considerável entre diferentes valores do reator e a melhora, piora, aumento ou diminuição destes índices.

As figuras 5.3 e 5.4 mostram os perfis de tensão e corrente para o cenário 2 e foram traçados da mesma maneira que aqueles do cenário 1. A análise a ser feita é exatamente a mesma, a pequena alteração no valor do tap “ideal” faz com que a mudança do carregamento seja acompanhada pela mudança deste, mantendo os perfis de tensão e corrente muito próximos. Nota-se neste cenário um maior afundamento da tensão central, um indicativo de que a tensão operacional poderia ser melhor otimizada, deixando o perfil mais plano e melhorando o nível de perdas, as quais se verifica que foram maiores que no cenário 1.

Figura 5.3: Perfil de tensão nos 15 ensaios do Cenário 2 (T.Altamira em  $l = 0$ ).

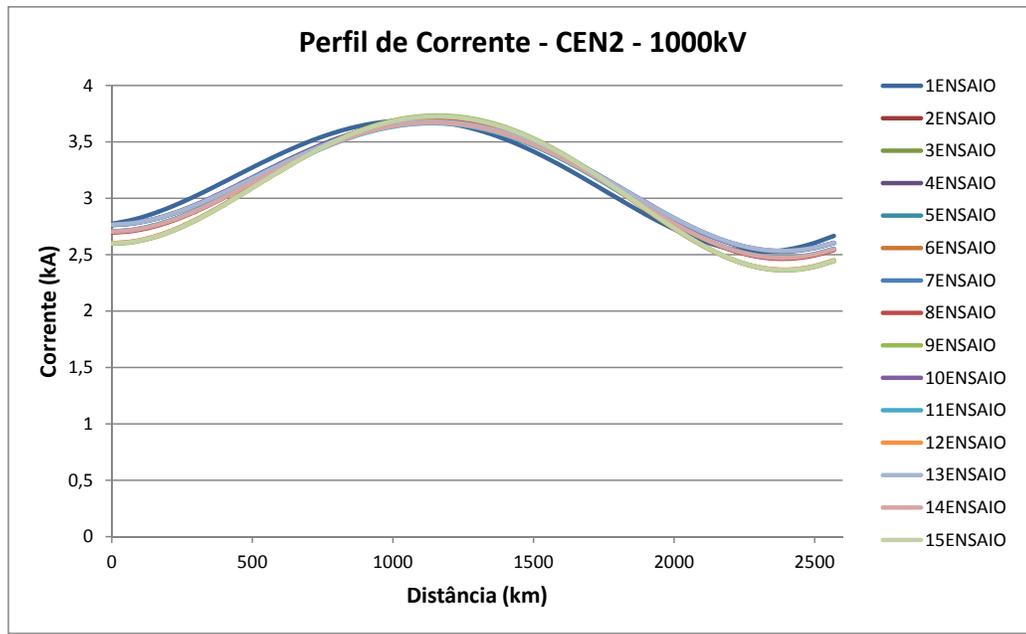


Figura 5.4: Perfil de corrente nos 15 ensaios do Cenário 2 (T.Altamira em  $l = 0$ ).

### 5.2.3 Cenário 3

Abaixo as tabelas dos ensaios do cenário 3:

Tabela 5.8: Ensaios para o Cenário 3 com fase do defasador em  $220^\circ$ .

CENÁRIO 3 - FASE $220^\circ$						
	Shunt (MVar)	115	105	95	85	75
	Tap ideal (pu)	3,286				
	Convergência	70,14%	72,22%	72,22%	68,06%	66,67%
PERDAS	MÉDIA	13,31%	13,30%	13,33%	13,30%	13,29%
	MÍN	13,04%	13,04%	13,04%	13,04%	13,04%
	MÁX	14,25%	14,24%	14,24%	14,24%	14,05%
	Fluxo no TE (MVA)	1291,0	1290,5	1291,8	1291,7	1292,5

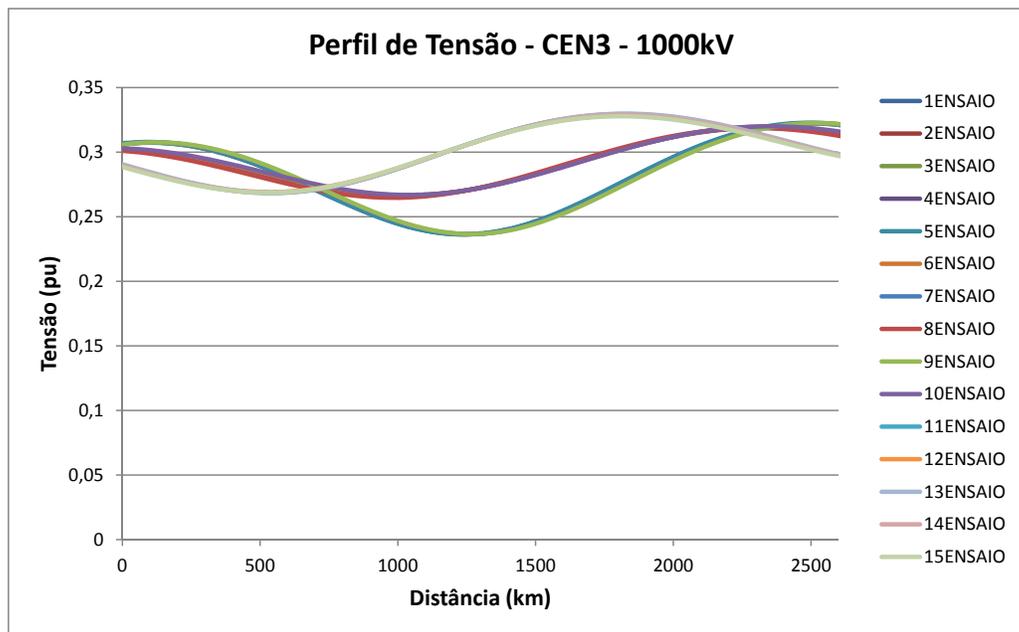
Tabela 5.9: Ensaios para o Cenário 3 com fase do defasador em  $230^\circ$ .

CENÁRIO 3 - FASE $230^\circ$						
	Shunt (MVar)	115	105	95	85	75
	Tap ideal (pu)	3,286				
	Convergência	95,83%	95,83%	97,22%	94,17%	96,53%
PERDAS	MÉDIA	13,15%	13,15%	13,14%	13,17%	13,14%
	MÍN	12,97%	12,97%	12,97%	12,97%	12,97%
	MÁX	13,83%	13,82%	13,82%	13,92%	13,81%
	Fluxo no TE (MVA)	1447,5	1450,1	1452,6	1439,3	1454,3

Tabela 5.10: Ensaio para o Cenário 3 com fase do defasador em 240°.

CENÁRIO 3 - FASE 240°						
Shunt (MVA)		115	105	95	85	75
Tap ideal (pu)		3,286				
Convergência		69,49%	69,49%	64,58%	68,06%	68,06%
PERDAS	MÉDIA	13,37%	13,36%	13,37%	13,37%	13,36%
	MÍN	13,07%	13,07%	13,07%	13,07%	13,07%
	MÁX	14,01%	14,00%	13,99%	13,97%	13,96%
Fluxo no TE (MVA)		1552,6	1551,6	1555,7	1551,7	1547,0

Este cenário possui uma característica interessante que sugere um ponto ótimo de convergência dependendo da defasagem do transformador. Diferentemente dos cenários anteriores, este apresenta o maior nível de convergência e menor nível de perdas num valor intermediário de defasagem do transformador, nos ensaios mostrados na tabela 5.9; os ensaios realizados com valores de defasagem menor ou maior que este implicam em menor nível de convergência e sutil piora na eficiência da linha. Tal situação levou à realização de novos ensaios mostrados mais adiante no intuito de checar um possível ponto ótimo da defasagem.

Figura 5.5: Perfil de tensão nos 15 ensaios do Cenário 3 (T.Altamira em  $l = 0$ ).

Outras características diferenciadas deste cenário em relação aos anteriores são os perfis de tensão e corrente apresentados nas figuras 5.5 e 5.6. Neste, como o tap central (ideal) foi mantido constante para todos os valores de defasamento no PST, houve sensível mudança entre os perfis de tensão e corrente. Na figura 5.5 são vistos basicamente 3 perfis de tensão diferentes, mesmo havendo 15 deles traçados. Cada um destes três refere-se a um valor diferente de defasagem inserida pelo PST. Seguindo de cima para baixo a ordem dos perfis de tensão quando a distância está em 1500km é: a primeira curva, de cor verde claro, refere-se aos ensaios com a defasagem

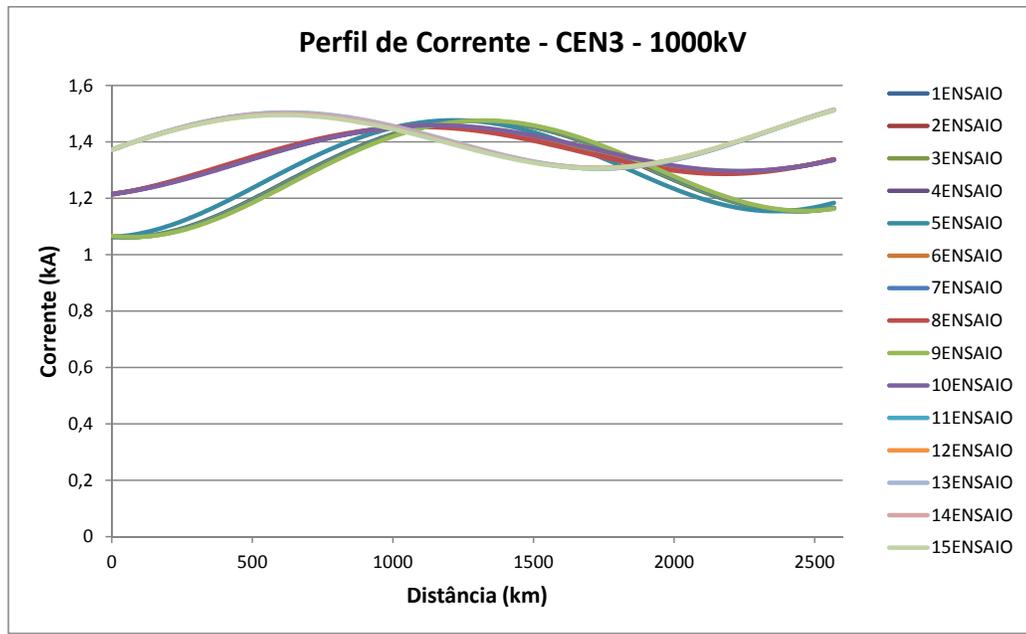


Figura 5.6: Perfil de corrente nos 15 ensaios do Cenário 3 (T.Altamira em  $l = 0$ ).

em  $240^\circ$ ; a segunda, de tom avermelhado, e mais plana refere-se aos ensaios com defasagem de  $230^\circ$  e a inferior, com o maior afundamento de tensão no centro da linha, refere-se aos ensaios com defasagem de  $220^\circ$ . Como os perfis de tensão e corrente são defasados de aproximadamente  $90^\circ$  elétricos, o que equivale a cerca de  $1250\text{km}$  em  $60\text{Hz}$ , a mesma ordem dos perfis de tensão se repete no perfil de corrente da figura 5.6, mas olhando no início do gráfico, em  $x = 0\text{km}$ . Confirma-se nestes gráficos o que foi observado anteriormente nas tabelas sobre o reator: a influência deste é desprezível no que se refere a perdas, carregamento e agora, perfis de tensão e corrente ao longo da linha.

#### 5.2.4 Cenário 4

Este cenário não apresenta muitos fatos novos, apenas o já conferido até o momento. Isto é, a diminuição da fase num cenário em que o Norte é importador de energia implica no aumento do carregamento da linha, podendo-se usar tal artifício como controle do fluxo de potência ativa, de tal maneira que a tensão operacional calculada para melhorar a eficiência da linha se ajuste melhor à situação. Novamente o reator não demonstrou ter impacto em nenhum dos fatores analisados. Também, por ser um cenário de intercâmbio zero, o carregamento do tronco é baixo e o impacto das mudanças do carregamento deste - apesar de grandes relativamente entre os ensaios com defasagem diferentes - são insignificativos para convergência do SIN, tanto assim que a convergência foi de  $100\%$  em todos os ensaios.

Quanto aos perfis de tensão e corrente, mostrados nas figuras 5.7 e 5.8, respectivamente, mostram o mesmo comportamento observado no cenário anterior. Como o “tap ideal” utilizado foi o mesmo para cada valor de defasagem, as diferenças entre os ensaios com defasagens distintas são percebidas nos perfis de tensão e corrente. Novamente, a mudança no valor do reator inserido no terminal de Assis não mostra influência perceptível nos perfis e, apesar de 15 curvas no total,

aparenta-se ter apenas 3. Além disso, conforme diminui-se a defasagem, o carregamento da linha fica mais próximo de obedecer a equação (4.1) com o tap central utilizado. De fato, tomando a média de carregamento do tronco mostrado nas tabelas 5.13, 5.12 e 5.11 obteria-se os valores de tapes, mostrados na tabela 5.14, <sup>1</sup> assim, o ensaio que mais se aproxima do ponto de máxima eficiência é o com defasagem de 140°, por tal motivo apresenta perdas menores e corresponde aos perfis de tensão e corrente mais planos.

Tabela 5.11: Ensaio para o Cenário 4 com fase do defasador em 140°.

CENÁRIO 4 - FASE 140°						
Shunt (MVA <sub>r</sub> )		115	105	95	85	75
Tap ideal (pu)		4,268				
Convergência		100%	100%	100%	100%	100%
PERDAS	MÉDIA	13,23%	13,23%	13,23%	13,23%	13,23%
	MÍN	12,97%	12,97%	12,97%	12,97%	12,97%
	MÁX	14,32%	14,32%	14,32%	14,32%	14,32%
Fluxo no TE (MVA)		912,5	912,5	912,5	912,5	912,5

Tabela 5.12: Ensaio para o Cenário 4 com fase do defasador em 147°.

CENÁRIO 4 - FASE 147°						
Shunt (MVA <sub>r</sub> )		115	105	95	85	75
Tap ideal (pu)		4,268				
Convergência		100%	100%	100%	100%	100%
PERDAS	MÉDIA	13,42%	13,42%	13,42%	13,42%	13,42%
	MÍN	13,05%	13,05%	13,05%	13,05%	13,05%
	MÁX	14,59%	14,59%	14,59%	14,59%	14,59%
Fluxo no TE (MVA)		824,9	824,9	824,9	824,9	824,9

Tabela 5.13: Ensaio para o Cenário 4 com fase do defasador em 155°.

CENÁRIO 4 - FASE 155°						
Shunt (MVA <sub>r</sub> )		115	105	95	85	75
Tap ideal (pu)		4,268				
Convergência		100%	100%	100%	100%	100%
PERDAS	MÉDIA	13,97%	13,97%	13,97%	13,97%	13,97%
	MÍN	13,45%	13,45%	13,45%	13,45%	13,45%
	MÁX	15,30%	15,30%	15,30%	15,30%	15,30%
Fluxo no TE (MVA)		720,8	720,8	720,8	720,8	720,8

<sup>1</sup>Para montagem da tabela foi utilizado a potência no terminal emissor, sendo que a equação para máxima eficiência prevê que se use a potência chegando no terminal receptor, no entanto, para o efeito que se deseja aqui, isto é, mostrar que o ensaio com a fase em 140° é o que atinge carregamento mais próximo de atender o ponto ótimo com o valor de tap utilizado.

	FASE 155°	FASE 147°	FASE 140°
TAP IDEAL	4,741	4,431	4,213
TAP UTILIZADO	4,268		

Tabela 5.14: Tapes centrais que otimizariam a eficiência para cada defasagem ensaiada no cenário 4.

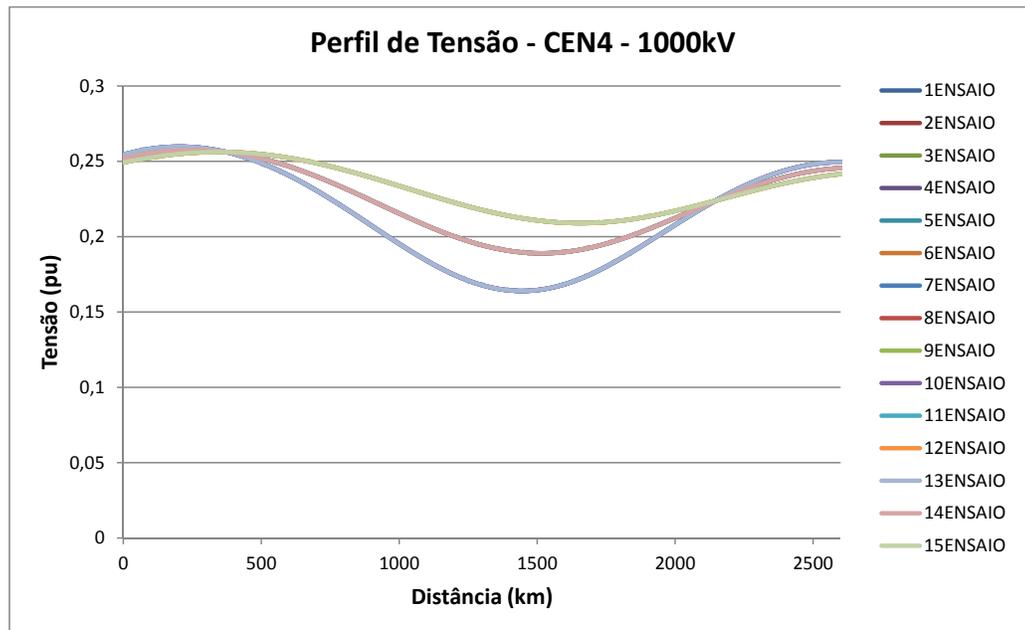


Figura 5.7: Perfil de tensão nos 15 ensaios do Cenário 4 (T.Altamira em  $l = 0$ ).

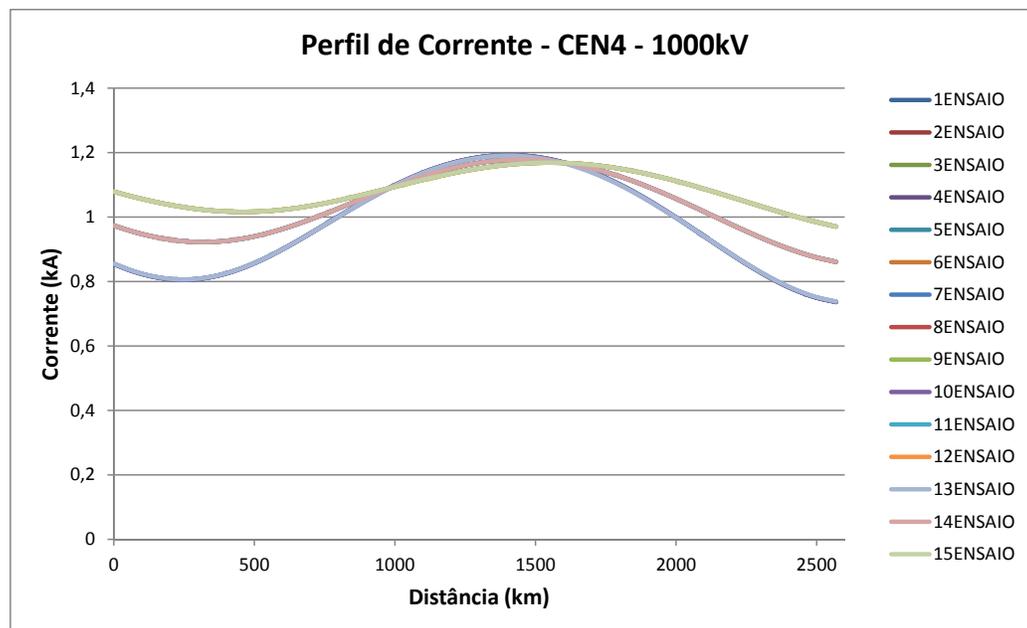


Figura 5.8: Perfil de corrente nos 15 ensaios do Cenário 4 (T.Altamira em  $l = 0$ ).

### 5.2.5 Cenário 5

Analisando as tabelas referentes a este cenário, mais uma vez conclui-se ser um cenário sensível, o que pode ser constatado pela convergência bastante baixa dos casos simulados. De fato, este cenário trata do SIN em carga pesada, com o Norte importando uma quantidade de potência considerável (mais de 4000MW) e sem nenhuma geração na UHE de Belo Monte. Apresenta as mesmas características dos cenários anteriores quanto ao reator e aos perfis de tensão e corrente, ressaltando-se que os ensaios com defasagem em  $187^\circ$  e  $195^\circ$  apresentam níveis de perdas muito semelhantes, portanto seus perfis de tensão e corrente.

Tabela 5.15: Ensaio para o Cenário 5 com fase do defasador em  $180^\circ$ .

CENÁRIO 5 - FASE $180^\circ$						
	Shunt (MVar)	115	105	95	85	75
	Tap ideal (pu)	1,904				
	Convergência	4,86%	4,86%	5,56%	6,25%	6,25%
PERDAS	MÉDIA	13,83%	13,83%	13,81%	13,79%	13,82%
	MÍN	13,69%	13,69%	13,65%	13,67%	13,68%
	MÁX	13,98%	13,98%	13,98%	13,92%	13,99%
	Fluxo no TE (MVA)	4121,9	4122,3	4112,6	4111,9	4118,0

Tabela 5.16: Ensaio para o Cenário 5 com fase do defasador em  $187^\circ$ .

CENÁRIO 5 - FASE $187^\circ$						
	Shunt (MVar)	115	105	95	85	75
	Tap ideal (pu)	1,904				
	Convergência	19,44%	19,44%	20,14%	20,14%	19,44%
PERDAS	MÉDIA	13,46%	13,45%	13,45%	13,45%	13,45%
	MÍN	13,22%	13,21%	13,21%	13,21%	13,21%
	MÁX	13,71%	13,68%	13,68%	13,68%	13,68%
	Fluxo no TE (MVA)	4182,9	4184,2	4179,8	4180,2	4181,5

Tabela 5.17: Ensaio para o Cenário 5 com fase do defasador em  $195^\circ$ .

CENÁRIO 5 - FASE $195^\circ$						
	Shunt (MVar)	115	105	95	85	75
	Tap ideal (pu)	1,904				
	Convergência	25,69%	27,78%	27,78%	27,78%	27,78%
PERDAS	MÉDIA	13,36%	13,36%	13,36%	13,36%	13,37%
	MÍN	13,10%	13,10%	13,10%	13,10%	13,10%
	MÁX	13,76%	13,75%	13,75%	13,75%	13,74%
	Fluxo no TE (MVA)	4321,0	4313,8	4315,1	4321,8	4317,7

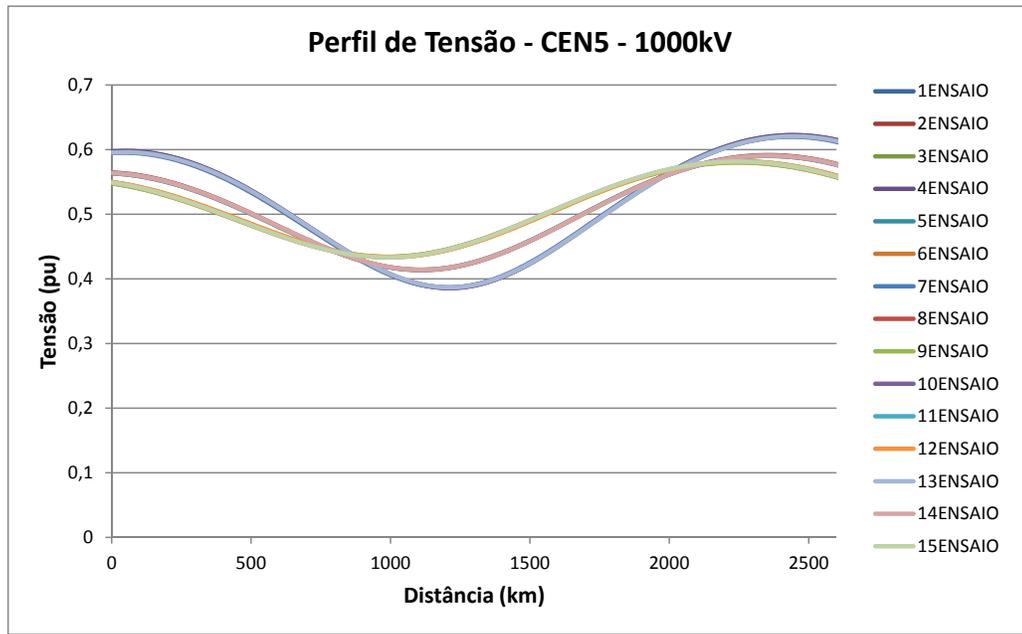


Figura 5.9: Perfil de tensão nos 15 ensaios do Cenário 5 (T.Altamira em  $l = 0$ ).

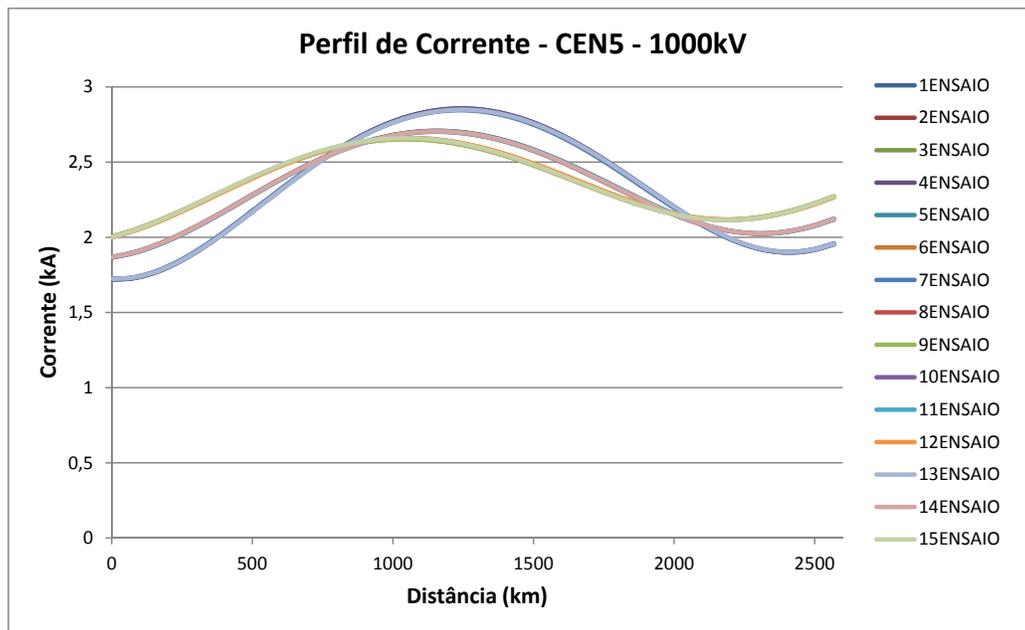


Figura 5.10: Perfil de corrente nos 15 ensaios do Cenário 5 (T.Altamira em  $l = 0$ ).

### 5.2.6 Cenário 6

Este cenário, assim como nos ensaios dos troncos de 800kV, por ser de carga leve, apresenta facilidade na convergência. A mudança no valor da fase impactou muito pouco todos os aspectos analisados. As perdas médias mantiveram-se inalteradas, a convergência dos casos é total e os perfis de tensão e corrente encontram-se praticamente sobrepostos. Apenas uma diferença de pouco mais de 100MW no carregamento do tronco aparece como resultado da mudança da

defasagem dos PSTs.

Tabela 5.18: Ensaio para o Cenário 6 com fase do defasador em 145°.

CENÁRIO 6 - FASE 145°						
Shunt (MVAr)	115	105	95	85	75	
Tap ideal (pu)	1,904					
Convergência	100%	100%	100%	100%	100%	
PERDAS	MÉDIA	13,05%	13,05%	13,05%	13,05%	13,05%
	MÍN	12,97%	12,97%	12,97%	12,97%	12,97%
	MÁX	13,34%	13,34%	13,34%	13,33%	13,33%
Fluxo no TE (MVA)	6966,4	6967,9	6969,3	6970,7	6972,2	

Tabela 5.19: Ensaio para o Cenário 6 com fase do defasador em 150°.

CENÁRIO 6 - FASE 150°						
Shunt (MVAr)	115	105	95	85	75	
Tap ideal (pu)	1,904					
Convergência	100%	100%	100%	100%	100%	
PERDAS	MÉDIA	13,05%	13,05%	13,05%	13,05%	13,05%
	MÍN	12,97%	12,97%	12,97%	12,97%	12,97%
	MÁX	13,28%	13,28%	13,29%	13,29%	13,29%
Fluxo no TE (MVA)	6855,4	6856,7	6858,0	6859,2	6860,4	

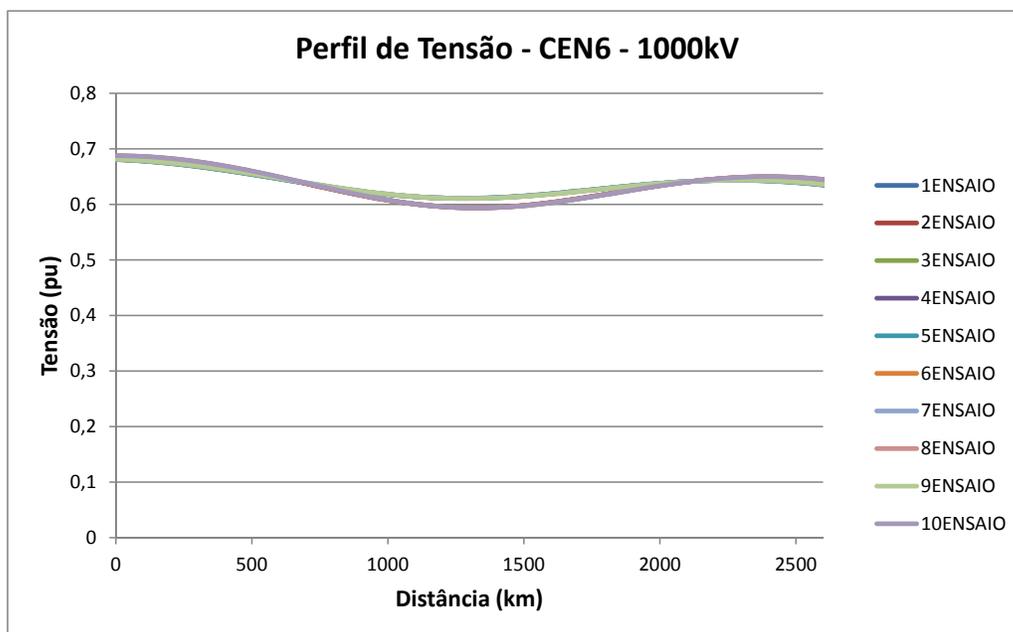


Figura 5.11: Perfil de tensão nos 15 ensaios do Cenário 6 (T.Altamira em  $l = 0$ ).

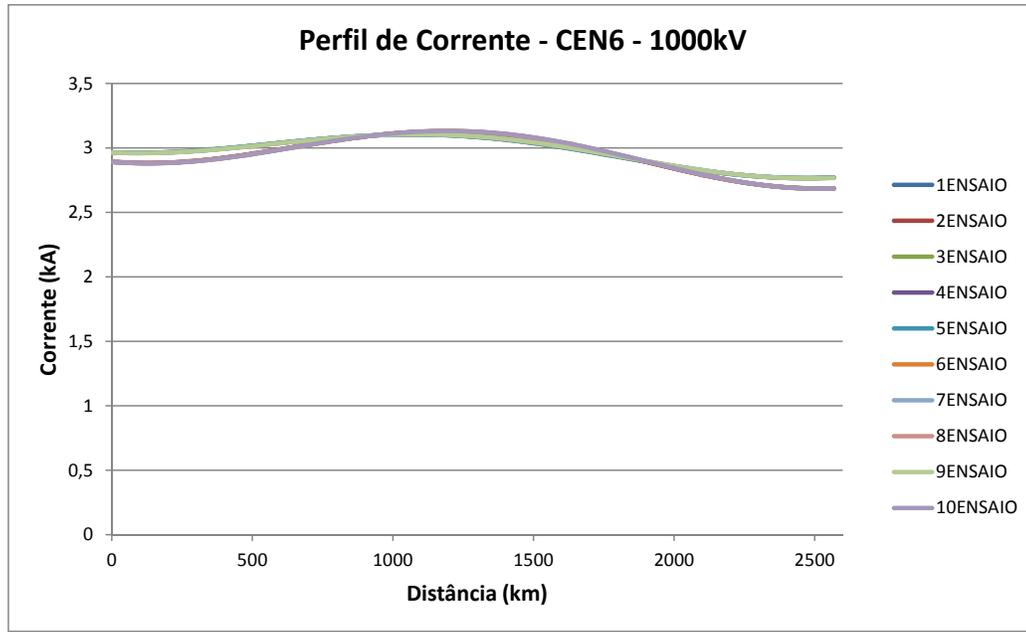


Figura 5.12: Perfil de corrente nos 15 ensaios do Cenário 6 (T.Altamira em  $l = 0$ ).

## 5.3 Impacto nas Tensões das Barras de Conexão

Na seção anterior foram analisados os resultados obtidos no que se refere às perdas, carregamento, convergência e perfis de tensão e corrente como consequências de alterações nos valores dos tapes e defasagem dos transformadores terminais, bem como do valor do reator shunt inserido no terminal de Assis. Nesta seção explora-se, assim como feito nos ensaios com troncos de 800 kV, como essas alterações impactam nas tensões das barras terminais.

As tabelas de 5.20 a 5.26 mostram as tensões terminais médias de cada cenário nos diversos ensaios. No intuito de verificar se o desvio da média é considerável, mostram-se também as tensões máximas e mínimas para cada ensaio (15 para cada cenário).

### 5.3.1 Cenário 1

Em relação à configuração com linhas de 800kV o primeiro cenário, cujas tensões terminais são mostradas na tabela 5.20, sofre modificações consideráveis quanto maior o carregamento (menor a defasagem). Para a defasagem do PST em  $155^\circ$  os valores das médias das tensões em ambos terminais reduz consideravelmente. O maior valor das médias na barra de Altamira equivale ao mínimo obtido na configuração com 3 linhas de 800kV, mostrado na tabela 4.5 e ainda menor que na configuração com 2 das mesmas linhas, tabela 4.8. Para este valor de defasagem, as tensões mínimas atingem valores não aceitáveis para operação normal de um nó da rede básica, chegando à 84,3% do valor nominal enquanto as máximas não chegam a ultrapassar 1% do valor nominal e as médias atingem valores aceitáveis para um cenário de longo prazo. A mesma análise pode ser feita para a defasagem em  $165^\circ$ , apesar das tensões mínimas na barra de Assis terem tido um leve aumento. Para os ensaios com defasagem em  $170^\circ$  e seguindo a tendência, percebe-se que o valor da tensões mínimas e da média no terminal

de Assis aumenta conforme aumenta-se o carregamento enquanto no terminal de Altamira todos os três valores são mantidos nos mesmos patamares.

É interessante notar que, novamente, o reator não mostra influência no impacto das tensões terminais. O fato é curioso dado que o suporte de reativos nos sistemas de potência (geralmente injetando reativos e não consumindo, como no caso) é um dos principais métodos de controle de tensão e será abordado melhor no cenário 4, no qual o terminal de Assis foi configurado pela própria EPE como uma barra PV.

Tabela 5.20: Tensões nas barras de conexão em pu para os ensaios do Cenário 1.

	CEN1		FASE 155°			FASE 165°			FASE 170°		
			MED	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX
Reator (MVar)	115	Altamira	0,985	0,924	1,009	0,985	0,966	1,003	0,988	0,968	1,006
		Assis	0,928	0,834	0,999	0,933	0,861	0,988	0,952	0,899	0,988
	105	Altamira	0,986	0,966	1,009	0,988	0,968	1,009	0,988	0,969	1,006
		Assis	0,929	0,841	1,000	0,945	0,862	1,000	0,956	0,899	0,989
	95	Altamira	0,984	0,924	1,009	0,988	0,968	1,010	0,988	0,968	1,006
		Assis	0,929	0,841	1,001	0,945	0,862	1,000	0,957	0,907	0,989
	85	Altamira	0,986	0,966	1,010	0,988	0,968	1,010	0,987	0,968	1,007
		Assis	0,931	0,839	1,001	0,944	0,863	1,001	0,957	0,908	0,990
	75	Altamira	0,985	0,966	1,010	0,988	0,969	1,010	0,986	0,968	1,007
		Assis	0,930	0,843	1,002	0,946	0,863	1,001	0,959	0,919	0,990

### 5.3.2 Cenário 2

Tabela 5.21: Tensões nas barras de conexão em pu para os ensaios do Cenário 2.

	CEN2		FASE 180°			FASE 187°			FASE 195°		
			MED	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX
Reator (MVar)	115	Altamira	1,088	1,033	1,111	1,090	1,070	1,109	1,093	1,072	1,111
		Assis	0,985	0,867	1,072	1,002	0,917	1,062	1,026	0,958	1,074
	105	Altamira	1,086	0,915	1,115	1,089	1,027	1,109	1,093	1,072	1,111
		Assis	0,987	0,871	1,073	1,002	0,909	1,062	1,025	0,956	1,075
	95	Altamira	1,088	1,041	1,111	1,090	1,070	1,109	1,093	1,072	1,111
		Assis	0,985	0,872	1,073	1,005	0,917	1,063	1,027	0,958	1,075
	85	Altamira	1,088	1,045	1,111	1,094	1,079	1,109	1,093	1,072	1,111
		Assis	0,985	0,867	1,074	0,997	0,918	1,062	1,027	0,966	1,076
	75	Altamira	1,087	0,976	1,111	1,090	1,071	1,109	1,099	1,085	1,111
		Assis	0,985	0,867	1,075	1,003	0,918	1,063	1,020	0,958	1,062

O cenário 2 volta a apresentar, assim como para as linhas de 800kV, tensões elevadas (acima de 10%) no terminal de Altamira para os valores máximos, indicando que é uma característica do cenário, de carga pesada do SIN e de maior carregamento do tronco. As médias, para ambos os terminais encontra-se em valores aceitáveis. Quanto às mínimas, apresenta a mesma característica do cenário 1, isto é, tensões abaixo de 90% na barra de Assis quando o carregamento é

maior e aumenta conforme diminui-se o carregamento da linha. Por fim, a mudança no valor de reativos consumidos pelo reator não aparenta causar impactos no valor das tensões terminais.

### 5.3.3 Cenário 3

Os resultados das tensões terminais no cenário 3 são mostrados na tabela 5.22. Neste cenário todos os valores de tensão terminal encontram-se dentro de limites toleráveis. O mesmo comportamento da relação entre carregamento e valor das tensões terminais apresentado nos cenários anteriores pode ser verificado aqui, mas muito mais sutil. De fato, com o aumento da fase há aumento do carregamento (neste cenário o subsistema Norte é importador) e pequena diminuição no valor das tensões em ambos os terminais.

Neste cenário, com a diminuição do valor do reator pode-se constatar um sutil aumento nas tensões do terminal de Assis, no entanto a diferença encontra-se na terceira casa decimal, considerado desprezível. Embora a diferença seja pequena, tal pode dar margem à futuras investigações, trabalhando com variações maiores dos reativos consumidos ou injetados nas barras terminais.

Tabela 5.22: Tensões nas barras de conexão em pu para os ensaios do Cenário 3.

	CEN3		FASE 220°			FASE 230°			FASE 240°		
			MED	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX
Reator (MVA r)	115	Altamira	1,039	1,028	1,045	1,034	1,025	1,041	1,027	1,018	1,032
		Assis	1,027	0,994	1,064	1,019	0,984	1,053	1,009	0,984	1,037
	105	Altamira	1,039	1,028	1,045	1,034	1,025	1,041	1,027	1,019	1,033
		Assis	1,028	0,995	1,064	1,020	0,983	1,054	1,010	0,982	1,038
	95	Altamira	1,039	1,028	1,045	1,034	1,025	1,041	1,027	1,019	1,032
		Assis	1,030	0,996	1,065	1,021	0,983	1,055	1,012	0,986	1,040
	85	Altamira	1,039	1,028	1,045	1,033	1,024	1,041	1,027	1,019	1,033
		Assis	1,029	0,997	1,066	1,024	0,984	1,057	1,013	0,984	1,042
	75	Altamira	1,040	1,029	1,045	1,034	1,025	1,041	1,027	1,019	1,033
		Assis	1,030	0,998	1,064	1,023	0,985	1,057	1,013	0,985	1,043

### 5.3.4 Cenário 4

À priori os resultados para este cenário são mostrados na tabela 5.23. As mesmas observações feitas anteriormente sobre o reator podem ser feitas para este cenário, no entanto, não se apresentaram tensões fora de valores aceitáveis para qualquer dos ensaios, em boa parte graças à configuração da barra de Assis, a mais problemática, como PV.

Sobre a particularidade deste cenário, isto é a barra de Assis ter sido especificada como uma barra PV, com  $P = 0$  e  $V = 1,08pu$ , a tensão nesta se mantém constante<sup>2</sup>. Logo, a potência reativa  $Q$  gerada/consumida é obtida pela solução do fluxo de potência, não sendo mais nula como nos outros cenários e tendo-se ideia do quanto seria necessário para manter a tensão da barra fixa no valor configurado caso de fato houvesse suprimento de reativos na barra.

<sup>2</sup>O mesmo ocorre nos cenários com linhas de 800kV

Tabela 5.23: Tensões nas barras de conexão em pu para os ensaios do Cenário 4.

	CEN4		FASE 140°			FASE 147°			FASE 155°		
			MÉD	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX
Reator (MVar)	115	Altamira	1,058	1,051	1,063	1,059	1,053	1,065	1,061	1,054	1,066
		Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
	105	Altamira	1,058	1,051	1,063	1,059	1,053	1,065	1,061	1,054	1,066
		Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
	95	Altamira	1,058	1,051	1,063	1,059	1,053	1,065	1,061	1,054	1,066
		Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
	85	Altamira	1,058	1,051	1,063	1,059	1,053	1,065	1,061	1,054	1,066
		Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
	75	Altamira	1,058	1,051	1,063	1,059	1,053	1,065	1,061	1,054	1,066
		Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080

A tabela 5.24 mostra o valor dos reativos gerados na barra após a convergência do fluxo de carga para os 15 ensaios. Nele finalmente percebe-se a influência dos reatores, ao se mudar o valor deste, o valor da média dos reativos gerados aumenta em pouco mais de 10 MVar, sendo este valor a variação escolhida no valor do reator entre um ensaio e outro para a mesma defasagem dos PSTs. Ou seja, a variação escolhida para variação do reator,  $95 \pm 20 \text{ MVar}$ , mostra-se pequena perto do valor de reativos necessários para manter um nível adequado de tensão na barra terminal e esta pequena variação não demonstra ter algum impacto nos valores analisados nesta seção e na anterior.

De fato, também fica difícil entender a opção da EPE pela conexão deste reator na barra de Assis; inicialmente precisa-se suprir reativos, ou seja deveria-se inserir capacitores shunts ou algo que fizesse a mesma função; no mais, ao menos para este cenário, nem mesmo o valor em módulo não corresponde ao necessário para manutenção de uma tensão adequada na linha.

A situação descrita acima, então, pode significar a necessidade de suprimento de reativos, não para garantir um fator de potência próximo do unitário no intuito de aumentar a eficiência da linha, mas de garantir tensões aceitáveis nas barras de conexão do tronco de meia onda. A análise econômica feita anteriormente e que resultava num custo de implantação bastante inferior ao HVDC é um dos motivadores desta investigação, sendo assim, a discussão deve passar por um estudo dos custos de implantação de dispositivos FACTS, por exemplo, o qual foge ao escopo deste trabalho.

Tabela 5.24: Reativos gerados na barra de Assis (configurada como PV).

CEN4		FASE 140°			FASE 147°			FASE 155°		
		MÉD	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX
Reator (MVar)	115	1016,0	781,6	1299,2	936,7	702,6	1219,2	856,9	623,5	1138,5
	105	1004,3	769,9	1287,6	925,0	691,0	1207,5	845,2	611,9	1126,8
	95	992,7	758,2	1275,9	913,4	679,3	1195,8	833,5	600,2	1115,2
	85	981,0	746,6	1264,2	901,7	667,6	1184,2	821,9	588,5	1103,5
	75	969,4	734,9	1252,6	890,0	656,0	1172,5	810,2	576,9	1091,8

### 5.3.5 Cenário 5

Este cenário, assim como o terceiro é um cenário em que o subsistema Norte é importador e da mesma maneira tem uma característica que tende a corroborar a necessidade de se regular a tensão na barra de Assis. Nos cenários em que o Norte é exportador, nos ensaios para linhas de 1000kV, a barra de Assis apresenta baixas tensões. Nos cenários em que o fluxo se inverte a tensão não chega a cair para valores não toleráveis, mas, diferentemente dos ensaios para linhas de 800 kV nos cenários com Norte importador, a barra de Assis, então conectada no terminal de envio, apresenta tensão levemente superior à barra de Altamira, esta no terminal receptor. A situação se inverte nos ensaios deste capítulo para o Norte importador: a barra de Assis (envio) apresenta tensão inferior à de Altamira (receptor). Analisando os perfis de tensão mostrados em 5.5 e 5.9 percebe-se que na linha de meia onda propriamente dita não há esta inversão, ou seja o terminal emissor desta (conectado na barra de Assis) tem tensão superior ao terminal receptor, conectado na barra de Altamira.

Tabela 5.25: Tensões nas barras de conexão em pu para os ensaios do Cenário 5.

	CEN5		FASE 180°			FASE 187°			FASE 195°		
			MED	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX
Reator (MVAR)	115	Altamira	1,042	1,03	1,048	1,029	1,005	1,045	1,020	0,994	1,040
		Assis	1,045	1,033	1,054	1,032	0,995	1,064	1,020	0,974	1,045
	105	Altamira	1,042	1,035	1,048	1,030	1,008	1,045	1,019	0,995	1,040
		Assis	1,045	1,034	1,055	1,032	0,996	1,057	1,020	0,975	1,046
	95	Altamira	1,041	1,032	1,048	1,029	1,008	1,045	1,020	0,995	1,040
		Assis	1,047	1,035	1,056	1,033	0,997	0,997	1,020	0,976	1,047
	85	Altamira	1,042	1,031	1,048	1,029	1,008	1,046	1,020	0,995	1,040
		Assis	1,046	1,025	1,059	1,034	0,998	1,056	1,022	0,984	1,047
	75	Altamira	1,042	1,031	1,049	1,029	1,008	1,046	1,019	0,995	1,040
		Assis	1,046	1,025	1,059	1,035	0,998	1,057	1,024	0,994	1,048

### 5.3.6 Cenário 6

Este cenário apresenta as mesmas características de boa parte daqueles em que o subsistema Norte é exportador, mesmo sendo um cenário de carga leve do SIN. As tensões médias estão em valores adequados, com menos de 5% abaixo do valor nominal, assim como as máximas, não passando de 6%. As mínimas na barra de Assis voltam a ser problemáticas, em alguns casos ultrapassando os 10% do valor nominal. Novamente a alteração no valor do reator não indica nenhuma influência no valor das tensões terminais.

Tabela 5.26: Tensões nas barras de conexão em pu para os ensaios do Cenário 6.

	CEN6		FASE 145°			FASE 150°		
			MED	MIN	MAX	MÉD	MIN	MAX
Reator (M V A r)	115	Altamira	1,041	1,026	1,055	1,045	1,031	1,059
		Assis	0,964	0,891	1,027	0,976	0,906	1,039
	105	Altamira	1,041	1,026	1,055	1,045	1,031	1,059
		Assis	0,965	0,892	1,028	0,977	0,907	1,039
	95	Altamira	1,041	1,026	1,055	1,045	1,031	1,059
		Assis	0,965	0,892	1,029	0,977	0,907	1,040
	85	Altamira	1,041	1,026	1,055	1,045	1,031	1,059
		Assis	0,966	0,893	1,029	0,978	0,908	1,041
	75	Altamira	1,041	1,026	1,056	1,045	1,031	1,059
		Assis	0,967	0,893	1,030	0,979	0,909	1,041

## 5.4 Conclusões Parciais

Este capítulo, como dito anteriormente, trouxe algumas análises novas em relação ao anterior e afirmando as conclusões parciais do capítulo anterior, como a eficácia do controle da tensão operacional para redução das perdas.

Dentre as análises novas, a primeira delas é o estudo mais aprofundado do impacto da defasagem nos quesitos analisados, principalmente no que se refere ao carregamento, eficiência e impacto nas barras de conexão. Basicamente foi corroborado o analisado - de forma mais superficial - no capítulo anterior. Pode-se, assim como faz-se eventualmente em linhas de transmissão convencionais, lançar mão da defasagem dos PSTs como mecanismo de controle do carregamento da linha. Tal ferramenta também pode ser usada num controle das perdas, isto é, estando o valor da tensão operacional diferente do valor que implica na máxima eficiência, ao invés de se mudar o tap dos transformadores de conexão, pode-se optar por alterar o carregamento da linha. Ao se afirmar essa possibilidade assume o pressuposto da capacidade de mudança do tap de fase em carga, o que, sem o estudo apropriado de transformadores deste tipo e para a potência em questão ainda é meramente uma suposição.

O estudo das consequências da variação da defasagem dos PSTs trouxe como resultado a observação da necessidade de suprimento de reativos em algumas situações, nas quais a tensão na barra de Assis cai demasiadamente, em especial quando o carregamento é maior e o sentido do fluxo de potência é do Norte para o Sul. Apesar desta característica se apresentar na configuração do tronco com duas linhas de 1000kV e não se apresentar naquelas com linhas de 800kV, é difícil afirmar que esta queda de tensão na barra de Assis deve-se exclusivamente ao impacto da linha de meia onda de 1000kV, no sistema visto que o perfil de tensão nas linhas para todas as configurações mostra-se parecido e a média das tensões terminais na maioria dos cenários estar dentro de valores aceitáveis.

Além da fase, o estudo do reator traz algumas indicações e apontamentos, inclusive para estudos futuros. A variação sugerida mostrou-se pequena e insuficiente para causar qualquer tipo de impacto nos fatores analisados. A sua influência e até a confirmação dessa insuficiência

só se percebeu na análise dos reativos gerados na barra de Assis quando configurada como PV. Ali mostra-se que o montante de reativos necessários para causar alterações significativas é de ao menos uma ordem de grandeza maior do que a variação proposta de  $\pm 20\text{MVAR}$  em torno do valor central. Seu “impacto” se faz sentir com o aumento de cerca de  $10\text{MVAR}$  na média de geração de reativos em cada ensaio, aumento ocasionado para compensar o consumo dos reatores. Por fim, sobre este ponto, volta-se a questionar o porque da inserção deste reator quando o que se configura é justamente a necessidade do oposto.



## Inserção de Carga e Geração no intermediário das linhas

Parte da crítica que se faz a grandes obras de transmissão em longa distância em se tratando de HVDC é que a população atingida diretamente com a construção desta é impedida de fazer uso da energia que passa nas suas vizinhanças. Isto se dá porque a extração de potência em pontos intermediários da linha e mesmo a integração de pequenas usinas elétricas envolveria a construção e operação de uma estação retificadora/inversora, as quais costumam representar os maiores custos em tal obra.

Diferentemente do HVDC, a transmissão em meia onda permite pequenas extrações e inserções de potência em pontos intermediários da linha [19]. Também existem estudos tratando da retirada de potência em montantes maiores como em [10], [11], [13] e [20], usando FACTS. Nestes estudos o montante de potência chega a 1GW em uma linha de 1000kV e  $P_c = 8000MW$  operando a plena carga. No entanto, todas estas proposições fazem uso de eletrônica de potência em estações em pontos intermediários da linha. Como a proposta deste trabalho é justamente manter a competitividade da transmissão em meia onda dada, entre outras razões, pelo baixo custo de instalação, esta opção não será explorada. Além disso, no trabalho já citado, [19], faz-se uma prospecção das possíveis cargas ao longo da linha ou próximo desta numa conexão da UHE de Belo Monte ao Sudeste. Usando os dados do Censo de 2010 e consumo *per capita* brasileiro chega-se à conclusão que as maiores cidades próximas ao caminho do tronco de transmissão consumiria menos de 40MW, não justificando uma extração de 1GW, ao menos no curto prazo.

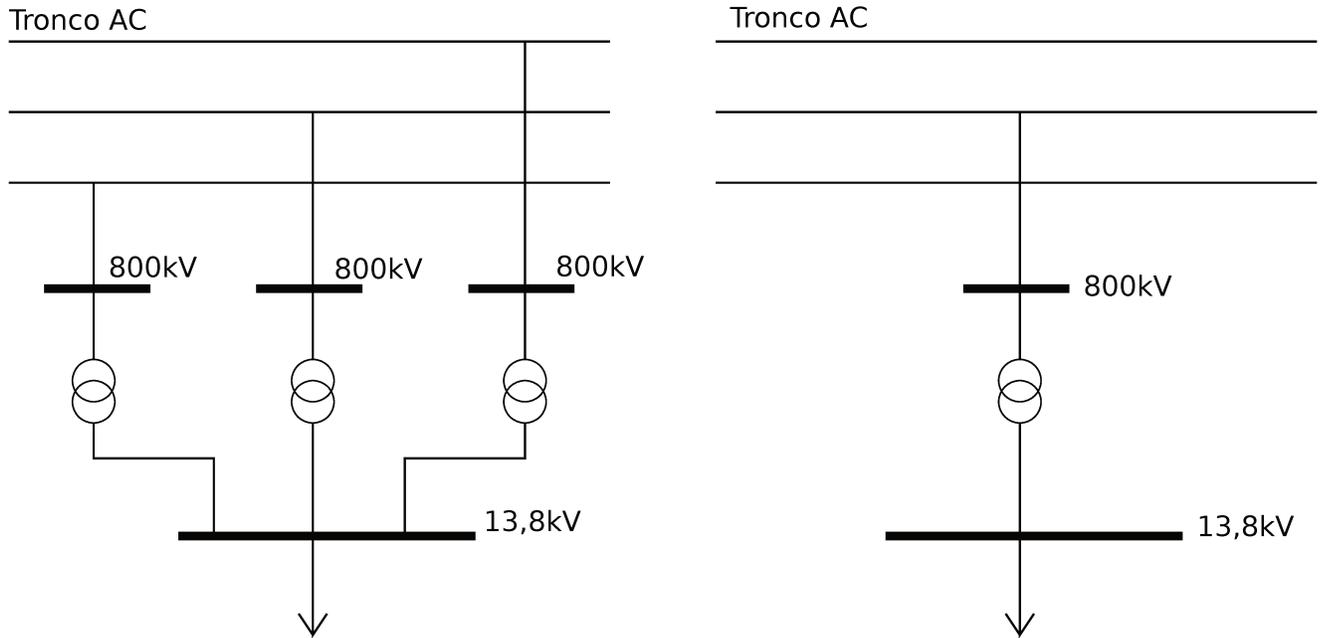
Dado o anteriormente exposto, este capítulo visa explorar a capacidade da linha de meia onda permitir pequena extração de potência em pontos intermediários dela, sem o uso de eletrônica de potência, e com o diferencial sobre o trabalho [19] de trabalhar com as linhas CA inseridas num sistema real e simulando diversos cenários de carregamento desta. Adicionalmente, explora-se a possível integração de PCHs ou usinas de bioenergia ao SIN através do tronco CA.

### 6.1 Metodologia

Entendendo que com a inserção de cargas ou usinas em pontos intermediários da linha necessita-se aumentar a robustez da linha e com o exposto nos outros capítulos sobre capacidade

de carregamento dos troncos, neste estudo optou-se por utilizar apenas as configurações de troncos de maior capacidade de potência, isto é, aquele com três linhas de 800kV e o com duas linhas de 1000kV.

Algumas variáveis devem ser levadas em consideração ao se pensar os casos a serem estudados. A primeira é o número de circuitos paralelos, pois a extração pode ser realizada de apenas uma das linhas ou do conjunto delas conforme indica a figura 6.1, cuja configuração é análoga para as linhas de 1000kV, mas com apenas dois circuitos paralelos ao invés de três.



(a) Extração de potência de todos os circuitos.

(b) Extração de potência de apenas um circuito.

Figura 6.1: Duas formas de conexão de cargas em pontos intermediários.

Apesar das vantagens e desvantagens de cada opção, discutidas na última seção deste capítulo, por se tratar de um estudo exploratório optou-se por abordar as duas formas, inclusive com o intuito de ter um parâmetro de comparação, podendo melhor basear uma opção dentre as duas possíveis.

Outra questão a ser pensada no estudo é o valor do nível de tensão a ser escolhido. No caso de extração de potência, o tipo de carga a ser abastecida teria um caráter mais residencial, no máximo industrial de pequeno porte, para os quais o valor de 13,8kV é bastante adequado. No caso de geração, que se daria com pequenas PCHs ou usinas de bagaço de cana, este nível de tensão também mostra-se adequado, sendo assim optou-se por tal valor. Na conexão da barra intermediária, de carga/geração, colocou-se apenas um transformador de 800/13,8kV, muito provavelmente, numa aplicação real, seriam necessários dois estágios de redução da tensão; mas, para o programa de fluxo de carga, com exceção da impedância dos trafos, isto é irrelevante.

Uma terceira questão a ser tratada é o montante de potência a ser extraída/injetada. Isto depende inicialmente do tipo de carga ou geração que será instalada. Conforme referência já citada, [19], faz-se ali um breve prospecto das possíveis cargas nos pontos intermediários da

linha, não passando dos 40MW. Quanto à geração, pensando na conexão de uma PCH, sabe-se que estas, pela definição, têm potência instalada inferior à 30MW; ainda assim há a possibilidade de integração de um conjunto destas ou mesmo de um conjunto de térmicas e PCHs. Em se tratando de um estudo exploratório e no intuito de estabelecer os possíveis limites de uma possível extração ou injeção de potência usaram-se os parâmetros reais como limites inferiores ao invés de superiores e selecionaram-se 4 valores de potência a ser injetada ou inserida: 50MW, 100MW, 200MW e 300MW. Nos estudos de extração de potência citados acima a linha opera na sua potência nominal, aqui, entendendo que a integração de uma carga ou uma usina através do tronco CA não é uma situação sazonal e deve ser garantido o suprimento de energia ou o canal de escoamento dela, esta situação em geral não acontece e esses valores podem significar um percentual considerável do carregamento.

O quarto e último fator aqui considerado foi a posição de extração ou injeção de potência. Adotaram-se aqui 3 posições intermediárias para conexão dos transformadores: em um quarto da linha, ou seja em 661km; no meio desta, em 1322km e no terceiro quarto, em 1983km. A posição central é a mais crítica dado que a tensão varia mais neste ponto e, novamente, os transformadores nas subestações intermediárias precisam ter possibilidade de grande variação no tap. Ainda sobre a variação de tensão, como esta é ajustada dependendo do carregamento da linha, mesmo que tivesse um perfil totalmente plano, ainda assim os transformadores de conexão em pontos intermediários deveriam suportar uma grande variação de tensão no primário e provavelmente este seja um dos principais pontos que levaram os trabalhos citados acima a investigarem a extração de potência usando eletrônica.

Após os ensaios os parâmetros observados foram em essência os mesmos observados anteriormente, isto é, perfis de tensão e corrente; carregamento das linhas; eficiência e tensão nas barras terminais. Os resultados obtidos tem como base de comparação os chamados "casos base"<sup>1</sup>, um para cada cenário e configuração de tronco e que constituem-se de um caso com tap ajustado para obter eficiência próxima aos melhores resultados obtidos nos capítulos 4 e 5, e defasagem ajustada para obter carregamento próximo ao da tabela 3.2. Por fim, outro parâmetro analisado foi a tensão na barra de conexão da carga ou geração, tendo em vista que, em se tratando de injeção de potência, a barra foi configurada como PV com faixa de variação de  $\pm 3\%$ .

## 6.2 Conexão em Todas as Linhas

Esta seção apresenta os resultados obtidos para a opção de se extrair ou injetar potência de/em todos os ramos paralelos do tronco CA. Como será visto, alguns resultados diferem substancialmente dos obtidos para opção de conexão em apenas um dos ramos do tronco de meia onda, apresentados na seção seguinte. A apresentação subdivide-se entre as duas configurações dos troncos, apresentando os dados referentes à cada ponto de extração escolhido.

---

<sup>1</sup>As colunas "Base" nas tabelas que seguem no capítulo referem-se a tais cenários.

## 6.2.1 Linhas de 800kV

Esta subseção apresenta os ensaios com conexão intermediária nas três linhas do tronco meia onda de 800kV. Será visto adiante que os resultados obtidos diferem pouco qualitativamente e mesmo quantitativamente entre os pontos onde a extração ou injeção de carga é feito. Neste sentido, o conjunto de tabelas e gráficos apresentados tem muito mais o intuito de corroborar as análises do que de fato diferenciar uma situação da outra, exceto nas poucas situações em que isto se faz necessário.

### 6.2.1.1 Eficiência

Para o cálculo das perdas foi utilizada a equação (6.1) para os casos de injeção de potência no intermediário da linha e a equação (6.2) para os casos de extração de potência nestes pontos. Isto é, a potência injetada entrou no cálculo da eficiência das linhas.

$$\eta_{Inj} = \frac{Perdas}{P_{TEmissor} + P_{Inj}} \quad (6.1)$$

$$\eta_{Ext} = \frac{Perdas}{P_{TEmissor}} \quad (6.2)$$

sendo  $P_{TEmissor}$  a potência no terminal emissor da linha e  $P_{Inj}$  a potência injetada na conexão central.

Como é de esperar, em ambos os casos a eficiência tende a aumentar conforme aumenta-se a potência injetada ou extraída dado que estas parcelas de potência passarão por uma trecho menor de linha para chegar ao seu destino do que na situação em que a potência é injetada em um terminal e é extraída apenas no outro. As tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 apresentam as perdas quando a conexão intermediária é feita no primeiro quarto da linha, no meio desta e no terceiro quarto, respectivamente e tendo como referência o terminal de Altamira. Nestas tabelas, pode-se observar o efeito descrito.

Tabela 6.1: Perdas para Injeção/Extração na barra 9 em três linhas de 800kV.

	PERDAS - BARRA 09 - 3X800KV								
	Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
	50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	12,54%	12,51%	12,46%	12,40%	12,51%	12,45%	12,33%	12,21%	12,57%
<b>CEN2</b>	12,42%	12,40%	12,35%	12,30%	12,39%	12,33%	12,22%	12,10%	12,45%
<b>CEN3</b>	12,28%	12,08%	11,72%	11,37%	12,39%	12,33%	12,22%	12,16%	12,48%
<b>CEN4</b>	12,26%	12,01%	11,66%	11,48%	12,25%	11,94%	11,39%	10,96%	12,58%
<b>CEN5</b>	12,66%	12,57%	12,40%	12,23%	12,68%	12,62%	12,52%	12,42%	12,74%
<b>CEN6</b>	12,35%	12,32%	12,27%	12,22%	12,32%	12,27%	12,16%	12,05%	12,38%

Tabela 6.2: Perdas para Injeção/Extração na barra 18 em três linhas de 800kV.

PERDAS - BARRA 18 - 3x800kV									
	Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
	50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	12,53%	12,49%	12,42%	12,35%	12,52%	12,46%	12,36%	12,26%	12,57%
<b>CEN2</b>	12,41%	12,38%	12,33%	12,27%	12,39%	12,34%	12,24%	12,14%	12,45%
<b>CEN3</b>	12,30%	12,14%	11,86%	11,63%	12,37%	12,29%	12,18%	12,11%	12,48%
<b>CEN4</b>	11,80%	11,52%	11,31%	11,44%	12,16%	12,65%	12,65%	13,67%	12,58%
<b>CEN5</b>	12,67%	12,59%	12,45%	12,34%	12,67%	12,61%	12,71%	12,67%	12,74%
<b>CEN6</b>	12,34%	12,30%	12,23%	12,16%	12,33%	12,29%	12,21%	12,13%	12,38%

Tabela 6.3: Perdas para Injeção/Extração na barra 27 em três linhas de 800kV.

PERDAS - BARRA 27 - 3x800kV									
	Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
	50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	12,53%	12,49%	12,43%	12,38%	12,51%	12,46%	12,36%	12,27%	12,57%
<b>CEN2</b>	12,40%	12,35%	12,26%	12,18%	12,41%	12,37%	12,31%	12,24%	12,45%
<b>CEN3</b>	12,34%	12,22%	12,00%	11,82%	12,33%	12,19%	11,94%	11,73%	12,48%
<b>CEN4</b>	12,11%	11,69%	10,98%	10,41%	12,41%	12,31%	12,33%	12,65%	12,58%
<b>CEN5</b>	12,70%	12,65%	12,56%	12,48%	12,64%	12,54%	12,36%	12,18%	12,74%
<b>CEN6</b>	12,33%	12,28%	12,19%	12,10%	12,35%	12,32%	12,26%	12,21%	12,38%

Nos cenários de menor carregamento o efeito de melhora da eficiência é mais sentido dado que o montante de potência extraída/injetada nos pontos intermediários - e que então deixa percorrer toda a linha - representa um percentual maior do que nos cenário de maior carregamento. Vale ressaltar que a melhora na eficiência poucas vezes é de um percentual expressivo, ficando em geral muito próxima àquela dos cenários base.

### 6.2.1.2 Carregamento

As tabelas 6.4, 6.5 e 6.6 apresentam o carregamento no tronco para os casos de injeção e extração de potência nos diferentes cenários feitos nas barras 9, 18 e 27, respectivamente. Notam-se duas situações distintas. No casos em que injeta-se potência no meio do tronco o carregamento deste no terminal emissor diminui conforme aumenta-se a quantidade injetada. Nos casos de extração de potência o inverso ocorre, o carregamento do tronco aumenta no sentido de suprir a demanda de potência adicional inserida no meio deste. Este efeito mostra-se mais acentuado nos cenários de menor carregamento.

Vale notar que o efeito não é direto, isto é, o montante de potência adicional extraída no meio da linha não corresponde exatamente ao aumento do carregamento no terminal emissor, assim como o montante de potência injetada nos pontos intermediários da linha corresponde àquele que deixou de ser injetado no terminal emissor.

Tabela 6.4: Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 9 em três linhas de 800kV.

CARREGAMENTO (MW) - BARRA 09 - 3x800kV									
	Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
	50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	6791,1	6790,5	6793,2	6794,4	6789,6	6788,8	6787,2	6784,9	6790,6
<b>CEN2</b>	7315,7	7315,3	7313,1	7311,8	7316,9	7317,5	7318,7	7319,1	7317,1
<b>CEN3</b>	2133,1	2076,9	1964,8	1850,9	2245,8	2302,2	2414,8	2526,6	2188,8
<b>CEN4</b>	880,9	870,2	848,6	826,5	901,8	912,0	932,7	952,9	891,1
<b>CEN5</b>	4191,1	4138,8	4034,0	3930,9	4296,2	4349,4	4454,8	4564,4	4243,6
<b>CEN6</b>	7204,8	7203,8	7203,5	7202,6	7200,9	7201,5	7202,5	7203,5	7204,8

Tabela 6.5: Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 18 em três linhas de 800kV.

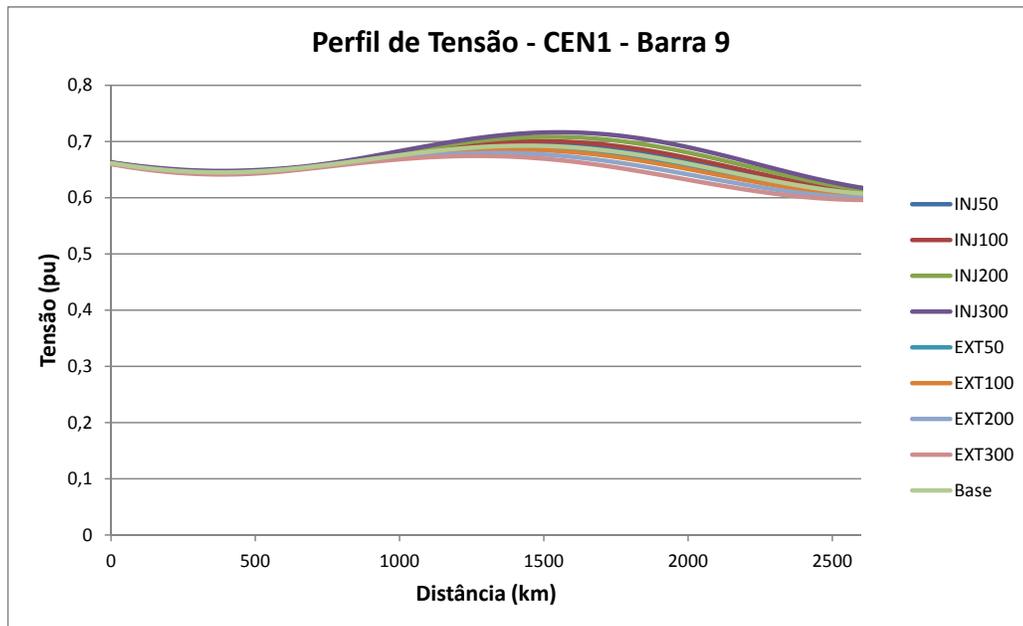
CARREGAMENTO (MW) - BARRA 18 - 3x800kV									
	Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
	50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	6783,4	6776,3	6761,7	6753,2	6795,2	6801,0	6811,9	6821,9	6790,6
<b>CEN2</b>	7315,1	7309,2	7282,6	7267,5	7318,0	7319,1	7320,0	7320,1	7317,1
<b>CEN3</b>	2153,6	2113,7	2030,1	1935,4	2219,6	2251,7	2310,2	2363,4	2188,8
<b>CEN4</b>	883,8	865,6	799,4	699,7	888,5	821,6	821,6	728,6	891,1
<b>CEN5</b>	4197,9	4154,3	4064,7	3971,8	4286,3	4329,0	4412,4	4490,4	4243,6
<b>CEN6</b>	7199,8	7199,0	7186,7	7173,9	7205,2	7209,9	7218,6	7226,6	7204,8

Tabela 6.6: Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 27 em três linhas de 800kV.

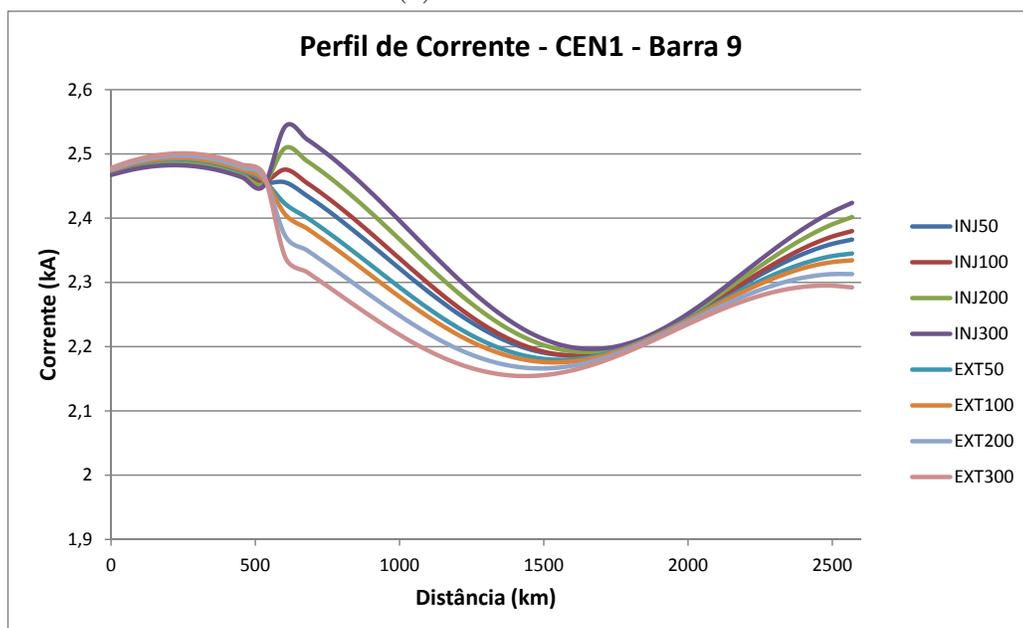
CARREGAMENTO (MW) - BARRA 27 - 3x800kV									
	Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
	50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	6765,9	6748,8	6697,5	6645,0	6814,4	6838,4	6888,4	6935,7	6790,6
<b>CEN2</b>	7301,1	7281,4	7241,1	7201,1	7335,9	7355,4	7394,4	7433,3	7317,1
<b>CEN3</b>	2173,9	2158,9	2128,7	2099,1	2205,0	2220,7	2251,4	2276,2	2188,8
<b>CEN4</b>	844,2	797,5	705,1	613,9	938,7	986,9	1084,4	1184,3	891,1
<b>CEN5</b>	4214,3	4185,3	4128,0	4070,8	4273,0	4307,4	4367,5	4443,8	4243,6
<b>CEN6</b>	7179,0	7164,9	7122,8	7079,8	7198,2	7219,5	7262,0	7304,6	7204,8

### 6.2.1.3 Perfis de Tensão e Corrente

A seguir são mostrados os perfis de tensão e corrente ao longo das linhas de 800kV quando há extração ou inserção de potência ao longo da linha. Não sentiu-se necessidade de colocar aqui todos os perfis obtidos dado que qualitativamente são muito próximos, variando conforme a barra de extração e o carregamento do tronco.



(a) Perfil de tensão.

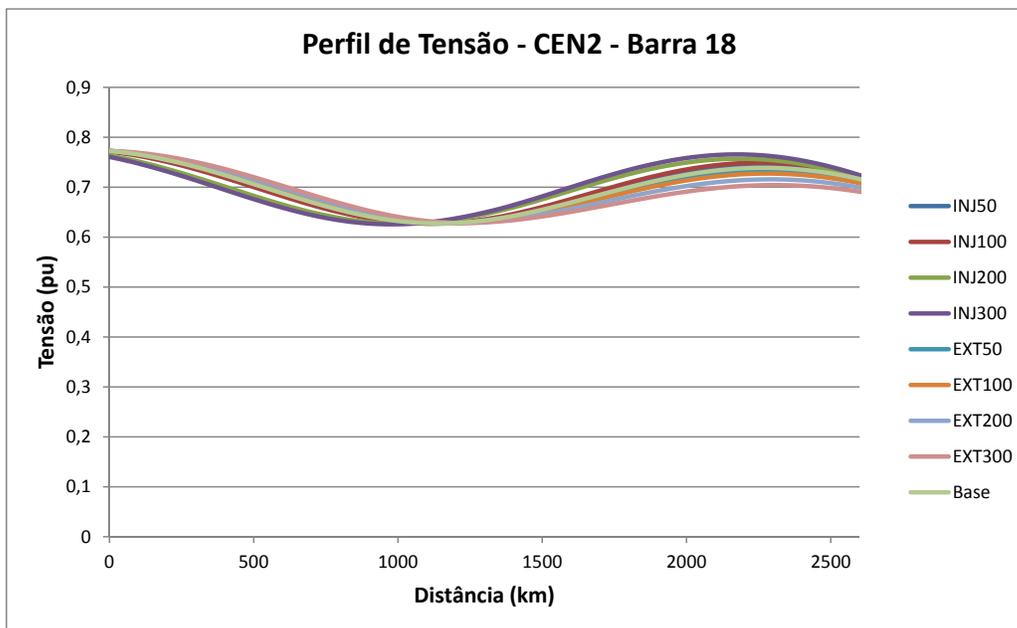


(b) Perfil de corrente.

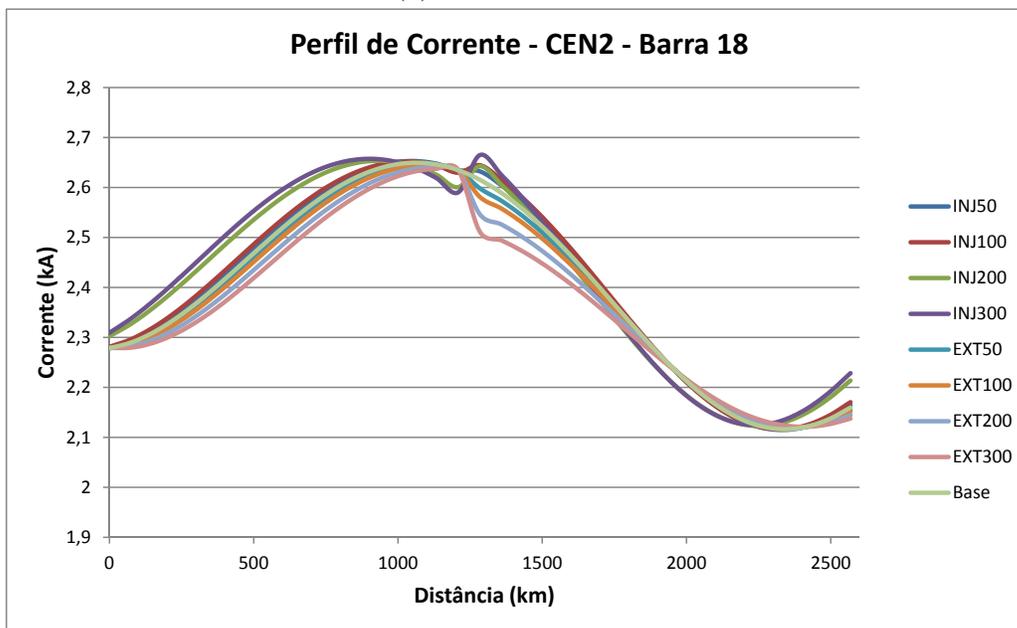
Figura 6.2: Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 9 em 3 linhas de 800kV no cenário 1.

A figura 6.2a mostra o perfil de tensão para conexão na barra 9 no cenário 1. Percebe-se uma leve perturbação na tensão, aparentemente todos os casos seguem um mesmo perfil antes do ponto de conexão até que se afastam levemente após este sem resultar em sobretensões ou modificações expressivas nas tensões terminais. A figura 6.2b mostra o perfil de corrente, o qual já demonstra uma perturbação bastante visível tendo em conta que a barra de carga/geração intermediária é mantida em torno de 1pu, sendo o transformador de conexão ajustado para "seguir" a tensão do ponto da linha onde é conectado. Desta maneira a potência adicional

extraída ou injetada compensa-se na corrente e entende-se o porque da maior alteração nesta e menor na tensão. De qualquer forma a alteração ocorre como um pico de cerca de  $0,1kA$  para injeção de  $300MW$  e uma queda de cerca de  $1,5kA$  para extração de  $300MW$ , pouco para os cerca de  $2,45kA$  do caso base no ponto de conexão.



(a) Perfil de tensão.

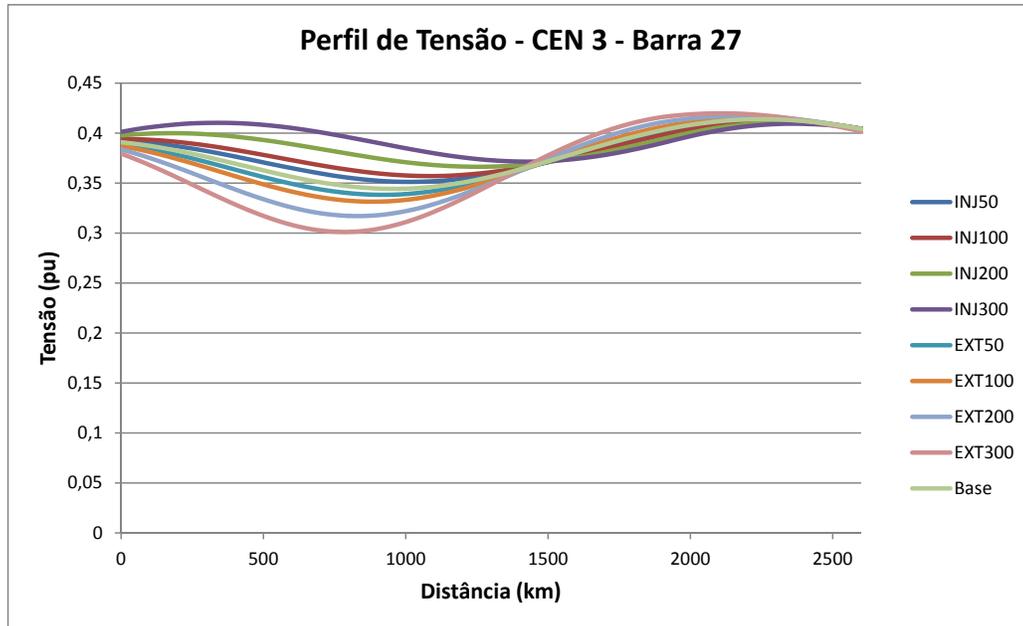


(b) Perfil de corrente.

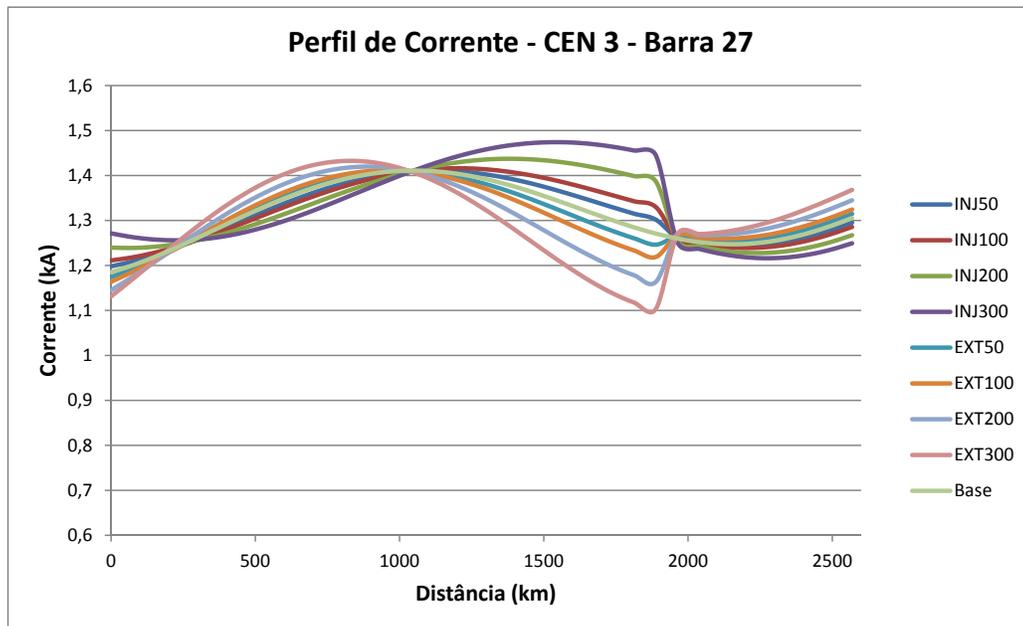
Figura 6.3: Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 18 em 3 linhas de  $800kV$  no cenário 2.

Os perfis da figura 6.3 são para conexão na barra 18, no centro da linha no cenário 2, de alto carregamento do tronco CA. Percebe-se situação parecida à anterior, pequena perturbação

na tensão, desta vez com impactos antes e depois do ponto de conexão. Na corrente também a mesma situação, um pico para os casos de injeção e um afundamento para os casos de extração, representando pouco perto da corrente total dado que trata-se de um caso de baixo carregamento.



(a) Perfil de tensão.

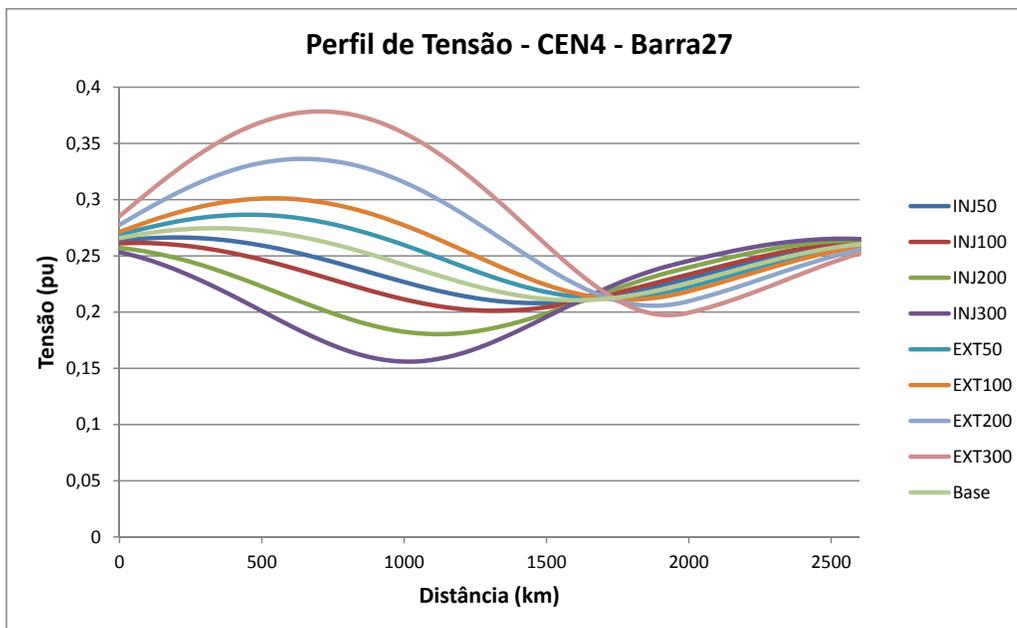


(b) Perfil de corrente.

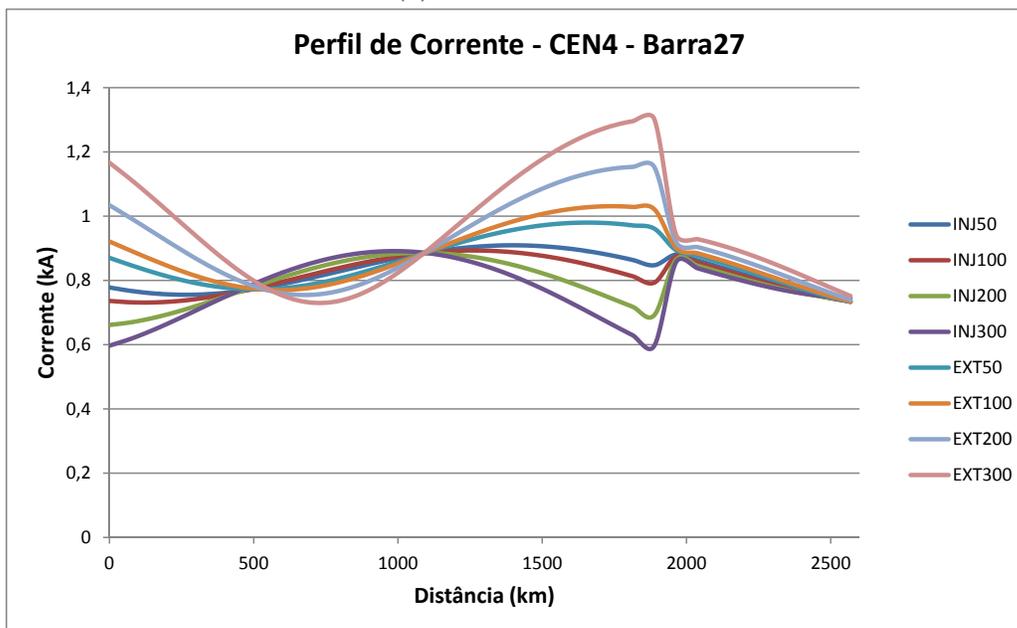
Figura 6.4: Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 27 em 3 linhas de 800kV no cenário 3.

Os perfis de tensão e corrente mostrados na figura 6.4 referem-se ao cenário 3, de baixo carregamento do tronco CA, e com ponto de conexão no quarto de linha mais próximo da barra

de Assis. Este cenário, além de baixo carregamento do tronco é um cenário em que o subsistema Norte é importador. Não por este motivo, como será visto a seguir, mas pelo fato de estar com baixo carregamento do tronco, as perturbações na tensão e na corrente são maiores.



(a) Perfil de tensão.



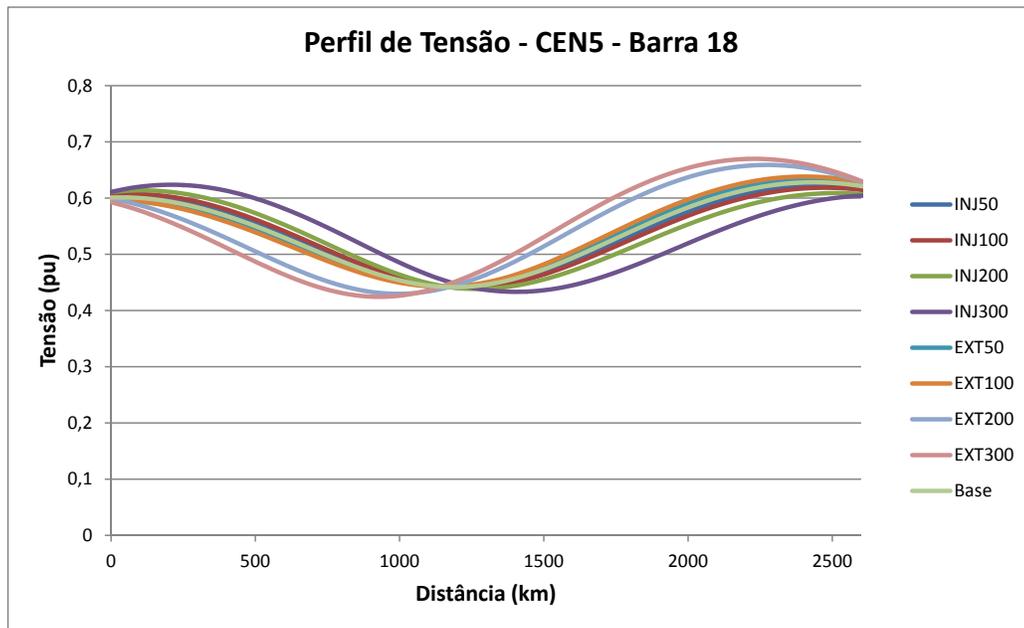
(b) Perfil de corrente.

Figura 6.5: Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 27 em 3 linhas de 800kV no cenário 4.

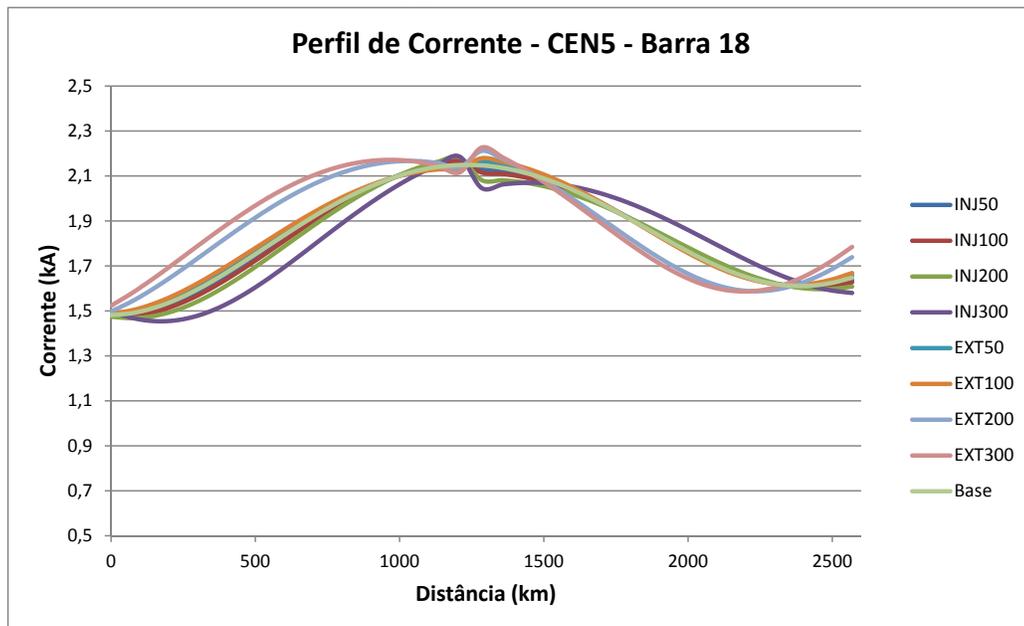
A figura 6.5 também mostra os perfis de um cenário de baixo carregamento, mas com o subsistema Norte como exportador. Novamente percebe-se uma perturbação expressiva na tensão e, principalmente, na corrente. Como a potência injetada ou extraída é a mesma para

todos os cenários, o pico ou afundamento da corrente é aproximadamente o mesmo em termos absolutos em todos eles, mas percentualmente muito maior nos cenários de baixo carregamento.

Outro problema recorrente nos casos de baixo carregamento é a necessidade de fazer ajustes constantes no transformador de conexão, principalmente quando conectado na barra 18 e nos casos de extração de potência, pois neste ponto a tensão varia mais conforme aumenta-se a carga adicional instalada no intermediário da linha .



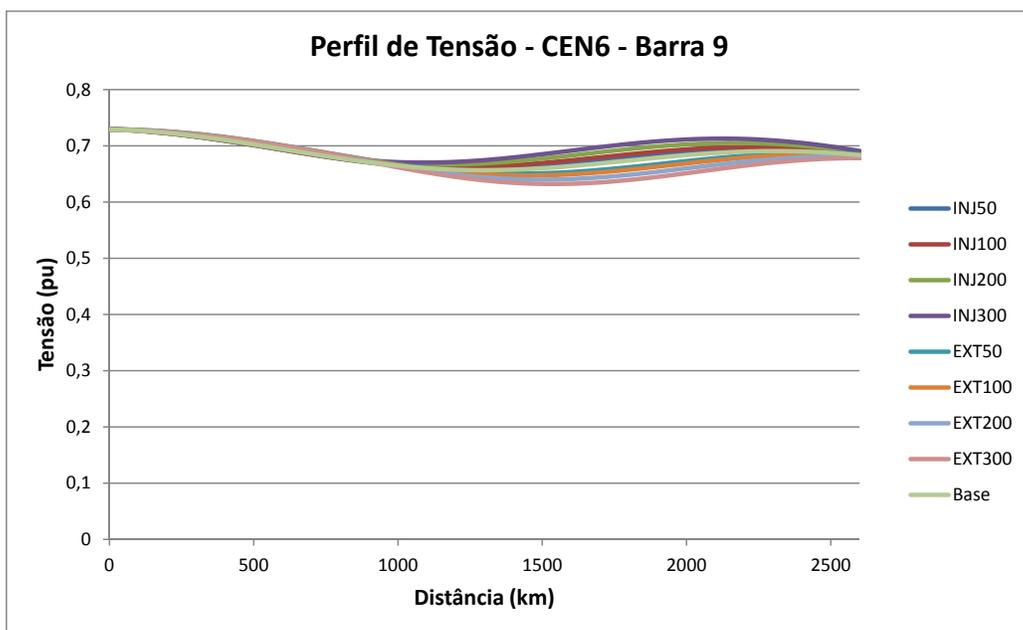
(a) Perfil de tensão.



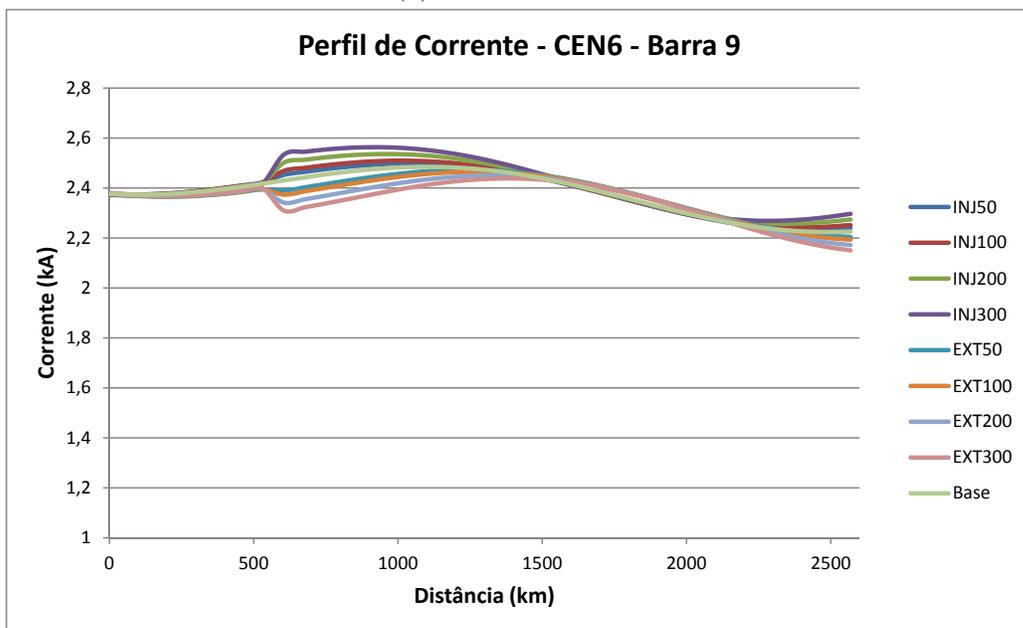
(b) Perfil de corrente.

Figura 6.6: Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 18 em 3 linhas de 800kV no cenário 5.

Os cenários 5 e 6 não apresentam novidades quanto ao perfil de tensão, mesmo tratando de casos não tratados, isto é, um cenário com Norte importador com carregamento médio do tronco CA e um cenário de carga leve do SIN, respectivamente. As figuras 6.6 e 6.7 ilustram os perfis de tensão e corrente nestes cenários para extração/injeção nas barras 18 e 9, respectivamente.



(a) Perfil de tensão.



(b) Perfil de corrente.

Figura 6.7: Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 9 em 3 linhas de 800kV no cenário 6.

### 6.2.1.4 Impacto nas Tensões Terminais e Central

Apresenta-se aqui os valores das tensões nos terminais de conexão do tronco de meia onda obtidos nos ensaios com conexão intermediária. As tabelas 6.8, 6.9 e 6.10 correspondem aos ensaios com injeção/extração nas barras 9, 18 e 27, respectivamente.

Com exceção do cenário 1, que vinha apresentando baixas tensões no terminal de Assis, todas as outras tensões terminais encontram-se em valores normais. As tensões apresentadas também seguem certo padrão conforme a barra em que se extrai e o tipo de cenário, esses padrões e tendência são mostrados na tabela 6.7. Vale notar que alguns poucos valores de tensão fogem destas tendências, mas trata-se de situações em que teve-se que flexibilizar os tapes dos transformadores de conexão ao SIN para obter a convergência do caso.

Tabela 6.7: Tendência das tensões nos terminais conforme barra de extração e tipo de cenário.

TIPO		TERMINAL	Tendência da Tensão		
			Barra 9	Barra 18	Barra 27
NORTE EXPORTADOR	Aumento Injeção	Assis	Aumento	Aumento	Diminuição
		Altamira	Constante	Diminuição	Diminuição
	Aumento Extração	Assis	Diminuição	Diminuição	Aumento
		Altamira	Constante	Aumento	Aumento
NORTE IMPORTADOR	Aumento Injeção	Assis	Diminuição	Diminuição	Aumento
		Altamira	Constante	Aumento	Aumento
	Aumento Extração	Assis	Aumento	Aumento	Diminuição
		Altamira	Constante	Diminuição	Diminuição

Tabela 6.8: Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 9 em três linhas de 800kV.

		TENSÕES TERMINAIS (PU) - BARRA 09 - 3x800kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	Assis	0,897	0,899	0,903	0,905	0,894	0,892	0,889	0,886	0,895
	Altamira	0,987	0,987	0,987	0,987	0,986	0,986	0,986	0,985	0,987
CEN2	Assis	0,986	0,989	0,991	0,994	0,984	0,983	0,980	0,977	0,985
	Altamira	1,096	1,095	1,096	1,096	1,095	1,095	1,095	1,095	1,096
CEN3	Assis	1,027	1,025	1,022	1,019	1,029	1,031	1,033	1,034	1,030
	Altamira	1,032	1,032	1,033	1,033	1,031	1,031	1,030	1,030	1,032
CEN4	Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
	Altamira	1,062	1,061	1,061	1,060	1,062	1,062	1,063	1,063	1,062
CEN5	Assis	1,046	1,046	1,044	1,040	1,048	1,048	1,049	1,050	1,046
	Altamira	1,041	1,041	1,041	1,044	1,041	1,040	1,040	1,039	1,040
CEN6	Assis	1,005	1,006	1,008	1,010	0,993	0,992	0,990	0,988	1,003
	Altamira	1,052	1,052	1,052	1,052	1,054	1,054	1,054	1,054	1,051

Tabela 6.9: Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 18 em três linhas de 800kV.

		TENSÕES TERMINAIS (PU) - BARRA 18 - 3x800kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	Assis	0,898	0,900	0,904	0,911	0,893	0,890	0,885	0,880	0,895
	Altamira	0,986	0,985	0,983	0,981	0,987	0,988	0,990	0,992	0,987
CEN2	Assis	0,989	0,992	1,002	1,006	0,981	0,977	0,968	0,959	0,985
	Altamira	1,095	1,094	1,088	1,086	1,097	1,097	1,099	1,101	1,096
CEN3	Assis	1,024	1,018	1,007	0,993	1,036	1,040	1,047	1,053	1,030
	Altamira	1,033	1,035	1,038	1,042	1,030	1,028	1,024	1,021	1,032
CEN4	Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
	Altamira	1,060	1,057	1,053	1,049	1,064	1,070	1,070	1,073	1,062
CEN5	Assis	1,043	1,039	1,032	1,002	1,050	1,053	1,080	1,088	1,046
	Altamira	1,043	1,045	1,049	1,061	1,039	1,036	1,019	1,011	1,040
CEN6	Assis	1,006	1,010	1,015	1,019	0,991	0,989	0,984	0,979	1,003
	Altamira	1,050	1,049	1,048	1,046	1,055	1,056	1,058	1,060	1,051

Tabela 6.10: Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 27 em três linhas de 800kV.

		TENSÕES TERMINAIS (PU) - BARRA 27 - 3x800kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	Assis	0,894	0,894	0,889	0,885	0,897	0,899	0,902	0,904	0,895
	Altamira	0,985	0,984	0,981	0,978	0,988	0,989	0,992	0,995	0,987
CEN2	Assis	0,985	0,984	0,981	0,978	0,986	0,987	0,990	0,992	0,985
	Altamira	1,094	1,093	1,091	1,089	1,097	1,098	1,100	1,102	1,096
CEN3	Assis	1,028	1,029	1,030	1,030	1,028	1,027	1,025	1,020	1,030
	Altamira	1,033	1,034	1,036	1,038	1,030	1,029	1,027	1,024	1,032
CEN4	Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
	Altamira	1,061	1,059	1,057	1,056	1,063	1,065	1,068	1,071	1,062
CEN5	Assis	1,049	1,050	1,053	1,055	1,045	1,043	1,038	1,032	1,046
	Altamira	1,043	1,044	1,048	1,051	1,039	1,037	1,033	1,028	1,040
CEN6	Assis	0,993	0,994	0,991	0,988	0,981	0,983	0,985	0,988	1,003
	Altamira	1,053	1,052	1,049	1,047	1,058	1,060	1,062	1,064	1,051

Por fim, faz-se um breve comentário sobre as tensões na barra em que se conecta a carga ou a geração. Não se observaram tendências de aumento ou diminuição conforme a potência extraída, inclusive pelo fato de ter se configurado estas barras como PV. Já no caso de extração de potência, nos quais as barras são configuradas como PQ, as tensões ficaram muito próximas de 1pu, com variações que não passam de 2% do valor nominal; esta situação só é excedida no cenário 4, com extração na barra 18, conforme comentado anteriormente, caso no qual teve-se

que ajustar o tap do transformador de conexão para cada aumento da carga inserida.

## 6.2.2 Linhas de 1000kV

Nos ensaios para linhas de 1000kV, após a observação de baixas tensões na barra de Assis e a constatação que o provável motivo era a falta de suprimento de reativos, conforme discutido em 5.3.4, retiraram-se os reatores da barra de Assis-500kV de 95MVAR e o da barra vizinha, Assis-440kV, de 110MVAR. Os reatores foram então substituídos por capacitores nos valores de 85MVAR e 30MVAR, respectivamente. A mudança, realizada por tentativa e erro, garantiu convergência para uma quantidade maior de carga ou de geração inserida, principalmente no cenário 1, o qual apresentava as maiores quedas de tensão na barra de Assis.

Ainda com os ajustes descritos e com a flexibilização dos tapes nos terminais emissores e receptores (perdendo em eficiência) não foi obtida convergência nos cenários 1 e 2 para injeção de 300MW de carga quando conectada na barra 27. O mesmo procedimento de flexibilização do valor dos tapes foi adotado no cenário 4, no qual conseguiu-se a convergência para todos os valores de potência injetada ou extraída.

### 6.2.2.1 Eficiência

As tabelas 6.11, 6.12 e 6.13 mostram as perdas para os ensaios de extração/injeção de potência com conexão nas duas linhas de 1000kV.

Tabela 6.11: Perdas para Injeção/Extração na barra 9 em duas linhas de 1000kV.

	PERDAS - BARRA 09 - 2X1000KV								
	Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
	50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	12,96%	12,84%	12,61%	12,39%	13,02%	12,94%	12,80%	12,66%	13,09%
<b>CEN2</b>	12,61%	12,50%	12,30%	12,11%	12,65%	12,59%	12,46%	12,33%	12,71%
<b>CEN3</b>	12,60%	12,08%	11,15%	10,32%	13,03%	12,94%	12,77%	12,64%	13,12%
<b>CEN4</b>	13,25%	13,14%	13,04%	13,04%	13,02%	12,69%	12,10%	11,60%	13,41%
<b>CEN5</b>	12,57%	12,31%	11,83%	11,38%	12,81%	12,78%	12,72%	12,68%	12,83%
<b>CEN6</b>	12,88%	12,76%	12,54%	12,33%	12,94%	12,88%	12,76%	12,64%	13,00%

Tabela 6.12: Perdas para Injeção/Extração na barra 18 em duas linhas de 1000kV.

	PERDAS - BARRA 18 - 2X1000KV								
	Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
	50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	12,93%	12,80%	12,55%	12,32%	13,00%	12,95%	12,84%	12,73%	13,09%
<b>CEN2</b>	12,59%	12,48%	12,25%	12,04%	12,66%	12,61%	12,51%	12,41%	12,71%
<b>CEN3</b>	12,60%	12,11%	11,27%	10,57%	13,01%	12,90%	12,73%	12,59%	13,12%
<b>CEN4</b>	13,13%	13,00%	13,30%	14,14%	13,41%	13,43%	14,06%	14,84%	13,41%
<b>CEN5</b>	12,59%	12,35%	11,91%	11,49%	12,78%	12,73%	12,66%	12,68%	12,83%
<b>CEN6</b>	12,86%	12,75%	12,51%	12,28%	12,95%	12,90%	12,81%	12,71%	13,00%

Tabela 6.13: Perdas para Injeção/Extração na barra 27 em duas linhas de 1000kV.

PERDAS - BARRA 27 - 2x1000kV									
	Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
	50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	13,00%	12,84%	12,58%	-	13,07%	13,00%	12,90%	12,81%	13,09%
<b>CEN2</b>	12,58%	12,46%	12,22%	-	12,66%	12,62%	12,54%	12,47%	12,71%
<b>CEN3</b>	12,68%	12,23%	11,50%	10,89%	12,96%	12,78%	12,45%	12,15%	13,12%
<b>CEN4</b>	13,15%	12,96%	12,63%	12,40%	13,21%	13,04%	13,31%	13,44%	13,41%
<b>CEN5</b>	12,59%	12,37%	11,92%	11,56%	12,84%	12,78%	12,72%	12,61%	12,83%
<b>CEN6</b>	12,85%	12,72%	12,44%	12,22%	12,96%	12,93%	12,87%	12,81%	13,00%

A mesma análise feita para a configuração do tronco com 800KV pode ser feita aqui: a eficiência mantém-se em níveis próximos àquela dos casos de base diminuindo sutilmente conforme aumenta-se a injeção ou extração de potência na linha. A justificativa para isso já foi exposta na seção análoga para o ensaio com tronco de 800kV.

A única diferença a ser ressaltada é quanto ao cenário 4 o qual teve os limites inferiores dos tapes terminais flexibilizados para obter convergência quando a conexão foi feita na barra 18. No capítulo 2 mostrou-se que a tensão neste ponto varia consideravelmente conforme o carregamento da linha e o efeito acentua-se quanto menor o carregamento desta, assim a combinação de um cenário de baixo carregamento das linhas aliado à extração no ponto central mostrou-se problemática e houve a necessidade de ajustes para cada mudança na carga/geração intermediária, seja no tap do transformador de conexão, seja naqueles dos terminais do tronco.

### 6.2.2.2 Carregamento

As tabelas 6.14, 6.15 e 6.16 mostram os níveis de carregamento do tronco para cada ensaio realizado com conexão intermediária nas barras 09, 18 e 27, respectivamente

Tabela 6.14: Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 09 em duas linhas de 1000kV.

CARREGAMENTO (MW)- BARRA 09 - 2x1000kV									
	Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
	50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	6657,3	6652,8	6653,5	6653,7	6656,2	6678,6	6683,0	6686,9	6656,6
<b>CEN2</b>	7234,4	7230,3	7229,7	7228,4	7235,2	7235,6	7236,6	7237,6	7246,8
<b>CEN3</b>	1885,9	1836,4	1728,9	1622,0	1994,9	2049,6	2159,7	2270,2	1927,6
<b>CEN4</b>	867,8	861,7	849,8	838,0	880,0	883,0	895,7	908,3	864,3
<b>CEN5</b>	4279,6	4231,9	4128,0	4024,4	4375,3	4427,4	4536,1	4640,7	4326,3
<b>CEN6</b>	7109,5	7107,7	7105,6	7102,7	7112,2	7113,4	7115,9	7118,2	7121,0

Tabela 6.15: Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 18 em duas linhas de 1000kV.

CARREGAMENTO (MW) - BARRA 18 - 2x1000kV									
	Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
	50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	6701,1	6699,4	6677,9	6656,4	6681,2	6691,0	6708,4	6725,5	6656,6
<b>CEN2</b>	7226,4	7217,9	7199,4	7180,5	7242,2	7250,6	7266,5	7281,3	7246,8
<b>CEN3</b>	1892,9	1842,5	1761,8	1674,5	1948,3	1979,3	2037,0	2089,4	1927,6
<b>CEN4</b>	863,8	831,6	736,4	617,3	841,9	835,0	772,9	717,0	864,3
<b>CEN5</b>	4288,5	4249,9	4150,6	4049,5	4366,3	4402,0	4471,2	4527,4	4326,3
<b>CEN6</b>	7103,2	7103,5	7087,3	7069,7	7118,4	7125,7	7139,9	7153,5	7121,0

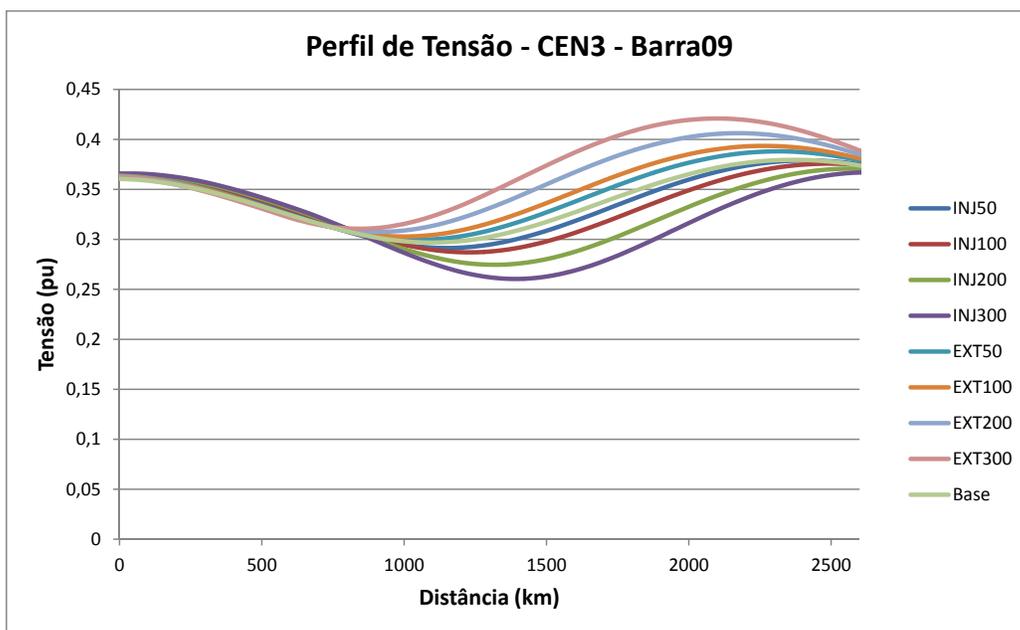
Tabela 6.16: Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 27 em duas linhas de 1000kV.

CARREGAMENTO (MW) - BARRA 27 - 2x1000kV									
	Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
	50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	6626,5	6613,0	6796,2	-	6669,2	6698,7	6731,6	6765,8	6656,6
<b>CEN2</b>	7222,3	7188,2	7141,4	-	7252,3	7276,6	7325,8	7374,2	7246,8
<b>CEN3</b>	1926,8	1909,5	1883,3	1857,7	1953,9	1967,6	1995,2	2023,1	1927,6
<b>CEN4</b>	827,9	779,7	692,6	605,8	902,1	950,2	1018,7	1125,9	864,3
<b>CEN5</b>	4311,3	4279,2	4224,7	4178,6	4367,2	4388,0	4458,9	4520,1	4326,3
<b>CEN6</b>	7085,7	7070,8	7018,7	6989,1	7135,9	7160,8	7210,0	7258,7	7121,0

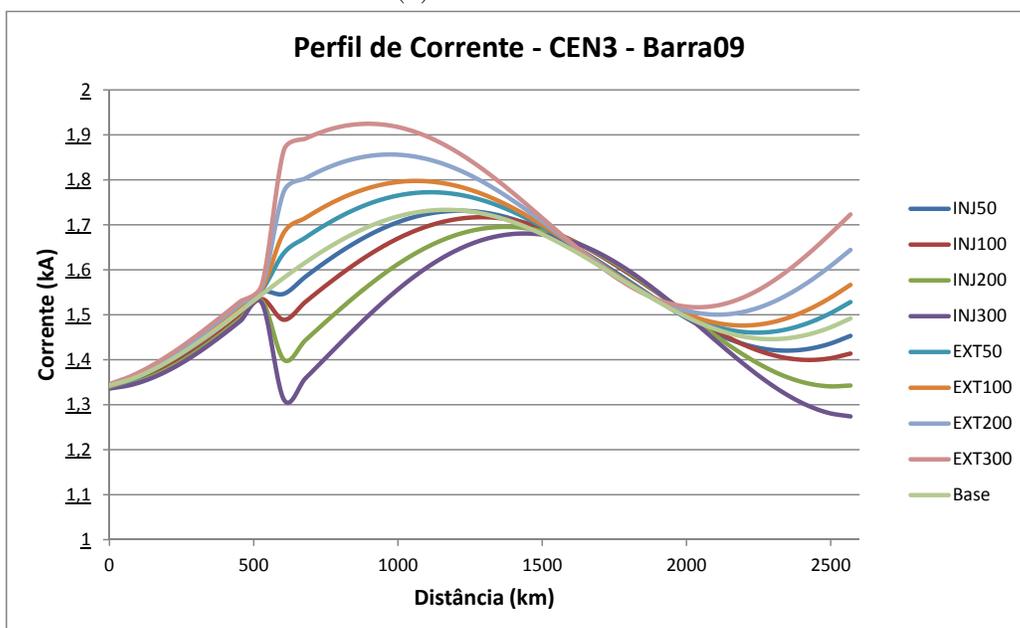
Novamente, o efeito da redução do carregamento do tronco nos casos de injeção e aumento deste no caso de extração se faz ver, mais acentuado nos cenários de baixo carregamento do tronco. Nenhuma diferença qualitativa significativa pode-se extrair ou concluir quanto a este aspecto ao compararmos com os ensaios com linhas de 800kV

### 6.2.2.3 Perfis de Tensão e Corrente

As análise tiradas para os casos de 800kV podem aqui serem transpostas. O impacto na corrente se sente muito mais do que na tensão; nesta há uma pequena separação entre as curvas, mas com pouco distanciamento da tensão nos terminais (com exceção do cenário 4) enquanto na corrente há uma forte perturbação no ponto de conexão e um distanciamento expressivo do nível de corrente no terminal de Assis. Os cenários de baixo carregamento são mais afetados, apresentando picos relativos maiores no perfil de corrente e maior distanciamento dos perfis de tensão. Tendo isto em vista, serão ilustrados apenas os alguns casos dos cenários mais críticos, isto é, os cenários 3, 4 e 5, escolhendo-se barras de conexão diferentes das mostradas na seção de ensaios com linhas de 800kV.



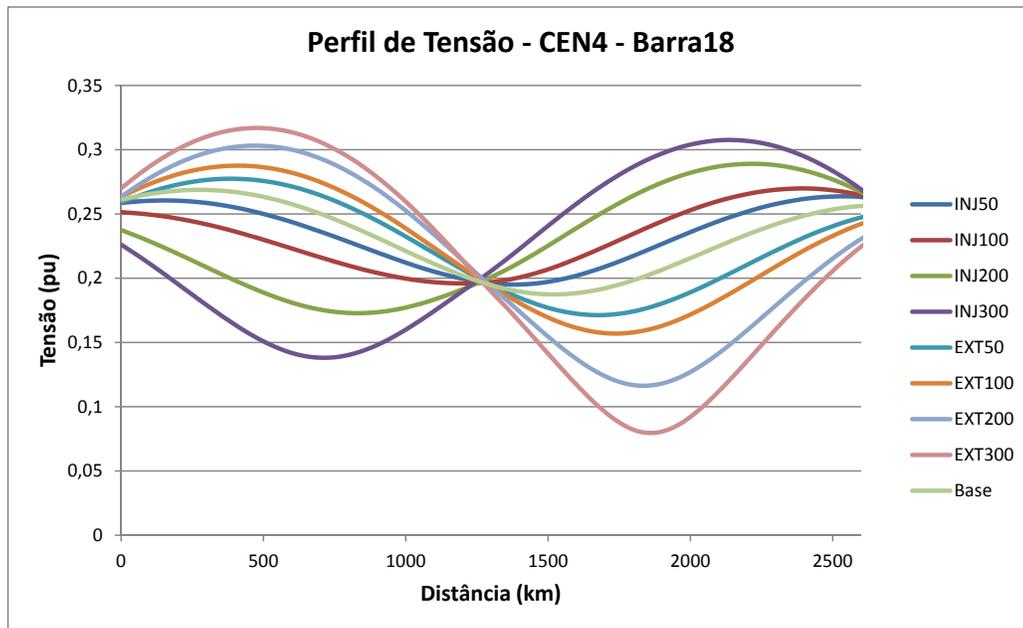
(a) Perfil de tensão.



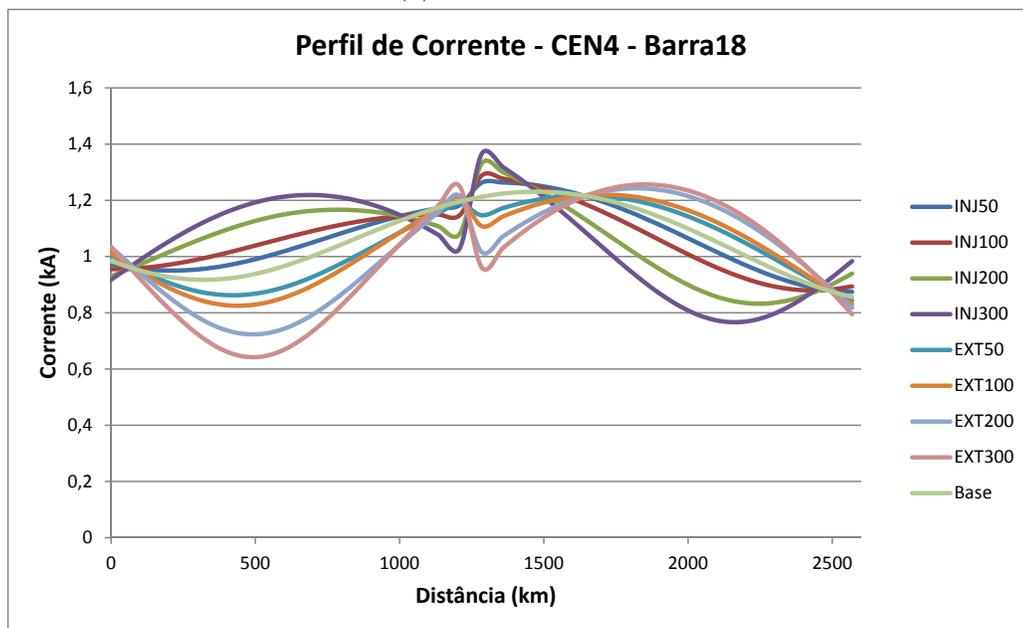
(b) Perfil de corrente.

Figura 6.8: Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 9 em 2 linhas de 1000kV no cenário 3.

É visível o descolamento das tensões na figura 6.8a após o ponto de conexão intermediária. Na figura 6.8b, que mostra o perfil de correntes, também percebe-se o pico ou afundamento da corrente no ponto de conexão e o posterior afastamento dos perfis de corrente. Ao se comparar com os ensaios com linhas de 800kV percebe-se que quanto mais próximo do terminal de Altamira o ponto de conexão intermediária se encontra, menos a tensão e a corrente neste terminal tendem a se distanciar, eximindo a necessidade de ajustes no tap do transformador de conexão em Altamira quando da mudança da potência injetada/extraída do ponto intermediário.



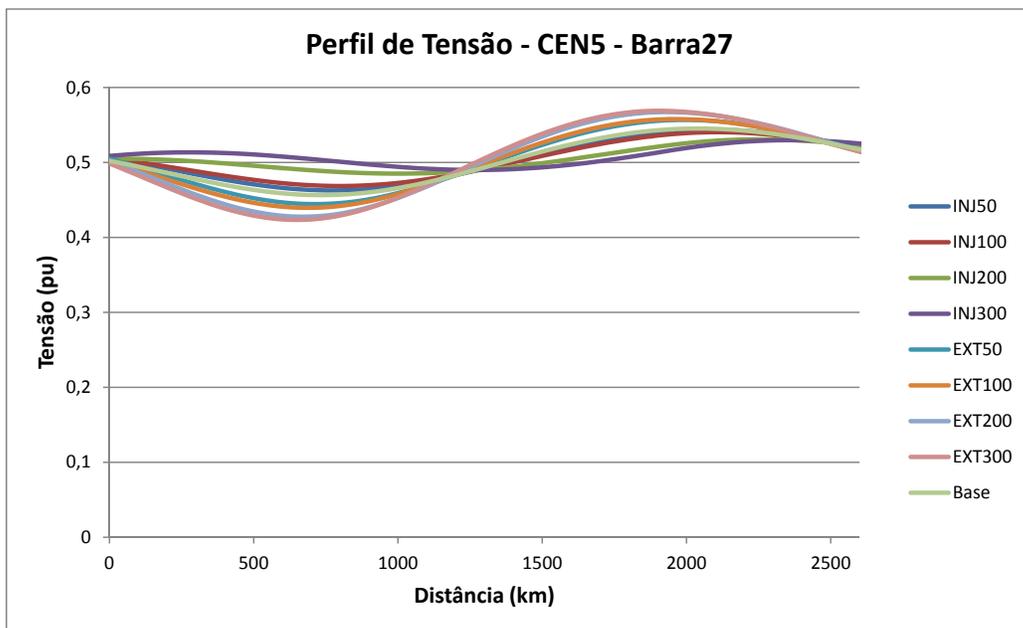
(a) Perfil de tensão.



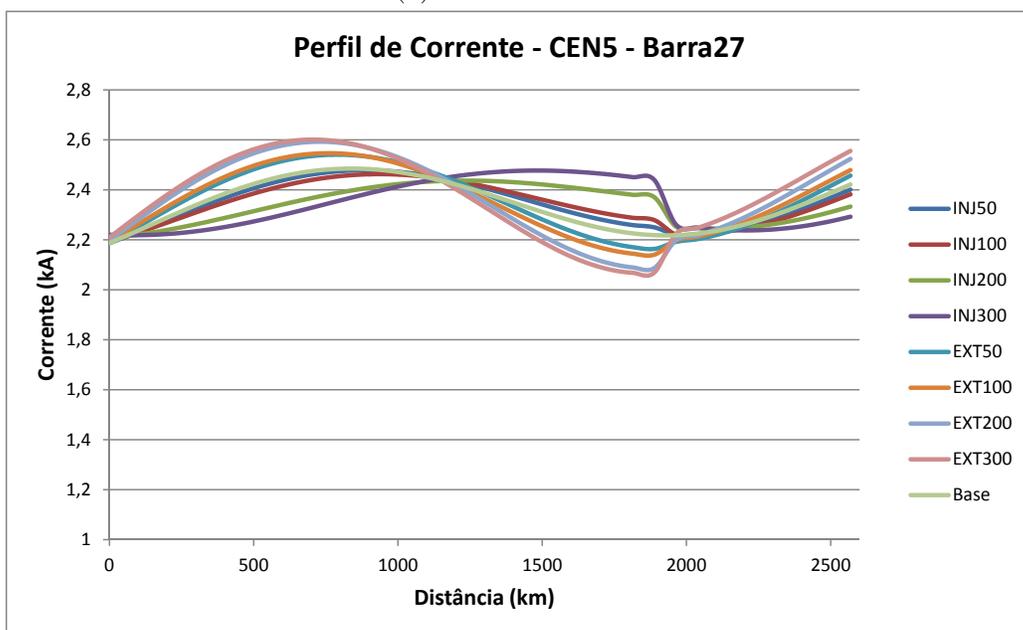
(b) Perfil de corrente.

Figura 6.9: Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 18 em 2 linhas de 1000kV no cenário 4.

A figura 6.9 traz os perfis de tensão e de corrente para extração/injeção de potência na barra 18 para o cenário 4. Outra vez constata-se um forte impacto também na tensão dado o fato de ser um cenário de baixo carregamento. Como se vê a tensão nos terminais emissor e receptor tende a ser diferente para cada nível de potência injetada ou extraída, o que levou à necessidade de flexibilizar os limites superiores e inferiores para variação dos tapes nos transformadores de conexão. A corrente apresenta a perturbação típica para conexão no centro da linha.



(a) Perfil de tensão.



(b) Perfil de corrente.

Figura 6.10: Perfis de tensão e corrente para extração/injeção de potência na barra 27 em 2 linhas de 1000kV no cenário 5.

Por fim, a figura 6.10 traz o perfil de tensão e de corrente para o cenário 5 com extração na barra 27. Este cenário apresenta carregamento médio do tronco e as perturbações na tensão e na corrente assemelham-se mais às perturbações dos casos com maior carregamento do tronco CA.

### 6.2.2.4 Impacto nas Tensões Terminais e Central

As tabelas 6.17, 6.18 e 6.19 apresentam as tensões nas barras de conexão para os ensaios de conexão intermediária em duas linhas de 1000kV. Essencialmente a análise segue a mesma feita para os ensaios feitos com o tronco de 800kV, inclusive com o mesmo padrão de tendência observado e descrito na tabela 6.7.

Tabela 6.17: Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 9 em duas linhas de 1000kV.

		TENSÕES TERMINAIS (PU) - BARRA 09 - 2X1000kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	Assis	0,875	0,877	0,880	0,882	0,873	0,876	0,885	0,878	0,874
	Altamira	0,973	0,973	0,974	0,974	0,973	0,973	0,974	0,975	0,973
CEN2	Assis	0,942	0,944	0,946	0,948	0,940	0,938	0,936	0,932	0,955
	Altamira	1,079	1,079	1,080	1,080	1,079	1,079	1,078	1,077	1,079
CEN3	Assis	1,040	1,038	1,037	1,035	1,041	1,042	1,043	1,044	1,019
	Altamira	1,032	1,033	1,033	1,034	1,032	1,032	1,031	1,031	1,032
CEN4	Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
	Altamira	1,060	1,060	1,059	1,059	1,060	1,060	1,060	1,061	1,060
CEN5	Assis	0,997	0,997	0,996	0,995	0,998	0,998	0,998	0,998	0,975
	Altamira	1,016	1,017	1,017	1,017	1,014	1,014	1,014	1,013	1,016
CEN6	Assis	0,996	0,998	1,000	1,001	0,995	0,994	0,992	0,991	0,998
	Altamira	1,043	1,042	1,043	1,043	1,043	1,042	1,042	1,042	1,043

Tabela 6.18: Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 18 em duas linhas de 1000kV.

		TENSÕES TERMINAIS (PU) - BARRA 18 - 2X1000kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	Assis	0,903	0,906	0,908	0,911	0,883	0,882	0,879	0,875	0,874
	Altamira	0,973	0,972	0,970	0,968	0,977	0,978	0,980	0,982	0,973
CEN2	Assis	0,943	0,945	0,948	0,952	0,939	0,937	0,932	0,928	0,955
	Altamira	1,078	1,078	1,076	1,074	1,080	1,081	1,083	1,084	1,079
CEN3	Assis	1,016	1,008	0,999	0,990	1,023	1,026	1,032	1,037	1,019
	Altamira	1,034	1,036	1,039	1,042	1,030	1,028	1,025	1,022	1,032
CEN4	Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
	Altamira	1,058	1,055	1,050	1,046	1,063	1,065	1,068	1,071	1,060
CEN5	Assis	0,974	0,973	0,964	0,956	0,975	0,976	0,976	0,979	0,975
	Altamira	1,018	1,020	1,023	1,026	1,014	1,012	1,006	1,001	1,016
CEN6	Assis	0,997	1,007	1,010	1,014	0,994	0,992	0,988	0,984	0,998
	Altamira	1,042	1,038	1,037	1,035	1,044	1,045	1,046	1,048	1,043

Tabela 6.19: Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 27 em duas linhas de 1000kV.

		TENSÕES TERMINAIS (PU) - BARRA 27 - 2X1000KV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	Assis	0,895	0,891	0,889	-	0,892	0,895	0,892	0,893	0,874
	Altamira	0,969	0,969	0,961	-	0,973	0,974	0,978	0,982	0,973
CEN2	Assis	0,953	0,951	0,945	-	0,953	0,955	0,960	0,964	0,955
	Altamira	1,078	1,076	1,073	-	1,080	1,082	1,084	1,086	1,079
CEN3	Assis	1,042	1,040	1,042	1,044	1,040	1,039	1,037	1,035	1,019
	Altamira	1,033	1,035	1,036	1,038	1,031	1,030	1,028	1,026	1,032
CEN4	Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
	Altamira	1,059	1,058	1,057	1,055	1,062	1,063	1,066	1,068	1,060
CEN5	Assis	1,000	1,001	0,995	0,995	1,005	1,001	0,999	0,989	0,975
	Altamira	1,018	1,021	1,029	1,035	1,009	1,007	1,001	0,999	1,016
CEN6	Assis	0,993	0,994	0,989	0,986	0,998	1,000	1,004	1,008	0,998
	Altamira	1,041	1,040	1,037	1,032	1,044	1,045	1,048	1,050	1,043

Há uma exceção que pode ser feita que refere-se à tensão na barra de Assis para os cenários com subsistema norte importador no caso de aumento da injeção de potência quando a ligação é feita na barra 27. Anteriormente, percebia-se uma tendência de aumento da tensão enquanto neste caso não se pode observar tal tendência, ainda mais pelo fato da mudança da carga injetada de 100MW para 200MW ter exigido a mudança dos tapes neste terminal para possibilitar a convergência dos casos com injeção de 200MW e 300MW.

## 6.3 Conexão em Apenas uma Linha

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos quando a conexão de carga ou geração em ponto intermediário se dá em apenas uma linha do tronco CA conforme mostrado anteriormente na figura 6.1b. Os parâmetros analisados são os mesmos de anteriormente, mas para esta situação a análise deve ser um pouco mais apurada, pois carregamento, eficiência e perfis de tensão e de corrente apresentarão diferenças entre a linha do tronco com tal conexão e a(s) linha(s) sem esta.

### 6.3.1 Linhas de 800kV

Aqui mostram-se os resultados obtidos para a conexão em apenas uma linha do tronco CA constituído por três linhas de 800kV. Os parâmetros analisados serão exatamente os mesmos que anteriormente. É importante ressaltar que para alguns casos não foi obtida convergência do fluxo de carga, mesmo fazendo a alteração da potência injetada/extraída em degraus pequenos. Essa situação mostrou-se mais grave principalmente no cenário 4 com conexão na barra 18. Para tais cenários as tabelas com dados apresentam o símbolo “-” na célula correspondente.

## 6.3.1.1 Eficiência

As tabelas 6.20, 6.21 e 6.22 apresentam as perdas obtidas em cada caso para cada cenário com conexões nas barras 9, 18 e 27, respectivamente.

Tabela 6.20: Perdas para Injeção/Extração na barra 9 em apenas uma linha de 800kV.

		PERDAS - BARRA 09 - 1x800kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	LC	12,51%	12,46%	12,38%	12,33%	12,36%	12,16%	11,76%	11,37%	12,57%
	LS	12,56%	12,55%	12,52%	12,50%	12,58%	12,60%	12,62%	12,66%	12,57%
CEN2	LC	12,36%	12,30%	12,18%	12,10%	12,28%	12,12%	11,80%	11,50%	12,45%
	LS	12,45%	12,45%	12,46%	12,47%	12,44%	12,44%	12,43%	12,43%	12,45%
CEN3	LC	11,90%	11,39%	10,55%	9,98%	12,30%	12,23%	12,34%	12,74%	12,48%
	LS	12,48%	12,48%	12,49%	12,51%	12,48%	12,47%	12,47%	12,48%	12,48%
CEN4	LC	11,83%	11,70%	12,42%	13,94%	12,09%	11,41%	11,47%	-	12,58%
	LS	12,61%	12,62%	12,68%	12,75%	12,57%	12,55%	12,54%	-	12,58%
CEN5	LC	12,52%	12,30%	11,92%	11,62%	12,55%	12,39%	12,16%	12,09%	12,74%
	LS	12,73%	12,71%	12,69%	12,67%	12,76%	12,77%	12,81%	12,82%	12,74%
CEN6	LC	12,30%	12,23%	12,12%	12,04%	12,21%	12,05%	11,73%	11,43%	12,38%
	LS	12,38%	12,38%	12,38%	12,38%	12,38%	12,38%	12,38%	12,39%	12,38%

LC - linha com carga/geração intermediária LS - linha sem carga/geração intermediária

Tabela 6.21: Perdas para Injeção/Extração na barra 18 em apenas uma linha de 800kV.

		PERDAS - BARRA 18 - 1x800kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	LC	13,50%	12,74%	11,86%	11,24%	11,79%	12,01%	12,27%	12,41%	12,57%
	LS	12,59%	12,58%	12,57%	12,57%	12,62%	12,59%	12,58%	12,57%	12,57%
CEN2	LC	12,39%	12,35%	12,28%	12,26%	12,29%	12,15%	11,93%	11,78%	12,45%
	LS	12,44%	12,43%	12,41%	12,40%	12,45%	12,46%	12,48%	12,49%	12,45%
CEN3	LC	11,99%	11,68%	11,64%	11,98%	12,30%	12,29%	12,96%	19,22%	12,48%
	LS	12,50%	12,52%	12,57%	12,60%	12,44%	12,44%	12,45%	12,70%	12,48%
CEN4	LC	11,76%	14,37%	-	-	16,31%	21,41%	-	-	12,58%
	LS	12,57%	12,53%	-	-	12,56%	12,55%	-	-	12,58%
CEN5	LC	12,48%	12,30%	12,17%	12,82%	12,63%	12,64%	13,48%	14,35%	12,74%
	LS	12,50%	12,52%	12,57%	12,71%	12,71%	12,65%	12,55%	12,48%	12,74%
CEN6	LC	12,27%	12,18%	12,06%	11,98%	12,28%	12,18%	12,07%	11,95%	12,38%
	LS	12,38%	12,38%	12,38%	12,39%	12,38%	12,38%	12,38%	12,38%	12,38%

LC - linha com carga/geração intermediária LS - linha sem carga/geração intermediária

Tabela 6.22: Perdas para Injeção/Extração na barra 27 em apenas uma linha de 800kV.

		PERDAS - BARRA 27 - 1X800KV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	LC	12,41%	12,26%	12,00%	11,75%	12,46%	12,36%	12,19%	12,07%	12,57%
	LS	12,59%	12,61%	12,68%	12,74%	12,55%	12,52%	12,49%	12,46%	12,57%
CEN2	LC	12,32%	12,21%	11,98%	11,78%	12,32%	12,21%	12,01%	11,87%	12,45%
	LS	12,44%	12,43%	12,42%	12,41%	12,46%	12,47%	12,50%	12,53%	12,45%
CEN3	LC	12,12%	11,86%	11,59%	11,57%	12,06%	11,70%	11,09%	10,70%	12,48%
	LS	12,48%	12,50%	12,56%	12,64%	12,48%	12,48%	12,51%	12,59%	12,48%
CEN4	LC	11,42%	10,82%	10,96%	-	13,85%	16,36%	21,83%	-	12,70%
	LS	12,55%	12,54%	12,55%	-	12,61%	12,67%	12,67%	-	12,70%
CEN5	LC	12,75%	12,53%	12,14%	11,88%	12,83%	12,67%	12,36%	12,18%	12,74%
	LS	13,08%	13,17%	13,33%	13,49%	12,94%	12,87%	12,76%	12,69%	12,74%
CEN6	LC	12,48%	12,54%	12,36%	10,23%	12,03%	11,77%	11,58%	13,72%	12,38%
	LS	12,38%	12,38%	12,39%	12,41%	12,38%	12,38%	12,38%	12,39%	12,38%

LC - linha com carga/geração intermediária LS - linha sem carga/geração intermediária

A análise das tabelas permite fazer a mesma afirmação feita anteriormente de que a eficiência aumenta cada vez que se aumenta a potência injetada ou extraída do ponto intermediário. Isso ocorre ao fato já descrito que é da potência injetada ou extraída no ponto intermediário da linha percorrer menor caminho até a chegada no ponto de consumo. Um ponto pode ser adicionado à esta análise. Nos casos em que o subsistema Norte é exportador a eficiência nos casos de extração de potência aumenta mais quanto mais perto a conexão estiver do terminal de Altamira; enquanto que os casos de injeção tem sua eficiência melhorada mais significativamente quanto mais próxima esta se der do terminal de Altamira. A situação se inverte nos casos em que o Norte é importador.

A diferença para esta configuração da conexão do ponto de injeção/extração intermediário está na diferença apresentada entre as linhas do tronco nas quais não são conectadas uma subestação. Para estas a eficiência tem um leve impacto, impacto para o qual não se observa nenhuma tendência específica como observada para as mudanças nas tensões terminais. Fato é que as perdas nas linhas sem conexão intermediária tem alterações na quarta casa decimal se comparadas aos respectivos casos base.

### 6.3.1.2 Carregamento

As tabelas 6.23, 6.24 e 6.25 apresentam o carregamento dos ensaios feitos nas barras 9, 18 e 27, respectivamente. Diferentemente daquelas apresentadas na seção anterior, estas apresentam o carregamento de cada linha e não do tronco como um todo, lembrando que as duas linhas sem conexão intermediária apresentam as mesmas características de tensão, corrente, carregamento e eficiência.

Tabela 6.23: Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 9 em apenas uma linha de 800kV.

		CARREGAMENTO (MW) - BARRA 09 - 1x800kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	LC	2277,5	2296,7	2324,2	2351,2	2249,2	2234,9	2205,8	2176,1	2263,5
	LS	2256,8	2247,9	2234,8	2221,9	2270,2	2277,0	2290,8	2304,7	2263,5
CEN2	LC	2456,1	2473,8	2507,4	2541,1	2421,3	2403,7	2368,2	2331,9	2437,0
	LS	2429,8	2420,8	2403,5	2386,1	2447,8	2456,9	2475,3	2493,8	2440,0
CEN3	LC	663,5	597,3	464,9	332,2	796,3	862,8	995,4	1128,0	729,9
	LS	734,9	740,2	751,1	762,1	724,5	719,7	711,0	702,4	728,9
CEN4	LC	315,9	331,5	367,5	403,7	275,7	263,7	232,0	-	297,0
	LS	292,7	288,9	280,7	272,6	302,3	305,5	313,0	-	297,0
CEN5	LC	1346,9	1279,5	1144,9	1018,1	1482,3	1550,4	1686,6	1812,9	1414,5
	LS	1422,2	1429,9	1445,4	1459,1	1407,0	1399,7	1385,1	1377,3	1414,5
CEN6	LC	2408,3	2425,4	2457,7	2488,3	2384,5	2368,8	2337,0	2304,7	2404,9
	LS	2396,7	2388,1	2371,6	2356,0	2408,2	2416,4	2432,8	2449,6	2404,9

LC - linha com carga/geração intermediária LS - linha sem carga/geração intermediária

Tabela 6.24: Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 18 em apenas uma linha de 800kV.

		CARREGAMENTO (MW) - BARRA 18 - 1x800kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	LC	2129,4	2184,6	2229,6	2248,0	2291,2	2294,6	2285,2	2275,8	2263,5
	LS	2303,6	2285,8	2272,7	2267,6	2259,2	2256,3	2257,8	2260,1	2263,5
CEN2	LC	2410,0	2375,7	2316,0	2241,1	2451,8	2460,5	2408,5	2388,1	2437,0
	LS	2449,7	2462,0	2482,7	2509,0	2434,9	2432,8	2453,5	2463,4	2440,0
CEN3	LC	701,3	657,7	513,6	422,8	736,7	736,9	669,4	361,8	729,9
	LS	723,3	721,9	734,4	748,8	751,9	751,8	796,1	898,4	728,9
CEN4	LC	265,5	136,6	-	-	234,7	164,8	-	-	297,0
	LS	300,6	322,1	-	-	308,4	322,0	-	-	297,0
CEN5	LC	1385,6	1347,3	1206,3	1013,7	1432,4	1418,4	1348,8	1240,5	1414,5
	LS	1405,7	1401,8	1416,8	1462,8	1426,6	1451,4	1524,1	1613,5	1414,5
CEN6	LC	2388,5	2385,0	2356,7	2296,7	2380,0	2380,4	2365,4	2333,5	2404,9
	LS	2405,5	2406,2	2414,7	2434,3	2406,9	2408,5	2415,4	2429,8	2404,9

LC - linha com carga/geração intermediária LS - linha sem carga/geração intermediária

Tabela 6.25: Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 27 em apenas uma linha de 800kV.

		CARREGAMENTO (MW) - BARRA 27 - 1x800kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	LC	2211,4	2162,5	2057,2	1953,5	2315,5	2367,5	2472,6	2577,2	2263,5
	LS	2277,2	2292,6	2319,0	2344,6	2249,5	2235,4	2207,6	2178,7	2263,5
CEN2	LC	2383,6	2331,0	2221,0	2111,8	2494,0	2549,4	2639,1	2735,9	2437,0
	LS	2456,4	2474,7	2509,5	2543,8	2420,9	2403,0	2374,6	2342,8	2440,0
CEN3	LC	742,0	753,6	776,2	796,2	717,3	704,4	677,0	645,3	729,9
	LS	715,9	702,3	675,3	649,2	743,3	757,5	786,2	813,6	728,9
CEN4	LC	229,9	165,8	59,4	-	353,8	414,9	425,9	-	297,0
	LS	307,2	317,3	334,3	-	287,9	278,7	278,2	-	297,0
CEN5	LC	1453,4	1466,0	1483,8	1502,7	1428,4	1416,0	1391,1	1367,1	1414,5
	LS	1419,8	1398,8	1359,0	1316,9	1461,9	1483,1	1525,2	1571,4	1414,5
CEN6	LC	2297,1	2209,6	2110,2	2439,8	2495,7	2591,3	2715,0	2393,7	2404,9
	LS	2416,7	2433,8	2459,7	2489,2	2387,8	2370,2	2340,4	2300,0	2404,9

LC - linha com carga/geração intermediária LS - linha sem carga/geração intermediária

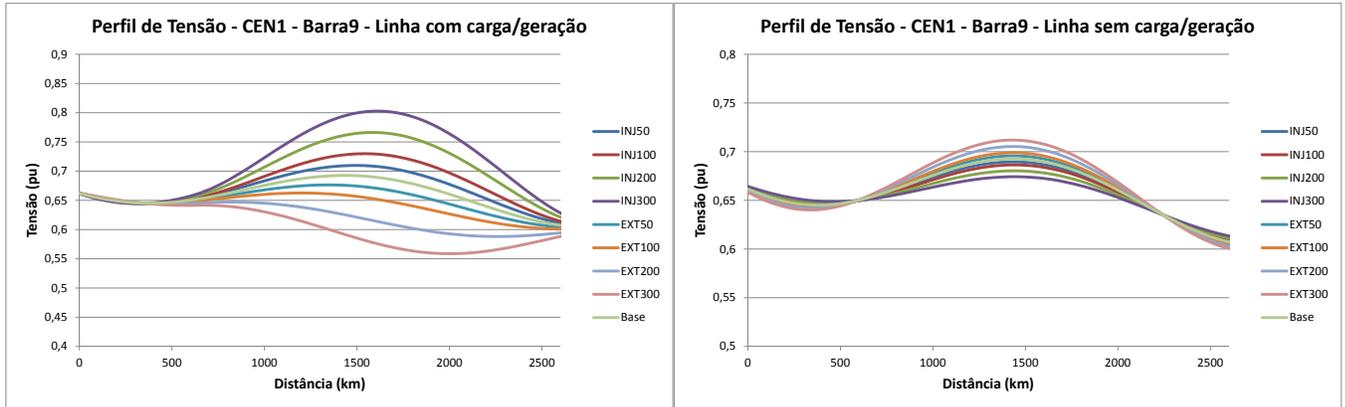
Nestes ensaios percebe-se uma situação diferente das apresentadas anteriormente, quando a extração era feita em todas as linhas do tronco CA. Naqueles casos o aumento da injeção no ponto intermediário implicava em uma redução do carregamento do tronco, assim como o aumento da extração implicava no aumento do carregamento. Para a conexão em apenas uma linha a situação apresenta-se de forma distinta. Em alguns casos, como por exemplo a injeção de potência na barra 9 para o cenário 1, tende a fazer com que o carregamento da linha na qual se conecta a geração intermediária aumente, sendo compensado pela diminuição do carregamento das linhas sem conexão intermediária. A análise das tendências de modificações do carregamento conforme a mudança da potência injetada/extraída segue a tabela 6.26. A conexão na barra 18 não apresentou uma tendência clara de modificação do carregamento, tanto na configuração do tronco com linhas de 800kV como naquela com linhas de 1000kV, como será visto à frente.

Tabela 6.26: Tendência do carregamento nas linhas conforme barra de extração e tipo de cenário.

TIPO		LINHA	Tendência da Tensão	
			Barra 9	Barra 27
NORTE EXPORTADOR	Aumento Injeção	LC	Aumento	Diminuição
		LS	Diminuição	Aumento
	Aumento Extração	LC	Diminuição	Aumento
		LS	Aumento	Diminuição
NORTE IMPORTADOR	Aumento Injeção	LC	Diminuição	Aumento
		LS	Aumento	Diminuição
	Aumento Extração	LC	Aumento	Diminuição
		LS	Diminuição	Aumento

### 6.3.1.3 Perfis de Tensão e Corrente

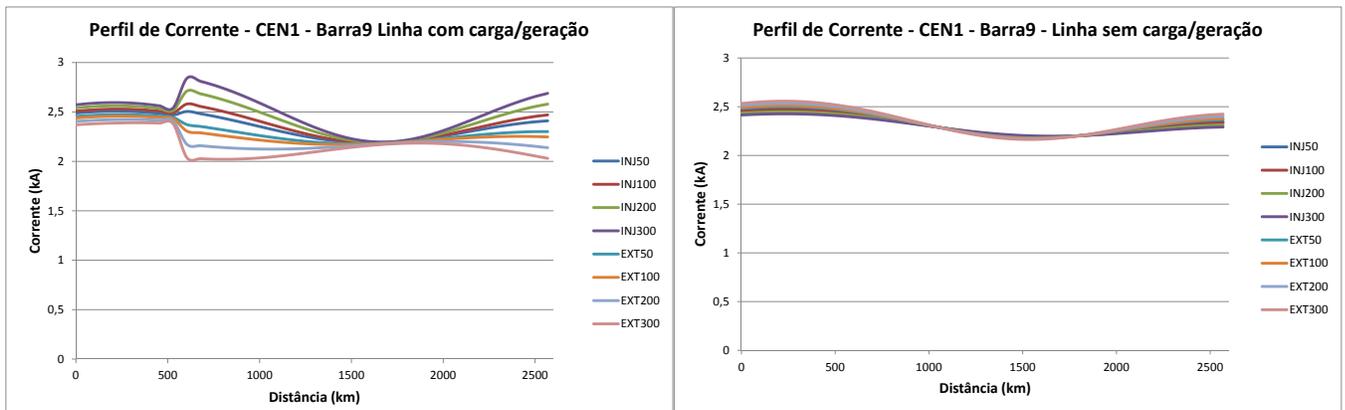
Aqui serão mostrados os perfis de tensão e corrente para alguns casos simulados quando a extração ou injeção de potência é feita em apenas uma linha do tronco. Fundamental aqui é analisar a diferença apresentada entre os perfis da linha com conexão intermediária e daquela sem esta.



(a) Perfil de tensão na linha com con. inter.

(b) Perfil de tensão na linha sem con. inter.

Figura 6.11: Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 9 em uma linha de 800kV no cenário 1.

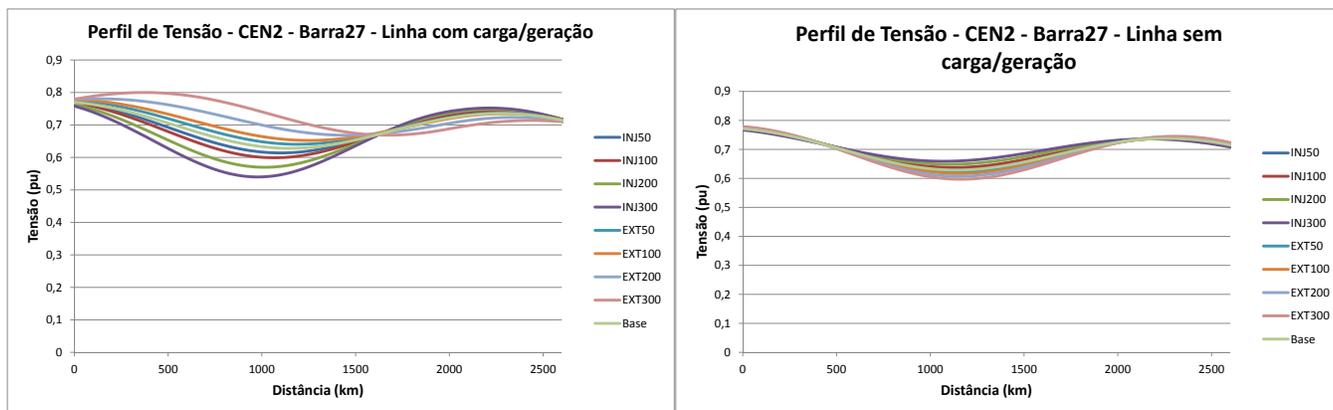


(a) Perfil de corrente na linha com con. inter.

(b) Perfil de corrente na linha sem con. inter.

Figura 6.12: Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 9 em uma linha de 800kV no cenário 1.

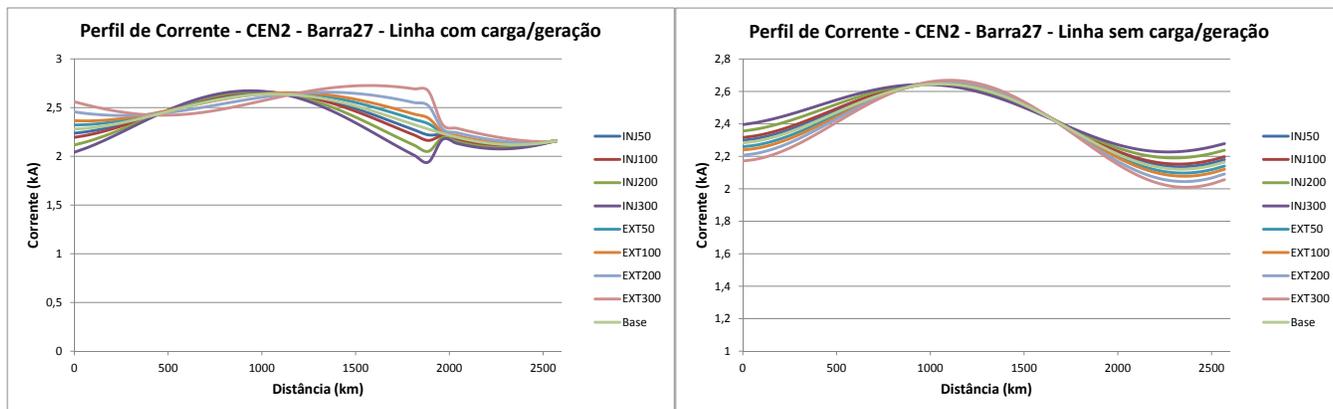
As figuras 6.11 e 6.12 mostram os perfis de tensões e correntes no cenário 1 para extração/injeção em apenas uma linha do tronco. O primeiro gráfico de cada figura refere-se à linha na qual há conexão e a segunda na linha sem esta. Percebe-se que os perfis de tensão e corrente na linha com conexão assemelham-se aos obtidos quando a extração é feita nos três ramos. A diferença é que os efeitos do afastamento das tensões assim como o pico ou afundamento da corrente são mais acentuados devido ao fato de toda a potência injetada ou extraída se dar em apenas uma linha. Já a linha sem conexão intermediária praticamente não apresenta perturbação.



(a) Perfil de tensão na linha com con. inter.

(b) Perfil de tensão na linha sem con. inter.

Figura 6.13: Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 27 em uma linha de 800kV no cenário 2.



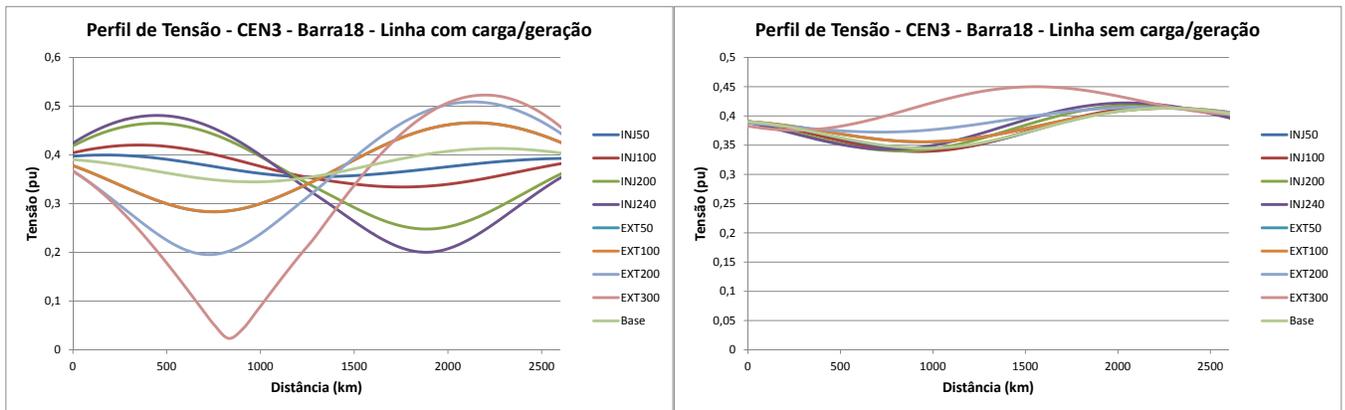
(a) Perfil de corrente na linha com con. inter.

(b) Perfil de corrente na linha sem con. inter.

Figura 6.14: Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 27 em uma linha de 800kV no cenário 2.

As figuras 6.13 e 6.14 apresentam as mesmas características, mas para o cenário 2 com conexão na barra 27. Os efeitos são exatamente os mesmos. A corrente na figura 6.14b, referente à linha sem conexão intermediária parece ser mais afetada que aquela no cenário 1, mas vale atentar-se para a escala do gráfico, a qual está mais ampliada para o cenário 2.

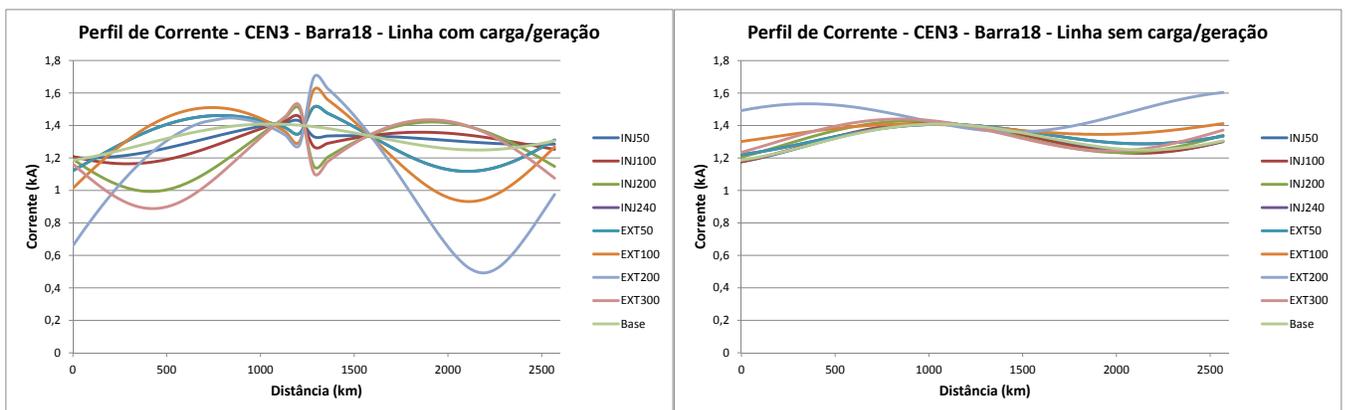
As figuras 6.15 e 6.16 mostram os perfis de corrente e tensão para o cenário 3 com conexão na barra 18. Como dito anteriormente, a conexão da barra 18, assim como os cenários de baixo carregamento são mais instáveis, de convergência mais difícil. Aqui explica-se em parte o porque. Como se vê, o perfil de tensão tem um afundamento expressivo nos quartos de onda, 1/4 ou 3/4 dependendo do fato de ser extrair ou injetar potência. No caso da extração de 300MW a tensão atinge quase zero no primeiro quarto da onda, impactando consideravelmente a tensão nas linhas nas quais não há conexão intermediária.



(a) Perfil de tensão na linha com con. inter.

(b) Perfil de tensão na linha sem con. inter.

Figura 6.15: Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 18 em uma linha de 800kV no cenário 3.



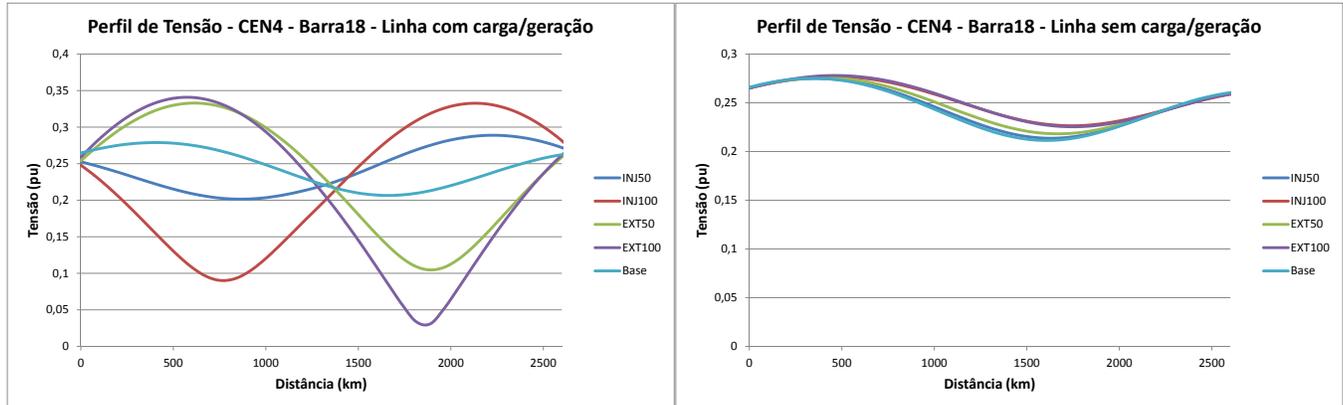
(a) Perfil de corrente na linha com con. inter.

(b) Perfil de corrente na linha sem con. inter.

Figura 6.16: Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 18 em uma linha de 800kV no cenário 3.

Esta mesma situação pode ser observada nos gráficos referentes aos ensaios do quarto cenário, aquele de menor carregamento do tronco e mostrado nas figuras 6.17 e 6.18. A perturbação

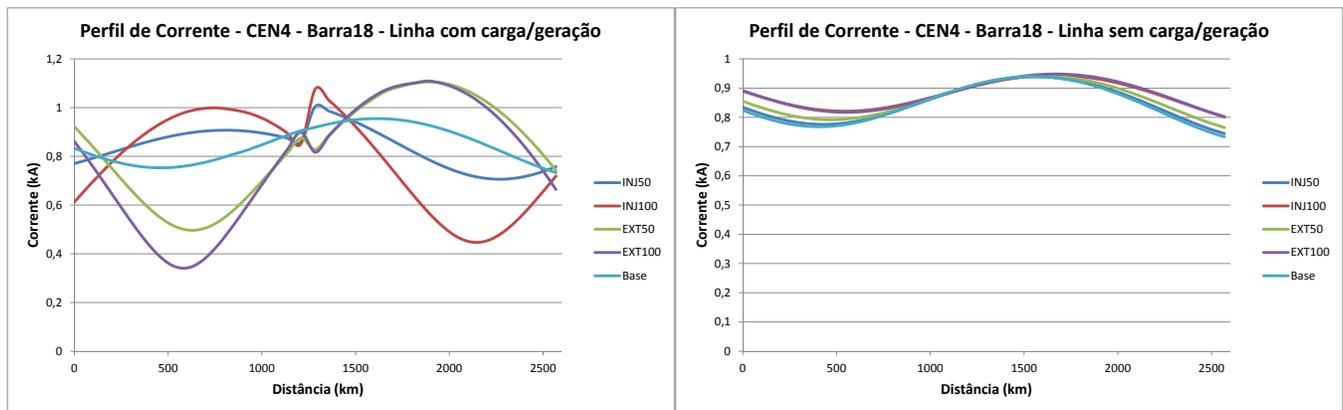
relativa na corrente constitui-se de um afundamento de mais de 60% tanto para injeção como extração de 100MW, enquanto o afundamento da tensão faz esta chegar cada vez mais próxima de zero, sendo provavelmente o principal motivo da não convergência deste cenário para potências injetadas/extraídas maiores que 100MW.



(a) Perfil de tensão na linha com con. inter.

(b) Perfil de tensão na linha sem con. inter.

Figura 6.17: Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 18 em uma linha de 800kV no cenário 4.



(a) Perfil de corrente na linha com con. inter.

(b) Perfil de corrente na linha sem con. inter.

Figura 6.18: Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 18 em uma linha de 800kV no cenário 4.

#### 6.3.1.4 Impacto nas Tensões Terminais e Central

Por fim, apresenta-se aqui as tensões terminais obtidas para estes ensaios. Essencialmente o mesmo que se disse anteriormente pode ser dito aqui. Apesar da mudança da configuração da conexão intermediária, as tensões terminais continuaram situando-se em valores adequados - com exceção das baixas tensões na barra de Assis para o cenário 1 - e seguindo as mesmas tendências mostradas na tabela 6.7.

Tabela 6.27: Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 9 em uma linha de 800kV.

		TENSÕES TERMINAIS (PU) - BARRA 09 - 1x800kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	Assis	0,897	0,900	0,903	0,906	0,894	0,892	0,889	0,887	0,896
	Altamira	0,987	0,987	0,987	0,987	0,986	0,986	0,986	0,985	0,987
CEN2	Assis	0,986	0,989	0,992	0,995	0,984	0,983	0,980	0,978	0,985
	Altamira	1,096	1,095	1,096	1,096	1,095	1,095	1,095	1,095	1,096
CEN3	Assis	1,027	1,026	1,024	1,022	1,030	1,031	1,035	1,038	1,028
	Altamira	1,032	1,032	1,033	1,033	1,031	1,031	1,030	1,029	1,031
CEN4	Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	-	1,080
	Altamira	1,062	1,061	1,059	1,058	1,063	1,063	1,063	-	1,0618
CEN5	Assis	1,046	1,046	1,045	1,042	1,048	1,048	1,050	1,052	1,047
	Altamira	1,041	1,041	1,041	1,044	1,041	1,040	1,040	1,038	1,041
CEN6	Assis	0,999	1,001	1,004	1,006	0,993	0,992	0,990	0,988	0,996
	Altamira	1,053	1,053	1,053	1,054	1,054	1,054	1,054	1,054	1,054

Tabela 6.28: Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 18 em uma linha de 800kV.

		TENSÕES TERMINAIS (PU) - BARRA 18 - 1x800kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	Assis	0,898	0,900	0,904	0,908	0,893	0,890	0,885	0,879	0,896
	Altamira	0,986	0,985	0,983	0,981	0,987	0,988	0,990	0,991	0,987
CEN2	Assis	0,990	0,994	0,998	1,002	0,982	0,979	0,968	0,961	0,985
	Altamira	1,094	1,092	1,090	1,088	1,096	1,097	1,099	1,100	1,096
CEN3	Assis	1,021	1,016	1,006	1,040	1,040	1,046	1,048	1,002	1,027
	Altamira	1,033	1,035	1,038	1,028	1,028	1,024	1,022	1,039	1,031
CEN4	Assis	1,080	1,080	-	-	1,080	1,080	-	-	1,080
	Altamira	1,059	1,056	-	-	1,066	1,067	-	-	1,062
CEN5	Assis	1,043	1,039	1,028	1,005	1,050	1,054	1,069	1,073	1,046
	Altamira	1,043	1,045	1,048	1,055	1,038	1,035	1,023	1,014	1,040
CEN6	Assis	1,006	1,010	1,016	1,019	0,985	0,983	0,974	0,964	1,003
	Altamira	1,050	1,049	1,047	1,045	1,057	1,057	1,060	1,062	1,051

Tabela 6.29: Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 27 em uma linha de 800kV.

		TENSÕES TERMINAIS (PU) - BARRA 27 - 1x800kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	Assis	0,894	0,893	0,890	0,885	0,897	0,899	0,901	0,904	0,896
	Altamira	0,985	0,984	0,981	0,978	0,988	0,989	0,992	0,995	0,987
CEN2	Assis	0,984	0,983	0,980	0,977	0,986	0,987	0,988	0,985	0,984
	Altamira	1,095	1,093	1,091	1,089	1,097	1,098	1,100	1,103	1,096
CEN3	Assis	1,028	1,029	1,029	1,029	1,028	1,027	1,024	1,018	1,028
	Altamira	1,033	1,034	1,036	1,039	1,030	1,029	1,027	1,025	1,031
CEN4	Assis	1,080	1,080	1,080	-	1,080	1,080	1,080	-	1,080
	Altamira	1,061	1,060	1,058	-	1,065	1,069	1,073	-	1,062
CEN5	Assis	1,056	1,058	1,058	1,058	1,053	1,051	1,048	1,047	1,055
	Altamira	1,048	1,050	1,053	1,058	1,044	1,043	1,039	1,036	1,046
CEN6	Assis	0,993	0,994	0,995	0,993	0,997	0,998	0,996	0,996	0,991
	Altamira	1,053	1,052	1,049	1,046	1,055	1,056	1,059	1,063	1,055

### 6.3.2 Linhas de 1000kV

Esta seção apresenta os resultados e comentários referentes aos ensaios com conexão intermediária em apenas uma linha do tronco CA de duas linhas de 1000kV.

A estrutura da apresentação seguirá a mesma usada até então e, como é de se esperar, os resultados não apresentam diferenças significativas daqueles obtidos nos ensaios para o tronco de 800kV, com a grande diferença residir no fato dos ensaios para o cenário 4 terem convergido até próximo do ponto desejado. Para este cenário, no caso da conexão na barra 9, obteve-se convergência para todos os casos, mas conseguiu-se extrair até 250MW; para conexão na barra 18, sabidamente mais sensível, conseguiu-se injetar até 230MW e extrair até 180MW; por fim, para conexão na barra 27 conseguiu-se convergência para todos os casos.

#### 6.3.2.1 Eficiência

As tabelas 6.30, 6.31 e 6.32 indicam as perdas obtidas nos respectivos ensaios com retirada/injeção de potência em apenas uma linha do tronco de 1000kV. Os valores se mantêm na faixa entre 12% e pouco mais de 13% apresentando a característica já descrita de melhora da eficiência conforme aumenta-se a potência injetada ou extraída. As perdas na linha em que não há conexão intermediária sofre pouca ou nenhuma alteração em relação ao caso base.

Tabela 6.30: Perdas para Injeção/Extração na barra 9 em apenas uma linha de 1000kV.

		PERDAS - BARRA 09 - 1x1000kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	LC	13,03%	12,99%	12,90%	12,82%	12,92%	12,78%	12,52%	12,25%	13,09%
	LS	12,00%	12,00%	11,99%	11,99%	12,01%	12,01%	12,02%	12,01%	13,09%
CEN2	LC	13,01%	12,96%	12,88%	12,80%	12,93%	12,80%	12,56%	12,32%	13,06%
	LS	12,88%	12,71%	12,38%	12,06%	13,05%	13,05%	13,05%	13,05%	13,06%
CEN3	LC	12,72%	12,31%	11,62%	11,03%	12,93%	12,77%	12,72%	12,70%	13,10%
	LS	13,14%	13,14%	13,12%	13,12%	13,15%	13,16%	13,18%	13,20%	13,14%
CEN4	LC	12,69%	12,27%	11,92%	12,27%	12,73%	12,19%	12,11%	11,92%	13,41%
	LS	13,40%	13,42%	13,47%	13,51%	13,34%	13,32%	13,28%	13,26%	13,41%
CEN5	LC	12,92%	12,69%	12,28%	11,88%	13,12%	13,06%	13,04%	13,08%	13,14%
	LS	13,17%	13,17%	13,18%	13,19%	13,16%	13,16%	13,15%	13,14%	13,14%
CEN6	LC	12,94%	12,88%	12,78%	12,68%	12,88%	12,76%	12,53%	12,30%	13,00%
	LS	13,00%	13,00%	13,01%	13,01%	12,99%	12,99%	12,99%	12,99%	13,00%

LC - linha com carga/geração intermediária LS - linha sem carga/geração intermediária

Tabela 6.31: Perdas para Injeção/Extração na barra 18 em apenas uma linha de 1000kV.

		PERDAS - BARRA 18 - 1x1000kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	LC	12,96%	12,90%	12,80%	12,69%	12,93%	12,82%	12,62%	12,44%	13,09%
	LS	12,04%	12,09%	12,19%	12,30%	11,94%	11,89%	11,79%	11,70%	13,09%
CEN2	LC	12,99%	12,94%	12,84%	12,75%	12,94%	12,83%	12,62%	12,42%	13,06%
	LS	12,87%	12,69%	12,35%	12,04%	13,06%	13,06%	13,08%	13,10%	13,06%
CEN3	LC	12,73%	12,51%	12,24%	12,24%	13,04%	12,93%	12,87%	13,00%	13,10%
	LS	13,24%	13,27%	13,29%	13,29%	13,19%	13,16%	13,11%	13,07%	13,14%
CEN4	LC	12,58%	13,17%	15,83%	17,55%	13,84%	14,54%	18,69%	-	13,41%
	LS	13,34%	13,27%	13,14%	13,12%	13,30%	13,26%	13,16%	-	13,41%
CEN5	LC	12,92%	12,73%	12,43%	12,20%	13,10%	13,02%	12,95%	12,92%	13,17%
	LS	13,18%	13,19%	13,21%	13,20%	13,16%	13,16%	13,17%	13,19%	13,14%
CEN6	LC	12,92%	12,88%	12,81%	12,74%	12,90%	12,80%	12,67%	12,53%	13,00%
	LS	12,99%	12,99%	12,99%	12,99%	13,00%	13,00%	13,00%	13,00%	13,00%

LC - linha com carga/geração intermediária LS - linha sem carga/geração intermediária

Tabela 6.32: Perdas para Injeção/Extração na barra 27 em apenas uma linha de 1000kV.

		PERDAS - BARRA 27 - 1x1000kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	LC	13,02%	12,93%	12,79%	-	13,02%	12,93%	12,76%	12,64%	13,09%
	LS	12,02%	12,03%	12,01%	-	12,01%	12,01%	12,03%	12,04%	13,09%
CEN2	LC	12,97%	12,89%	12,72%	12,50%	12,96%	12,88%	12,70%	12,56%	13,06%
	LS	12,88%	12,71%	12,38%	12,07%	13,06%	13,06%	13,07%	13,11%	13,06%
CEN3	LC	12,84%	12,57%	12,22%	12,00%	12,81%	12,49%	11,91%	11,42%	13,10%
	LS	13,18%	13,21%	13,31%	13,43%	13,12%	13,10%	13,07%	13,07%	13,14%
CEN4	LC	12,55%	11,83%	10,81%	10,24%	13,16%	13,31%	13,87%	15,18%	13,41%
	LS	13,30%	13,24%	13,15%	13,11%	13,42%	13,51%	13,77%	14,15%	13,41%
CEN5	LC	13,00%	12,84%	12,58%	12,40%	13,11%	12,97%	12,76%	12,69%	13,17%
	LS	13,13%	13,13%	13,12%	13,12%	13,24%	13,26%	13,35%	13,38%	13,14%
CEN6	LC	12,89%	12,80%	12,66%	12,54%	12,92%	12,85%	12,72%	12,65%	13,00%
	LS	12,99%	12,99%	12,97%	12,97%	13,01%	13,02%	13,04%	13,06%	13,00%
LC - linha com carga/geração intermediária LS - linha sem carga/geração intermediária										

### 6.3.2.2 Carregamento

Quanto a este parâmetro, nada de novo pode ser dito, as tendências de aumento ou diminuição do carregamento seguem as descritas na tabela 6.26. Pode-se notar que no cenário 4, principalmente quando a conexão se dá na barra 18, pode-se notar uma tendência do carregamento diminuir bruscamente até a não convergência do caso.

Tabela 6.33: Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 9 em apenas uma linha de 1000kV.

		CARREGAMENTO (MW) - BARRA 09 - 1x1000kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	LC	3342,9	3351,9	3364,4	3377,1	3366,5	3360,3	3348,1	3343,0	3328,3
	LS	3332,0	3321,3	3309,1	3296,9	3323,1	3329,1	3340,5	3365,5	3328,3
CEN2	LC	3631,1	3637,9	3652,0	3665,8	3624,0	3617,2	3603,5	3589,9	3623,4
	LS	3616,8	3609,3	3594,5	3579,3	3638,3	3645,7	3660,5	3675,0	3623,4
CEN3	LC	911,4	858,8	744,1	631,0	1029,4	1089,1	1207,2	1331,0	968,1
	LS	974,6	978,0	986,5	994,7	965,6	960,9	952,8	942,8	967,9
CEN4	LC	446,8	449,2	464,7	474,1	425,1	414,0	398,2	391,4	432,1
	LS	433,1	430,8	423,6	418,1	441,2	445,3	453,0	456,6	432,1
CEN5	LC	2115,8	2067,9	1955,3	1844,1	2211,6	2269,0	2365,9	2459,6	2171,9
	LS	2163,9	2164,1	2173,5	2182,5	2163,7	2159,1	2167,1	2166,6	2172,1
CEN6	LC	3561,7	3567,0	3579,8	3592,5	3549,2	3542,9	3530,4	3517,9	3563,8
	LS	3547,8	3540,8	3526,0	3510,5	3563,0	3570,5	3585,5	3600,4	3557,2
LC - linha com carga/geração intermediária LS - linha sem carga/geração intermediária										

Tabela 6.34: Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 18 em apenas uma linha de 1000kV.

		CARREGAMENTO (MW) - BARRA 18 - 1x1000kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	LC	3340,3	3310,1	3250,9	3209,3	3371,8	3385,9	3382,7	3387,3	3328,3
	LS	3362,9	3378,0	3407,9	3425,7	3350,7	3345,0	3342,9	3339,2	3328,3
CEN2	LC	3612,8	3580,4	3531,0	3486,7	3649,1	3664,1	3662,3	3656,8	3623,4
	LS	3643,8	3662,3	3688,7	3711,5	3624,8	3617,3	3614,4	3614,5	3623,4
CEN3	LC	937,0	912,6	815,7	693,2	988,5	1003,6	1017,5	1012,9	968,1
	LS	956,5	947,8	949,7	961,6	977,7	989,8	1019,7	1056,2	967,9
CEN4	LC	405,8	342,4	150,5	79,5	389,3	359,4	256,0	-	432,1
	LS	441,5	456,3	502,1	519,5	450,0	459,4	487,7	-	432,1
CEN5	LC	2145,7	2104,4	1998,1	1874,7	2173,9	2199,9	2214,8	2232,0	2171,9
	LS	2146,5	2143,3	2151,8	2176,1	2185,4	2199,0	2249,6	2281,9	2172,1
CEN6	LC	3541,1	3531,2	3516,4	3508,6	3568,7	3580,8	3569,7	3543,8	3563,8
	LS	3561,9	3571,3	3578,8	3577,2	3549,6	3544,4	3548,1	3569,4	3557,2

LC - linha com carga/geração intermediária LS - linha sem carga/geração intermediária

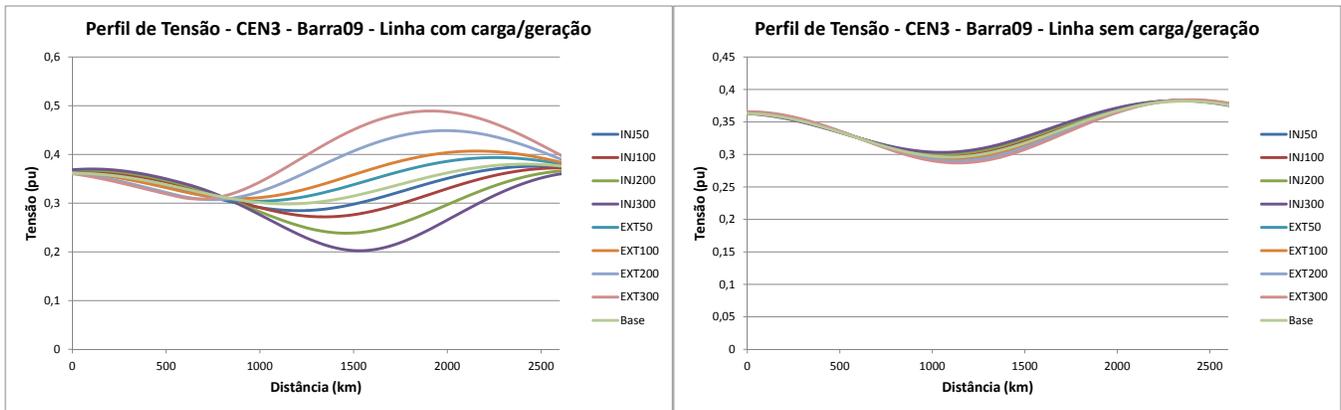
Tabela 6.35: Carregamento do Tronco para Injeção/Extração na barra 27 em apenas uma linha de 1000kV.

		CARREGAMENTO (MW) - BARRA 27 - 1x1000kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	LC	3297,6	3266,1	3206,5	-	3361,8	3406,3	3475,2	3554,3	3328,3
	LS	3357,7	3373,3	3390,4	-	3308,3	3293,4	3266,7	3237,2	3328,3
CEN2	LC	3579,9	3532,2	3444,4	3384,3	3653,1	3697,9	3756,5	3838,7	3623,4
	LS	3642,3	3667,5	3714,0	3747,6	3599,1	3579,5	3556,7	3516,9	3623,4
CEN3	LC	971,6	971,7	975,2	980,3	968,9	967,8	966,2	965,6	968,1
	LS	955,2	938,0	908,0	877,3	985,0	999,8	1028,6	1057,2	967,9
CEN4	LC	380,1	322,0	213,3	108,3	472,7	522,3	648,8	786,7	432,1
	LS	447,8	458,8	479,1	498,2	431,1	422,0	393,7	363,0	432,1
CEN5	LC	2179,0	2183,7	2205,8	2212,4	2162,4	2153,4	2134,2	2129,1	2171,9
	LS	2148,9	2125,9	2095,9	2059,2	2188,1	2204,5	2255,0	2273,1	2172,1
CEN6	LC	3511,1	3475,1	3406,8	3347,8	3600,0	3644,6	3707,1	3769,3	3563,8
	LS	3574,6	3595,6	3626,0	3647,0	3536,0	3516,2	3488,9	3461,4	3557,2

LC - linha com carga/geração intermediária LS - linha sem carga/geração intermediária

### 6.3.2.3 Perfis de Tensão e Corrente

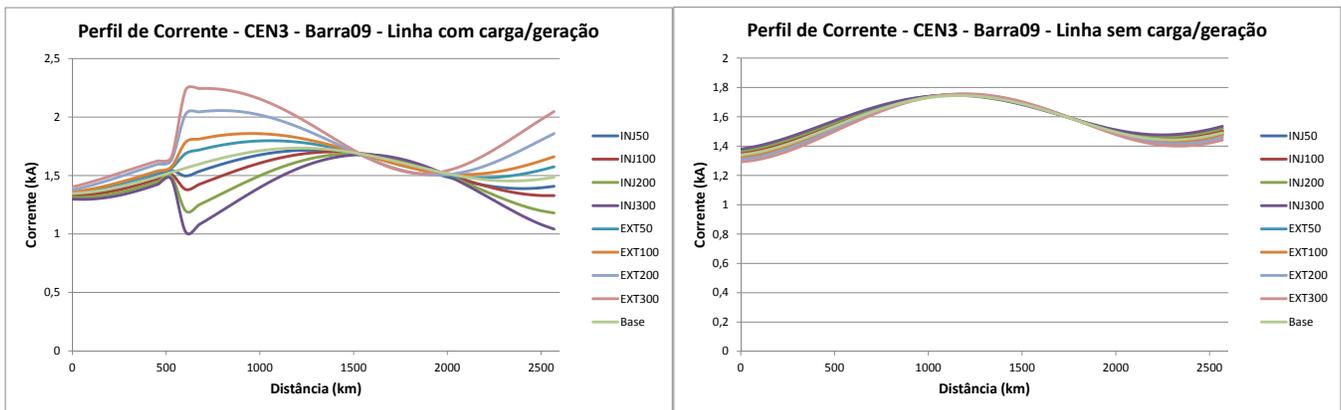
Apresenta-se aqui os perfis de tensão e corrente para alguns casos, dando-se novamente a preferência por abordar casos mais problemáticos



(a) Perfil de tensão na linha com con. inter.

(b) Perfil de tensão na linha sem con. inter.

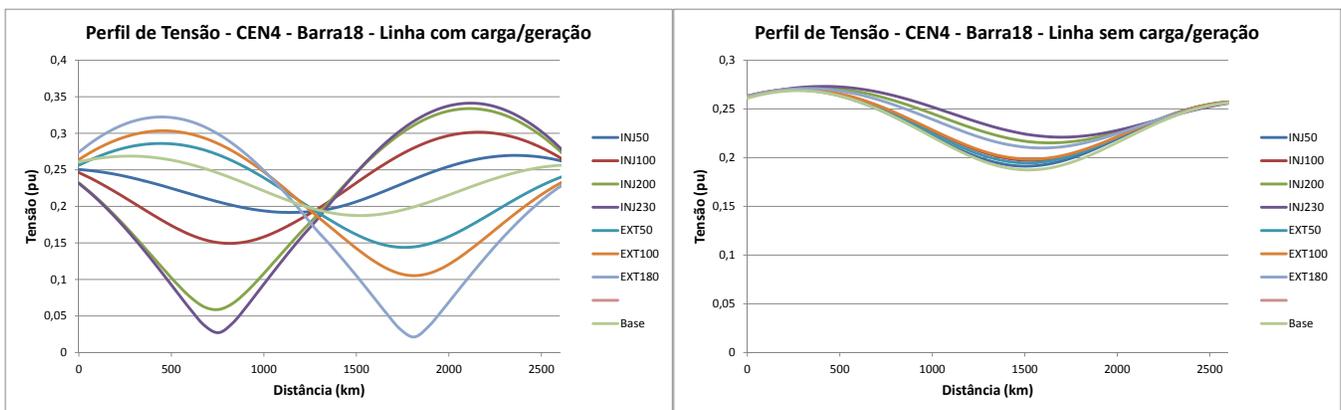
Figura 6.19: Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 9 em uma linha de 1000kV no cenário 3.



(a) Perfil de corrente na linha com con. inter.

(b) Perfil de corrente na linha sem con. inter.

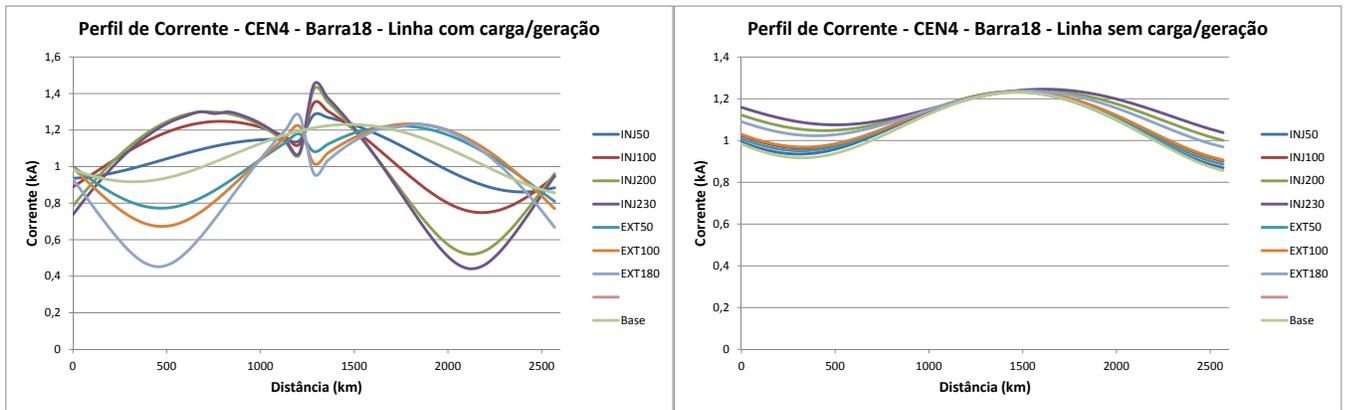
Figura 6.20: Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 9 em uma linha de 1000kV no cenário 3.



(a) Perfil de tensão na linha com con. inter.

(b) Perfil de tensão na linha sem con. inter.

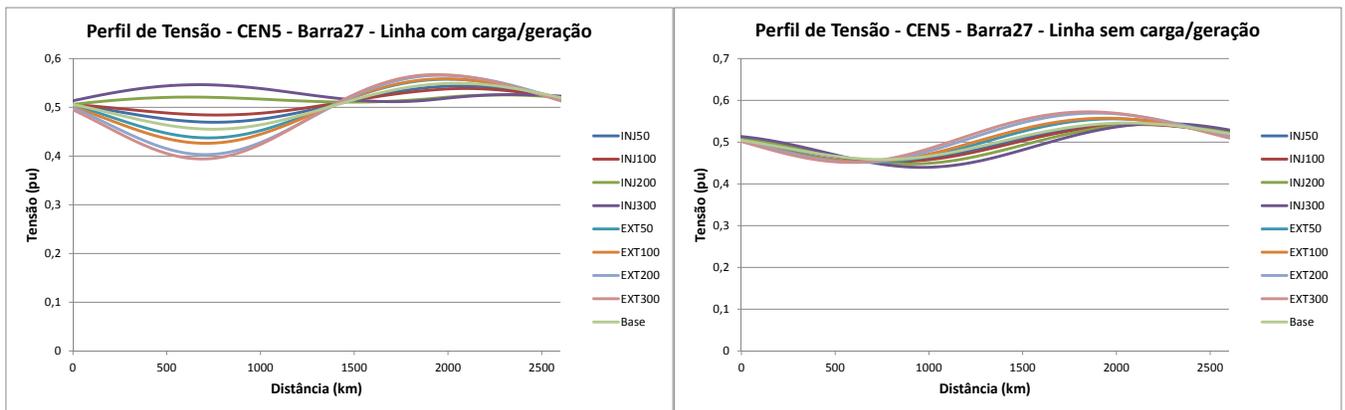
Figura 6.21: Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 18 em uma linha de 1000kV no cenário 4.



(a) Perfil de corrente na linha com con. inter.

(b) Perfil de corrente na linha sem con. inter.

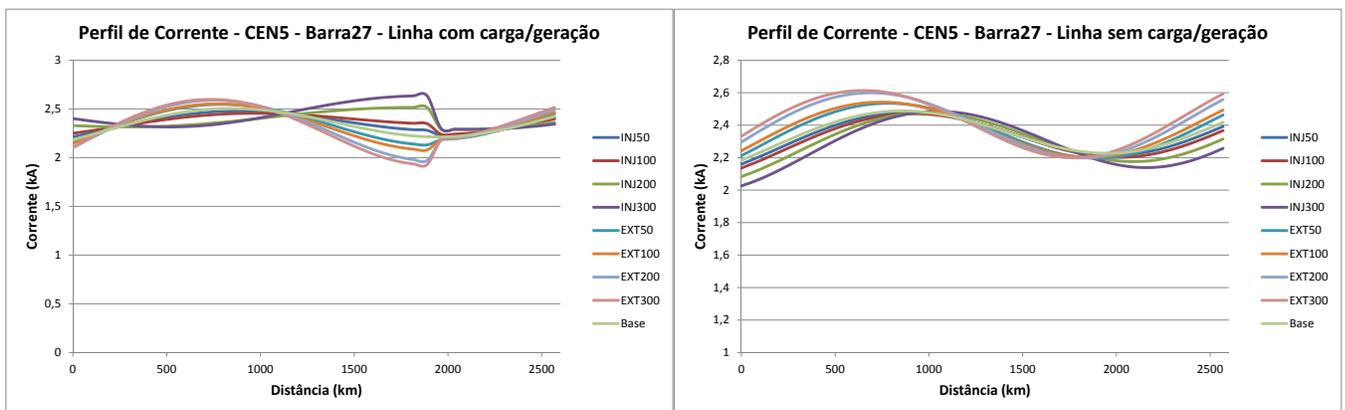
Figura 6.22: Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 18 em uma linha de 1000kV no cenário 4.



(a) Perfil de tensão na linha com con. inter.

(b) Perfil de tensão na linha sem con. inter.

Figura 6.23: Perfis de tensão para extração/injeção de potência na barra 27 em uma linha de 1000kV no cenário 5.



(a) Perfil de corrente na linha com con. inter.

(b) Perfil de corrente na linha sem con. inter.

Figura 6.24: Perfis de corrente para extração/injeção de potência na barra 27 em uma linha de 1000kV no cenário 5.

Os perfis mostram o que já foi afirmado anteriormente: a linha na qual não há conexão intermediária permanece praticamente sem perturbações na tensão e na corrente enquanto a linha na qual conecta-se a carga/geração intermediária apresenta modificações nos perfis de tensão e corrente qualitativamente iguais à situação em que a conexão se dá nas duas linhas do tronco. No cenário 4, novamente percebe-se uma tendência da tensão a aproximar-se do zero, o que contribui para a limitação da potência que pode-se inserir ou retirar da linha.

#### 6.3.2.4 Impacto nas Tensões Terminais e Central

Quanto à este último parâmetro analisado a diferença está por conta da tensão da barra de carga/geração intermediária quando a conexão se dá na barra 27 no cenário 4. Diferentemente das situações passadas em que a variação nesta não foi significativa, neste caso específico as tensões variaram consideravelmente, chegando à 0,886 pu após uma tendência de queda, como pode ser observado na tabela 6.36

Tabela 6.36: Tensões na barra intermediária conectada na barra 27 em uma linha de 1000kV.

	TENSÃO CENTRAL (PU) - BARRA 27 - 1x1000kV							
	Injeção (MW)				Extração (MW)			
	50	100	200	300	50	100	200	300
<b>CEN1</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,997	0,997	0,997
<b>CEN2</b>	1,002	1,002	1,007	1,012	1,007	1,005	1,000	0,996
<b>CEN3</b>	1,004	1,004	1,004	1,004	1,007	1,011	1,011	1,011
<b>CEN4</b>	1,006	1,006	1,018	1,043	0,989	0,971	0,932	0,886
<b>CEN5</b>	1,000	1,000	0,995	0,990	1,000	1,003	1,003	1,006
<b>CEN6</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,997	0,997	0,993

Tabela 6.37: Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 9 em uma linha de 1000kV.

		TENSÕES TERMINAIS (PU) - BARRA 09 - 1x1000kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
<b>CEN1</b>	Assis	0,894	0,895	0,897	0,900	0,890	0,889	0,886	0,890	0,874
	Altamira	0,973	0,974	0,974	0,975	0,974	0,974	0,973	0,974	0,973
<b>CEN2</b>	Assis	0,957	0,958	0,960	0,962	0,952	0,951	0,949	0,946	0,955
	Altamira	1,080	1,080	1,080	1,081	1,081	1,081	1,080	1,080	1,079
<b>CEN3</b>	Assis	1,040	1,038	1,037	1,036	1,041	1,042	1,046	1,046	1,039
	Altamira	1,032	1,033	1,033	1,034	1,032	1,032	1,030	1,030	1,033
<b>CEN4</b>	Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
	Altamira	1,060	1,060	1,059	1,058	1,060	1,060	1,062	1,062	1,062
<b>CEN5</b>	Assis	0,997	0,997	0,996	0,995	0,998	0,998	0,998	0,999	1,000
	Altamira	1,016	1,017	1,017	1,017	1,014	1,014	1,012	1,011	1,015
<b>CEN6</b>	Assis	0,996	0,998	1,000	1,001	0,995	0,994	0,992	0,991	0,998
	Altamira	1,043	1,042	1,043	1,043	1,043	1,042	1,042	1,042	1,043

Tabela 6.38: Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 18 em uma linha de 1000kV.

		TENSÕES TERMINAIS (PU) - BARRA 18 - 1x1000kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	Assis	0,896	0,898	0,901	0,903	0,892	0,890	0,887	0,883	0,874
	Altamira	0,976	0,974	0,972	0,970	0,978	0,979	0,980	0,982	0,973
CEN2	Assis	0,956	0,958	0,962	0,965	0,952	0,950	0,941	0,932	0,955
	Altamira	1,081	1,079	1,077	1,075	1,082	1,083	1,085	1,086	1,079
CEN3	Assis	1,036	1,032	1,026	1,020	1,048	1,051	1,056	1,061	1,039
	Altamira	1,034	1,036	1,039	1,042	1,028	1,027	1,023	1,020	1,033
CEN4	Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	-	1,080
	Altamira	1,057	1,054	1,051	1,050	1,063	1,064	1,067	-	1,062
CEN5	Assis	0,994	0,989	0,981	0,972	0,999	0,999	0,998	0,996	1,000
	Altamira	1,019	1,022	1,026	1,030	1,012	1,010	1,005	1,002	1,015
CEN6	Assis	0,997	1,007	1,017	1,023	0,994	0,992	0,973	0,965	0,998
	Altamira	1,042	1,038	1,035	1,032	1,044	1,045	1,049	1,051	1,043

Tabela 6.39: Tensões nas Barras de Conexão para extração na Barra 27 em uma linha de 1000kV.

		TENSÕES TERMINAIS (PU) - BARRA 27 - 1x1000kV								
		Injeção (MW)				Extração (MW)				Base
		50	100	200	300	50	100	200	300	
CEN1	Assis	0,901	0,901	0,896	-	0,893	0,896	0,896	0,897	0,874
	Altamira	0,969	0,968	0,961	-	0,973	0,974	0,978	0,982	0,973
CEN2	Assis	0,953	0,950	0,944	0,936	0,953	0,955	0,951	0,956	0,955
	Altamira	1,078	1,077	1,076	1,075	1,081	1,082	1,085	1,087	1,079
CEN3	Assis	1,042	1,040	1,041	1,042	1,040	1,039	1,037	1,035	1,039
	Altamira	1,033	1,035	1,037	1,039	1,031	1,030	1,028	1,026	1,033
CEN4	Assis	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
	Altamira	1,059	1,058	1,057	1,055	1,062	1,063	1,066	1,069	1,062
CEN5	Assis	1,000	1,001	0,999	1,003	1,005	1,001	0,999	0,994	1,000
	Altamira	1,018	1,021	1,028	1,032	1,009	1,007	1,001	0,998	1,015
CEN6	Assis	0,993	0,994	0,992	0,994	0,998	1,000	0,996	0,991	0,998
	Altamira	1,041	1,040	1,037	1,033	1,044	1,045	1,049	1,054	1,043

Quanto ao restante, mostrado nas tabelas 6.37, 6.38 e 6.39, pode-se afirmar o mesmo de anteriormente quanto aos valores dentro da normalidade com exceção do cenário 1 e tendências seguindo a tabela 6.7.

## 6.4 Conclusões Parciais

Este capítulo visou explorar a possibilidade de integrar cargas e pequenas usinas no tronco de meia onda. A perspectiva tratada tem em vista que este passará por regiões de baixa densidade populacional, e neste sentido as potências aqui simuladas são superestimadas para o atual cenário brasileiro, no entanto o estudo aqui visa uma perspectiva teórica e de prospecção em cenários de longo prazo nos quais as atuais demandas de potência a serem injetadas ou extraídas tendem a aumentar.

Pode-se dizer que, nas variáveis observadas (eficiência, carregamento, impacto nas tensões terminais, perfis de tensão e corrente), a conexão de subestações intermediárias não impacta de forma significativa de maneira a justificar o descarte de seu uso ou a necessidade desta. Essa análise deve ser feita tomando em conta outros parâmetros como, por exemplo, as já citadas dificuldades de construção e controle de transformador de tão larga flexibilidade de variação de tap.

Outro ponto importante para a análise acima citada é a estabilidade do sistema com a conexão intermediária dado que a prioridade do tronco é o fluxo Norte-Sudeste e não a conexão destas pequenas carga/usinas. Percebeu-se pelo que foi apresentado anteriormente que no caso de baixo carregamento do tronco a estabilidade fica comprometida, principalmente com cargas/injeções maiores. Esta conclusão foi tirada pela dificuldade de convergência do sistema; pela necessidade de flexibilização dos limites dos tapes terminais (perdendo em eficiência) e pelo constante ajuste do tap do transformador de conexão. No entanto, este problema é reduzido ou inexistente para cenários de mais alto carregamento. Esta característica tende a afirmar conclusões já tiradas nos capítulos anteriores que um tronco de meia onda deve ser pensado para operar com uma potência de carregamento aproximadamente constante, próxima da nominal e com um sentido prioritário de fluxo de potência. Ainda assim, dado que a prioridade do tronco HWL+ é o intercâmbio das grandes montantes de potência, a inserção de pequenas cargas ou geração no intermediário deste implica em uma perturbação na operação que pode comprometer sua estabilidade.

Trabalhando com a perspectiva da inclusão de uma conexão intermediária no tronco, deve-se abordar a opção entre a conexão em apenas uma ou todas as linhas do tronco. Na configuração em que a extração/injeção se dá em todas as linhas há uma facilidade operacional que é o do impacto causado ser igual em todas as linhas. Como os terminais de envio e recepção destas são comuns, a inserção de uma subestação intermediária conectada em todas as linhas paralelas do tronco implica num sistema mais estável do que na configuração em que esta é instalada em apenas uma linha. Isso porque a injeção ou extração de potência impacta nas tensões terminais da linha na qual foi conectada, havendo uma divergência de valores entre a linha na qual foi conectada e aquela(s) na(s) quas(is) não foram caso seja conectada em apenas uma linha. Este problema poderia todavia, ser resolvido com o controle separado dos tapes terminais ou com a conexão de cada linha do tronco em terminais receptores diferentes, o que implicaria em novos estudos e mudanças significativas no SIN.

Por outro lado há vantagens em se extrair de apenas uma linha. A primeira diz respeito ao custo, que seria de apenas um circuito e um transformador, muito mais adequado para o montante de potência que se deseja extrair e levando em conta que as linhas, apesar de

---

eletricamente paralelas possuem uma distância considerável entre uma e outra. A segunda refere-se às proteções e à estabilidade em caso de falta em uma linha do tronco, pois, como na extração/injeção em todos os circuitos as barras estão eletricamente conectadas não apenas nos dois terminais, mas também em um ponto intermediário do tronco, fazendo com que seja necessário um esquema de proteção que desligue a carga/geração no intermediário da linha ou desconecte o ramo que deriva da linha em falta para isolá-la também neste ponto de conexão.



## Conclusões

Este capítulo visa analisar brevemente e de maneira entrelaçada os resultados obtidos anteriormente, trazendo as conclusões e indicativos de implementação de um possível tronco de transmissão em meia onda, traçando novas perspectivas de estudos necessários para análise da viabilidade de tal implementação.

Antes de abordar as conclusões do trabalho anteriormente apresentado vale fazer algumas observações sobre o mesmo. Como já descrito anteriormente, o trabalho utilizou cenários que não foram montados no âmbito desta dissertação. Estes cenários, quando montados traziam uma perspectiva de longo prazo, mas já não tão distantes do momento de defesa desta dissertação. Os cenários da EPE para longo prazo (2021) já prevêem modificações expressivas em relação a estes aqui tratados. A mais importante talvez seja a conexão da nova interligação Norte-Sudeste em pontos diferentes dos daqui propostos. Aqui trabalha-se com um tronco CA único saindo da mesma barra e conectando em ponto comum além de um tronco CC conectando no Nordeste. Na nova perspectiva há dois links CC conectando Altamira ao sudeste. O primeiro conectado na barra de Estreito-MG e o segundo em Nova Iguaçu-RJ, ambos na rede de 500kV. Abre-se então a opção de conexão de um tronco CA em cada uma dessas respectivas barras e a possibilidade de novos estudos.

Vale ressaltar que tal possibilidade implicaria em amenizar problemas enfrentados neste trabalho. Um deles é exatamente a alta variação do carregamento, pois em baixo carregamento poderia-se optar pelo desligamento de um tronco, deixando o escoamento por conta do outro. Além disso, o montante de potência injetada na barra de Assis não é trivial e efeitos como sobre e subtensão foram constatados neste trabalho, efeitos que poderiam ser amenizados ao dividir-se a recepção desta potência em dois troncos diferentes. Um terceiro aspecto que seria amenizado com esta opção já foi tratado no capítulo 6, que é justamente amenizar a divergência entre tensões e carregamento das linhas paralelas no caso de conexão de subestações intermediárias em apenas uma linha do tronco, isso imaginando a possibilidade de um tronco de apenas uma linha; ainda sobre a inserção de conexão intermediária, poderia-se atender regiões diferentes tendo em vista que cada tronco passa por regiões distintas.

Regressando aos ensaios realizados no âmbito desta dissertação, retomam-se análises já realizadas nas seções relativas às conclusões parciais de cada capítulo. É importante deixar claro que muitos ensaios e análise realizados se deram por heurística, a obtenção de certos resultados

em um estudo implicaram em um impulso para tentar abordar aspectos, causas e consequências dos fatores que determinaram os resultados previamente obtidos. Independentemente disso, observa-se ao longo do trabalho que podem-se definir dois tipos de divisões nos cenários estudados e que pautaram a análise ao longo desta dissertação. A primeira divisão diz respeito ao carregamento das linhas e a divisão entre alto e baixo carregamento destas. Do ponto de vista dos ajustes para melhorar a eficiência, os cenários de alto carregamento mostraram mais facilidade dado que a mudança na tensão operacional a ser realizada é menor, implicando inclusive em menor desafio na construção e operação do tronco; tais cenários também mostraram-se de maior estabilidade numérica, obtendo maior taxa de convergência dos fluxos de carga rodados. Já os cenários de baixo carregamento mostram-se problemáticos não apenas pela tensão de operação para melhorar a eficiência ser muito menor que a nominal, implicando em transformadores para os quais desconhece-se as dificuldades construtivas e operacionais; o fato deste ajuste da tensão operacional implicar numa redução considerável do carregamento é outro problema apresentado nos cenários de baixo carregamento. Fez-se então necessário a aplicação de transformadores defasadores com defasagem fora da faixa possível com a combinação proposta de um transformador inversor em série com um PST comum de defasagem  $\pm 30^\circ$  e que resultaria numa faixa de  $150^\circ$  a  $210^\circ$ . Mesmo com a aplicação destas medidas, a eficiência nos cenários de baixo carregamento mostra-se menor que naqueles de mais alto carregamento. Por último, numa possível conexão intermediária no tronco, os cenários de baixo carregamento, em especial com conexão no centro da linha, mostram-se mais instáveis e com maiores desafios na sua operação.

A segunda divisão importante nas análises se dá entre os cenários em que o subsistema Norte é exportador e naqueles em que é importador. De fato, como espera-se que o subsistema Norte seja majoritariamente exportador ao longo do ano e sua demanda de potência é muito menor em relação aos outros subsistemas do SIN, estes cenários também são cenários de baixo carregamento do tronco CA. Estes cenários, não só pelo fato de serem de baixo carregamento, mas por tratarem de uma situação no qual o SIN como um todo está mais sensível, também resultaram em baixa flexibilidade do tronco CA além de dificuldades de convergência, aumento de perdas e necessidade de ajustes constantes nos tapes dos transformadores de conexão.

A análise acima corrobora o que foi afirmado anteriormente: a opção por um tronco em meia onda deve ser feita priorizando situação na qual o carregamento deste mantenha-se aproximadamente constante e em sentido único. Variação possível disto já foi descrita anteriormente, na seção 4.4 e constituiu-se de uma alternativa com duas situações de carregamento distintas ao longo do ano. Novamente, à longo prazo provavelmente esta será a configuração "natural" do SIN, com o Norte essencialmente exportador e com maior capacidade de potência instalada, potência que deverá ser majoritariamente despachada para outras regiões.

Vale ressaltar que, apesar da divisão dos capítulos e suas seções ter-se dado muitas vezes entre ensaios com linhas de 800kV e ensaios com linhas de 1000kV, não se pode observar diferenças qualitativas significativas quanto aos parâmetros analisados como eficiência, estabilidade, etc... que justifiquem a opção por um ou outro nível de tensão. A diferença está muito mais pela capacidade de carregamento deste tronco, podendo o de 1000kV suportar uma quantidade maior de fluxo de potência. Dentro de um cenário de longo prazo, no qual está prevista a construção de mais algumas UHEs de grande porte na região Norte, a opção pelo tronco de 1000kV torna-se

mais interessante dado que representaria maior folga para expansão do parque de geração nesta região.

## 7.1 Trabalhos Futuros

Alguns problemas abordados nesta dissertação mereceriam estudo mais aprofundado. O primeiro deles, e que norteia parte deste trabalho, é o fato das linhas operarem preferencialmente com sua SIL operacional. Como a limitação do carregamento da linha encontra-se próximo de 1,4SIL, a perda de uma linha, mesmo num tronco com três linhas implicaria em uma necessidade de descarte de carga dado que cada linha deveria suportar metade do carregamento da linha perdida, resultando então num carregamento de 1,5SIL. Tal situação implicaria no não atendimento do critério N-1 geralmente adotado para o planejamento da expansão de um sistema de transmissão no sistema brasileiro. O critério estabelece que na contingência simples de qualquer elemento da rede básica o sistema deverá permanecer dentro dos limites de operação sem provocar qualquer corte de carga. Há de se ter em conta que um possível descarte de cargas implicaria numa coordenação do sistema de proteção da linha com as cargas do SIN a serem descartadas, o que implica em grande dificuldade de implementação desta tecnologia dado que os estudos de curto-circuito, de localização de falhas como de proteção em geral para uma linha HWL+ ainda estão em estágio pouco avançado.

Um segundo problema apresentado é a construção e operação dos transformadores de conexão. Como dito anteriormente, mesmo que a variação do carregamento seja baixa, haverá necessidade de controle da tensão operacional que implique na redução das perdas. Tal controle, no caso da opção de fazê-lo através dos tapes dos transformadores deverá implicar num estudo da possibilidade de ter tal variação; da vida útil dos transformadores; da possibilidade de chaveamento em carga além de um sistema de controle e coordenação entre os mesmos.

Um terceiro problema e que de certa maneira se relaciona com o segundo é a necessidade de controle do fluxo de reativos pela linha. O excesso de fluxo destes pela linha além de diminuir a eficiência, também pode ocasionar pontos de sobretensão ao longo da mesma, implicando em isoladores mais robustos no intuito de evitar curtos. Este problema é menos grave caso a linha opere com um carregamento levemente abaixo do nominal, visto que as sobretensões serão menores, mas ainda restando o problema da perda de eficiência. O presente trabalho mostrou que há uma correlação entre as tensões terminais da linha e o fluxo de reativos e que a mudança dos tapes impacta neste quesito, mas sem apresentar formulação que permita prever o montante destes. De qualquer forma, não puderam-se observar nos perfis de tensões e correntes apresentados, situações em que o fator de potência se desviasse muito do nominal a ponto de causar picos de tensão ao longo da linha. Ainda sobre tal questão, uma investigação usando eletrônica de potência, ou outras formas de compensação de reativos é necessária, pensando não apenas na eficiência da linha como também no impacto nas tensões das barras de conexão.

Por fim, este trabalho tem como ponto de destaque dentro da bibliografia apresentada o fato dos testes com linhas de meia onda terem sido realizados dentro de um sistema interligado e não apenas com a linha isolada. De toda forma, resumiu-se ao tratamento destas em regime permanente, deixando aberta a possibilidade e necessidade de um tratamento destas inseridas

no SIN com intuito de analisarem-se os aspectos transitórios em operação normal e em caso de falhas.

# Bibliografia

- [1] [http://www.ons.org.br/download/biblioteca\\_virtual/publicacoes/dados\\_relevantes\\_2011/index.html](http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/dados_relevantes_2011/index.html).
- [2] M. Tavares and C. Portela, "Proposition of a half-wave length energization case test," in *IPST 2009. International Conference on Power Systems Transients, 2-6 June 2009.*, pp. 1–6, 2009.
- [3] [http://www.ons.org.br/download/biblioteca\\_virtual/publicacoes/dados\\_relevantes\\_2011/08-Evolucao-da-Carga-de-Demanda-MW-h.html](http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/dados_relevantes_2011/08-Evolucao-da-Carga-de-Demanda-MW-h.html).
- [4] R. Dias, A. Lima, C. Portela, and M. Aredes, "Non conventional transmission line with facts in electromagnetic transient programs," in *IPST 2009. International Conference on Power Systems Transients, 2-6 June 2009.*, pp. 1–7, 2009.
- [5] F. Gatta and F. Iliceto, "Analysis of some operation problems of half-wave length power transmission lines," in *AFRICON '92 Proceedings., 3rd AFRICON Conference*, pp. 59–64, 1992.
- [6] C. Portela, J. Silva, and M. Alvim, "Non-conventional ac solutions adequate for very long distance transmission - an alternative for the amazon transmission system," in *IEC/CIGRE UHV International Symposium Beijing 2007-07-18/21, 2007, Beijing*, pp. 1–29, 2007.
- [7] C. Portela and M. Aredes, "Very long distance transmission," in *Proceedings 2003 International Conference on AC Power Delivery at Long and Very Long Distances, Novosibirsk, Russia*, pp. 385–394, September 2003.
- [8] A. Drujinin, G. Samorodov, and V. Kobylin, "Methods of active loss minimization in half-wave lines (by the example of power export from uchur hydro power plants to south korea)," in *Proceedings of Asian Energy Cooperation*, September 2004.
- [9] F. Iliceto and E. Cinieri, "Analysis of half-wavelength transmission lines with simulation of corona losses," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 4, pp. 2081–2091, 1988.
- [10] M. Aredes and R. Dias, "Facts for tapping and power flow control in half-wavelength transmission lines," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 10, pp. 3669–3679, 2012.

- 
- [11] M. Aredes and R. F. S. Dias, "A shunt facts device for tapping and power flow control in half-wavelength transmission lines," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific*, pp. 1–6, 2011.
- [12] D. de Souza, "Análise do sistema de transmissão em meia onda integrado ao sistema interligado nacional," mestrado, COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ, 2011.
- [13] R. Dias, G. Santos, and M. Aredes, "Analysis of a series tap for half-wavelength transmission lines using active filters," in *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th*, pp. 1894–1900, 2005.
- [14] F. Hubert and M. R. Gent, "Half-wavelength power transmission lines," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 84, no. 10, pp. 965–974, 1965.
- [15] F. Prabhakara, K. Parthasarathy, and H. Ramachandra Rao, "Analysis of natural half-wave-length power transmission lines," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-88, no. 12, pp. 1787–1794, 1969.
- [16] F. Prabhakara, K. Parthasarathy, and H. Ramachandra Rao, "Performance of tuned half-wave-length power transmission lines," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-88, no. 12, pp. 1795–1802, 1969.
- [17] J. Verboomen, D. Van Hertem, P. Schavemaker, W. Kling, and R. Belmans, "Phase shifting transformers: principles and applications," in *Future Power Systems, 2005 International Conference on*, pp. 6 pp.–6, 2005.
- [18] A. J. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. Edgard Blücher LTDA, 1983.
- [19] M. Tavares and R. Torquato, "Attending small loads along a half-wavelength transmission line," in *Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2011 IEEE*, pp. 255–259, 2011.
- [20] M. Aredes and R. Dias, "Comparisons between a series and a shunt facts for tapping and power flow control in half-wavelength transmission lines," in *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International*, pp. DS3b.20–1–DS3b.20–7, 2012.