

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CAUÊ MELGAREJO MENDONÇA

**ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE DA CONEXÃO DA USINA EÓLICA
CERRO CHATO NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO**

**ALEGRETE
2013**

CAUÊ MELGAREJO MENDONÇA

**ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE DA CONEXÃO DA USINA EÓLICA
CERRO CHATO NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção de grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: José Wagner Kaehler

**Alegrete
2013**

CAUÊ MELGAREJO MENDONÇA

**ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE DA CONEXÃO DA USINA EÓLICA CERRO
CHATO NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO**

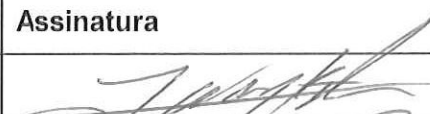


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Autoria: Caue Melgarejo Mendonça

Título: Análise em Regime Permanente da conexão da Usina Eólica Cerro Chato do Sistema Elétrico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado

	Nome	Titulação	Assinatura	Instituição
1	José Wagner Maciel Kaehler	Prof. Dr.		unipampa
2	Diego Berlezi Ramos	Prof. Dr.		unipampa
3	Luciano Lopes Pfitscher	Prof. Dr.		UFSC

Data da aprovação: 14 de outubro de 2013.

Dedico este trabalho a todos aqueles que até hoje contribuíram com a minha formação moral e intelectual.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me proporcionado nascer nessa família incrível que me possibilitou todos os recursos materiais e principalmente os sentimentais para fazer eu me tornar o que sou hoje.

Em especial a minha Mãe, Rose que sempre incentivou meus estudos fazendo com que eu percebesse que eles eram uma das ferramentas mais importantes para construção dos meus sonhos.

Ao meu Pai, Jefferson, que possibilitou através da sua dedicação e esforços sem fim a minha tão importante experiência profissional na Eólica Cerro Chato, que foi um passo essencial no meu crescimento moral e na realização desse trabalho.

Ao meu Irmão, Cauã, o maior parceiro que eu pude ter nesse mundo. Me faltam adjetivos para mensurar através de palavras a tua importância na minha vida, até porque nos entendemos através da linguagem dos espíritos.

E a todos colegas e professores que durante a graduação contribuíram na minha formação acadêmica.

“Sob medida, só se for sob pressão.”
Humberto Gessinger/Duca Leindecker

RESUMO

A energia eólica vem se destacando como a fonte de maior crescimento no setor eletroenergético brasileiro desde 2009, crescimento este que se justifica, principalmente, pelo volume de energia contratada nos leilões a partir deste ano e aos preços cada vez mais competitivos se comparados às outras fontes primárias. Devido a natureza aleatória e variável do vento, o aumento da participação desta fonte na matriz energética pode se tornar um problema para o planejamento e controle do despacho de energia elétrica pelo Operador do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS). Em vista disto, o ONS elaborou os procedimentos de rede que definem através do Sub-módulo 3.6 requisitos específicos para implantação e operação de Usinas Eólicas e uma das suas exigências é o estudo em regime permanente do impacto da geração no sistema elétrico, principalmente no que se refere ao comportamento do fluxo de tensão, aos níveis de tensão nas barras e nos limites elétricos das linhas de transmissão. Portanto, o objetivo deste trabalho é fazer esta análise usando como referencia o Complexo Eólico Cerro Chato. O programa ANAREDE, desenvolvido pelo CEPEL, foi escolhido para a execução das simulações que consistem na avaliação do comportamento do sistema elétrico frente às variações de carga da rede e os níveis de geração da Usina, comparando cinco estados de operação, dentre estes, um sem contingências, outros três com a perda de linhas de transmissão na “vizinhança” da central geradora eólica e por ultimo com a perda de geração do Complexo Termelétrico de Candiota. A partir desse estudo, se espera determinar os possíveis riscos advindos da conexão da Eólica Cerro Chato na rede na rede elétrica.

Palavras-Chave: Energia Eólica, Usina Eólica Cerro Chato, ANAREDE, Fluxo de Potência, Planejamento da Operação.

ABSTRACT

Wind power energy has proved to be the source with more growth in the Brazilian energetic field since 2009 and this growth is justified mainly by the volume of energy acquired in the auctions and the prices each time more competitive, if compared to other primary sources. Due to random and variable nature of the wind, the increase in the participation of this energetic font in the energy matrix can become a problem for the planning and control of the electric energy dispatched by the system operator (ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro). As a result, the system operator has develop the network procedures that define specific requirements through Submodulo 3.6 for the establishment and operation of Wind Farms, one of these requirements is the study in permanent regime of the impact of the generation at the electric system, especially in the behavior of the flow stress, in the levels of tension of the bars and in the electric limits of the transmission lines. Therefore, the objective of this study is to make this analysis using the Cerro Chato Wind Farm as reference. The software ANAREDE, developed by CEPEL, was chosen to perform the simulations which consist in the evaluation of the compartment of the electric system facing the variations of power grid and the levels of generation of the electric power plant, comparing 5 operational states, among these, one without contingency, other three with the lost of transmission lines in the “neighborhood” of the Wind farm and finally with the lost of generation of the Thermal Power Plant Candiota. Based on this study, it is expected to determine the possible risks that can come from the connection of the Cerro Chato Wind Farm in the grid.

Keywords: Wind Energy, Cerro Chato Wind Farm, ANAREDE, Power Flow, Electric System Planning.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Projeção da participação das fontes de Geração no Brasil – 2011 a 2021	1
Figura 1.2 – Detalhe do mapa do SIN com as Subestações e Linhas a serem analisadas.	3
Figura 2.1 – Visão aérea do Complexo Eólico Cerro Chato	5
Figura 2.2 – Secção dos cabos de média tensão do Circuito 1 do Parque Cerro Chato I.....	6
Figura 2.3 – Esquema de coleta de energia em um Parque Eólico.....	7
Figura 2.4 – Detalhe do rotor, gerador e nacele de um Aerogerador E-82	9
Figura 2.5 –Gabinetes de inversores e transformador	10
Figura 2.4 – Modelo simplificado do sistema de conversão de energia eólica da ENERCON	11
Figura 3.1 – Expansão da capacidade instalada de usinas eólicas no SIN.	13
Figura 3.2 – Mapa simplificado do Sistema Interligado Nacional	15
Figura 4.1 – Tela do ANAREDE com os barramentos a serem analisados.	21
Tabela 4.4 – Análise 1 – Fluxo de Potência para carga pesada na Barra LIV2	24
Figura 4.2 – Análise 1 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 0 MW	24
Figura 4.3 – Análise 1 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 33,9 MW	25
Figura 4.4 – Análise 1 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 90 MW	25
Figura 4.5 – Análise 2 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 33,9 MW	28
Figura 4.6 – Análise 2 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 90 MW	28
Figura 4.7 – Análise 2 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 0 MW	29
Figura 4.8 – Análise 3 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 90 MW	31
Figura 4.9 – Análise 3 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 33,9 MW	32
Figura 4.10 – Análise 3 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 0 MW	32
Figura 4.11 – Análise 4 - Fluxo de Potência na barra ALE2 – Carga Média - Cerro Chato 0 MW	34
Figura 4.12 – Análise 5 - Fluxo de Potência na barra Pmedici – Carga Média - Cerro Chato 0 MW	36
Figura 4.13 – Análise 5 - Fluxo de Potência na barra Pmedici – Carga Média - Cerro Chato 0 MW – s/ geração em Candiota	37
Figura 5.1 – Contingência 2 - Fluxo de Potência na Barra LIV2 para Carga Pesada.....	39
Figura 5.2 – Contingência 3 - Fluxo de Potência na Barra LIV2 para Carga Pesada.....	39

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Histórico de leilões de energia brasileiros de 2005 a 2013.	13
Tabela 3.2 – Empreendimentos de geração em construção no Brasil	14
Tabela 3.3 – Requisitos técnicos para conexão de usinas eólicas ao SIN.....	17
Tabela 4.1 – Análise 1 - Níveis de tensão para Carga Leve	23
Tabela 4.2 – Análise 1 - Níveis de tensão para Carga Média	23
Tabela 4.3 – Análise 1 – Níveis de tensão para Carga Pesada	23
Tabela 4.5 – Análise 2 - Níveis de tensão para Carga Leve – Sem Linha ALE2- LIV2.....	26
Tabela 4.6 – Análise 2 - Níveis de tensão para Carga Média – Sem Linha ALE2- LIV2.....	26
Tabela 4.7 – Análise 2 - Níveis de tensão para Carga Pesada – Sem Linha ALE2- LIV2.....	27
Tabela 4.8 – Análise 3 - Níveis de tensão para Carga Leve – Sem Linha LIV2- Bagé2.....	30
Tabela 4.9 – Análise 3 - Níveis de tensão para Carga Média – Sem Linha LIV2- Bagé2.....	30
Tabela 4.10 – Análise 3 - Níveis de tensão para Carga Pesada – Sem Linha LIV2- Bagé2.....	30
Tabela 4.11 – Análise 4 – Fluxo de Potência para Carga Média na barra ALE2.....	33
Tabela 4.12 – Análise 4 – Fluxo de Potência para Carga Média na barra ALE2 s/ linha Maçambará.....	34
Tabela 4.13 – Análise 5 - Níveis de tensão para Carga Leve – Sem Geração de Candiota.....	35
Tabela 4.14 – Análise 5 - Níveis de tensão para Carga Média – Sem Geração de Candiota.....	35
Tabela 4.15 – Análise 5 - Níveis de tensão para Carga Pesada – Sem Geração de Candiota.....	35

Lista de Siglas

ALE2 – Subestação Alegrete 2

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CEPEL – Centro de Estudos e Pesquisas Elétricas

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

LIV2 – Subestação Livramento 2

MME – Ministério de Minas e Energia

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

Pmedici – Subestação Presidente Médici

PROINFA – Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia

PWM – *Pulse Width Modulated*

SIN – Sistema Interligado Nacional

UECC – Usina Eólica Cerro Chato

SUMÁRIO

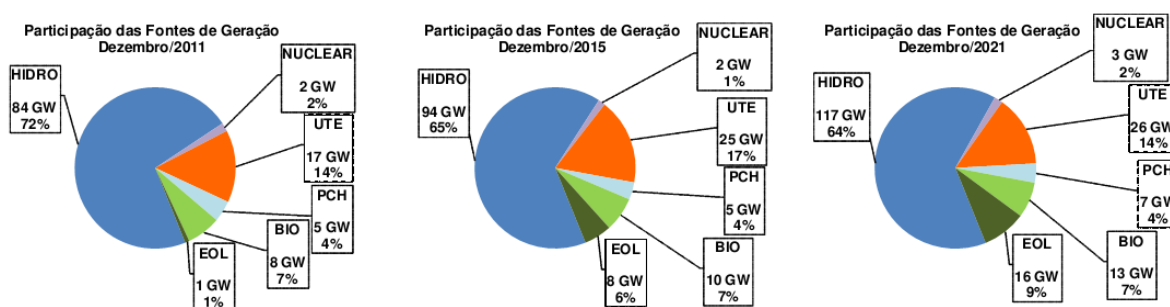
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Organização do Trabalho.....	4
2 COMPLEXO EÓLICO CERRO CHATO.....	5
2.1 Rede Coletora de Energia	6
2.2 Aerogeradores: ENERCON E-82.....	7
3 CONEXÃO DE PARQUES EÓLICOS NO SISTEMA ELÉTRICO	12
3.1 Leilões de Energia e crescimento da Fonte na Matriz Elétrica.....	12
3.2 Sistema Interligado Nacional – SIN.....	14
3.3 Procedimentos de Rede	16
3.4 Estudos em Regime Permanente e Regime Dinâmico	18
3.4.1 Regime Permanente.....	18
3.4.2 Regime Dinâmico	18
3.5 Fluxo de Potência	19
4 ESTUDOS DE FLUXO DE POTÊNCIA NO ANAREDE	21
4.1 Análise sem Contingências	22
4.2 Análise sem a Linha de Transmissão entre as subestações LIV 2 e ALE 2	26
4.3 Análise sem a Linha de Transmissão entre as subestações LIV 2 e Bagé 2	30
4.4 Análise sem a Linha de Transmissão entre as subestações ALE 2 e Maçambará.....	33
4.5 Análise sem a geração da Usina Termelétrica de Candiota.....	34
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
5.1 Sugestões de Continuidade.....	40

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica vem se destacando como uma forma bastante viável e competitiva de geração de energia elétrica e o Brasil vêm demonstrando grande interesse por essa fonte nos últimos anos justamente por possuir um grande potencial eólico [1].

Em vista disso, o governo, procurou dar incentivos para que essa fonte fosse mais explorada no país e através do PROINFA, criado em 2004, contratou mais de 1.400 MW de energia eólica, porém depois desse passo inicial, tornou-se difícil de contratar novamente a energia advinda dessa fonte, tendo em vista que o seu preço imposto pelos supridores era muito alto em comparação as fontes hidro e térmicas. O que impulsionou o crescimento do aproveitamento de energia eólica no setor elétrico brasileiro foi a mudança de modelo de contratação, passando a serem utilizados leilões de energia a partir de 2009 [2].

Segundo a EPE as contratações dos últimos anos demonstraram que as usinas eólicas atingiram preços bastante competitivos e impulsionaram a instalação de uma indústria nacional de equipamentos para atendimento a esse mercado e que este crescimento, segundo estudos, não irá parar tão cedo. De acordo o Plano decenal de 2021, a participação da fonte na Matriz Energética ira passar de 1GW no fim de 2011 para 16 GW em 2021, atingindo 9% dessa participação [3].



Fonte: EPE, 2012.

Figura 1.1 – Projeção da participação das fontes de Geração no Brasil – 2011 a 2021

Em vista desse aumento da participação de Usinas Eólicas no Sistema Interligado Nacional (SIN), o Operador Nacional do Sistema - ONS estabelece dentro do Submódulo 3.6, dos Procedimentos de Rede, instruções para o acesso dessas e outras centrais à rede básica.

Juntamente com o agente legalmente responsável pela instalação de uma grande central eólica, a ONS, avalia por meio de estudos pré-operacionais o impacto da instalação sobre o sistema [4]. Um desses estudos feitos é o do comportamento em Regime Permanente da rede elétrica após essa inserção, principalmente no que se refere ao fluxo de potência [5 - 6].

Segundo [5] os estudos de fluxo de potência determinam as influências da penetração da geração eólica nos parâmetros do sistema elétrico, tais como tensão nos barramentos e limites de carga nas linhas de transmissão. Nos estudos de regime permanente, é feita a análise dos fluxos de carga nas linhas e os níveis de tensão nos barramentos das subestações após a inserção de uma unidade geradora eólica, verificando-se o atendimento dos limites técnicos estabelecidos pelo operador do sistema.

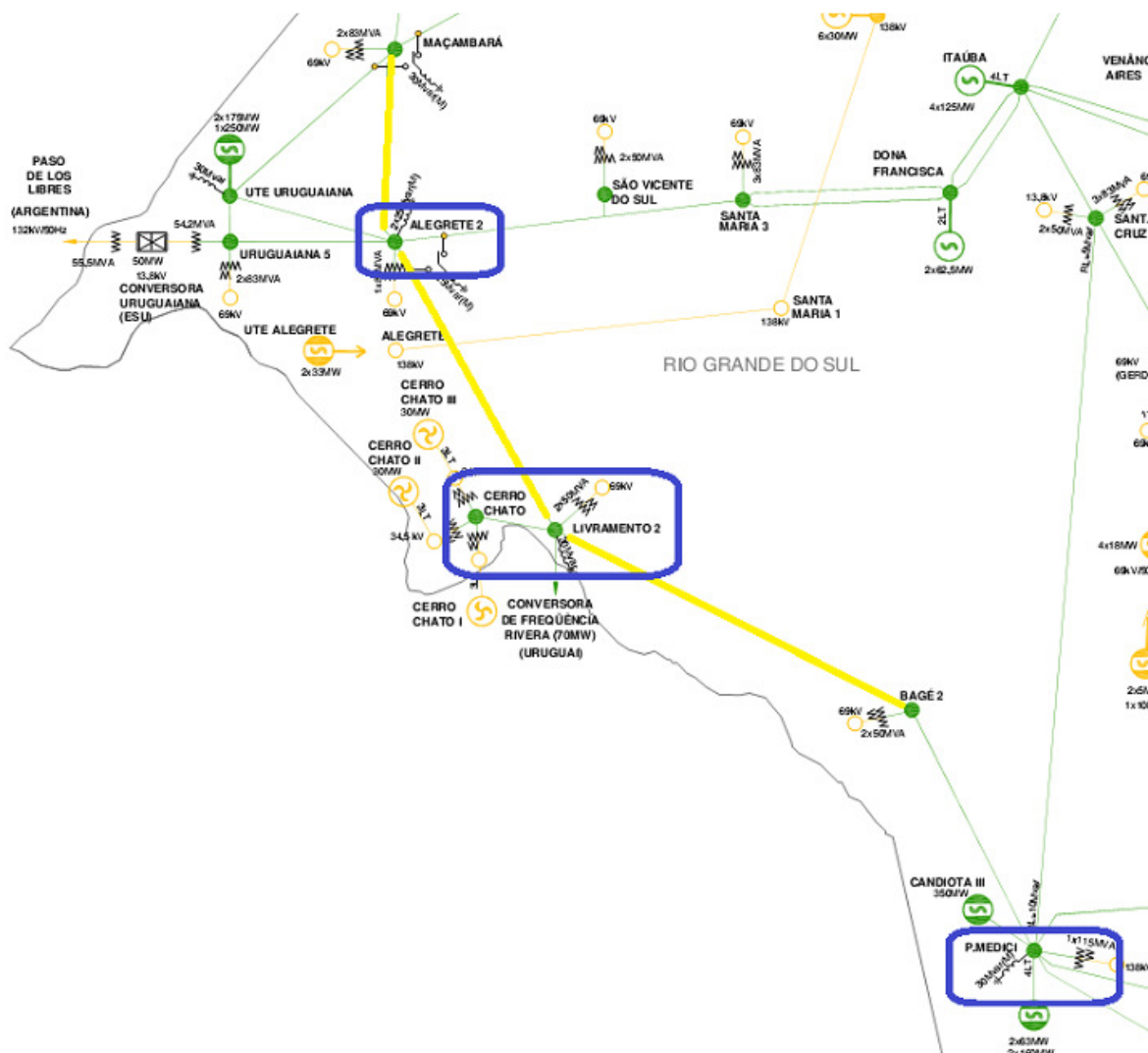
Nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho é realizar através do software ANAREDE, desenvolvido pelo Centro de Estudos e Pesquisas Elétricas o CEPEL, a análise do fluxo de potência no sistema elétrico após a instalação da Usina Eólica Cerro Chato, monitorando assim quaisquer restrições ou interferências que a central geradora possa causar no sistema.

Como objetivos secundários, tem-se a avaliação de contingências na rede elétrica próxima ao PAC da UECC, buscando saber quais apresentam riscos operacionais ao sistema e quais os níveis desses riscos, assim como servir de base para estudos mais precisos de análise de redes elétricas, como os de interferências Eletromagnéticas.

Usando como referência o Ponto de Acoplamento Comum (PAC) da Usina Eólica Cerro Chato, a Subestação Livramento 2, foram analisados os níveis de tensão e fluxo de potência nas linhas das subestações da sua vizinhança frente a variações de carga da rede e da potência gerada por Cerro Chato (Figura 1.2).

Os barramentos citados anteriormente são: Subestação coletora da Cerro Chato, Subestação Livramento 2, Subestação Alegrete 2 e Subestação Presidente Médici (apesar dessa subestação estar distante da usina eólica, ela foi inserida na análise por ser o PAC do Complexo Termelétrico Candiota, que pode injetar quase 800 MW de potência elétrica no sistema). O monitoramento das tensões nessas barras e dos fluxos de potência em suas linhas será feito após a variação da

geração da Cerro Chato em três casos: Geração máxima (90MW), geração média estimada para o período (33,9MW em março de 2012) e geração mínima (0MW).



Fonte: ONS, 2013.

Figura 1.2 – Detalhe do mapa do SIN com as Subestações e Linhas a serem analisadas.

Para cada patamar citado será variado o nível de carga exigido pelo sistema, também através de três casos: Carga Pesada, Média e Leve.

Partindo dessa condição inicial de operação e análise frente às variações escolhidas, quatro contingências foram simuladas de forma a abranger situações que poderiam comprometer o estado operativo do sistema:

- Operação sem a Linha de Transmissão entre as subestações LIV 2 e ALE 2;
- Operação sem a Linha de Transmissão entre as subestações LIV 2 e Bagé 2;
- Operação sem a Linha de Transmissão entre as subestações ALE 2 e Maçambará;

- Operação sem a geração da Usina Termelétrica de Candiota.

Propõe-se que através da análise destes cinco casos operativos, avaliar a influência que a Central Eólica Cerro Chato tem nos barramentos vizinhos ao seu PAC, tornando este estudo de caso, um importante suporte para compreender a inserção de Usinas Eólicas no Sistema Elétrico Brasileiro no que se refere a estudos em regime permanente.

1.1 Organização do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no capítulo 1, como foi apresentado, explana-se sobre o crescimento do aproveitamento da energia eólica no Brasil como justificativa e motivação para o desenvolvimento deste trabalho, assim como os objetivos e a metodologia empregada para tal.

O Capítulo 2 apresenta uma explicação a respeito da Usina Eólica Cerro Chato e suas particularidades construtivas. É feito também uma breve análise do aerogerador da ENERCON utilizado na Usina apresentando as suas características de funcionamento.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica a respeito do crescimento da fonte eólica na matriz elétrica brasileira, assim como as características do Sistema Interligado Nacional, o SIN. Se faz uma revisão dos procedimentos de rede vigentes no Brasil e os tipos de estudos que devem ser feitos para a conexão de centrais eólicas.

O Capítulo 4 apresenta as simulações feitas no ANAREDE para as cinco situações operativas que foram propostas no início deste trabalho.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais a respeito dos dados coletados através das simulações feitas e apresentadas no Capítulo 4 e as sugestões de continuidade.

2 COMPLEXO EÓLICO CERRO CHATO

O complexo Eólico Cerro Chato está localizado na cidade de Santana do Livramento, na região da fronteira oeste do Rio Grande do Sul com o Uruguai. Ele possui 90MW de potência instalada, sendo composto por três parques de 30MW que ocupam uma área de 80 km² (Figura 2.1), são eles:

- Cerro Chato I – 15 aerogeradores E-82 de 2MW;
- Cerro Chato II – 15 aerogeradores E-82 de 2MW;
- Cerro Chato III – 15 aerogeradores E-82 de 2MW.



Fonte: ELETROSUL, 2011.

Figura 2.1 – Visão aérea do Complexo Eólico Cerro Chato

O projeto foi contemplado no Leilão de Energia de Reserva, promovido em dezembro de 2009, tendo sido atribuído o preço de R\$ 131,00/MWh. Inicialmente de propriedade 90% ELETROSUL e 10% WOBEN WINDPOWER, mas atualmente a ELETROSUL detém 100% do controle acionário da Usina.

Cronologia de construção da obra:

- Junho de 2010 – Assinatura da ordem de serviço e início de obras;
- Abril de 2011 – Montagem do primeiro Aerogerador;
- Maio de 2011 – Entrada de operação do primeiro Aerogerador;
- Julho de 2011 – Operação de todo parque Cerro Chato III;
- Dezembro de 2011 – Operação de todo parque Cerro Chato II;

- Janeiro de 2012 – Operação de todo o parque Cerro Chato I (finalizado 7 meses antes do prazo agosto do mesmo ano, estipulado pela ANEEL).

2.1 Rede Coletora de Energia

A coleta de energia elétrica proveniente dos aerogeradores é feita através de cabos isolados de média tensão em circuitos subterrâneos. Os cabos isolados de alumínio estão projetados para a tensão de 34,5kV e dependendo da aplicação, foi necessária a variação da sua secção (240, 185, 120, 95 e 70 mm²) devido a fatores como distância dos aerogeradores, fator de agrupamento nas valas, mas principalmente pelos limites de corrente em cada ponto dos circuitos. Os circuitos de cada parque são os seguintes:

- Cerro Chato I e II
 - Circuito 1 – Unidades geradoras de 1 a 6;
 - Circuito 2 – Unidades geradoras de 7 a 11;
 - Circuito 3 – Unidades geradoras de 12 a 15;
- Cerro Chato III
 - Circuito 1 – Unidades geradoras de 1 a 5;
 - Circuito 2 – Unidades geradoras de 6 a 10;
 - Circuito 3 – Unidades geradoras de 11 a 15;

A figura 2.2 mostra um esboço das secções dos cabos condutores utilizados para transporte de potencia do Circuito 1 do parque Cerro Chato I, para a subestação coletora. Nota-se a importância do dimensionamento correto dos cabos de média tensão utilizados na coleta de energia de um parque eólico para que não haja sobrecarga nos mesmos.

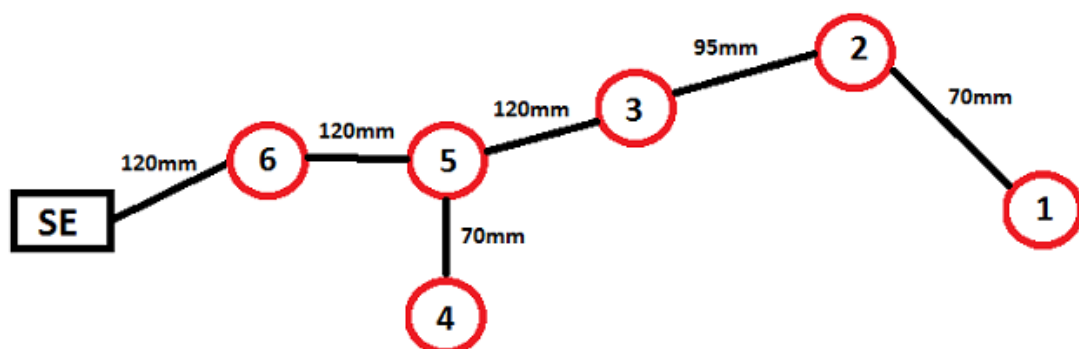


Figura 2.2 – Secção dos cabos de média tensão do Circuito 1 do Parque Cerro Chato I

A figura 2.3, mostra como a energia é levada dos circuitos dos parques através dos cabos de média tensão, até a Subestação Coletora Cerro. Esta tem como principal função elevar a tensão de 34,5kV para 230kV para que a mesma possa ser transportada a uma grande distancia (LT de 25km que conecta Cerro Chato com o PAC – Subestação Livramento 2). Essa elevação da tensão é feita por três transformadores principais, um para cada parque, e com capacidades de 35MVA com as seguintes relações de transformação: 34,5kV/230kV/13,8kV.

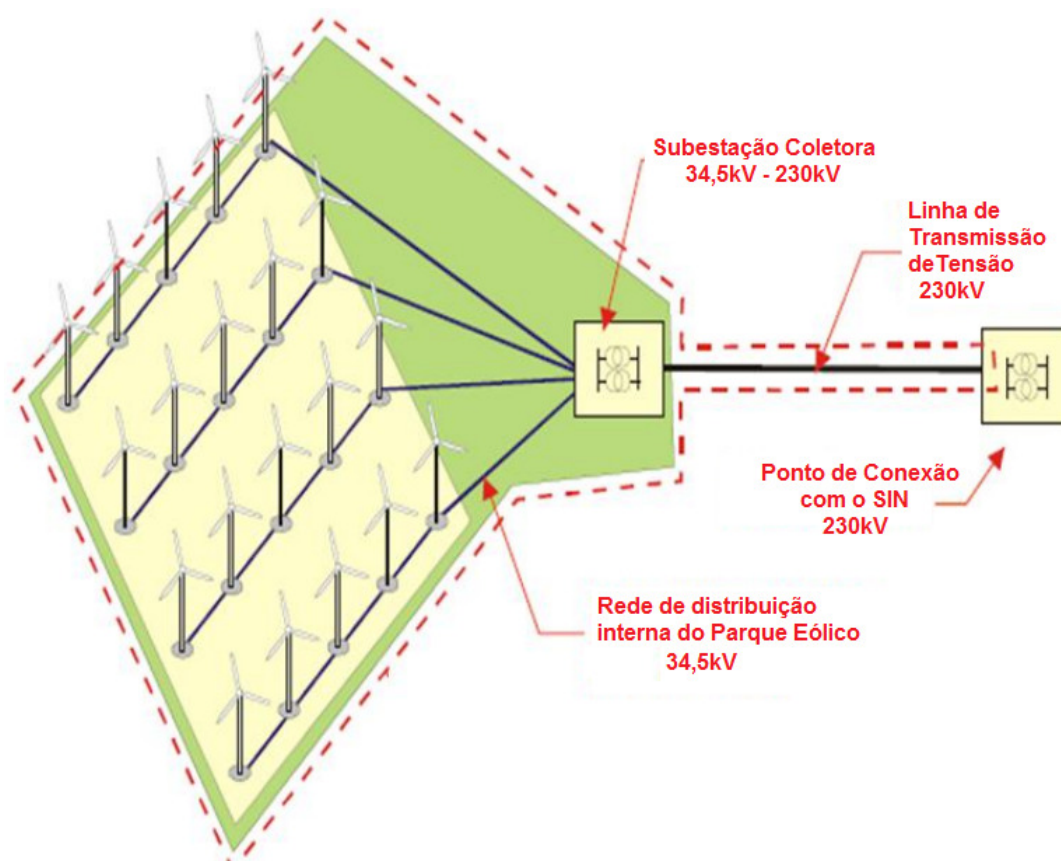


Figura 2.3 – Esquema de coleta de energia em um Parque Eólico

2.2 Aerogeradores: ENERCON E-82

O Aerogerador utilizado nas Usinas Cerro Chato I, II e III são modelos E-82 da empresa ENERCON que é pioneira no uso de máquinas sem sistema de conversão de velocidades com engrenagens, denominadas máquinas acoplamento direto.

Os dados técnicos do modelo podem ser vistos a seguir [8]:

- Características Gerais
 - Potência Nominal: 2MW

- Diâmetro do rotor: 82m
- Altura do Cubo: 108m (caso de Cerro Chato)
- Sem caixa de engrenagens, rotação variável e controle individual das pás
- Rotor
 - Tipo: 3 pás com controle de ângulo de passo ativo
 - Área varrida: 5.281 m²
 - Velocidade: Variável de 6 a 17,5 rpm
 - Controle de passo: Cada pá tem sistema autônomo
- Transmissão com Gerador
 - Rolamento Principal: Dois rolamentos cônicos
 - Gerador: Síncrono multipolos com acionamento direto
- Abastecimento da Rede
 - Inversor ENERCON
- Controle de Azimute
 - Ativado por engrenagens de regulação
- Velocidade de Parada
 - 28 – 34 m/s, controle de tempestade ENERCON

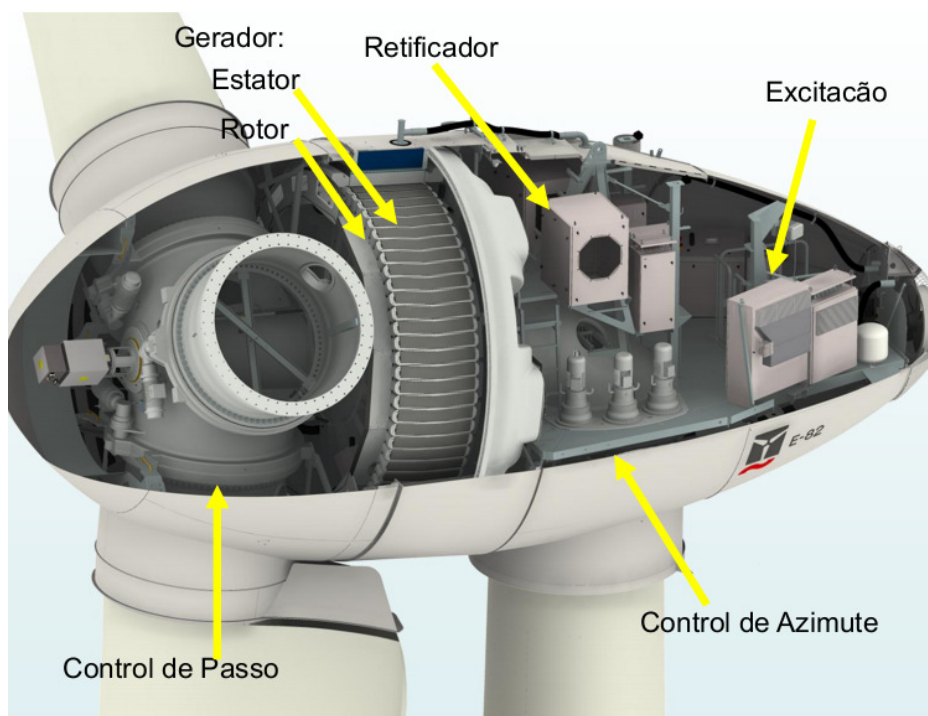
No aerogerador ENERCON, é utilizado Gerador síncrono hexafásico multipolos com excitação de campo. Geradores síncronos multipolares possuem a vantagem de poder operar em velocidades mais baixas. A desvantagem, porém, é seu tamanho e a necessidade de um sistema de conversão eletrônica entre o estator e a rede, pois a tensão e a frequência de saída do gerador variam de acordo com a velocidade de rotação que está diretamente relacionada com a velocidade variável do vento [9].

Para resolver este problema o sistema conversor de potência da máquina a tensão gerada é retificada em um retificador de onda completa (ponte de diodos) que transforma a corrente alternada de frequência variável em corrente contínua que tem seu valor controlado por um *chopper*, que mantém a corrente contínua em um valor constante desejado e a disponibiliza para o Elo CC [10].

A última etapa da conversão de frequência é executada pelo inversor que transforma a corrente contínua disponibilizada em corrente alternada, na frequência

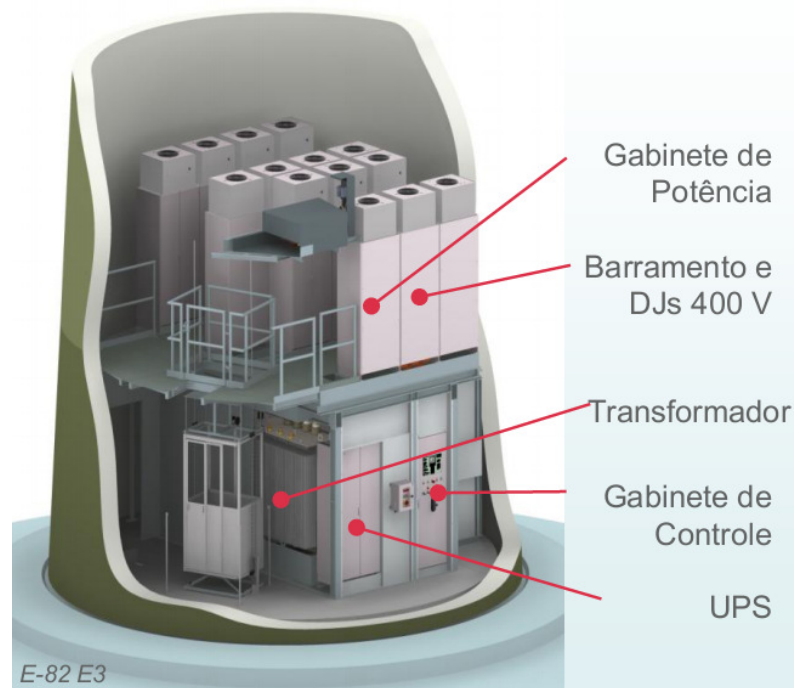
da rede. Este processo é feito usando transistores do tipo IGBT, operando com modulação por largura de pulso, PWM (*pulse width modulated*). Uma característica importante desse tipo de inversor é sua capacidade de controlar o nível de tensão em sua entrada. Nesta configuração, o inversor opera como uma fonte de corrente para a rede elétrica, medindo instantaneamente o valor de tensão da rede e calculando o valor de corrente que deve ser injetado pelo conversor para que um determinado valor de potência ativa e reativa seja atingido [10]. O nível de tensão na saída do inversor nesse estágio do processo, ainda é muito baixo para ser transportado a longas distâncias, portanto um transformador faz a conexão entre os módulos inversores da máquina com o sistema coletor do parque eólico.

Outra característica importante presente nesta turbina é o controle de potência tipo passo que permite regular a potência mecânica que é extraída dos ventos variando o ângulo de inclinação das pás, ou seja, as pás giram em torno do seu próprio eixo a fim de aproveitar mais ou menos a energia proveniente dos ventos. Isto é necessário no momento em que o vento atinge velocidades acima das máximas permitidas para a turbina eólica ou para partidas no intuito de vencer a inércia do rotor [10].



Fonte: ENERCON, 2011.

Figura 2.4 – Detalhe do rotor, gerador e nacela de um Aerogerador E-82

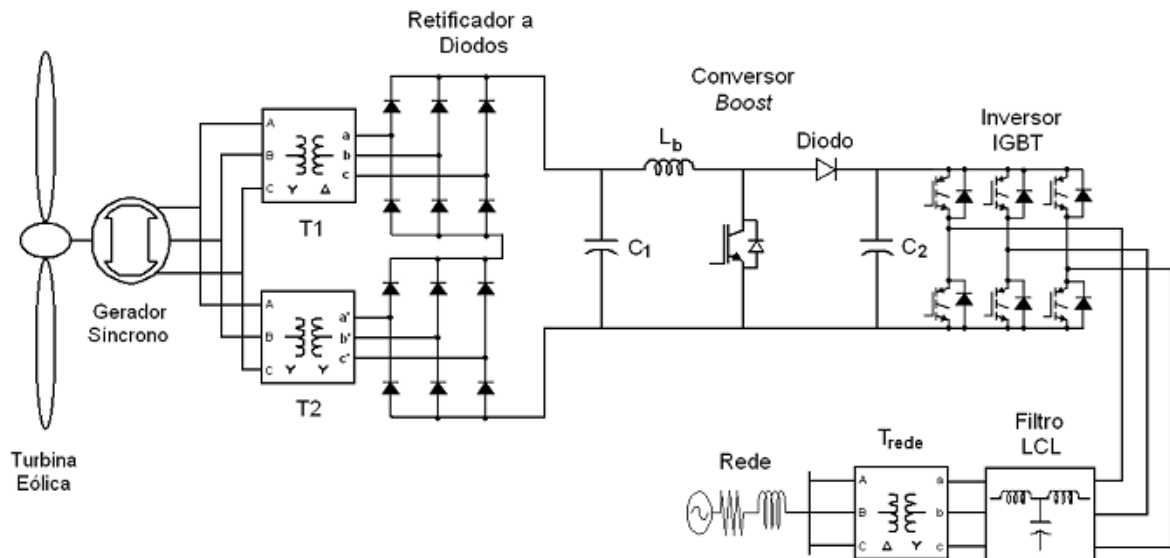


Fonte: ENERCON, 2011.

Figura 2.5 –Gabinetes de inversores e transformador

O método de conversão de energia eólica em energia elétrica, empregado pela ENERCON, serve de base para alguns estudos em regime dinâmico da influência dessa tecnologia na rede. Estes métodos consistem na modelagem dessa máquina em ambiente computacional e a verificação de sua interação com o sistema elétrico. Em [10] é feita a análise da interação desse tipo de aerogerador com o sistema e a sua capacidade de resistir a curtos circuitos na rede.

Em [11] é efetuada a comparação entre o modelo ENERCON com outras duas tecnologias de conversão de potência (Gerador de Indução duplamente alimentado e Gerador Síncrono com excitação independente) avaliando seus desempenhos frente a Afundamentos Momentâneos de Tensão na rede elétrica. O modelo implementado por este autor é mostrado na figura 2.4.



Fonte: Ramos, 2009.

Figura 2.4 – Modelo simplificado do sistema de conversão de energia eólica da ENERCON

Em [12] é feita a modelagem deste aerogerador e a avaliação da sua influência na qualidade de energia elétrica do sistema elétrico, respeitando as normas brasileiras.

3 CONEXÃO DE PARQUES EÓLICOS NO SISTEMA ELÉTRICO

3.1 Leilões de Energia e crescimento da Fonte na Matriz Elétrica

Segundo [2 e 9] em 2004, com o início do PROINFA a contratação de energia eólica como fonte primária de geração ficou por anos caracterizada como cara e inviável frente a competição com outras fontes mais baratas e competitivas, acumulando vários fracassos em leilões de energia. Em vista desse problema, a EPE realizou um estudo das características da fonte levando em consideração os aspectos energéticos e financeiros, sugerindo ao MME um modelo de contratação que resolvesse esse problema. Este novo modelo permitia mitigar os riscos do empreendedor sem prejudicar o consumidor, usando medidas como:

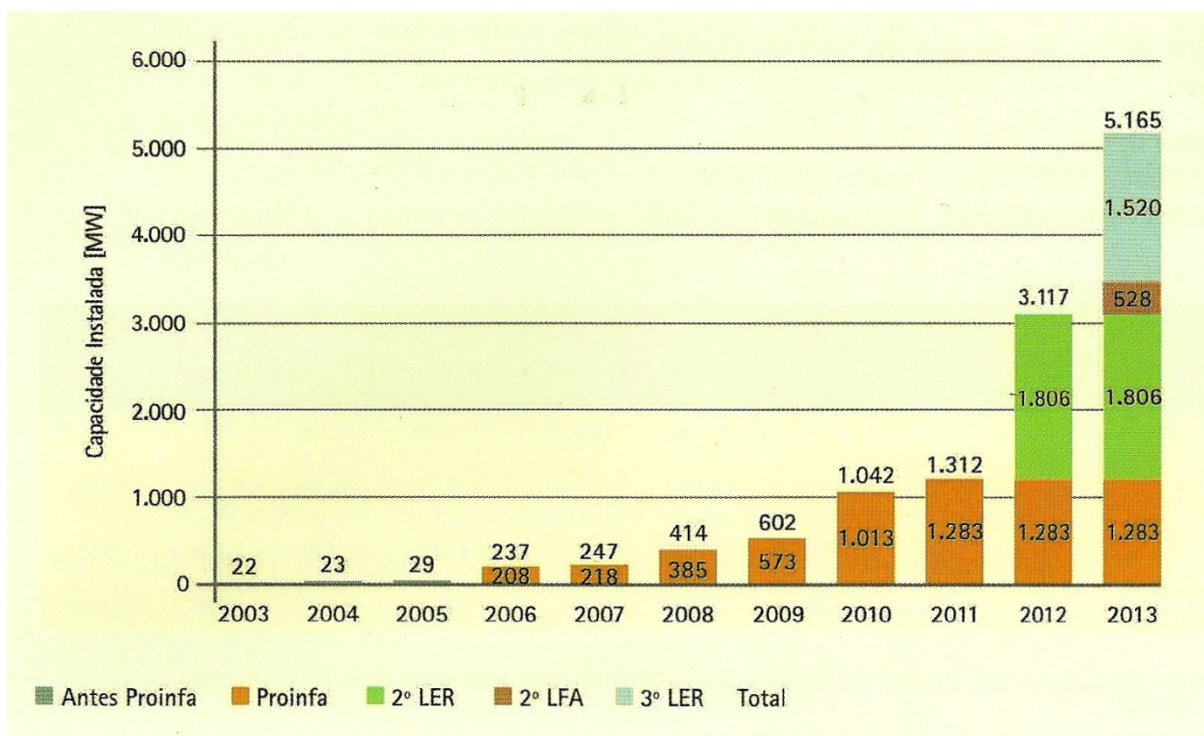
- Isenções fiscais aos fabricantes de Aerogeradores;
- Projetos inseridos no PAC e no Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI);
- Contrato de venda de energia estendido de 15 para 20 anos;
- Direito dos empreendedores sobre os créditos de carbono gerados pelas usinas.

A partir daí, em 2009 esse modelo foi testado no 2º Leilão de Energia de Reserva, que contratou 71 empreendimentos de fontes eólicas, totalizando 1.806 MW, passo inicial para que vários outros leilões nos mesmos moldes continuassem contratando um significativo volume de energia advindo desta fonte [2], como mostram as figuras 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 – Histórico de leilões de energia brasileiros de 2005 a 2013.

Ano	Leilão	Potência (MW)	Hidro	Termo	Eólico	Total
2005	Primeiro de Energia Nova	3286	11	9		49 usinas
2006	Segundo de Energia Nova A-3	1682	15	16		31 usinas
2006	Terceiro de Energia Nova A-5	1104	17	21		38 usinas
2007	Primeiro de Fontes Alternativas	638,64	6	12		18 usinas
2007	Quarto de Energia Nova A-3	1304		12		12 usinas
2007	Quinto de Energia Nova A-5	2312	5	5		10 usinas
2008	Quinto de Energia de Reserva	2379,4		31		31 usinas
2008	Sexto de Energia Nova A-3	1076		10		10 usinas
2008	Sétimo de Energia Nova A-5	3125	1	23		24 usinas
2009	Segundo de Energia de Reserva (Eólica)	1807,7			71	71 usinas
2010	Terceiro de Energia de Reserva	1206,6 + 1685,6 = 2892,2		8	20	28 usinas
2010	Segundo de Fontes Alternativas	2047,8(eólica)		11	50	61 usinas
2011	12º de Energia Nova A-3	2744,6 total 861(eólica)	1	6	44	51 usinas
2011	Quarto de Energia de Reserva	1218,1 total 1068(eólica)		7	34	41 usinas
2011	13º de Energia Nova A-5	1211,5 976,5(eólica)	1	2	39	42 usinas
2012	15º de Energia Nova A-5	574,3 281,9(eólica)	2		10	12 usinas
2013	Quinto de Energia de Reserva	1505,2			66	66 usinas
2013	16º de Energia Nova A-5	1265,5	10	9		19 usinas
Total de 334 Usinas Eólicas						

Fonte: CCEE, 2013.



Fonte: Tolmasquin, 2011.

Figura 3.1 – Expansão da capacidade instalada de usinas eólicas no SIN.

A figura 3.1 demonstra a evolução da expansão da capacidade instalada até 2013, porém segundo dados da ANEEL consultados em setembro deste ano, a real capacidade instalada é de 2.137MW, o que representa 1,71% da contribuição na matriz elétrica [13].

Isto se deve a vários empreendimentos com construções atrasadas e que deveriam ficar prontos nesse período, como mostra a figura 3.3. Com a conclusão dos mesmos, a estimativa vista na Tabela 3.2 é superada, chegando a 5.275MW de potência.

Tabela 3.2 – Empreendimentos de geração em construção no Brasil

Empreendimentos em Construção			
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%
CGH	1	848	0
EOL	92	2.318.466	11,27
PCH	32	338.961	1,65
UHE	7	14.060.800	68,37
UTE	21	2.495.220	12,13
UTN	1	1.350.000	6,56
Total	154	20.564.295	100

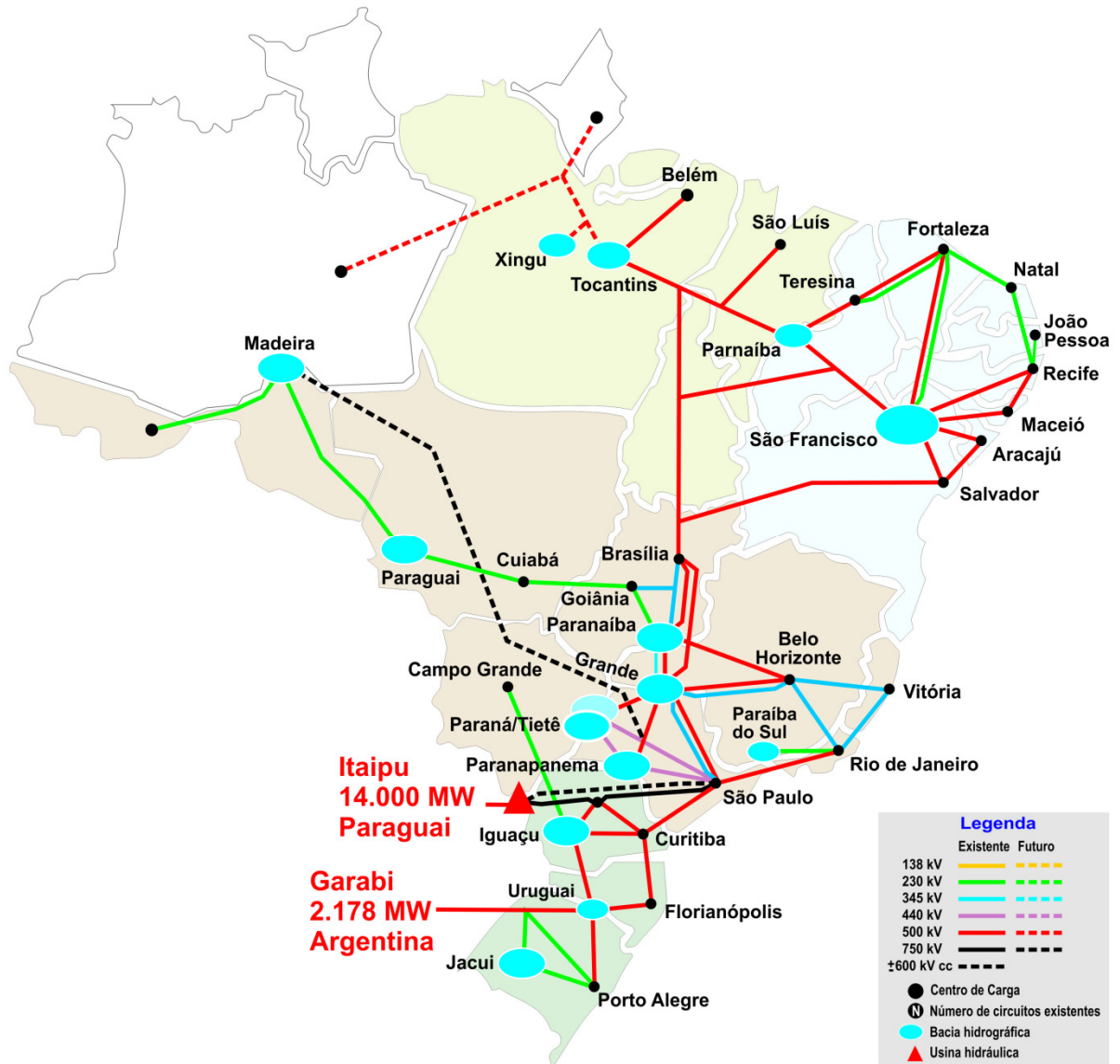
Fonte: Aneel, 2013.

3.2 Sistema Interligado Nacional – SIN

Segundo o ONS, o Sistema Interligado Nacional tem tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial. O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte [4].

Por ser um sistema predominantemente hidrelétrico seu fornecimento de energia depende diretamente das afluições das grandes bacias hídricas do país fazendo com que o regime de chuvas seja fator de grande relevância no planejamento energético. Isto leva a divisão do sistema em quatro subsistemas (Sul, Sudeste, Nordeste e Norte) que mesmo interligados, possuem características próprias de operação e planejamento (Figura 3.2). Este sistema, mesmo sob influência de contingências, deve continuar sua operação sem que ocorra interrupção do fornecimento de energia, perda de estabilidade, violação dos padrões

de grandezas elétricas e sem atingir limites de sobrecarga de equipamentos e instalações [9]



Fonte: ONS, 2013.

Figura 3.2 – Mapa simplificado do Sistema Interligado Nacional

Segundo [14], sistemas interligados possuem as seguintes vantagens:

- Maiores unidades geradoras (economia de escala);
- Menor capacidade de Reserva;
- Intercâmbio sazonal;
- Fusos horários;
- Transmissão fora de pico;

- Demandas de emergência.

3.3 Procedimentos de Rede

Os códigos de rede estipulam requisitos mínimos para a conexão da geração eólica ao sistema de transmissão. Entre os principais objetivos dos operadores dos sistemas estão a diminuição da quantidade de geração perdida devido a distúrbios no sistema, a necessidade de manter a estabilidade de operação e a confiabilidade [15]. Cada país no mundo elabora seus próprios procedimentos de rede de acordo com suas necessidades e suas características. Existem, para a geração por meio de usinas eólicas, procedimentos específicos, regulamentados nos documentos das agências reguladoras, que devem ser seguidos pelos operadores deste tipo de usina. É importante dizer que todas as exigências são especificadas para o ponto de conexão, ou seja, toda a preocupação do projetista do parque eólico é com o ponto no qual a sua usina irá se conectar com o sistema elétrico, sendo dele toda a responsabilidade no que diz respeito à qualidade de tensão e fluxo de potência [10].

No Brasil, o acesso de usinas eólicas aos sistemas de transmissão é controlado pelo ONS e aprovado pela ANEEL, através do Submódulo 3.6 dos Procedimentos de Rede. Os procedimentos de rede são documentos de caráter normativo e que definem os procedimentos e requisitos mínimos a realização das atividades de planejamento da operação eletroenergética, administração da transmissão, programação e operação em tempo real no âmbito do SIN [4].

As exigências feitas no Submódulo 3.6 à conexão e operação de centrais eólicas podem ser vistas na tabela 3.3.

Notas a tabela 3.3:

(1) A temporização da proteção de desligamento por sobrefrequência é definida com base em avaliação do desempenho dinâmico, para garantir a segurança operativa do SIN.

(2) Conforme definição do art. 2º, da Resolução ANEEL nº 407/2000.

(3) As condições de operação quase-estáticas são caracterizadas por gradientes de frequência $\leq 0,5\%/min$ e de tensão $\leq 5\%/min$.

Tabela 3.3 – Requisitos técnicos para conexão de usinas eólicas ao SIN

Descrição	Requisito técnico mínimo	Benefício
1. Operação em regime de frequência não nominal	(a) Operação entre 56,5 e 63 Hz sem atuação dos relés de subfrequência e sobrefrequência instantâneos. (b) Operação abaixo de 58,5 Hz por até 10 segundos. (c) Operação entre 58,5 e 61,5 Hz sem atuação dos relés de subfrequência e sobrefrequência temporizados. (d) Operação acima de 61,5 Hz por até 10 segundos (1).	Evitar o desligamento dos geradores quando de déficit de geração, antes que o esquema de alívio de carga atue completamente ou em condições de sobrefrequência controláveis.
2. Geração/absorção de reativos	No ponto de conexão, a central geradora eólica deve propiciar os recursos necessários para, em potência ativa nominal (2) e quando solicitado pelo ONS, operar com fator de potência indutivo ou capacitivo dentro da faixa especificada abaixo: (a) mínimo de 0,95 capacitivo; (b) mínimo de 0,95 indutivo.	Participação efetiva no controle da tensão, aumentando as margens de estabilidade de tensão.
3. Operação em regime de tensão não nominal	No ponto de conexão da central geradora: (a) Operação entre 0,90 e 1,10 p.u. da tensão nominal sem atuação dos relés de subtensão e sobretensão temporizados. (b) Operação entre 0,85 e 0,90 p.u. da tensão nominal por até 5 segundos.	Evitar o desligamento da usina quando há variações de tensão no sistema.
4. Participação em SEP	Possibilidade de desconexão automática ou de redução de geração mediante controle de passo e/ou de <i>stall</i> das pás.	Minimizar consequências de perturbações no sistema, incluindo sobrefrequência no caso de ilhamento.
5. Potência ativa de saída	Para tensões no ponto de conexão entre 0,90 e 1,10 pu, para a central geradora eólica não será admitida redução na sua potência de saída, na faixa de frequências entre 58,5 e 60,0 Hz. Para frequências na faixa entre 57 e 58,5 Hz é admitida redução na potência de saída de até 10%. Esses requisitos aplicam-se em condições de operação de regime permanente, quase-estáticas (3).	Garantir a disponibilidade de potência das centrais de geração eólica em situações de subfrequência de modo a evitar/minimizar os cortes de carga por atuação do ERAC.

Fonte: Procedimentos de Rede, ONS, 2010.

Além dos requisitos normatizados pela tabela 3.3, outros requisitos mínimos são exigidos, tais como:

- Variações de tensão em Regime permanente;
- Instabilidade, desequilíbrio e flutuações de tensão;
- Distorção Harmônica;
- Sistema de proteção e registro de perturbações dos geradores;

- Suportabilidade frente a afundamentos momentâneos de tensão;
- Requisitos para tomada de carga.

3.4 Estudos em Regime Permanente e Regime Dinâmico

Para atender as exigências feitas pelos operadores de rede ao se inserir uma unidade geradora eólica no sistema elétrico, são necessários estudos que avaliem o impacto que este tipo de fonte causa na rede. Estes estudos se dividem em dois regimes, o estacionário/permanente e o dinâmico. Cada um possui sua importância e relevância na hora de se fazer a análise de segurança da conexão de uma usina eólica no sistema elétrico.

3.4.1 Regime Permanente

A análise de segurança em regime permanente, na qual se avaliam as condições de operação com que o sistema fica no regime estacionário após a ocorrência de perturbações, geralmente com elevada probabilidade de ocorrência (tais como os correspondes à saída de serviço de algum componente do sistema), cuja consequência se possa traduzir na violação de limites de operacionalidade definidos em regime permanente para a carga nos ramos ou a tensão nos barramentos. Quando se recorre a ferramentas analíticas de cálculo convencional, esta análise costuma ser realizada através da resolução de fluxos de potências [17].

No Brasil as análises em regime permanente das condições operativas do sistema são feitas principalmente pelo software ANAREDE. A análise em regime permanente tem como principal objetivo servir de indicativo para estudos mais aprofundados do caso em que se está estudando, ou seja, para certas situações em que se necessitem maiores informações da influência de unidades geradoras na rede, estudos dinâmicos deverão ser feitos.

3.4.2 Regime Dinâmico

A análise de segurança em regime dinâmico, na qual se avaliam as condições de operação associadas ao comportamento dinâmico do sistema após a ocorrência de perturbações, geralmente de menor probabilidade de ocorrência, mas que possam provocar o colapso parcial ou total do sistema (tais como as correspondentes à ocorrência de curtos-circuitos trifásicos que sejam isolados por atuação dos órgãos de proteção e corte inseridos no sistema) [17].

Uma das dificuldades que se encontram ao se fazer o estudo dinâmico da inserção de usinas eólicas aos sistemas elétricos, é a necessidade de modelagem do tipo de aerogerador usado no parque, pois hoje em dia os fabricantes contam com várias formas de conversão da energia eólica em energia elétrica, sendo que cada uma tem suas particularidades assim como diferentes efeitos sobre a energia gerada.

3.5 Fluxo de Potência

O fluxo de potência ou fluxo de carga consiste em uma análise algébrica das condições de operação do sistema de energia elétrica em regime permanente, levando em consideração para essa análise o estado das tensões nas barras, a distribuição dos fluxos (potências ativas e reativas que fluem pelas linhas e transformadores) e de outras grandezas de interesse [14].

Em [18] foi feito o desenvolvimento no ambiente MATLAB de uma ferramenta que resolve problemas de fluxo de carga e segundo seu autor a análise do fluxo de potencia tem como principais objetivos:

- *Segurança*: a simulação do fluxo de potência no sistema é eficaz no sentido de se estimar eventuais violações nos limites de operação do mesmo, sendo possível assim detectar problemas futuros que possam causar a perda de transmissão de energia como a perda de estabilidade de partes do sistema elétrico e que possam causar o seu colapso;
- *Planejamento e Operação*: a análise do fluxo de potência atua como uma poderosa ferramenta no processo de avaliação de novas configurações do sistema elétrico para atender o aumento da demanda dentro dos limites de segurança. Assim, também se procura configurações das redes com as menores perdas de operação;
- *Simulação de Sistemas Elétricos*: operando sob condições anormais decorrentes da saída de operação de equipamentos como linhas de transmissão, transformadores e unidades geradoras. A saída de operação desses equipamentos pode se dar pela necessidade de manutenção preventiva ou corretiva, ou ainda, em se tratando de linhas de transmissão, pelo desligamento automático após descargas atmosféricas.

Na literatura é possível encontrar trabalhos em que é feita a análise de fluxo de potência através do ANAREDE. Em [6] o autor faz uma comparação do software com outros dois programas de análise de fluxo de carga o PSLab e o ANATEM num sistema de 9 barras.

Em [19] foi feita a análise no ANAREDE, do impacto da potência gerada pelo parque Eólico Cerro Chato em função de estimativas de vento a partir de modelos meteorológicos. A análise de fluxo de potência não verificou nenhum problema na inserção da usina no SIN, porém a análise foi feita apenas sob condições normais de operação do sistema, ou seja, sem contingências operativas.

4 ESTUDOS DE FLUXO DE POTÊNCIA NO ANAREDE

Para a execução da análise em regime permanente da conexão da Usina Eólica Cerro Chato no SIN, foi usado o programa ANAREDE, pela sua facilidade de manuseio e por conter uma interface gráfica simples e amigável. Desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL para a realização de estudos nas áreas de operação e planejamento de sistemas elétricos de potência ele tem como objetivo principal o cálculo do estado operativo da rede elétrica para certas condições de carga, geração e restrições operacionais [20].

A figura 4.1 mostra a área de trabalho do ANAREDE, mais precisamente onde está localizada a Usina Eólica Cerro Chato e os barramentos na sua “vizinhança”. No ANAREDE, usinas eólicas são representadas como uma carga negativa, ou seja, injetando potencia ativa na rede, justamente por não serem fontes de reativos na operação em regime permanente.

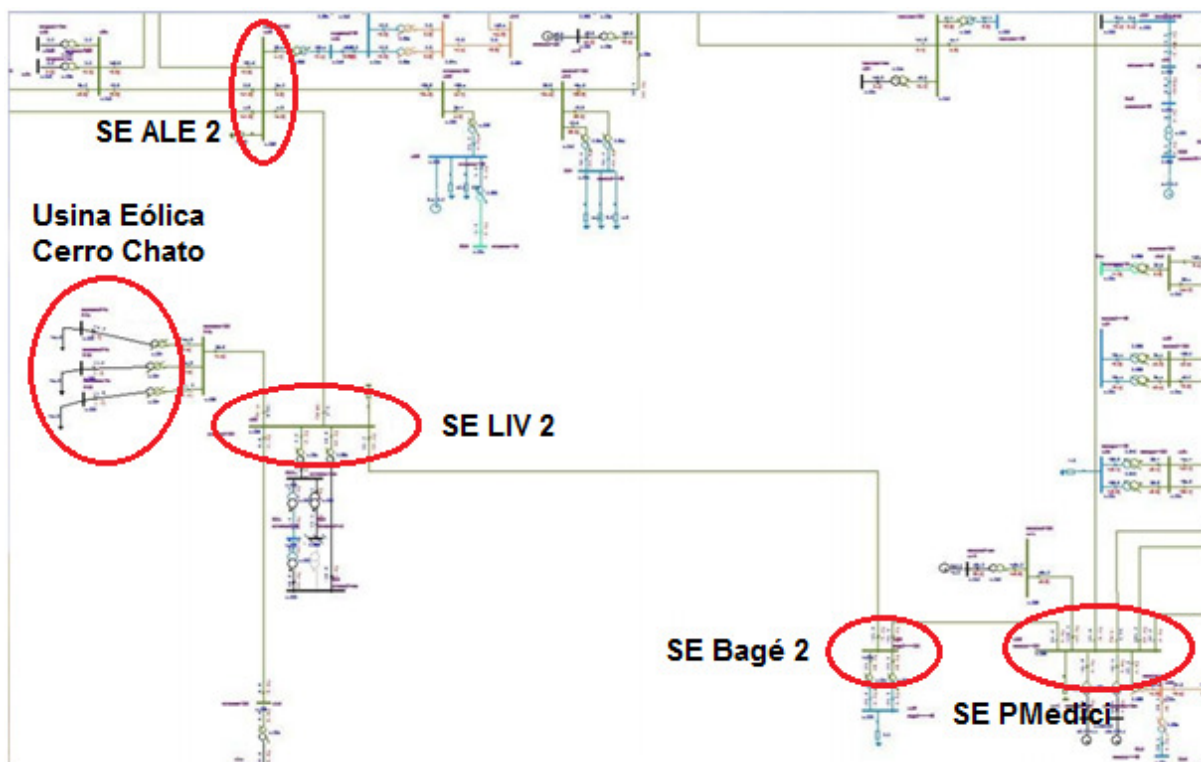


Figura 4.1 – Tela do ANAREDE com os barramentos a serem analisados.

A metodologia de simulação no software consiste basicamente na variação potência gerada pela Usina Eólica Cerro Chato frente a três níveis de carga do sistema. As três potências de geração adotadas foram a mínima 0 MW, a média 33,9

MW e a máxima 90 MW. O valor de 33,9 MW já vem fixado pelo planejamento de operação da ONS, portanto é uma estimativa de geração média para o mês estudado, no caso, março de 2012, porém segundo o Boletim Mensal de Geração Eólica [21] deste mês, a geração média do Complexo foi de 28,8 MW. A variação de carga do sistema também já vem definida para o período estudado e consiste nas médias horárias verificadas neste mês e os níveis adotados foram: Carga Leve (as 04:00), Carga Média (as 15:00) e Carga Pesada (as 20:00).

Partindo deste princípio, foram escolhidas cinco situações a serem analisadas para avaliar o impacto da variação de geração em Cerro Chato nos três estados de carga do sistema:

- Operação sem Contingências;
- Operação sem a Linha de Transmissão entre as subestações LIV 2 e ALE 2;
- Operação sem a Linha de Transmissão entre as subestações LIV 2 e Bagé 2;
- Operação sem a Linha de Transmissão entre as subestações ALE 2 e Maçambará;
- Operação sem a geração da Usina Termelétrica de Candiota.

Nos subitens a seguir, serão analisados com mais atenção os dados provenientes das simulações dos estados operativos listados acima.

4.1 Análise sem Contingências

Como explicado anteriormente, nesta análise, foram considerados apenas as variações de geração de Cerro Chato para os três estados de carga do sistema elétrico e observando sua influência no fluxo de potência e nos níveis de tensão dos barramentos Cerro Chato (Subestação coletora do Parque Eólico), Livramento 2 (subestação que interliga Cerro Chato ao SIN), Alegrete 2 (subestação conectada a Livramento 2) e PMédici (subestação que interliga as três unidades geradoras de Candiota ao SIN e que possui importância significativa no trânsito de potência da região).

Esta análise inicial sem contingências se faz importante para servir de ponto de partida e comparação com os outros e estados operativos analisados.

As tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 mostram os níveis de tensão observados para os níveis de carga da rede conforme a variação de geração de Cerro Chato e é possível

comprovar que as tensões se encontram dentro do limite operativo estabelecido pela Resolução 140/2002 da ANEEL (0.95 pu e 1.05 pu).

Tabela 4.1 – Análise 1 - Níveis de tensão para Carga Leve

Carga Leve - Tensões nas Barras (Vpu)			
Barra	Geração 33.9 MW	Geração 90 MW	Geração 0 MW
Alegrete2	1.020	1.018	1.017
Livramento2	1.028	1.026	1.023
Pmedici	1.040	1.039	1.040
Cerro Chato	1.030	1.028	1.024

Tabela 4.2 – Análise 1 - Níveis de tensão para Carga Média

Carga Média - Tensões nas Barras (Vpu)			
Barra	Geração 33.9 MW	Geração 90 MW	Geração 0 MW
Alegrete2	1.036	1.037	1.031
Livramento2	1.028	1.028	1.021
Pmedici	1.038	1.038	1.037
Cerro Chato	1.029	1.030	1.021

Tabela 4.3 – Análise 1 – Níveis de tensão para Carga Pesada

Carga Pesada - Tensões nas Barras (Vpu)			
Barra	Geração 33.9 MW	Geração 90 MW	Geração 0 MW
Alegrete2	1.008	1.009	1.003
Livramento2	1.035	1.036	1.028
Pmedici	1.041	1.041	1.041
Cerro Chato	1.037	1.038	1.029

A influência da Cerro Chato na rede, quando demanda carga pesada, pode ser vista na Tabela 4.4 que mostra os fluxos de potência no barramento LIV2. Observa-se que quando não há geração a subestação recebe potência das linhas de Alegrete2 e Bagé2 para alimentar as cargas da cidade de Livramento, porem quando há participação da usina na geração de 33,9 MW e 90MW, além de suprir a demanda local da cidade há despacho de energia para as linhas que anteriormente forneciam potência. As figuras 4.2, 4.3 e 4.4, ilustram melhor essa situação no ambiente ANAREDE.

Tabela 4.4 – Análise 1 – Fluxo de Potência para carga pesada na Barra LIV2

Carga Pesada - Barramento Livramento 2						
Linha	UECC 33,9 MW		UECC 90 MW		UECC 0 MW	
	Pativa	Preativa	Pativa	Preativa	Pativa	Preativa
Cerro Chato	-33,9	-2,6	-89,9	7,5	0	-4,3
Alegrete2	1,6	11,5	33,1	4,8	-17,4	13,6
Bage2	10,4	-15,9	34,5	-19,2	-4,5	-16,3
Livrame1	10,8	4,5	10,8	4,5	10,8	4,5
Livrame2	11,1	4,6	11,1	4,6	11,1	4,6

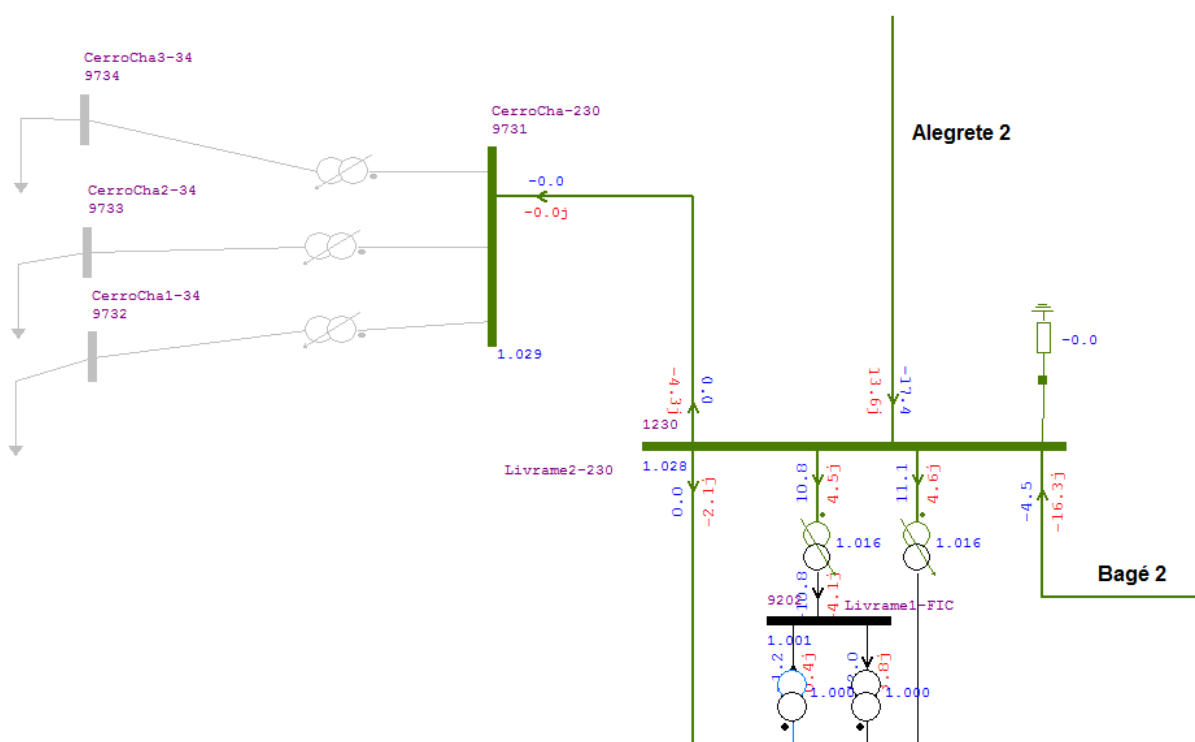


Figura 4.2 – Análise 1 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 0 MW

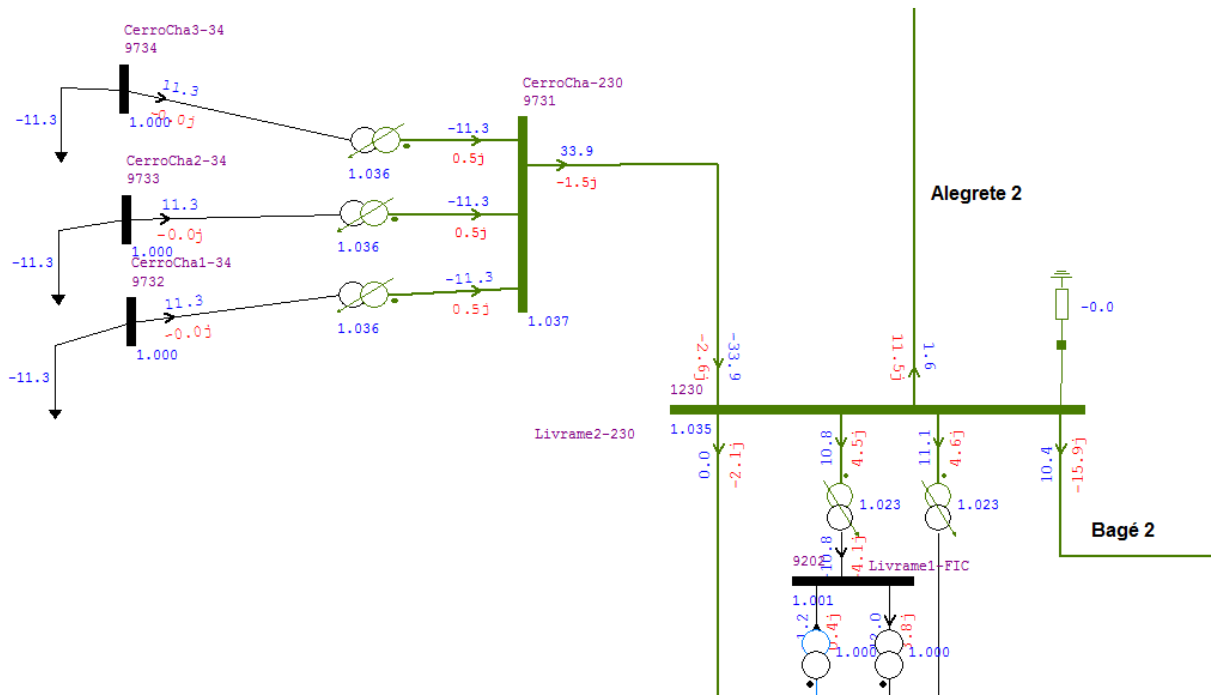


Figura 4.3 – Análise 1 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 33,9 MW

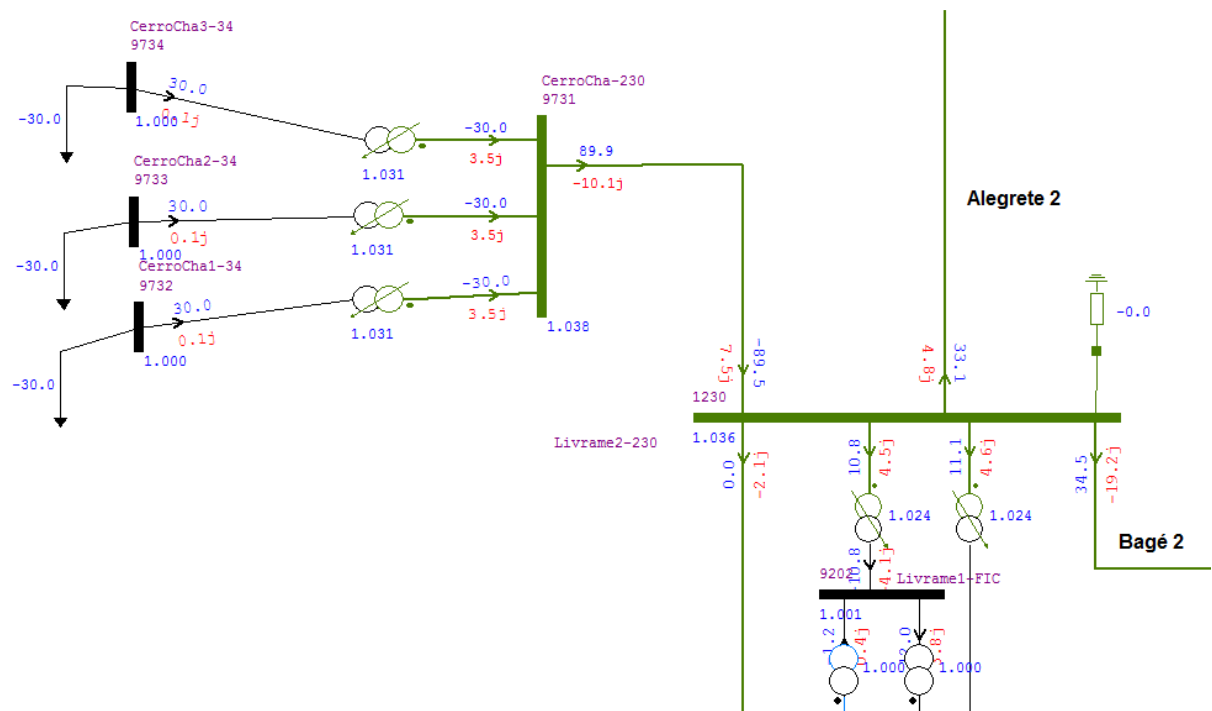


Figura 4.4 – Análise 1 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 90 MW

4.2 Análise sem a Linha de Transmissão entre as subestações LIV 2 e ALE 2

Para a execução desta segunda análise, foi retirada a linha de transmissão entre as subestações de Livramento 2 e Alegrete 2. Com a retirada dessa linha, o foco agora é verificar se há variações de tensão nos barramentos e quais mudanças ocorrem no sentido de fluxo de potência na linha que interliga Livramento 2 a Bagé 2.

Através da comparação das tabelas 4.5 e 4.6 com as tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente, pode-se constatar que há uma queda de tensão significativa nos barramentos Livramento 2 e Cerro Chato em relação a condição de operação sem contingências. Já quando se comparam as tensões da tabela 4.7 com a tabela 4.3, notamos um aumento da tensão nos barramentos Livramento 2 e Cerro Chato. Para gerações de 33,9MW e 90MW o nível máximo normatizado de 1,05 pu é ultrapassado e quando a geração é nula este patamar quase é atingido. Nesse caso em particular, é estranho o aumento da tensão, já que o comportamento natural, assim como se verificou nas cargas Leve e Média, seria sua queda com a retirada da linha.

Tabela 4.5 – Análise 2 - Níveis de tensão para Carga Leve – Sem Linha ALE2-LIV2.

Carga Leve - Tensões nas Barras (Vpu) - s/ LIV2-ALE2			
Barra	Geração 33.9	Geração 90	Geração 0
Alegrete 2	1.003	1.003	1.002
Livramento 2	1.018	1.004	1.011
Pmedici	1.038	1.035	1.038
Cerro Chato	1.020	1.006	1.011

Tabela 4.6 – Análise 2 - Níveis de tensão para Carga Média – Sem Linha ALE2-LIV2.

Carga Media - Tensões nas Barras (Vpu) - s/ LIV2-ALE2			
Barra	Geração 33.9	Geração 90	Geração 0
Alegrete 2	1.030	1.030	1.030
Livramento 2	0.990	0.979	0.980
Pmedici	1.035	1.033	1.034
Cerro Chato	0.992	0.981	0.980

Tabela 4.7 – Análise 2 - Níveis de tensão para Carga Pesada – Sem Linha ALE2-LIV2

Carga Pesada - Tensões nas Barras (Vpu) - s/ LIV2-ALE2			
Barra	Geração 33.9	Geração 90	Geração 0
Alegrete 2	0.974	0.975	0.974
Livramento 2	1.061	1.053	1.049
Pmedici	1.043	1.042	1.042
Cerro Chato	1.062	1.055	1.049

Vale ressaltar que para todas as simulações realizadas com Carga Pesada, o reator da subestação Livramento 2 se encontra desligado, como se vê nas figuras 4.5 e 4.6. Segundo [22] como os reatores ligados aos barramentos tem a finalidade de reduzir a tensão no sistema absorvendo energia reativa o uso deste equipamento é restringido em algumas barras a partir de regimes de carga média e pesada, justamente por esses níveis de carga fazerem com que haja a redução de tensão na rede. A operação desses dispositivos é necessária quando o sistema está pouco carregado, pois a redução de carga e o excesso de reativos gerados pelas linhas pouco carregadas faz com que a tensão tenda a aumentar. Neste caso, o uso de compensadores estáticos seria uma solução, pois ele nada mais é do que um conjunto de Indutores e Capacitores montados em paralelo com controle de potencia reativa injetada na rede, fazendo com que pudesse controlar tanto quedas como subidas de tensão na barra.

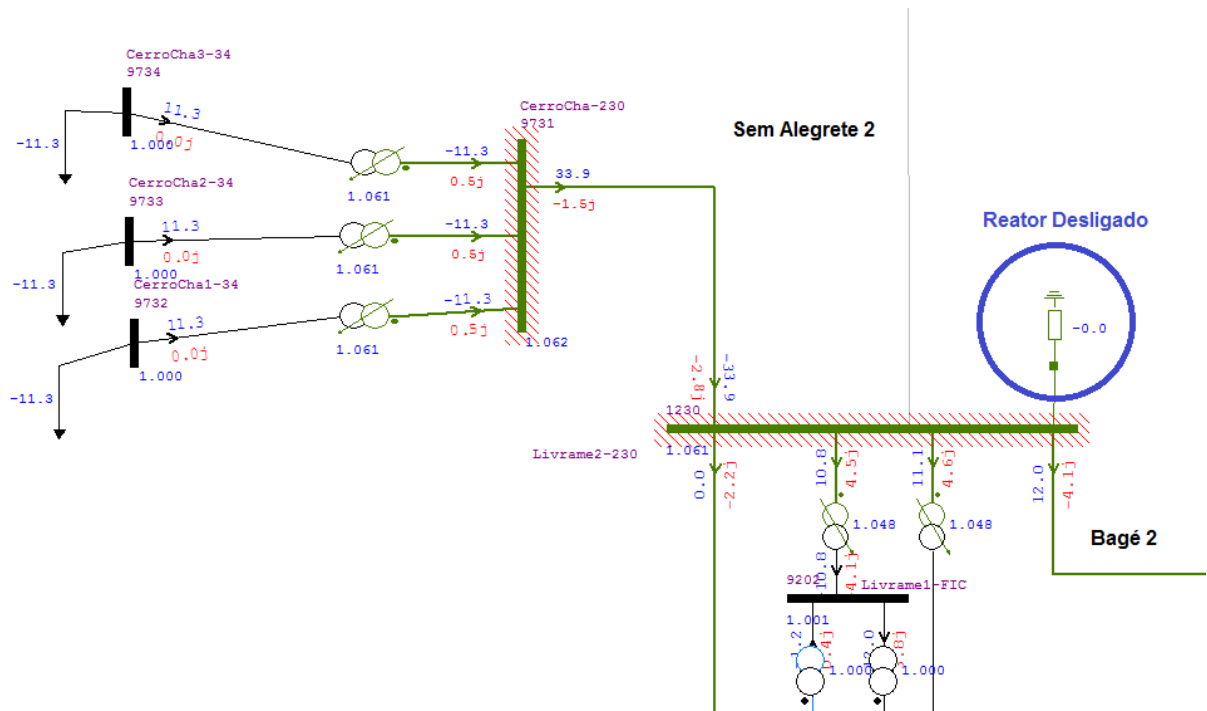


Figura 4.5 – Análise 2 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 33,9 MW

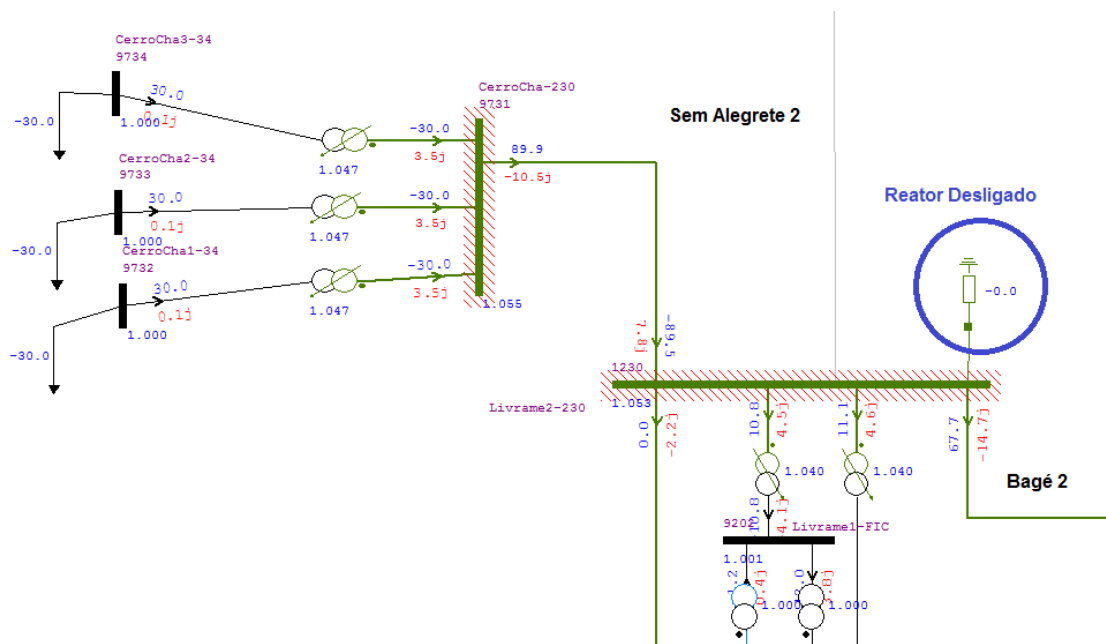


Figura 4.6 – Análise 2 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 90 MW

Através das figuras 4.5 e 4.6 é possível notar o comportamento normal do fluxo de tensão para essa contingência em especial, pois toda a energia gerada por Cerro Chato que não é consumida pelas cargas de Livramento, são escoadas pela linha de Bagé 2 e na figura 4.7 vemos o contrário. Quando a Usina não gera energia o fluxo de potência é alterado. Nota-se também que a situação exposta neste caso

se refere ao nível de carga Média e o reator da SE Livramento 2 está ligado e atuando no controle de tensão.

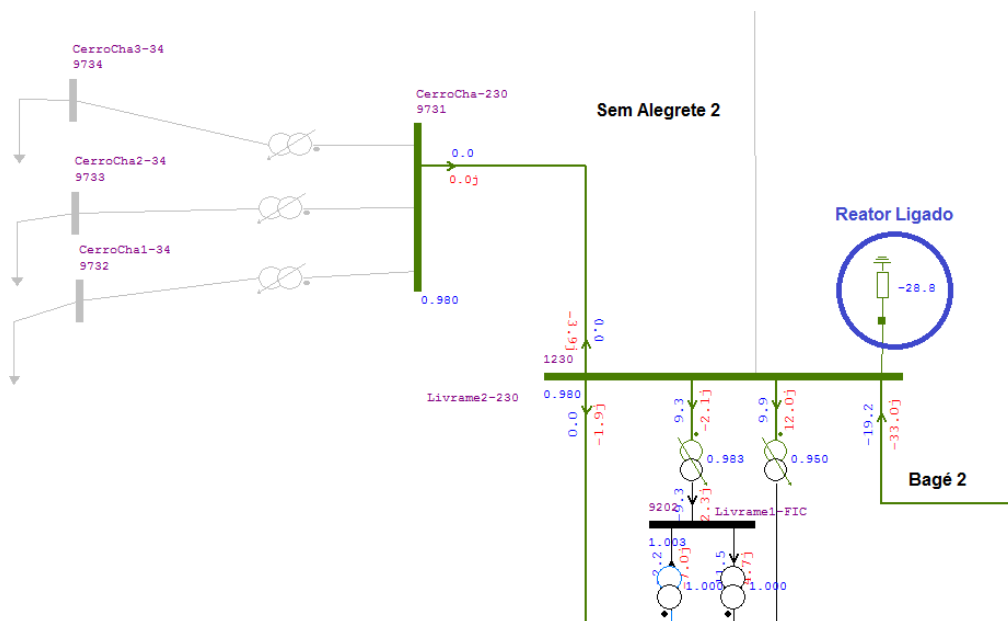


Figura 4.7 – Análise 2 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 0 MW

4.3 Análise sem a Linha de Transmissão entre as subestações LIV 2 e Bagé 2

Para a execução da terceira análise, se efetuou o desligamento da linha de transmissão ente as subestações de Livramento 2 e Bagé 2. Com a retirada da mesma, o foco agora é verificar se há variações de tensão nos barramentos e quais mudanças ocorrem no sentido de fluxo de potência na linha que interliga Livramento 2 a Alegrete 2.

Através da comparação das tabelas 4.8 e 4.9 e 4.10 com as tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente, pode-se constatar que há uma queda de tensão significativa nos barramentos Livramento 2 e Cerro Chato e uma menor na barra Alegrete 2, em relação as condições normais de operação.

Tabela 4.8 – Análise 3 - Níveis de tensão para Carga Leve – Sem Linha LIV2-Bagé2

Carga Leve - Tensões nas Barras (Vpu) - s/ LIV2-Bagé2			
Barra	Geração 33.9	Geração 90	Geração 0
Alegrete 2	1.000	0.993	0.996
Livramento 2	0.972	0.983	0.973
Pmedici	1.039	1.039	1.039
Cerro Chato	0.974	0.985	0.974

Tabela 4.9 – Análise 3 - Níveis de tensão para Carga Média – Sem Linha LIV2-Bagé2

Carga Media - Tensões nas Barras (Vpu) - s/ LIV2-Bagé2			
Barra	Geração 33.9	Geração 90	Geração 0
Alegrete 2	1.020	1.017	1.012
Livramento 2	0.993	0.987	0.979
Pmedici	1.036	1.036	1.036
Cerro Chato	0.995	0.989	0.979

Tabela 4.10 – Análise 3 - Níveis de tensão para Carga Pesada – Sem Linha LIV2-Bagé2

Carga Pesada - Tensões nas Barras (Vpu) - s/ LIV2-Bagé2			
Barra	Geração 33.9	Geração 90	Geração 0
Alegrete 2	0.994	0.993	0.984
Livramento 2	1.005	1.002	0.988
Pmedici	1.039	1.039	1.039
Cerro Chato	1.006	1.004	0.998

Assim como aconteceu para a contingência anterior, onde a troca de energia do barramento Livramento 2 ficou limitada a apenas uma linha, nota-se dessa vez que a interação com Alegrete 2 é muito semelhante. Quando há geração na usina (Figuras 4.8 e 4.9) todo excedente não consumido pelas cargas de livramento é entregue a barra ALE 2 e quando não há geração na usina (figura 4.10) o fluxo é revertido e ALE2 começa a fornecer potência a LIV2. As figuras 4.8, 4.9 e 4.10 representam o sistema com Carga Média.

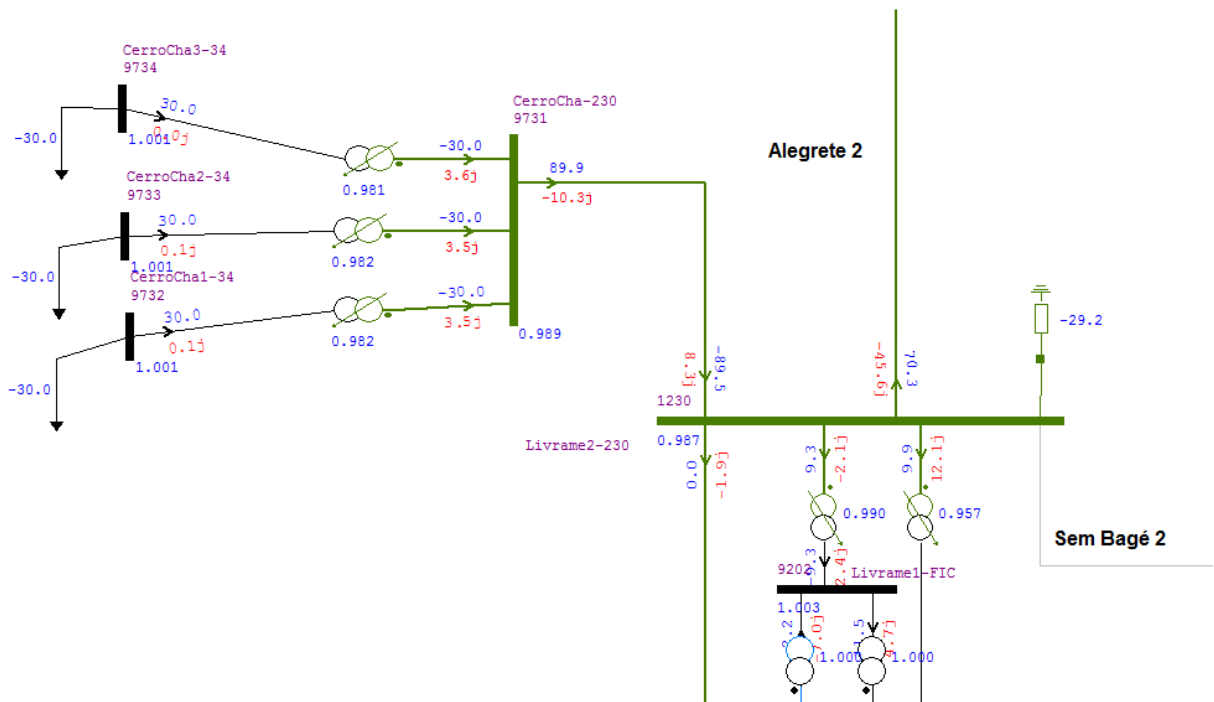


Figura 4.8 – Análise 3 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 90 MW

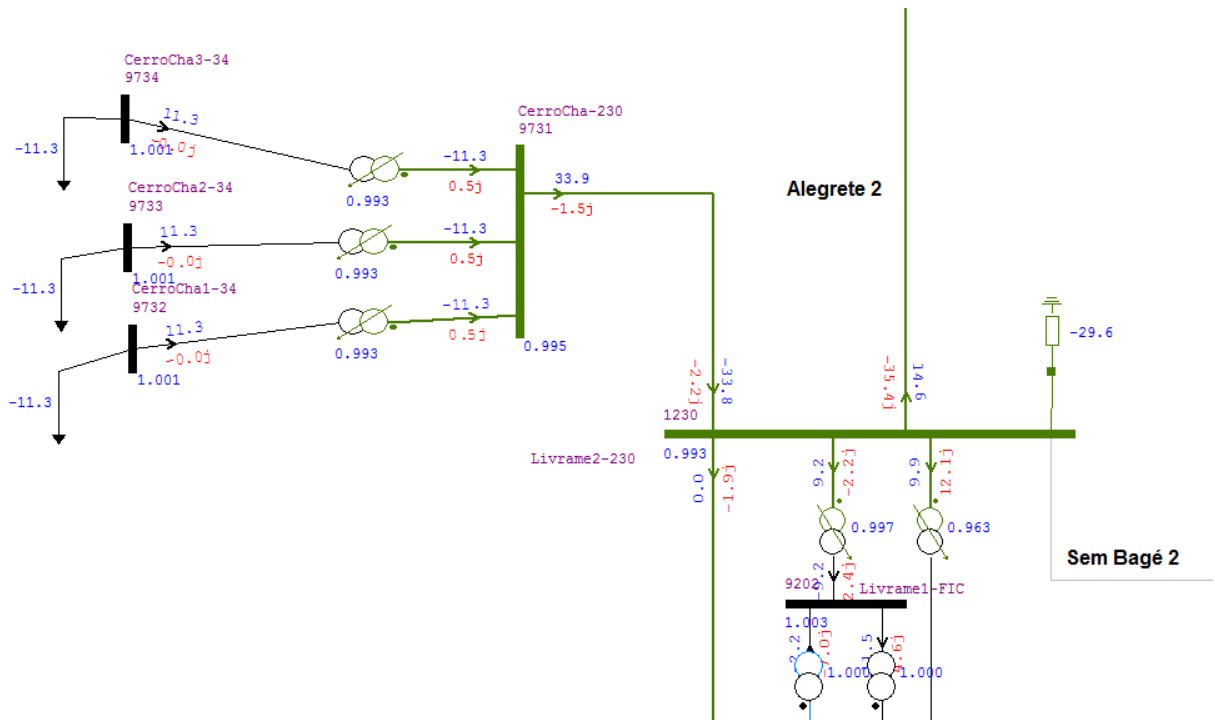


Figura 4.9 – Análise 3 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 33,9 MW

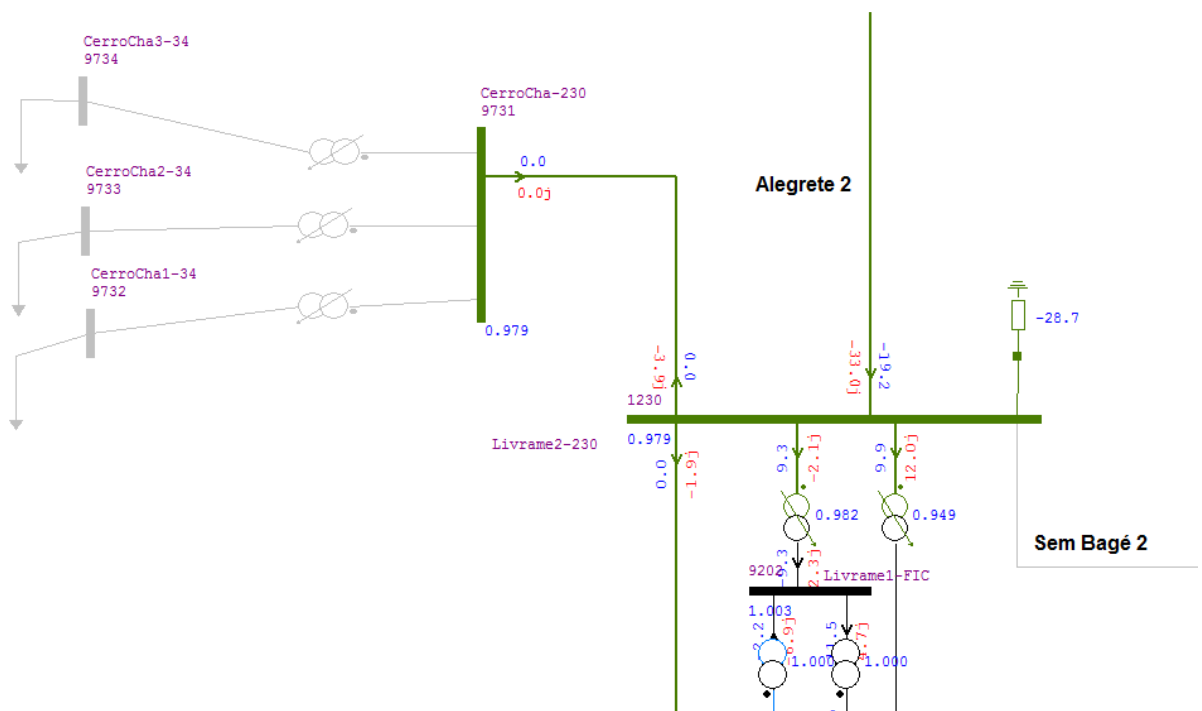


Figura 4.10 – Análise 3 - Fluxo de Potência na barra LIV 2 – Cerro Chato 0 MW

4.4 Análise sem a Linha de Transmissão entre as subestações ALE 2 e Maçambará

Diferente das outras situações, a escolha dessa contingência não afeta diretamente o barramento em que a Eólica Cerro Chato está conectada. Nas simulações anteriores a linha de Maçambará se mostrou muito importante no transporte de energia até a Subestação Alegrete 2. As tabelas 4.11 e 4.12 apresentam os fluxos de potência nas linhas de ALE 2 e a partir delas se nota que para quando Cerro Chato despacha pouca energia para este barramento, Maçambará aumenta seu fluxo para atender as cargas e linhas conectadas ao mesmo. Com a retirada dessa importante linha o sentido dos fluxos muda completamente. As duas linhas de Uruguaiana e a de Livramento 2, passam a fornecer potencia ativa a barra, numa forma de compensar essa perda. Na imagem 4.11, é possível observar que o fluxo vindo das linhas Uruguaiana5 e UruguaianaV na verdade são provenientes da mesma subestação que alimentava a linha Maçambará-Alegrete2. Isto prova, que o um sistema elétrico bem malhado, possui uma confiabilidade muito maior em relação a sistemas mais simples.

Tabela 4.11 – Análise 4 – Fluxo de Potência para Carga Média na barra ALE2

Carga Média - Barramento Alegrete 2						
Linha	UECC 33,9 MW		UECC 90 MW		UECC 0 MW	
	Pativa	Preativa	Pativa	Preativa	Pativa	Preativa
Livramento2	1,3	-5,3	-30,6	2,7	20,7	-7,1
Uruguaiana5	4,8	-17,3	7	-17,9	3,5	-16,9
UruguaianaV	2,3	-17,8	4,6	-18,5	1	-17,5
Svicente	24	3,2	35,5	1,8	16,9	2,7
Maçambara	-67,3	-0,3	-55,5	-4,5	-74,3	1
Alegrete2 - 69	32,5	1,7	34,5	1,2	31,3	2,1

Tabela 4.12 – Análise 4 – Fluxo de Potência para Carga Média na barra ALE2 s/ linha Maçambará

Carga Média - Barramento Alegrete 2 - s/ Linha Maçambará						
Linha	UECC 33,9 MW		UECC 90 MW		UECC 0 MW	
	Pativa	Preativa	Pativa	Preativa	Pativa	Preativa
Livramento2	-6,8	-7,9	-37,1	0,3	11,7	-9,8
Uruguaiana5	-9,6	-15,1	-4,9	-16,8	-12,4	-14,5
UruguaianaV	-12,3	-15,6	-7,5	-17,3	-15,2	-14,9
Svicente	10,6	-0,3	24,3	-2,7	2,2	-0,4
Maçambará	0	0	0	0	0	0
Alegrete2 - 69	30,4	2,4	32,7	1,7	28,9	2,9

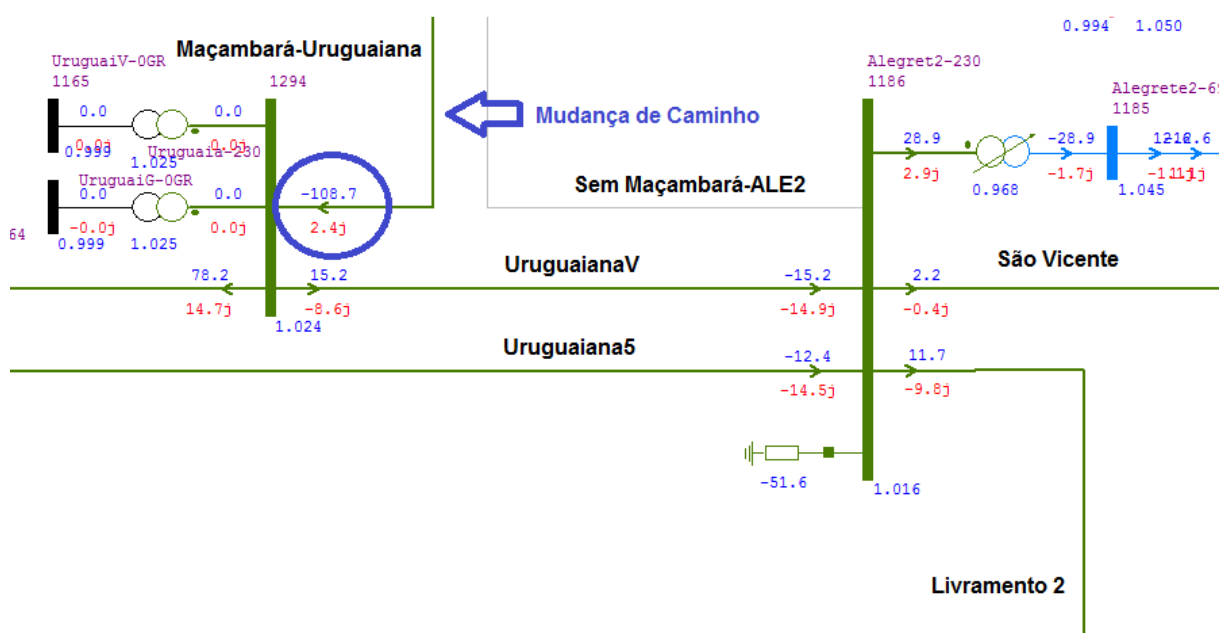


Figura 4.11 – Análise 4 - Fluxo de Potência na barra ALE2 – Carga Média - Cerro Chato 0 MW

4.5 Análise sem a geração da Usina Termelétrica de Candiota

A última contingência proposta a ser analisada é a da retirada da Usina Termelétrica de Candiota do sistema devido ao volume de potência que pode gerar e a sua importância na região. Localizada no município de Candiota – RS, ela é dividida em três fases com capacidades instaladas de: Fase A – 126 MW, Fase B – 320 MW e Fase C – 350 MW [23]. Porém nas simulações do ANAREDE os valores de geração adotados para o período são diferentes. Na Fase A a geração é de 94,5 MW, na Fase B é de 45,0 MW e na Fase C de 191,0 MW. Lembrando que esses valores de potência ativa se mantêm fixos em todas as simulações, variando-se apenas os valores de geração de potência reativa.

As tabelas 4.13, 4.14 e 4.15, apresentam as respostas de tensão nos barramentos com a retirada do Complexo Termelétrico de Candiota. Se compararmos a tabela 4.1, que representa as tensões sem contingências na rede, com a tabela 4.13, se verá que há uma queda de tensão, para carga leve no sistema, mas todas dentro dos limites de operação. Porém, isto não acontece para os outros dois patamares de carga, sendo que o método empregado pelo ANAREDE não converge nas duas situações e as tensões ficam abaixo do limite operacional normatizado (Tabelas 4.14 e 4.15).

Tabela 4.13 – Análise 5 - Níveis de tensão para Carga Leve – Sem Geração de Candiota

Carga Leve - Tensões nas Barras (Vpu) - s/ Candiota			
Barra	Geração 33.9	Geração 90	Geração 0
Alegrete 2	1,012	1,013	1,007
Livramento 2	1,016	1,014	1,008
Pmedici	1,026	1,025	1,022
Cerro Chato	1,017	1,016	1,008

Tabela 4.14 – Análise 5 - Níveis de tensão para Carga Média – Sem Geração de Candiota

Carga Media - Tensões nas Barras (Vpu) - s/ Candiota			
Barra	Geração 33.9	Geração 90	Geração 0
Alegrete 2	0,871	0,872	0,931
Livramento 2	0,828	0,828	0,921
Pmedici	0,838	0,838	0,937
Cerro Chato	0,829	0,83	0,921

Tabela 4.15 – Análise 5 - Níveis de tensão para Carga Pesada – Sem Geração de Candiota

Carga Pesada - Tensões nas Barras (Vpu) - s/ Candiota			
Barra	Geração 33.9	Geração 90	Geração 0
Alegrete 2	0,956	0,964	0,924
Livramento 2	0,914	0,92	0,863
Pmedici	0,841	0,85	0,841
Cerro Chato	0,916	0,921	0,863

Na figura 4.12 pode-se ver o barramento de Pmedici sob operação sem contingências na carga média e na figura 4.13 o mesmo barramento sem a geração das unidades termelétricas. Ao se comparar as imagens, é possível notar a queda de tensão no barramento como consequência a indicação gráfica do ANAREDE através das hachuras na mesma.

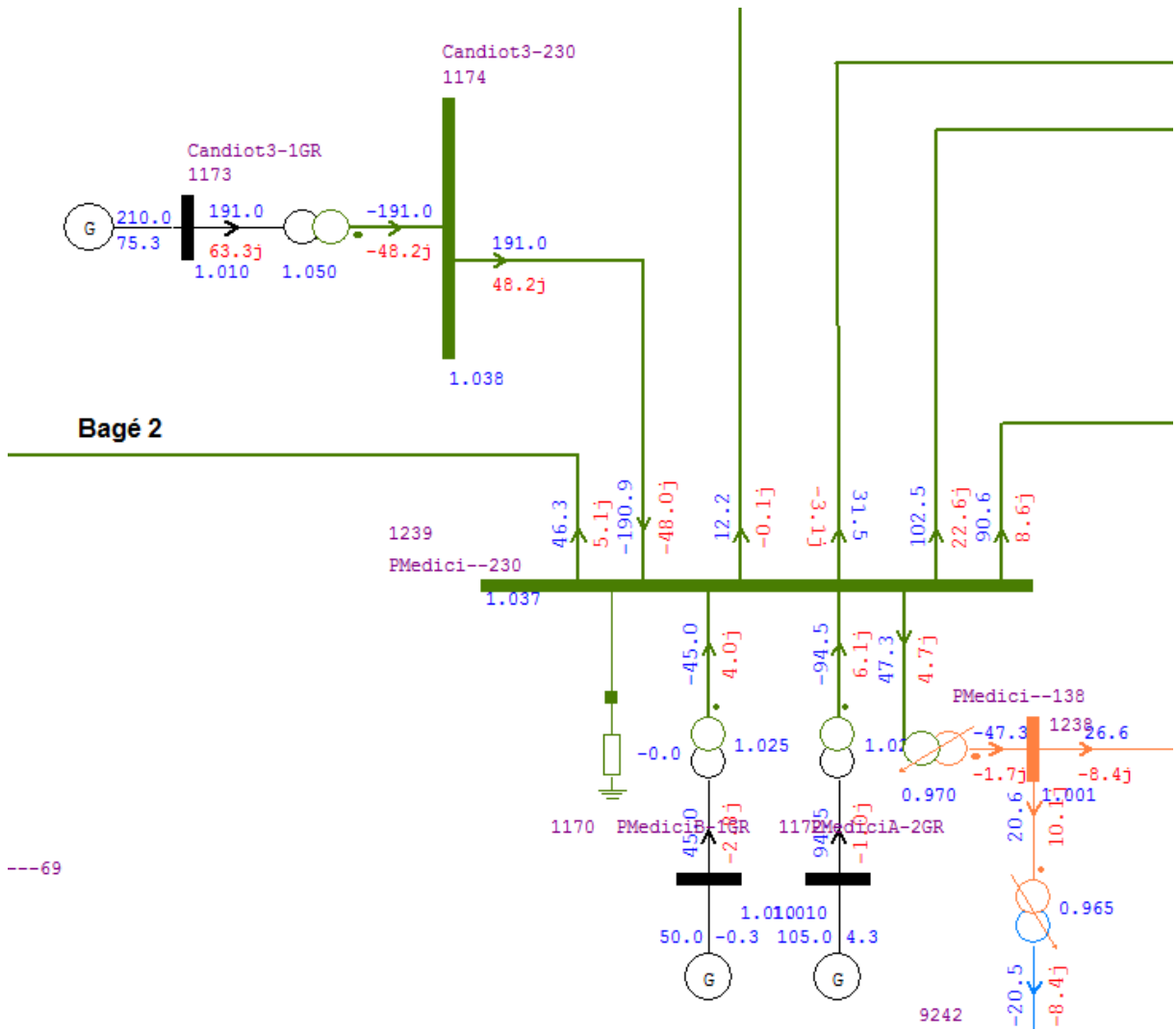


Figura 4.12 – Análise 5 - Fluxo de Potência na barra Pmedici – Carga Média - Cerro Chato 0 MW

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a análise em regime permanente, usando o programa de fluxo de potência ANAREDE, da inserção da Usina Eólica Cerro Chato no sistema elétrico considerando variações de geração do parque e de carga do sistema, com o objetivo de verificar se há condições operacionais que são agravadas com a conexão da mesma a Rede Elétrica. Ainda foram inseridas ao estudo, contingências que poderiam deixar mais clara essa influência da central eólica no SIN.

Na situação em que não foram inseridas contingências, não se verificou quaisquer perturbações no sistema provenientes, tanto da potência injetada por Cerro Chato, quanto das variações de carga no sistema.

Com a retirada da linha de transmissão LIV2-ALE2 verificou-se que para os níveis de carga leve e média, houve queda de tensão nos barramentos, porém quando o perfil de carga analisado é o Pesado, há um aumento na tensão das barras Livramento 2 e Cerro Chato acima dos limites de segurança da rede. Verificando a situação em especial, nota-se que para todas as simulações em regime de carga Pesada, o Reator da SE LIV2, não injeta potência reativa na barra, o que poderia solucionar o problema verificado.

Esperava-se que com a retirada da linha de transmissão LIV2-Bagé, houvesse um comportamento igual ao da contingência anterior, isto se verificou para os níveis de carga leve e média, mas para o nível de carga pesada há apenas uma queda de tensão nas barras LIV2 e Cerro Chato. Como visto na contingência anterior, houve um aumento acima dos níveis de segurança, o que é no mínimo, curioso, já que o comportamento do fluxo de potência nessas barras é praticamente igual quando comparadas as situações expostas nas figuras 5.1 e 5.2.

A retirada da linha Maçambará- ALE2, mostrou que o sistema reagiu bem a essa contingência, apesar do volume significativo de potência nessa LT ao contrário da contingência em que se retirou a Termelétrica Candiota do Sistema. Ao simular o sistema nessas condições se verificou que seu volume de geração de energia elétrica é muito importante para a operação estável e segura dos barramentos analisados. Nessa simulação o método implementado pelo ANAREDE nem ao menos converge para os níveis de carga média a pesada fazendo com que haja uma queda de tensão abaixo dos níveis de segurança.

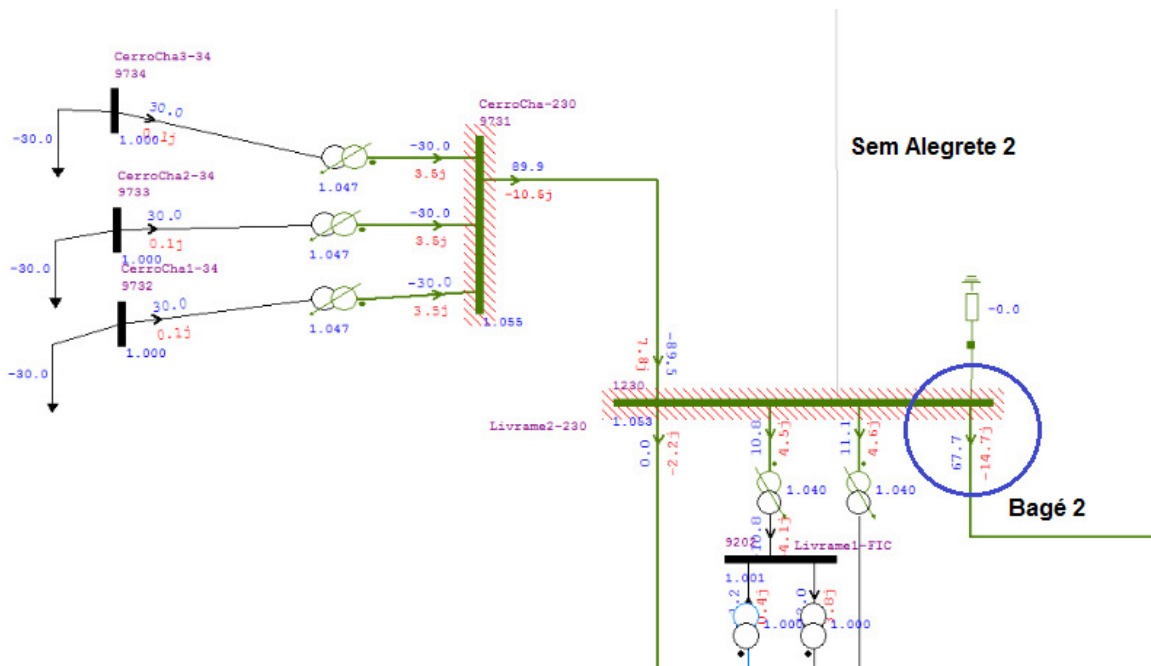


Figura 5.1 – Contingência 2 - Fluxo de Potência na Barra LIV2 para Carga Pesada

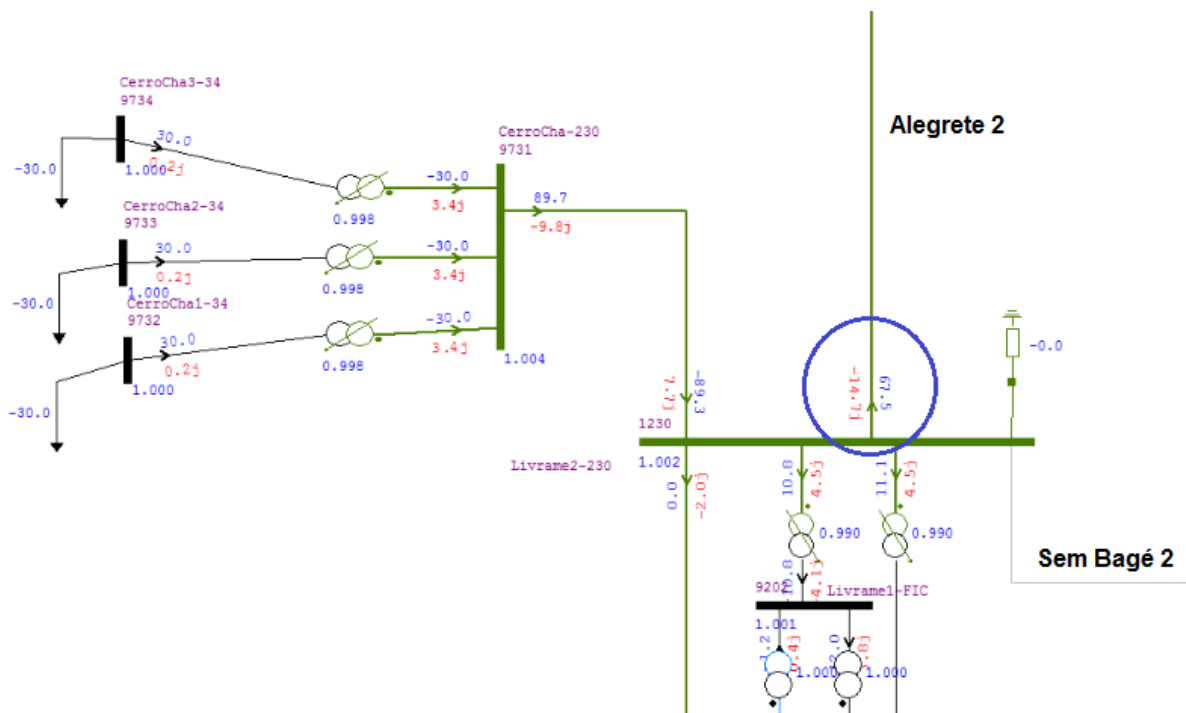


Figura 5.2 – Contingência 3 - Fluxo de Potência na Barra LIV2 para Carga Pesada

Cabe ressaltar também, que os estudos realizados podem não mostrar o comportamento real do sistema frente a estes tipos de contingências, se fazendo ideal uma análise em regime dinâmico das mesmas situações analisadas.

5.1 Sugestões de Continuidade

- Repetir a metodologia utilizada no trabalho, alterando apenas a potência injetada no sistema pelas novas usinas instaladas no Complexo Eólico Cerro Chato (acrécimo de 78MW);
- Realizar a análise em Regime Dinâmico da conexão da Usina Eólica Cerro Chato no local analisado e comparar com os resultados obtidos nesse estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] CEPEL, **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, Brasília, 2001.
- [2] TOLMASQUIM, M, T. **Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro**, EPE, ed. Synergia, Brasília, 2011.
- [3] MME/EPE, **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021**, Brasília, 2012.
- [4] ONS, **Operador Nacional do Sistema Elétrico**, < www.ons.org.br >, acessado em 12/08/2013.
- [5] CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**, Eletrobrás, ed. Eletrobrás, Rio de Janeiro, 2009.
- [6] FERRAZ, A. P. C. **Avaliação da Operação de Geradores Eólicos em Regime Estacionário Considerando a Conexão Direta a Rede Elétrica**, Rio de Janeiro, 2010.
- [7] ELETROSUL, **ELETROSUL Centrais Elétricas S.A.**, < www.ELETROSUL.gov.br >, acessado em 18/07/2013.
- [8] ENERCON, **E-82 E2/ 2000kW**, < <http://www.ENERCON.de/pt-pt/62.htm> >, acessado em 07/10/2013.
- [9] PINTO, M. O. **Fundamentos de Energia Eólica**, ed. Gen/LTC, Rio de Janeiro, 2013.
- [10] CASCÃO, V. H. **Análise do Desempenho de um Gerador Eólico em Conexão Unitária Durante a Ocorrência de Falhas**, Rio de Janeiro, 2007.
- [11] RAMOS, M. C. L. **Análise do Comportamento de Aero geradores Frente a Afundamentos Momentâneos de Tensão**, Belo Horizonte, 2009.
- [12] CASTILLO, B. C. **Desenvolvimento de Modelo Computacional de Sistemas Eólicos Utilizando Geradores Síncronos para Estudos de Desempenho no Contexto da Qualidade de Energia Elétrica**, Uberlândia, 2006.
- [13] ANEEL, **BIG – Banco de Informações de Geração**, <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> acessado em 11/10/2013.
- [14] MONTICELLI, A. GARCIA, A. **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica**, Unicamp, ed. Unicamp, Campinas, 2003.
- [15] GABE, I. J. **Análise e Controle de Aero geradores com Conversor Pleno Durante Afundamentos de Tensão**, UFSM, Santa Maria, 2012.

- [16] PROCEDIMENTOS DE REDE. **Submódulo 3.6 – Requisitos técnicos mínimos para a conexão as instalações de transmissão**, ONS, 2010.
- [17] VASCONCELOS, M. P. **Avaliação de Controle de Segurança de Redes Interligadas com Grande Penetração Eólica com base em Métodos de Aprendizagem Automática**, Porto – Portugal, 2007.
- [18] CANOSSA, J. H. **Um Programa Interativo para Estudos de Fluxo de Potência**, Ilha Solteira-SP, 2007.
- [19] FERREIRA, A. A. B. **Metodologia de Previsão do Potencial Eólico de Curto Prazo para Planejamento da Operação de Sistemas elétricos**, Alegrete, 2012.
- [20] CEPEL, **ANAREDE – Programa de Análise de Redes – Manual do Usuário**, 2004.
- [21] ONS, **Boletim Mensal de Geração Eólica – Março/2012**, NOS, 2012.
- [22] ALVES, E. A. F. **Sistema Interligado Nacional (SIN) com ênfase no Controle de Tensão**, Brasília, 2008.
- [23] ELETROBRAS/CGTEE, **Usina Termelétrica Presidente Médici**, < <http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=37> > Acessado em 20/01/2013.