

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DE ÍNDICES DE ESTABILIDADE
BASEADOS NO SIME: APLICADOS À REGIÃO DE
SEGURANÇA DINÂMICA

LIAMARA DE FATIMA FERREIRA

Dezembro 2016
Itajubá – MG – Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LIAMARA DE FATIMA FERREIRA

**ANÁLISE DE ÍNDICES DE ESTABILIDADE
BASEADOS NO SIME: APLICADOS À REGIÃO DE
SEGURANÇA DINÂMICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Zulmar Soares Machado Júnior

Dezembro 2016
Itajubá – MG – Brasil



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO I
FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Título da Dissertação: **“Análise de índices de estabilidade baseados no SIME aplicados à região de segurança dinâmica”**

Autor: **Liamara de Fatima Ferreira**

Julgamento

Examinadores	Conceito		Rubrica
	A - Aprovado	R - Reprovado	
1º	A		
2º	A		
3º	A		

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Médio: **Conceito:** A , ou seja, APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 09 de dezembro de 2016.

Prof. Dr. Jorge Luiz de Araujo Jardim
1º Examinador – PUC-Rio

Prof. Dr. Mauricio Campos Passaro
2º Examinador – UNIFEI

Prof. Dr. Zulmar Soares Machado Júnior
3º Examinador (Orientador) – UNIFEI

Dedico aos meus pais, José e Márcia.

“A força mais potente do universo é a fé.”

Madre Teresa de Calcutá

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade concedida.

Ao Professor Zulmar pela orientação e ajuda na realização deste trabalho.

Ao Dr. Jorge Jardim, consultor presidente da empresa HPPA, pelo fornecimento da versão acadêmica do programa ORGANON, utilizado na elaboração dos resultados deste trabalho.

Aos meus amigos e especialmente aos meus familiares.

À CAPES pelo apoio financeiro.

A todos aqueles que contribuíram de algum modo para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Diante dos desafios apresentados na atualidade, no qual os equipamentos de rede são submetidos a operar em condições próximas de seus limites, o uso de índices de segurança torna-se fundamental frente ao problema de avaliação de segurança dinâmica de sistemas de energia elétrica. Além disto, este tipo de problema deve levar em consideração a ocorrência de contingências cada vez mais severas sobre a rede elétrica, o que tende a deteriorar ainda o suprimento de energia, bem como a qualidade dos índices de confiabilidade e estabilidade do sistema de potência. Usualmente, índices de segurança são calculados através da análise da estabilidade, na qual busca-se investigar qual a quantidade de potência o sistema suportaria antes de entrar em condição instável de operação, definindo assim o conceito de margem de estabilidade. Este trabalho tem por objetivo avaliar a segurança dinâmica do sistema, utilizando-se de índices de estabilidade, considerando também contingências. Partindo de um estudo inicial através dos chamados métodos diretos, este trabalho investiga tais índices sobre a fundamentação do conceito de máquina equivalente (SIME - *Single Machine Equivalent*) aplicado à chamada Região de Segurança Dinâmica. Estes índices são obtidos através das curvas de simulações eletromecânicas, que consideram a representação completa do sistema de potência e das máquinas síncronas e seus controladores. Serão apresentadas várias análises sobre as curvas *Potência-Ângulo* em um sistema teste com a finalidade de verificar a consistência dos métodos propostos e seu eventual potencial de uso na análise da estabilidade de sistemas de potência.

PALAVRAS-CHAVE

Avaliação de Segurança Dinâmica, Critério das Áreas Iguais, Estabilidade Transitória, Máquina Equivalente Singular, Margem de Estabilidade.

ABSTRACT

Faced with today's challenges, in which network devices are subjected to operate near the limit of their condition, the use of security indexes becomes mandatory in face of the problem of dynamic security assessment of power systems. Also, this type of problem must take into account the occurrence of increasingly severe contingencies on the power network, which tends to deteriorate the power supply, as well as the quality of the power system reliability and stability indexes. Security indexes are usually calculated by analyzing the stability, which intends to investigate how much power the system can bear before starting to operate under unstable conditions, defining, then, the concept of stability margin. This study aims at assessing the system dynamic security by using stability indexes and considering the contingencies as well. Starting from an initial study of the so-called direct methods, this study investigates such indices on the basis of the concept of machine equivalent (SIME - Single Machine Equivalent) applied the so-called Dynamic Security Region. These indexes are attained from electromechanical simulations curves, which consider the full depiction of the power system and of the synchronous machines and their drivers. Several analyzes of the Power-Angle curves will be presented in a simulation system in order to check the consistency of the proposed methods and their eventual potential of use for the analysis of power system stability.

KEYWORDS

Dynamic Security Assessment, Equal Area Criterion, Transient Stability, Single Machine Equivalent, Stability Margin.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xvi
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Estrutura da Dissertação.....	3
CAPÍTULO 2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Considerações Iniciais.....	6
2.2 Método SIME	6
2.3 Avaliação de Segurança Dinâmica.....	9
2.4 Avaliação de Estabilidade Transitória.....	11
2.5 Considerações Finais.....	13
CAPÍTULO 3 MÉTODO DA MÁQUINA EQUIVALENTE E OS ÍNDICES DE ESTABILIDADE	14
3.1 Considerações Iniciais.....	14
3.2 Análise de Estabilidade Transitória.....	14
3.3 Critério das Áreas Iguais	15
3.4 Método da Máquina Equivalente	19
3.4.1 Transformação de um Sistema Multimáquina em um OMIB	19
3.4.2 Determinação das Máquinas Críticas	20
3.4.3 Expressões dos Parâmetros do OMIB	20
3.4.4 Condição de Estabilidade Através do Critério das Áreas.....	22
3.4.5 Trajetória do OMIB e Grandezas Associadas.....	23
3.4.6 Condições para um OMIB de Trajetória Instável	23
3.4.7 Condições para um OMIB de Trajetória Estável	24
3.4.8 Margem de Estabilidade	24
3.5 Índice de Estabilidade	25
3.5.1 Índice de Margem Positiva.....	26
3.5.2 Índice de Margem Negativa	27

3.6 Considerações Finais.....	28
CAPÍTULO 4 AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA.....	29
4.1 Considerações Iniciais.....	29
4.2 O Programa ORGANON	29
4.3 Fluxo de Potência	31
4.3.1 Fluxo de Potência Convencional.....	31
4.3.1.1 Método de Newton-Raphson	33
4.3.1.2 Aplicação do Método de Newton ao Fluxo de Potência.....	34
4.3.2 Fluxo de Potência Continuado	36
4.3.2.1 Metodologia de Predição e Correção.....	37
4.4 Processamento Distribuído.....	39
4.5 Região de Segurança	40
4.5.1 Metodologia.....	40
4.5.2 Breve consideração da Região de Segurança Dinâmica	42
4.5.3 Interpretação das Tabelas de Resultados.....	43
4.6 Comentários Finais.....	45
CAPÍTULO 5 ESTUDOS PRELIMINARES DE ESTABILIDADE	46
5.1 Considerações Iniciais.....	46
5.2 O sistema Brazilian Birds	46
5.3 Determinação das Contingências para Realização dos Estudos.....	47
5.4 Resultados e Testes Computacionais	51
5.4.1 Análise Convencional: Simulações Dinâmicas e Índice de Estabilidade	51
5.4.2 Definição dos Grupos.....	53
5.4.3 Construção da Região de Segurança Dinâmica.....	54
5.4.4 Estudo e Análise de Índices de Estabilidade	56
5.4.5 Análise de Índices de Estabilidade por Direção de Busca	57
5.5 Análise dos Resultados Preliminares	68
5.6 Considerações do Índice de Margem Positiva	68
CAPÍTULO 6 CÁLCULO DE ÍNDICES DE ESTABILIDADE: RESULTADOS.....	70
6.1 Considerações Iniciais.....	70
6.2 Desenvolvimento Conceitual	70

6.2.1 Margem pela Integral da Área de Desaceleração Excedente	71
6.2.2 Margem pela Aproximação Triangular da Integral da Área	72
6.2.3 Índice de Abertura Angular entre Máquinas Críticas e Não – Críticas.....	73
6.2.4 Índice baseado no Primeiro <i>Swing</i>	75
6.2.5 Índice baseado nas Áreas da Curva $P- \delta$	76
6.3 Resultados	77
6.3.1 Análise de Índices de Estabilidade por Direção de Busca	78
6.4 Considerações Finais.....	88
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES	89
7.1 Considerações Gerais	89
7.2 Trabalhos Futuros.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
APÊNDICE A DADOS DO SISTEMA BRAZILIAN BIRDS	95
APÊNDICE B DADOS DE ENTRADA DA FERRAMENTA ORGANON.....	101
B.1 Dados de entrada da topologia do sistema Brazilian Birds (.pwf)	101
B.2 Desenvolvimento Conceitual	102
APÊNDICE C MAPEAMENTO DAS DIREÇÕES DA DIREÇÃO DE SEGURANÇA DINÂMICA.....	105

LISTA DE FIGURAS

Fig. 3.1: Diagrama de um Sistema Máquina versus Barramento infinito	15
Fig. 3.2: Característica Potência-Ângulo.....	16
Fig. 3.3: Critério das Áreas Iguais	23
Fig. 3.4: Curva $P-\delta$ e Parâmetros do Índice de Margem Positiva no tempo	27
Fig. 4.1: Metodologia de Predição e Correção	36
Fig. 4.2: Arquitetura Mestre-Escravo do Processamento Distribuído.....	39
Fig. 4.3: Nomograma da Região de Segurança	42
Fig. 4.4: Região de Segurança em torno de um ponto de operação	42
Fig. 5.1: Diagrama unifilar do Sistema Brazilian Birds	47
Fig. 5.2: Local do curto para análise dinâmica do Sistema Brazilian Birds.....	50
Fig. 5.3: Planilha de resultados fornecida pelo programa Organon	51
Fig. 5.4: Região de Segurança Dinâmica para 12 contingências.....	55
Fig. 5.5: Análise Detalhada da Região de Segurança.....	57
Fig. 5.6: Análise do Índice de Margem Positiva	69
Fig. 6.1: Cálculo da área de Margem por Integração da Curva $P-\delta$	71
Fig. 6.2: Aproximação triangular aplicada à Curva $P-\delta$	73
Fig. 6.3: Estrutura de I_{d1} baseado na Curva $P-\delta$	74
Fig. 6.4: Cálculo de I_{d1} aplicado a resposta no tempo	74
Fig. 6.5: Estrutura de I_{d2} baseado na Curva $P-\delta$	76
Fig. 6.6: Estrutura de I_{d3} baseado no Critério das Áreas	76
Fig. 6.7: Ângulo delta da máquina crítica Dir. 16 e Contingência 12	79
Fig. 6.8: Ângulo delta da máquina crítica Dir. 22 e Contingência 04	81
Fig. 6.9: Ângulo delta da máquina crítica Dir. 08 e Contingência 11	83
Fig. 6.10: Ângulo delta da máquina crítica Dir. 18 e Contingência 06	85

Fig. 6.11: Ângulo delta da máquina crítica Dir. 22 e Contingência 11	87
Fig. A.1: Modelo de compensação de desfasamento temporário	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Classificação das Barras	32
Tabela 4.2 – Sumário da Região de Segurança	44
Tabela 5.1 – Corrente de curto-circuito para análise do Sistema Brazilian Birds.....	48
Tabela 5.2 – Lista de Contingências simuladas para o Sistema Brazilian Birds.....	49
Tabela 5.3 – Dados do Caso Base para o Sistema Brazilian Birds	49
Tabela 5.4 – Índice de Estabilidade – Ponto de Operação Inicial	52
Tabela 5.5 – Sumário da Região de Segurança fornecida para o Caso Base	56
Tabela 5.6 – Índice de Estabilidade : Direção 16.....	59
Tabela 5.7 – Índice de Estabilidade : Direção 22.....	61
Tabela 5.8 – Índice de Estabilidade : Direção 08.....	63
Tabela 5.9 – Índice de Estabilidade : Direção 18.....	65
Tabela 5.10 – Índice de Estabilidade : Direção 22.....	67
Tabela 6.1 – Índices de Estabilidade: Dir. 16 Contingência 12	79
Tabela 6.2 – Índices de Estabilidade: Dir. 22 Contingência 04	81
Tabela 6.3 – Índices de Estabilidade: Dir. 08 Contingência 11	83
Tabela 6.4 – Índices de Estabilidade: Dir. 18 Contingência 06	85
Tabela 6.5 – Índices de Estabilidade: Dir. 22 Contingência 11	87
Tabela A.1 – Dados das Linhas de Transmissão I.....	95
Tabela A.2 – Dados das Linhas de Transmissão II	95
Tabela A.3 – Dados de Transformadores de 2 enrolamentos.....	96
Tabela A.4 – Dados de Transformadores de 3 enrolamentos.....	96
Tabela A.5 – Dados de Compensação Paralela	96
Tabela A.6 – Dados de Compensação Série.....	96
Tabela A.7 – Dados de Cargas	97

Tabela A.8 – Dados de Máquinas Síncronas (regime permanente)	97
Tabela A.9 – Dados de Máquinas Síncronas (regime transitório).....	97
Tabela A.10 – Dados dos Reguladores de Tensão I.....	98
Tabela A.11 – Dados dos Reguladores de Tensão II.....	98
Tabela A.12 – Dados dos Reguladores de Velocidade I	99
Tabela A.13 – Dados dos Reguladores de Velocidade II.....	100
Tabela A.14 – Dados dos PSS	100
Tabela C.1 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 1	105
Tabela C.2 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 6	106
Tabela C.3 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 7	106
Tabela C.4 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 8	107
Tabela C.5 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 9	107
Tabela C.6 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 10	108
Tabela C.7 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 11	108
Tabela C.8 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 12	109
Tabela C.9 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 13	109
Tabela C.10 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 14	110
Tabela C.11 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 15	110
Tabela C.12 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 16	111
Tabela C.13 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 17	111
Tabela C.14 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 18	112
Tabela C.15 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 19	112
Tabela C.16 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 20	113
Tabela C.17 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 21	113
Tabela C.18 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 22	114
Tabela C.19 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 23	114
Tabela C.20 – Variação do Índice de Estabilidade na Direção 24	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A_{ACC}	Área de aceleração
A_{DEC}	Área de desaceleração
a_{km}	Taps dos transformadores
A_{MAR}	Área de margem
BCU	<i>Boundary Controlling Unstable</i>
B_{kk}	Susceptância própria da barra k
B_{km}	Susceptância de transferência entre a barra k e m
C	Grupo de máquinas críticas
CCT	<i>Critical clearing time</i>
COA	<i>Center of Angle</i>
COI	<i>Center of Inertia</i>
DSA	<i>Dynamic Security Assessment</i>
E'	Tensão interna da máquina
E_{∞}	Tensão na barra infinita
EAC	<i>Equal Area Criterion</i>
e_k	Vetor linha de elementos nulos
Φ_{km}	Ângulos do deslocamento de fase
FPDS	Fluxo de Potência Dinâmico Sintético
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
G	Vetor das equações de balanço de potências ativas e reativas
G_{kk}	Condutância própria da barra k
G_{km}	Condutância de transferência entre a barra k e m
H	Constante de tempo de inércia
IEA	Índice de Estabilidade Aparente
I_{d1}	Índice de Abertura angular entre Máquinas Críticas e Não-Críticas
I_{d2}	Índice baseado no Primeiro <i>Swing</i>
I_{d3}	Índice baseado nas Áreas da Curva P- δ
I_n	Índice de margem negativa
IMEF	<i>Individual Machine Energy Function</i>
I_p	Índice de margem positiva

J	Matriz Jacobiana
J_a	Matriz Jacobiana aumentada
λ	Fator de Carregamento
M	Constante de Inércia do OMIB
M_C	Constante de Inércia do grupo de geradores críticos
M_N	Constante de Inércia do grupo de geradores não-críticos
N	Grupo de máquinas não-críticas
OMIB	<i>One-Machine Infinite Bus</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
P_a	Potência acelerante do OMIB
P_e	Potência elétrica do OMIB
P_{e0}	Potência elétrica pré-falta
$P_{e\text{df}}$	Potência elétrica durante a falta
$P_{e\text{pf}}$	Potência elétrica pós-falta
P_{gk}	Potência ativa de geração na barra k
P_k	Injeção líquida de potência ativa
P_{km}	Fluxo de potência ativo no ramo $k - m$
P_{lk}	Potência ativa da carga na barra k
P_m	Potência mecânica do OMIB
PMC	Ponto de máximo carregamento
Q_k	Injeção líquida de potência reativa
Q_k^{sh}	Componente de injeção de potência reativa devida ao elemento da barra k
Q_{km}	Fluxo de potência reativo no ramo $k - m$
Q_{gk}	Potência reativa de geração na barra k
Q_{lk}	Potência reativa da carga na barra k
SIME	<i>Single Machine Equivalent</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SLEP	Superfície limite de energia potencial
t_c	Tempo associado ao ângulo de eliminação do defeito
t	Vetor tangente
V	Vetor das magnitudes de tensões nodais
V_k	Magnitude de tensão da barra k
V_m	Magnitude de tensão da barra m

V_{ke}	Energia Cinética
VSA	<i>Voltage Stability Assessment</i>
Y_{kk}	Admitância própria da barra k
Y_{km}	Admitância de transferência entre a barra k e m
δ	Ângulo do rotor OMIB
δ_0	Ângulo do rotor pré-falta
δ_C	Ângulo do rotor do grupo de geradores críticos
δ_{ch}	Ângulo do rotor pós-falta, em que a potência acelerante muda de positiva para negativa
δ_{clr}	Ângulo do rotor na eliminação da falta
δ_{COA}	Ângulo do centro de inércia
δ_N	Ângulo do rotor do grupo de geradores não-críticos
δ_r	Ângulo de retorno OMIB
δ_s	Ângulo do rotor no ponto de equilíbrio pós-falta
δ_s^C	Ângulo do rotor no ponto de equilíbrio pós-falta do grupo de geradores críticos
δ_s^{NC}	Ângulo do rotor no ponto de equilíbrio pós-falta do grupo de geradores não-críticos
δ_u	Ângulo de equilíbrio instável
Δ_x	Vetor de correções
η	Margem de estabilidade
η_u	Margem de energia negativa
η_s	Margem estável
θ	Vetor dos ângulos de fase nodais
θ_k	Ângulo de tensão da barra k
θ_m	Ângulo de tensão da barra m
ω	Velocidade angular do rotor OMIB
ω_C	Velocidade angular do rotor do grupo de geradores críticos
ω_N	Velocidade angular do rotor do grupo de geradores não-críticos
ω_u	Velocidade angular OMIB no ponto de equilíbrio instável
ω_s	Velocidade síncrona
Ω_k	Conjunto de barras vizinhas a barra k

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Considerações Iniciais

UM dos grandes desafios de se operar um sistema de grande porte é garantir o suprimento de energia elétrica de maneira contínua, segura e dentro dos padrões de qualidade aceitáveis. O papel principal dos profissionais envolvidos com a operação de sistemas elétricos de potência é trabalhar de forma a otimizar os recursos, a disponibilidade de geração hidráulica, mantendo sempre os níveis de segurança do sistema dentro de padrões de qualidade preestabelecidos, mesmo diante da ocorrência de inúmeras e severas contingências, previstas ou não, sem que o sistema seja conduzido a condições indesejáveis.

Atualmente, o sistema é obrigado a operar próximo ao seu limite para garantir uma maior eficiência e transferência de energia, estando cada vez mais propício a operações que remetem a situações de risco. Neste sentido, a utilização de índices capazes de traduzir o impacto de uma determinada perturbação na rede elétrica e de quantificar o “grau de estabilidade do sistema” tornou-se uma tarefa fundamental, evidenciada sua necessidade, quando da ocorrência de diversas falhas e interrupções do suprimento de energia no mundo todo.

A obtenção de índices para análise de segurança tem sido o objetivo de muitos estudos, o período transitório torna a avaliação de estabilidade uma tarefa desafiadora. Ao analisar a literatura sobre o tema, é possível identificar as abordagens em três grandes grupos: os métodos que utilizam de simulações no domínio do tempo, os métodos diretos que utilizam funções de energia e os métodos híbridos baseados no chamado critério das áreas iguais. Em geral, o que se quer saber é: Qual a margem de estabilidade do sistema diante de um evento ou distúrbio? Esta margem é calculada através de métodos diretos, sendo o mais conhecido o chamado método SIME (*Single Machine Equivalent*).

O método SIME, utilizado nesta dissertação, trata-se de um método com características relevantes de estudo. Apresenta satisfatória eficiência computacional, precisão e confiabili-

dade adequadas, permitindo ainda uma representação dinâmica detalhada do sistema de potência, o que o torna uma opção atraente na determinação de índices de estabilidade.

A avaliação do desempenho transitório de sistemas elétricos de potência pode ser efetuada através de simulações, com informações diretas de resposta no tempo de todas as variáveis envolvidas. A aplicação do método SIME fornece resultados eficazes, já que permite transformar e incorporar a uma máquina equivalente, modelos mais abrangentes e com maior nível de detalhamento, que representam adequadamente o comportamento dinâmico do sistema. Contudo, as respostas fornecidas não são capazes de quantificar o quão próximo se encontra o sistema de uma possível estabilidade/instabilidade. Sendo assim, o escopo desta dissertação é efetuar a conversão destas respostas em índices não interativos adimensionais que determinam a proximidade do sistema a uma condição de instabilidade, a partir de condições estáveis. Estes índices fornecem um referencial de análise para as diversas condições operativas que são obtidas por intermédio da região de segurança dinâmica.

Este trabalho propõe a determinação de índices de estabilidade dentro do contexto de mapeamento da região de segurança dinâmica, possibilitando efetuar uma análise entre a máxima capacidade de geração fornecida por esta região com as condições operativas sinalizadas pelos índices de estabilidade. Para realizar esta comparação, o sistema deve ser conduzido a um ponto de operação limitante de estabilidade. Para tanto, utiliza-se da construção de regiões de segurança, a qual é realizada por um processo automatizado de variação da vizinhança de um ponto de operação em direções radiais através do redespacho de dois grupos geradores. Durante este processo, a carga é mantida constante, sendo necessária a definição de um terceiro grupo gerador para realizar o balanço de potência. Para cada novo ponto de operação obtido, é simulada uma lista de contingências, até se encontrar o ponto limite de segurança de um dos grupos. Deste modo, quando a região de segurança alcançar o ponto limitante, o mesmo irá sinalizar sua proximidade com uma possível instabilidade com o auxílio dos índices baseados no SIME.

A importância do tema na análise de sistemas elétricos de potência está no amplo campo de aplicação da metodologia proposta. Nota-se a abrangência de áreas como: segurança dinâmica dos sistemas, avaliação da estabilidade transitória, classificação de contingências, etc.

1.2. Estrutura da Dissertação

A estrutura da dissertação está dividida em 7 capítulos e 3 anexos, brevemente apresentados nessa seção. O presente trabalho está organizado como se segue:

O capítulo 1 apresenta a introdução e o objetivo da dissertação, fornecendo informações do contexto no qual esta pesquisa está fundamentada.

O capítulo 2 contém uma breve revisão bibliográfica dos temas relacionados a índices de estabilidade e à região de segurança.

O capítulo 3 descreve detalhadamente o método para avaliação de segurança dinâmica, baseado em um equivalente generalizado de uma máquina contra barramento infinito (SIME), apresentando seus principais conceitos, características, vantagens e desvantagens.

O capítulo 4 apresenta informações de caráter específico, relativas a ferramenta computacional empregada nesta dissertação, o software ORGANON, apresentando suas metodologias e funcionalidades, propondo uma abordagem da região de segurança.

O capítulo 5 apresenta os resultados preliminares obtidos com a ferramenta computacional ORGANON, aplicado ao sistema teste *Brazilian Birds*.

O capítulo 6 apresenta a metodologia proposta nesta dissertação para avaliação de segurança transitória, constituindo a principal contribuição deste trabalho. Este trata do estabelecimento de índices de segurança baseados no método SIME. Neste capítulo são feitos diversos estudos, considerando um sistema teste e comparando-se os resultados obtidos.

Finalmente, o capítulo 7 apresenta as conclusões e desenvolvimentos futuros deste trabalho.

CAPÍTULO 2

Análise de Estabilidade: Revisão Bibliográfica

2.1. Considerações Iniciais

ESTE capítulo tem por objetivo apresentar uma breve revisão bibliográfica sobre os avanços de estudos voltados para a análise de estabilidade nos últimos anos, destacando para tanto o método SIME (*Single Machine Equivalent*), o cálculo da margem de estabilidade, bem como, o cálculo dos índices de segurança, além de apresentar trabalhos referentes à determinação da região de segurança.

2.2. Método SIME

Em 2001, *Ferreira et al.* [01] apresentam aplicações de técnicas probabilísticas para análise de estabilidade transitória, motivadas pela natureza aleatória de variáveis do sistema, tais como a carga. Os estudos foram desenvolvidos usando uma abordagem combinada Monte Carlo-híbrido via método SIME para a avaliação da estabilidade transitória e avaliação de segurança dinâmica de sistemas. O ponto central da metodologia híbrida, proposta pelos autores, reside na redução do sistema multimáquina a seu equivalente máquina-barras infinita (*One Machine Infinite Bus - OMIB*), e posteriormente aplicação do método SIME para determinação da margem de estabilidade transitória. A técnica de simulação Monte Carlo foi utilizada para avaliação da probabilidade de instabilidade. O método proposto pode ser dividido em três estágios. O primeiro estágio exige o fornecimento das probabilidades dos vários tipos de perturbações, tendo como saída a simulação de uma série de perturbações que podem ocorrer ao longo de um determinado período do ano. No segundo estágio, estas perturbações são identificadas de acordo com sua localização e tipo. Finalmente, o terceiro estágio utiliza a série de perturbações sequenciais para obter a margem de estabilidade e o tempo crítico de eliminação do defeito. Os resultados apresentados pelos autores constataram a viabilidade do método utilizado e sua importância, dado que este apresentou-se como uma ferramenta eficaz para determinação do tempo crítico de eliminação de defeito. O uso do método reduziu consideravelmente os esforços aplicados à avaliação de estabilidade

transitória para cada cenário, fornecendo um tempo total de simulação aceitável.

Em 2005, *Ferreira* [02] apresenta uma formulação híbrida para a simulação e análise de estabilidade transitória de um sistema de energia elétrica. O trabalho exaltou os diversos métodos encontrados na literatura para avaliação de estabilidade transitória, dentre eles é possível citar: o método de Função Energia Transitória, o método da Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP), o método do Ponto de Equilíbrio Instável de Controle (*Boundary Controlling Unstable* - BCU) e o método das Áreas Iguais. Contudo, tais métodos são considerados pouco robustos quando o sistema opera muito próximo aos seus limites. Diante desta motivação, o autor propõe um método híbrido que capta vantagens de formulações diretas, tais como o método SIME, com algoritmos de integração numérica no domínio do tempo e técnicas de inteligência artificial. As premissas aplicadas na nova metodologia baseiam-se na redução do sistema multimáquina ao seu equivalente OMIB. A detecção de instabilidade foi efetuada através de índices capazes de caracterizar o comportamento dinâmico do sistema. Para determinação da margem de estabilidade, utilizou-se um algoritmo de simulações no domínio do tempo associado ao critério de áreas iguais, à luz do método SIME. A determinação do limite de estabilidade foi realizada por um processo de extrapolação numérica. A formulação descrita pelo autor foi implementada a um pacote interativo e modular, designado por TRANSySTEM, testada e validada adequadamente.

Em 2009, *Tan et al.* [03] utilizam do método SIME aprimorado, conhecido também como método SIME-Binário. Nesse método, os autores abordam a determinação da margem de estabilidade transitória, utilizando o software Siemens PPS/E. A técnica proposta baseia-se em efetuar uma busca binária, sempre que a determinação dos limites utilizando o método SIME original não puder ser aplicada. A metodologia para controle da estabilidade transitória reside em uma restrição dinâmica que limita o desvio angular do OMIB em 180 graus, em relação ao COI (*Center of Inertia*). Quando o ângulo do rotor de qualquer máquina atinge um valor de desvio maior que 180, o sistema é considerado inseguro. A margem instável é calculada utilizando-se o método numérico trapezoidal, baseada na diferença entre as áreas de aceleração e desaceleração da curva característica potência-ângulo do OMIB. Já, em casos estáveis, a característica potência-ângulo é extrapolada para obtenção da margem de estabilidade. Por fim, os autores efetuam uma busca binária-SIME ao sistema sob análise para determinação dos limites de estabilidade transitória e tempo crítico de eliminação da falta. As conclusões destacam a necessidade de aprimoramento do método de parada para casos de

detecção de instabilidade antecipada e também a necessidade da aplicação de melhorias à técnica utilizada na distinção das máquinas em grupos críticos e não-críticos.

Em 2009, uma avaliação da estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência submetidos a grandes perturbações, baseada em novos índices probabilísticos de segurança dinâmica foi apresentada por Santos [04]. O autor propõe um novo indicador de risco, o Índice de Estabilidade Aparente (IEA), utilizado na identificação de falha de segurança sobre a influência de incertezas. A metodologia descrita pelo autor dividiu as incertezas do sistema em duas classes: a primeira delas são as chamadas incertezas de *cenários*, representadas por parâmetros topológicos, tais como carga e modos de intercâmbio entre áreas. Já, a segunda classe é composta pelas chamadas incertezas nos *distúrbios*, representadas por perturbações severas aplicadas ao sistema. Na tese, o autor descreve a realização de estudos com o programa ASTP, aplicado juntamente ao método SIME, com o objetivo de gerar um novo modelo de avaliação de segurança em regime transitório, considerando incertezas desacopladas. O emprego do método SIME, permite que a avaliação de estabilidade transitória seja realizada numericamente. A nova abordagem proposta pelo autor para o tratamento de incertezas, aliada à utilização de índices de desempenho dinâmico, se demonstrou uma ferramenta possível de aplicação prática e de grande importância para avaliação de segurança de sistemas elétricos de potência.

Ainda em 2009, uma nova estrutura de avaliação de estabilidade transitória baseada no método SIME, combinado com um Fluxo de Potência Ótimo (FPO), para sistemas multimáquina, foi apresentada por Pizano-Martinez *et al.* [05]. A metodologia consiste na redução das trajetórias do sistema multimáquina a uma máquina equivalente contra barramento infinito, ou seja, o esquema de análise OMIB. A detecção de estabilidade do sistema é realizada implicitamente pelo controle do desvio angular da trajetória equivalente do OMIB, no qual para cada novo passo de integração numérica no tempo, o critério do método SIME está sendo satisfeito. A partir de então, uma restrição de estabilidade transitória é formulada para máquina equivalente e o dimensionamento do problema é claramente definido e, é inserido no problema matemático do FPO. A abordagem proposta foi testada apenas para o sistema clássico conhecido na literatura IEEE de 9 barras.

Em 2014, Lima [06] apresenta uma metodologia probabilística capaz de classificar as subestações por níveis de severidades, baseado nas análises estáticas e dinâmicas de sistema

de potência. Esta utilizava índices de estabilidade, capazes de medir o impacto de contingências simples e duplas aplicadas ao sistema. O cálculo destes índices foi realizado através do método SIME melhorado. Originalmente, o método baseia-se no fato de que a perda de sincronismo de um sistema multimáquina fica caracterizada pela separação de suas máquinas em dois grupos distintos, os quais são substituídos por um sistema de duas máquinas equivalentes para avaliação de estabilidade, através do critério das áreas iguais. Porém, este método pode ser ineficiente para determinação da margem de estabilidade de cenários estáveis, uma vez que o mesmo exige a determinação do ângulo delta no momento da ocorrência de instabilidade, o qual somente é conhecido para casos instáveis. A proposta de melhoria para o método SIME apresentada pelo autor considera a extrapolação da curva de trajetória da potência acelerante em casos de grandes excursões angulares, através da proposta de um valor estimado de impedância externa conectada ao modelo OMIB. Esta proposta de melhoria apresentou resultados expressivos para classificação das subestações, mesmo para pontos de operação adversos.

2.3. Avaliação de Segurança Dinâmica

Em 1999, *Leite da Silva, et al.* [07] apresentam uma discussão sobre os riscos agregados à avaliação de segurança dinâmica do sistema em tempo real, dentre eles: riscos de colapso de tensão e riscos probabilísticos de confiabilidade. Os autores destacam a utilização de índices probabilísticos e os benefícios agregados à segurança de sistemas elétricos de potência.

Em 2004, *Jardim, et al.* [08] apresentam um novo modelo característico para avaliação da região de segurança dinâmica, o qual é utilizado na análise de tempo real do centro de controle do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Neste trabalho, foram discutidas as metodologias, as características, os algoritmos numéricos, as especificações técnicas e a arquitetura da região de segurança. Bem como, a aplicação tanto a problemas de natureza estática quanto a problemas de natureza dinâmica. A arquitetura computacional foi desenvolvida baseada no processamento distribuído, do tipo Mestre-Escravo. Esta concentra-se na automação de procedimentos tradicionais de avaliação de segurança, tais como: soluções de fluxo de potência e transitórios eletromecânicos para várias condições de carga, geração e rede. A premissa básica de desenvolvimento do programa considerou características de alto desempenho computacional e grande robustez numérica, assegurada pela escolha

adequada de seu algoritmo.

Em 2006, *Jardim, et al.* [09] descrevem como é efetuada a avaliação de segurança dinâmica do sistema elétrico brasileiro. O método consiste basicamente em: partindo-se de um ponto de operação inicial, realizar uma busca radial em diversas direções, considerando uma lista de contingências a serem simuladas, as quais são previamente definidas. Sendo alcançados novos pontos de operação para as diferentes direções, a análise de contingências é efetuada novamente, até que o algoritmo encontre o limite em uma determinada direção. A análise descrita considera a possibilidade de se obter uma região de segurança estática, para a qual utiliza-se de modelos elétricos estáticos, e uma outra região de segurança dinâmica, para a qual são considerados os modelos dinâmicos dos componentes da rede. A técnica desenvolvida pelos autores contempla o despacho agregado de energia de três áreas de geração interconectadas, submetidas a contingências estáticas e dinâmicas, respectivamente, no qual a carga permanece constante. O objetivo do estudo foi verificar até que ponto um sistema pode operar, considerando despachos na geração.

Em 2008, *Chaves* [10] descreve detalhadamente o programa ORGANON, uma ferramenta computacional voltada para aplicações no planejamento da expansão e operação do sistema elétrico brasileiro. O poder deste software reside na capacidade de realizar de forma integrada as análises de regime permanente, transitório e de segurança. Uma descrição teórica detalhada foi apresentada pela autora, bem como os principais métodos e conceitos utilizados pelo programa. Além disto, são apresentados resultados através de estudos de análise de redes estáticas e dinâmicas.

Em 2012, *Santos et al.* [11] avaliam os benefícios proporcionados pela utilização das regiões de segurança no processo de análise de ampliações e reforços da rede básica brasileira. O trabalho buscou analisar a inserção da interligação do sistema Acre-Rondônia ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Os autores definiram os três grupos de geração que governam o deslocamento da região de segurança dinâmica respectivamente por: G_1 (Geração do Mato Grosso), G_2 (Geração do Acre-Rondônia) e G_3 (Geração do Sul-Sudeste). O estudo considerou como critério de análise a maximização do intercâmbio de potência entre áreas. A região de segurança avaliou o desempenho dinâmico das regiões Acre-Rondônia e Mato Grosso, no qual se aplicou uma contingência crítica ao sistema sem reforço. Os resultados foram adequados de modo a obter um ponto de operação seguro. Posteriormente, estes foram

comparados com uma configuração de rede com reforço, através da inclusão de uma linha de transmissão. Os autores verificaram que a inserção desta nova linha de transmissão proporcionou um aumento significativo na margem de segurança operativa do sistema, permitindo o despacho total das áreas de geração Mato Grosso e Acre-Rondônia.

2.4. Avaliação de Estabilidade Transitória

Em 1986, *Fouad et al.* [12] apresentam uma metodologia para análise transitória de respostas fornecidas por programas convencionais de estabilidade, utilizando o conceito de funções energia. Propõem, assim, calcular no período pós-falta, a energia cinética, a energia potencial e a derivada temporal da energia potencial, parâmetros estes utilizados na obtenção de índices para determinação quantitativa do grau de estabilidade de cada gerador.

Em 1995, *Haque* [13] apresenta um novo e eficiente método para determinação de estabilidade transitória. O método propõe a avaliação de estabilidade de um sistema multimáquina submetido a um dado distúrbio. A técnica de avaliação desenvolvida identifica a máquina crítica pela observação da variação de potência acelerante das máquinas mais severamente perturbadas. A análise foi efetuada unicamente para máquina crítica, checando-se seu limite de estabilidade baseado no critério de áreas iguais. O autor estabeleceu a determinação do limite de estabilidade através do diagnóstico de ocorrências simultâneas de zeros da potência acelerante e da velocidade da máquina crítica do sistema. A determinação do tempo crítico de eliminação de falta proposto pelo autor foi facilmente calculado, exigindo apenas os parâmetros do sistema e os ângulos da máquina crítica, os quais foram estimados por expansões em séries de Taylor. O método foi testado para três sistemas distintos; os resultados foram comparados e validados.

Em 1996, *Haque* [14] retoma o desenvolvimento de um método híbrido capaz de determinar a margem de estabilidade de sistemas e o tempo crítico de eliminação de defeito. O método trata-se de uma combinação de função energia com métodos convencionais aplicados ao domínio do tempo. Usualmente, os métodos convencionais para determinação do limite de estabilidade são baseados em repetitivas simulações no domínio do tempo e na resolução de complexas equações dinâmicas. O autor propõe uma análise de resultados, através do método IMEF (*Individual Machine Energy Function*) para estabelecimento da margem de estabilidade

transitória. Ao contrário de outros métodos híbridos propostos ao longo da literatura, este apresentava a vantagem de se eliminar, por exemplo, a possibilidade de se computar falsas trajetórias durante a falta. Além disto, o mesmo diminuía significativamente esforços computacionais. Um aspecto apontado pelo autor diz respeito ao fato do cálculo de margem ser determinado somente para uma máquina do sistema, a chamada máquina crítica. A determinação desta máquina crítica e do sincronismo das unidades geradoras para inicialização do algoritmo utilizado poderiam ser efetuados, verificando-se variações angulares das máquinas síncronas no domínio do tempo. Para um sistema estável, o método se demonstrou eficaz na determinação da margem de estabilidade através da capacidade de desaceleração da máquina que percebia mais severamente a perturbação. *Haque* indica, ainda, que para situações instáveis, a margem poderia ser determinada através da mínima velocidade pós-falta.

Ainda em 1996, *Haque* [15] apresenta um novo método para determinação da margem de estabilidade de primeira oscilação por análises diretas de simulações no domínio do tempo. Ao contrário de muitos métodos híbridos, este não utilizava o conceito de funções de energia para determinação da margem de estabilidade, porém eliminava as limitações e reduzia os custos computacionais associados ao método de funções de energia transitória. Para tanto, o autor utilizou de uma metodologia considerada muito simples, de rápida e fácil implementação, requerendo apenas os ângulos e as velocidades dos rotores das máquinas, extraídos diretamente da resposta no tempo. Perante um sistema estável, este determinava a margem de estabilidade da máquina mais severamente perturbada quando o ângulo pós-falta alcançasse os valores de pico, ou seja, a máxima excursão angular. Perante uma situação instável, a margem de instabilidade poderia ser determinada a partir da velocidade mínima pós-falta.

Zhang, et al. [16] propuseram um método híbrido baseado no SIME, para avaliação da estabilidade transitória em um sistema longitudinal, como alternativa aos métodos convencionais de avaliação no domínio do tempo. O método resultava de uma combinação entre o SIME e um particular método direto, o qual buscava combinar vantagem de ambos. Este foi aplicado na avaliação transitória de um sistema da Hydro-Québec. Os autores introduziram no decorrer das simulações, ao método SIME original, procedimentos de avaliação de fenômenos de instabilidade aplicado ao “*First Swing*” e “*Multi-Swing*”. O método foi considerado como uma alternativa flexível, devido sua capacidade de avaliar

qualquer sistema independente do grau de complexidade e modelagem dinâmica, além de ser uma interessante opção frente aos métodos que foram aplicados puramente sob a análise no domínio do tempo.

Em 2005, *Suzuki, et al.* [17] apresentam um método baseado na área de desaceleração da curva característica potência-ângulo do sistema, para efetuar análises de estabilidade transitória em casos estáveis. Este utilizava aproximações, baseadas no SIME, para determinação das áreas, e consiste em analisar a desaceleração do sistema para cada contingência aplicada em função da variação de potência mecânica, com um tempo específico preestabelecido para eliminação do defeito. Por fim, os autores realizaram uma classificação das contingências mais severas ao sistema, em comparação ao tempo crítico de eliminação do defeito obtido através de simulações no domínio do tempo. O método proposto foi aplicado ao clássico sistema de 9 barras.

2.5. Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentada uma breve descrição bibliográfica a respeito dos avanços dos estudos e análises de técnicas de determinação da estabilidade de um sistema de potência. Como resultado disto, observa-se que o método baseado no modelo de máquina equivalente (SIME) apresenta-se como o de maior destaque e investigação.

O método de avaliação da segurança dinâmica descrito em [09] foi utilizado como referência dos estudos realizados no presente trabalho, uma vez que permitiu analisar os cálculos de índices de estabilidade na fronteira limite da região de segurança. Bem como, possibilitou identificar e estudar novas e diferentes propostas para cálculos dos índices de estabilidade.

CAPÍTULO 3

Método da Máquina Equivalente e os Índices de Estabilidade

3.1. Considerações Iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma breve descrição teórica sobre a análise de estabilidade, utilizando o método da máquina equivalente, sendo mais conhecido pelo seu nome em inglês: “*Single Machine Equivalent*” (SIME). Neste capítulo será explorado também o cálculo de índices de estabilidade, que no presente trabalho se concentrará na análise do critério das áreas iguais, através da curva característica potência-ângulo.

3.2. Análise de Estabilidade Transitória

Os estudos de estabilidade transitória estão entre os aspectos mais relevantes da avaliação de segurança dinâmica, em outras palavras, o conceito de estabilidade se define pela capacidade do sistema de manter o sincronismo de suas unidades geradoras diante de distúrbios de médio e grande porte, tais como: curtos-circuitos trifásicos seguidos do desligamento de componentes, perda de grandes blocos de geração, etc. A natureza da resposta do sistema envolve variáveis de tensões, fluxo de potência e as excursões angulares dos rotores, sendo esta última altamente influenciada pelas relações não lineares existentes entre potência e ângulo.

Em grandes sistemas interligados, a instabilidade ocorre normalmente de duas formas: (a) através de aceleração do rotor, com crescimento progressivo, ou monotônico, do deslocamento angular, sendo a causa fundamental a falta de conjugado sincronizante e (b) através de oscilações crescentes do rotor, causadas pela superposição de diversos modos de oscilação do sistema [18].

Para se proceder ao estudo de estabilidade transitória, um dos requisitos mais importante é a escolha adequada dos métodos e técnicas de simulação para a resolução do problema. Como

já mencionado anteriormente, o método de avaliação de estabilidade escolhido no presente trabalho, é o método da máquina equivalente (SIME). Este se destaca pela sua satisfatória eficiência computacional, precisão e confiabilidade adequada, permitindo ainda uma representação dinâmica detalhada da rede e seus equipamentos.

O método SIME consiste em uma formulação híbrida para o estudo e análise da estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência, que utiliza como método direto o princípio clássico do critério das áreas iguais, combinado com um método de integração numérica no domínio do tempo das equações que descrevem o comportamento dinâmico do sistema [19][20].

3.3. Critério das Áreas Iguais

O chamado “Critério das Áreas Iguais” (*Equal Area Criterion - EAC*) se trata de um método direto de análise de estabilidade angular transitória, onde a abordagem é realizada pelo exame da curva característica $P - \delta$, com independência do tempo, sendo P a potência elétrica fornecida pela máquina síncrona e δ o deslocamento angular do rotor da máquina. A aplicação deste método elimina a necessidade de obter a solução de complexas equações dinâmicas, ligadas à resolução de equações diferenciais não lineares, tais como as equações de oscilação dos geradores, o que facilita a análise e simplifica o processo de verificação da estabilidade. Para uma revisão mais detalhada do critério das áreas iguais, veja a referência [21].

Para tanto, considere o sistema da figura 3.1, no qual apresenta um gerador conectado a um barramento infinito.

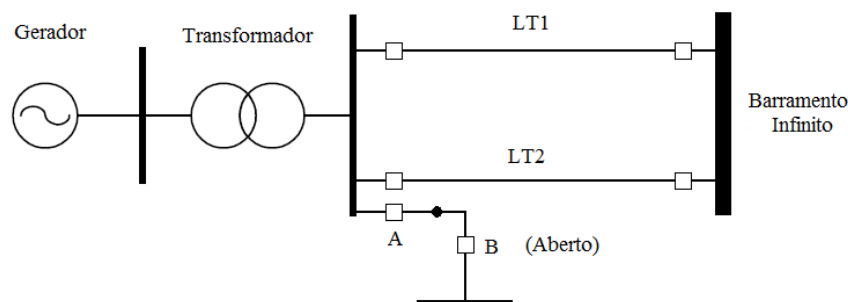


Fig. 3.1: Diagrama de um Sistema Máquina versus Barramento Infinito.

Inicialmente, o disjuntor A é considerado fechado e o disjuntor B em oposição é considerado aberto. A ocorrência de uma falta trifásica no ponto entre A e B ocasionará, após um curto período de tempo, a abertura do disjuntor A. Nesta condição, o curto-circuito causado pelo defeito é aplicado efetivamente sobre o barramento, desta forma, a potência elétrica dos geradores se reduz abruptamente antes do defeito ser eliminado, e a variação entre os conjugados mecânico e elétrico, durante o defeito, ocasiona a aceleração do gerador.

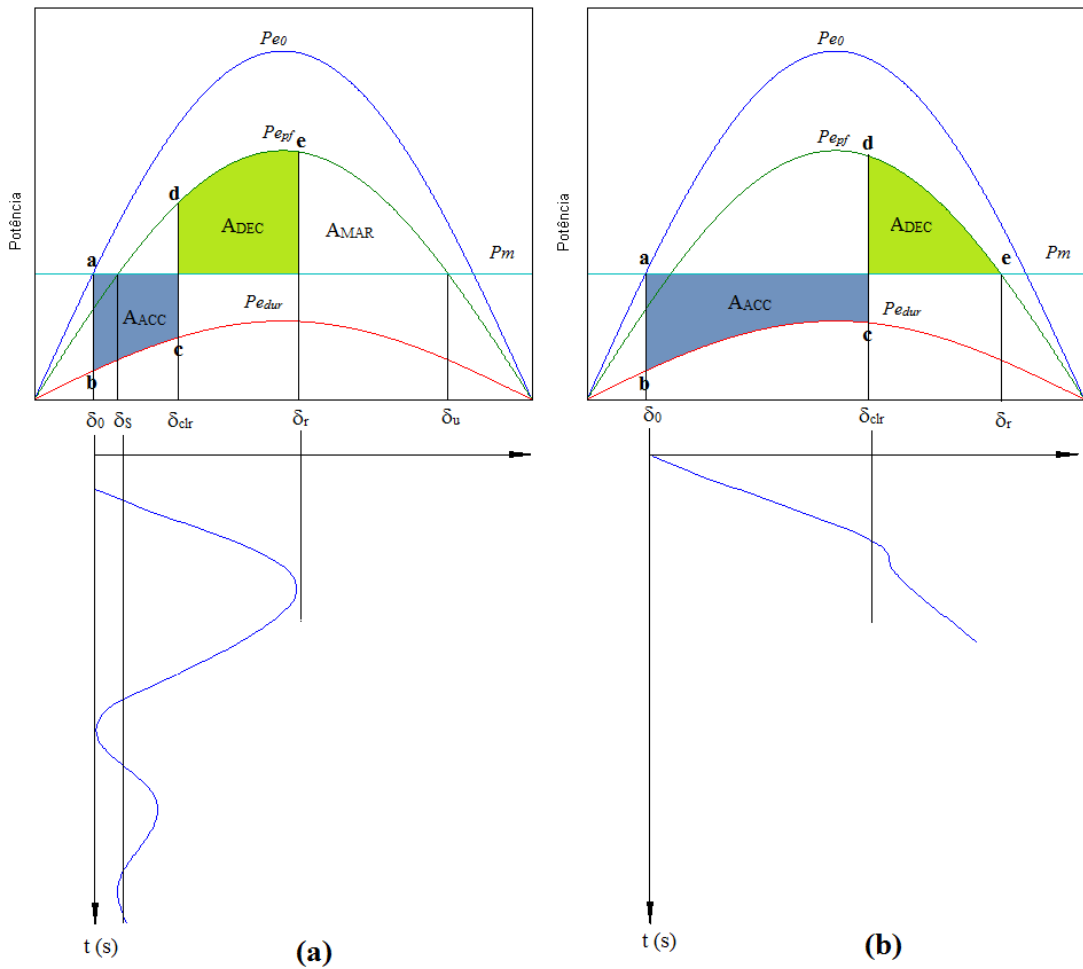


Fig. 3.2: Característica Potência-Ângulo.

As figuras 3.2(a) e 3.2(b) ilustram o conceito do EAC, onde P_{e0} , P_{edur} e P_{epf} são as características potência-ângulo pré-falta, durante a falta e pós-falta, respectivamente; δ_0 é o ângulo inicial do rotor, δ_{clr} representa o ângulo do rotor no instante que o defeito é eliminado, δ_r é o ângulo de retorno, i.e., a máxima excursão angular para um cenário estável e δ_u é o ponto de equilíbrio instável no período de pós-falta.

O gerador está operando inicialmente com velocidade síncrona, com o ângulo do rotor em δ_0 e a potência mecânica de entrada P_m igual à potência elétrica de saída P_e , como é mostrado no ponto *a* (ver figura 3.2(a)). A ocorrência de um curto-circuito na barra terminal da máquina ocasiona alteração do ponto de operação inicial de **a** para **b**. Durante o defeito (trecho **b-c**), a potência elétrica reduz significativamente e o sistema excursiona ao longo da curva $P_{e_{dur}}$, enquanto a potência mecânica de entrada permanece inalterada. A diferença de potência é armazenada como energia cinética nas massas do rotor, através do acréscimo de velocidade em relação à velocidade síncrona.

É importante verificar que para uma ocorrência severa tal que $P_e = 0$, ou seja, nesta condição, estaria sendo aplicado um curto-circuito trifásico franco aos terminais do gerador, e admitindo sempre P_m constante, a máquina síncrona desenvolveria durante o curto uma aceleração constante dada pela equação (3.1):

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} P_m \quad (3.1)$$

Observe que na situação descrita pela equação (3.1), toda a energia é transferida pelo sistema como energia cinética, fazendo com que a máquina adquira mais velocidade.

Entretanto, durante a falta, a velocidade aumentará acima da velocidade síncrona, sendo possível verificar realizando a integração da equação de oscilação como pode ser vista na equação (3.2):

$$\frac{d\delta}{dt} = \int_0^t \frac{\omega_s}{2H} P_m dt = \frac{\omega_s}{2H} P_m t \quad (3.2)$$

Novamente, realizando a operação de integral na equação (3.2), obtém-se uma equação de ângulo quadrática partindo do valor inicial δ_0 :

$$\delta = \frac{\omega_s P_m}{4H} t^2 + \delta_0 \quad (3.3)$$

As equações (3.2) e (3.3) mostram que a velocidade do rotor relativa à velocidade síncrona aumenta linearmente com o tempo, enquanto o ângulo do rotor avança de δ_0 em direção ao ângulo de eliminação do defeito δ_{clr} . Observe que, nesta condição, para o sistema máquina barramento infinito, o ângulo δ irá excursionar do ponto **b** para **c** (ver figura 3.2(a)). No instante de remoção da falta, há um aumento da velocidade do rotor e da abertura angular entre o gerador e a barra infinita, dados respectivamente, pelas equações (3.4) e (3.5):

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{t=t_c} = \frac{\omega_s}{2H} P_m t_c \quad (3.4)$$

$$\delta(t) \Big|_{t=t_c} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_c^2 + \delta_0 \quad (3.5)$$

Quando a falta é eliminada ao atingir o ângulo δ_{clr} , a potência elétrica de saída aumenta para um valor correspondente ao ponto **d** da figura 3.2 (a) da curva $P - \delta$. Em **d**, a potência elétrica de saída excede a potência mecânica de entrada, assim a potência acelerante resultante é negativa. Como consequência, o rotor desacelera, diminuindo a velocidade à medida que a P_e vai do ponto **d** para **e**, na figura 3.2 (a), excursionando, agora, sobre a curva de P_{epf} . No ponto **e**, a posição angular do rotor é δ_r e a máquina atinge a velocidade síncrona ($\omega = \omega_s$). O ângulo δ_r é determinado, considerando o fato que as áreas de aceleração (A_{ACC}) e desaceleração (A_{DEC}) são iguais. Como a P_a é negativa, o rotor desacelera, efetuando agora o caminho inverso e o ângulo excursionará do ponto **e** retornando sobre a curva de P_{epf} . Neste momento, o ciclo se repete e a máquina passa a oscilar no em torno de um ponto de equilíbrio estável, definindo um novo valor de ângulo δ_s .

Agora, examinando o caso instável, figura 3.2 (b), nota-se que o sistema foi submetido a um tempo de exposição ao curto-circuito maior, tendo portando uma A_{ACC} maior que a A_{DEC} , não garantindo a estabilidade na primeira oscilação. Em outras palavras, o incremento de energia cinética armazenado no rotor durante a falta não pode ser totalmente absorvido pelo sistema. Quando o ponto **e** da figura 3.2 (b) é ultrapassado, P_e é menor que P_m permitindo que o rotor retorne a acelerar, assim, neste momento, ω e δ crescem monotonicamente caracterizando a perda de sincronismo do sistema, por incapacidade de conjugado sincronizante.

3.4. Método da Máquina Equivalente

O método da máquina equivalente (SIME) [22] pertence à classe geral dos métodos baseados no equivalente de uma máquina versus barramento infinito (*One Machine Infinite Bus* - OMIB). Esse método se baseia no princípio que a perda de sincronismo de um sistema multimáquina se caracteriza pela separação de suas máquinas em dois grupos, os quais são substituídos por um sistema equivalente de duas máquinas, e posteriormente por um OMIB. Um OMIB pode ser visto como uma transformação do espaço multidimensional das equações dinâmicas do sistema multimáquina em uma única equação dinâmica.

A separação do sistema multimáquina em dois grupos, o primeiro denominado grupo de máquinas críticas e, o segundo grupo de máquinas não-críticas, é ocasionado por um desequilíbrio de potência entre áreas o qual promove desaceleração ou aceleração nos geradores. Para tanto, é importante notar que o ponto crucial da abordagem SIME está na definição adequada das máquinas que serão consideradas críticas e as máquinas que serão consideradas não-críticas.

Em geral, tais grupos são determinados a partir dos seus respectivos centro de ângulo (*Center of Angle* - COA), ou seja, o grupo crítico é formado por geradores com ângulo crescente/decrecente em relação ao COA. Posteriormente, esses grupos são substituídos pelo respectivo OMIB do sistema.

Aplicando-se o critério das áreas iguais à máquina equivalente, calcula-se a margem de estabilidade transitória, definida como o excesso da sua energia de desaceleração sobre sua energia de aceleração. A margem de estabilidade de um sistema de potência obtida através do método SIME expressa quão distante o sistema encontra-se de uma possível instabilidade.

3.4.1. Transformação de um Sistema Multimáquina em um OMIB

A determinação de um OMIB é obtida seguindo os seguintes passos:

1. Após submeter-se um sistema multimáquina a um determinado distúrbio, independente do seu grau de severidade, suas máquinas são separadas em dois grupos, o grupo das máquinas críticas e o grupo das máquinas não-críticas;

2. Estes grupos são equivalentados e transformados em duas máquinas distintas, utilizando-se a formulação do centro de inércia;
3. Em seguida, substituem-se as máquinas obtidas no passo 2 por uma máquina ligada a um barramento infinito, em outras palavras, por seu equivalente OMIB.

3.4.2. Determinação das Máquinas Críticas

A noção de máquina crítica está intimamente ligada a cenários instáveis. Por definição, as trajetórias das máquinas instáveis do grupo das máquinas críticas se afastam excessivamente causando perda de sincronismo do sistema. Sendo assim, as máquinas são ordenadas de acordo com os ângulos dos seus rotores, identificando-se o maior desvio angular entre duas máquinas adjacentes, e, portanto, sendo consideradas candidatas ao grupo das máquinas críticas, aquelas cujo desvio angular se situe acima desta maior distância angular.

3.4.3. Expressões dos Parâmetros do OMIB

As equações dinâmicas de um sistema multimáquina transformado em uma equação equivalente OMIB tem seu modelo expresso por:

$$M\ddot{\delta} = P_a \quad (3.6)$$

Onde, M representa o coeficiente de inércia equivalente do OMIB e P_a , sua potência acelerante.

Como já mencionado anteriormente, o resultado da transformação é proveniente da decomposição das máquinas do sistema em dois grupos, e posteriormente da agregação destes grupos com relação aos seus respectivos COA's. Nessa seção, são apresentadas as expressões para determinação dos parâmetros δ , ω , M , P_m , P_e , P_a do OMIB, para os quais o índice 'C' se refere a parâmetros relacionados a máquinas críticas, e o índice 'N' se refere a parâmetros relacionados a máquinas não-críticas [22].

(i) Denotando $\delta_C(t)$, o COA do grupo das máquinas críticas. Pode-se escrever:

$$\delta_C(t) = M_C^{-1} \sum_{k \in C} M_k \delta_k(t) \quad (3.7)$$

Similarmente, para grupos não-críticos têm-se:

$$\delta_N(t) = M_N^{-1} \sum_{j \in N} M_j \delta_j(t) \quad (3.8)$$

Das equações acima (3.7) e (3.8), têm-se os coeficientes de inércia equivalente para os grupos críticos e não-críticos, respectivamente:

$$M_C = \sum_{k \in C} M_k \quad (3.9)$$

$$M_N = \sum_{j \in N} M_j \quad (3.10)$$

(ii) Definindo o ângulo do rotor do OMIB correspondente pela transformação:

$$\delta(t) = \delta_C(t) - \delta_N(t) \quad (3.11)$$

Por conseguinte, a velocidade angular do rotor do OMIB é dada por:

$$\omega(t) = \omega_C(t) - \omega_N(t) \quad (3.12)$$

Onde, as parcelas dos grupos críticos e não-críticos são calculados pela equação (3.13) abaixo.

$$\begin{cases} \omega_C(t) = M_C^{-1} \sum_{k \in C} M_k \omega_k(t) \\ \omega_N(t) = M_N^{-1} \sum_{j \in N} M_j \omega_j(t) \end{cases} \quad (3.13)$$

(iii) Definindo a potência mecânica equivalente do OMIB, é dada por:

$$Pm(t) = M \left[\frac{1}{M_C} \sum_{k \in C} Pm_k(t) - \frac{1}{M_N} \sum_{j \in N} Pm_j(t) \right] \quad (3.14)$$

e a potência elétrica equivalente do OMIB, como:

$$Pe(t) = M \left[\frac{1}{M_C} \sum_{k \in C} Pe_k(t) - \frac{1}{M_N} \sum_{j \in N} Pe_j(t) \right] \quad (3.15)$$

Portanto, a potência acelerante resultante é dada por:

$$Pa(t) = Pm(t) - Pe(t) \quad (3.16)$$

Nas expressões (3.14) e (3.15), o coeficiente de inércia do OMIB pode ser determinado como:

$$M = \frac{M_C M_N}{M_C + M_N} \quad (3.17)$$

3.4.4. Condição de Estabilidade Através do Critério das Áreas

O critério das áreas iguais propõe a determinação da estabilidade de um sistema do tipo máquina ligado a um barramento infinito sem resolver formalmente as equações dinâmicas do sistema. Em outras palavras, o critério das áreas é capaz de determinar a máxima excursão de δ e a estabilidade do sistema, sem computar o tempo de resposta através de solução das equações. Em resumo, o critério estabelece que a estabilidade de um determinado sistema perante um cenário de contingência pode ser obtido em termos da margem de estabilidade, calculada como sendo a diferença entre a área desacelerante (A_{DEC}) e a área acelerante (A_{ACC}) do OMIB através da curva característica $P-\delta$.

$$\eta = A_{DEC}^{Total} - A_{ACC} \quad (3.18)$$

Na expressão acima (3.18), a área de aceleração representa a energia cinética armazenada durante a falta, enquanto a área de desaceleração representa a energia potencial que o sistema pode dissipar no período pós-falta.

Nota-se que o princípio de conservação da energia é um conceito geral e pode ser aplicado à qualquer sistema, inclusive ao OMIB. A diferença principal entre SIME e o critério das áreas iguais aplicado em sua forma clássica, é que para a abordagem SIME as curvas $P_m - \delta$ e $P_e - \delta$ são computadas dos dados resultantes de uma simulação no domínio do tempo. Em geral, essa simulação é realizada somente durante o espaço de tempo necessário para os

cálculos de aplicação do critério. Dependendo da estabilidade do caso, a sua duração reduz-se ao tempo para atingir os ângulos do OMIB, δ_u ou δ_r , sendo o ângulo de equilíbrio instável pós-falta, ou, ângulo de retorno, respectivamente.

3.4.5. Trajetória do OMIB e Grandezas Associadas

Na prática, a curva de potência elétrica determinada para modelos de máquina mais detalhados não é representada por uma senóide pura, uma vez que a máquina síncrona deixa de ser representada por uma fonte de tensão atrás de uma impedância. É possível perceber esta característica observando a figura 3.3. Pela análise da curva $P - \delta$, nota-se que o sistema se torna instável, quando o ângulo do equivalente ultrapassa δ_u . Por outro lado, e ainda, observando a figura 3.3, é possível verificar que a potência mecânica continua sendo constante, sugerindo que não há uma rápida atuação do regulador de velocidade para esta representação. Fica evidente que quando o ângulo do OMIB atinge δ_u , as potências mecânica e elétrica novamente se igualarão, porém caracterizando um ponto limitante de estabilidade.

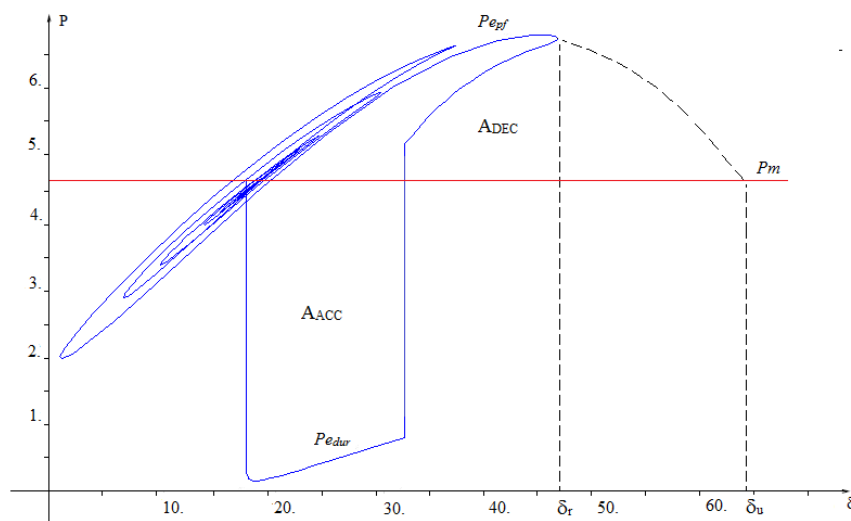


Fig. 3.3: Critério das Áreas Iguais.

3.4.6. Condições para um OMIB de Trajetória Instável

Um caso instável corresponde à situação em que a margem resultante definida pelo critério das áreas seja negativa, ou seja, $\eta < 0$, o que significa que $A_{DEC} < A_{ACC}$. Nesta condição, a curva P_{epf} cruza a P_m , ou equivalentemente, a potência acelerante P_a passa por zero e o rotor retorna a acelerar. De um ponto de vista físico, $P_a = 0$, leva $\delta = \delta_u$, e caracteriza a perda de sincronismo do OMIB.

Um OMIB de trajetória instável alcança o ângulo instável δ_u , no tempo t_u , tal que:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_a(t_u) = 0 \\ \dot{P}_a(t_u) = \left. \frac{dP_a}{dt} \right|_{t=t_u} \geq 0 \end{array} \right. \quad (3.19)$$

Com $\omega > 0$, para $t > t_0$.

3.4.7. Condições para um OMIB de Trajetória Estável

Novamente, considerando agora, o caso estável o qual corresponde à situação em que a margem resultante definida pelo critério das áreas é positiva, ou seja, $\eta > 0$, e, ainda, $A_{DEC} > A_{ACC}$. Então, neste caso, a energia cinética adquirida é menor que a energia potencial máxima, i.e., a potência elétrica P_{epf} encontra o ângulo de parada e irá começar a retornar a sua excursão, no qual neste momento $\delta = \delta_r$, antes de cruzar a P_m . Em outras palavras, $\delta = \delta_r$, $\omega=0$, com $P_a < 0$, a magnitude do ângulo δ para de se elevar e, em seguida, começará a diminuir.

A trajetória de um OMIB estável atinge o ângulo de retorno δ_r ($\delta_r < \delta_u$), em $t=t_r$, assim que:

$$\omega(t_r) = 0, \text{ com } P_a(t_r) < 0 \quad (3.20)$$

3.4.8. Margem de Estabilidade

Observando que o OMIB torna-se instável assim que encontra as condições (3.19), e multiplicando ambos os membros da equação dinâmica (3.6) por $\dot{\delta}$, tem-se:

$$M\ddot{\delta}\dot{\delta} = P_a\dot{\delta} \quad (3.21)$$

Porém, $\omega_0 = 0$, assim tem-se por integração:

$$\frac{1}{2}M\omega_u^2 = \int_{\delta_0}^{\delta_u} P_a d\delta \quad (3.22)$$

Denotando por δ_{ch} o ângulo do rotor pós-falta, em que a potência acelerante muda de positiva

para negativa. A margem de estabilidade pode ser expressa por:

$$\eta = -\int_{\delta_0}^{\delta_{ch}} P_a d\delta - \int_{\delta_{ch}}^{\delta_u} P_a d\delta = -\int_{\delta_0}^{\delta_u} P_a d\delta \quad (3.23)$$

Comparando as equações (3.22) e (3.23), tem-se:

$$\eta_u = -\frac{1}{2} M \omega_u^2 \quad (3.24)$$

Onde, o subscrito ‘u’ denomina o termo instável (do inglês *unstable*), e $\omega_u \equiv \omega(\delta = \delta_u)$. Sabendo que o OMIB permanecera estável, se $P_{e_{pf}}$ retornar antes de cruzar com P_m , e que $\omega = 0$ para $\delta = \delta_0$ e $\delta = \delta_r$, através da manipulação da equação (3.24), a margem estável é dada por:

$$\eta_s = -\int_{\delta_r}^{\delta_u} P_a d\delta = \int_{\delta_r}^{\delta_u} |P_a| d\delta \quad (3.25)$$

Já, o subscrito ‘s’ denomina o termo estável (do inglês *stable*).

A margem estável dada por (3.25) não pode ser calculada de forma exata, devido ao fato que δ_u e $P_{e_{pf}}(\delta)$ ($\delta_u > \delta > \delta_r$) não podem ser determinados diretamente, já que a curva $P_e - \delta$ do OMIB retorna em $\delta = \delta_r$. Duas formas possíveis de cálculo aproximado de η_s envolvem ou uma aproximação triangular da área de margem desacelerante, ou a extrapolação da $P_a(\delta)$ via aproximação por mínimos quadrados entre δ_r e δ_u . Tais possibilidades de cálculo serão apresentadas posteriormente.

3.5. Índice de Estabilidade

Índices de estabilidade são opções atraentes para avaliação de segurança de sistemas submetidos a grandes perturbações. Índices capazes de informar o grau de risco para o sistema e produzir diagnósticos que apoiem a obtenção de um ponto de máxima segurança operativa, têm sido o objetivo de muitos estudos nas últimas décadas. Contudo, as metodologias empregadas para a determinação de índices de estabilidade ainda se deparam com dificuldades de obtenção de alguns parâmetros típicos, tais como: o tempo crítico de

eliminação de falta (*Critical Clearing Time* - CCT). Estratégias que buscam conhecer tais índices de forma iterativa podem apresentar um elevado custo computacional, exigindo busca binária e inúmeras simulações em função do grande número de contingências envolvidas no processo de avaliação de segurança.

No que se segue, nesta seção são apresentados índices de estabilidade com o objetivo de facilitar o entendimento de seus aspectos relevantes e suas contribuições neste trabalho. Os índices utilizados foram extraídos do trabalho de mestrado de Lima [06].

Lima sugere duas novas metodologias para avaliação de estabilidade transitória. Estruturas distintas de cálculo são aplicadas para determinação dos índices, sendo uma estrutura associada ao cálculo da margem positiva e outra associada ao cálculo da margem negativa. A vantagem no cálculo destes índices está no fato de que os mesmos apresentam baixo custo computacional e eficiência satisfatória.

3.5.1. Índice de Margem Positiva

O índice de margem positiva é baseado na proximidade das trajetórias angulares do gerador em atingir o limite de energia potencial. Pode ser interpretado como uma “*medida de distância*” em relação à condição de instabilidade do sistema. Para isto, utiliza-se o método SIME para obtenção do grupo crítico e sua respectiva trajetória angular. O índice de margem positiva é determinado por:

$$I_p = \frac{\delta_u - \delta_r}{\delta_u - \delta_s} \quad (3.26)$$

Onde δ_u é o ângulo SIME no ponto de equilíbrio instável, δ_r é o ângulo de retorno e δ_s é o ponto de equilíbrio pós-falta. O índice de margem positiva pode variar de 0 a 1, através de um estado chamado *criticamente estável* (ou seja, $\delta_u = \delta_r$) para um estado chamado *muito estável* (ou seja, $\delta_r = \delta_s$), respectivamente. A figura 3.4, apresenta as variáveis da trajetória do ângulo SIME associada à resposta no domínio do tempo.

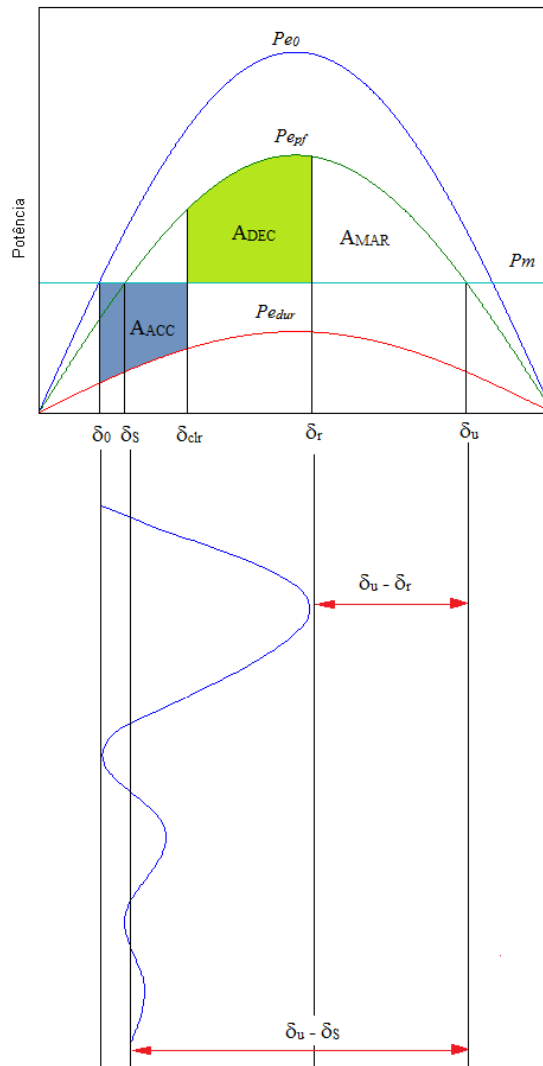


Fig. 3.4: Curva P- δ e Parâmetros do Índice de Margem Positiva no tempo.

3.5.2. Índice de Margem Negativa

O índice apresentado na seção anterior é obviamente aplicável somente para casos estáveis. Uma opção similar seria aplicar a análise para cálculo de um índice para a margem negativa, o qual pode ser obtido pela equação (3.27) escrita abaixo:

$$I_n = \frac{Vke_{\min}}{Vke_{\max}} \quad (3.27)$$

Onde, Vke_{\min} é o valor da energia cinética mínima pós-falta da trajetória SIME e Vke_{\max} é o valor da energia cinética máxima pós-falta da trajetória SIME.

Esses valores de energia cinética são significativos apenas para um curto período após a eliminação da falta. Após a perda de estabilidade, o sistema ganhará energia cinética adicional que distorcerá o índice em questão. Portanto, é necessário encerrar a simulação (término antecipado) logo que é detectada instabilidade. A instabilidade é detectada quando a trajetória cruza o limite de energia potencial. Para maiores detalhes ver a referência [06].

O presente índice varia de 0 a -1, onde “0” é uma condição de estado chamada *criticamente estável* e “-1” uma condição de estado chamada *altamente instável*.

3.6. Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado o método de análise de estabilidade chamado SIME, no qual grupos de máquinas críticas e máquinas não-críticas foram definidas para estudar a estabilidade de sistemas de potência, com objetivo de elaborar índices de estabilidade.

Um índice de estabilidade de margem positiva foi apresentado e este será utilizado e aplicado na análise da região de segurança. Já, o índice de margem negativa foi apresentado, porém seu estudo e análise ficarão como trabalhos futuros.

CAPÍTULO 4

Avaliação de Segurança

4.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo, são descritas as metodologias de avaliação de segurança existentes no programa ORGANON, uma ferramenta computacional utilizada para atividades de análise e avaliação da segurança de sistemas de potência, aplicados tanto a problemas de natureza estática (*Voltage Stability Assessment - VSA*), quanto a problemas de natureza dinâmica (*Dynamic Security Assessment - DSA*), com ênfase para esta última funcionalidade que é âmbito de estudo deste trabalho. A avaliação de segurança ou simplesmente região de segurança baseia-se em um processo automatizado de avaliação da condição de segurança operativa de um sistema elétrico de potência em um ponto de operação e em sua vizinhança [23] [24].

Este capítulo está dividido em seis seções, das quais: a seção 4.1 descreve as considerações iniciais, a seção 4.2 apresenta uma breve introdução ao programa ORGANON, a seção 4.3 apresenta os métodos para cálculo de fluxo de potência empregados por esta ferramenta computacional, a seção 4.4 descreve a estrutura do processamento distribuído utilizado para avaliação de segurança. Já, a seção 4.5 apresenta uma visão geral sobre a região de segurança, assim como suas formulações, princípios de cálculos, construção e interpretações dos resultados. Por fim, na seção 4.6 são apresentadas as considerações finais deste capítulo.

4.2. O Programa ORGANON

O ORGANON é uma ferramenta integrada dos conjuntos clássicos de aplicações de análise de redes conhecidas. O programa é capaz de efetuar de forma integrada as análises de regime permanente, transitório e segurança. O qual pode realizar de forma automatizada os processos de cálculos e regiões de segurança, além de possuir a capacidade de estabelecer rotinas de diagnósticos tanto de simulações estáticas triviais quanto de complexas respostas dinâmicas. Para isso, utiliza computação de alto desempenho e algoritmos com grande robustez

numérica. Entre os métodos empregados pelo ORGANON para diagnóstico de estabilidade e análise dinâmica estão: inspeção visual, utilização de curvas, tabelas e principalmente o método quantitativo, com base em funções de energia e produto interno para análise de estabilidade angular e perdas de sincronismo.

As ferramentas e funcionalidades contidas no programa ORGANON são:

- Fluxo de Potência Convencional;
- Fluxo de Potência Continuado;
- Análise de Sensibilidade;
- Simulação no Domínio do Tempo;
- Análise de Contingências;
- Avaliação de Segurança ou Região de Segurança.

Em âmbito dos estudos em regime permanente, o ORGANON conta com as análises de fluxo de potência convencional, continuado, contingências e sensibilidade. O fluxo de potência convencional é baseado no algoritmo denominado “Full Newton”, que permite uma modelagem detalhada da rede elétrica, incorporando todos os modelos de equipamentos. Além de contar com o robusto método de “Fluxo de Potência de Dinâmica Sintética” (FPDS) [25] [26], um algoritmo inédito que proporciona a solução de casos de difícil convergência utilizando o simples princípio de que a resposta dinâmica de um sistema de potência estável converge para um ponto de equilíbrio estável. A obtenção de uma solução robusta e muito menos dependente das condições iniciais durante a solução do problema de fluxo de potência é fundamental para a determinação de uma correta região de segurança.

As análises e diagnósticos dinâmicos são consideradas tarefas complexas, para tanto o ORGANON realiza as simulações eletromecânicas e análise das condições de amortecimento baseado na decomposição de Prony, técnica de análise de perturbações que permite identificar diretamente a frequência, o amortecimento, a fase e a amplitude associados ao modo eletromecânico. O modo menos amortecido dentre todas as máquinas do sistema pode ser então comparado e avaliado com relação a valores preestabelecidos.

O ORGANON pode ser aplicado a elaborados cálculos de construção de regiões de segurança, permitindo efetuar a avaliação de segurança estática e dinâmica em ambiente de

tempo real.

4.3. Fluxo de Potência

A seguir são apresentados detalhes do método de fluxo de potência convencional e continuado, uma vez que estes assuntos são relevantes para a análise de segurança.

4.3.1. Fluxo de Potência Convencional

O problema principal do fluxo de potência em uma rede de energia consiste na obtenção dos módulos e ângulos das tensões complexas das barras do sistema, i.e., determinação de seu estado operativo em regime permanente, baseado na topologia da rede para uma configuração específica de carga e geração do sistema. A solução para o estudo de fluxo de potência convencional busca calcular as distribuições dos fluxos de potência ativa e reativa de todos os ramos do sistema, assim como determinar o ponto de operação mais adequado, no qual o balanço de potência em todas as barras é nulo.

Neste tipo de problema, a modelagem do sistema elétrico é estática, significando que a rede é representada por um conjunto de equações e inequações algébricas. Esse tipo de representação é utilizado em situações onde as variações com o tempo são suficientemente lentas, podendo se ignorar os efeitos transitórios [27].

O problema de fluxo de potência pode ser formulado essencialmente por um sistema de equações e inequações algébricas não lineares, que corresponde, respectivamente, às leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições operacionais da rede elétrica e de seus componentes. Na formulação básica do problema a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, sendo que duas delas entram no problema como dados conhecidos e outras duas como incógnitas. Para uma dada barra k , tais variáveis são designadas por:

V_k	Módulo da tensão nodal
θ_k	Ângulo da tensão nodal
P_k	Injeção líquida de potência ativa
Q_k	Injeção líquida de potência reativa

A tabela 4.1 exemplifica a classificação de barras utilizada por um fluxo de potência.

TABELA 4.1 – CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAS

Nome da Barra	Tipo	Grandezas	
		Conhecidas	Calculadas
Carga	PQ	P_K, Q_K	V_K, Θ_K
Tensão Controlada	PV	P_K, V_K	Q_K, Θ_K
Referência-Swing	V Θ	V_K, Θ_K	P_K, Q_K

As barras dos tipos PQ e PV são utilizadas para representar, respectivamente, barras de carga e barras de geração (incluindo-se os compensadores síncronos). A barra V θ , também chamada de barra *Swing*, estabelece a referência angular do sistema, sendo necessária para realizar o balanço de potência no sistema. O conjunto de equações do problema do fluxo de potência é formado por duas equações para cada barra, representadas por (4.1) e (4.2). Estas equações seguem as premissas de que as potências ativas injetadas em uma barra são iguais à soma dos fluxos das potências ativas e reativas correspondentes que deixam a barra através de linhas de transmissão, sendo expressas por:

$$Pg_k - Pl_k - \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) = 0 \quad (4.1)$$

$$Qg_k - Ql_k + Q_k^{sh}(V_k) - \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) = 0 \quad (4.2)$$

Onde:

$k = 1, \dots, N$, sendo N o número de barras da rede;

Ω_k – Conjunto de barras vizinhas da barra k;

V_k, V_m – Magnitudes das tensões das barras terminais do ramo k – m;

θ_k, θ_m – Ângulos das tensões das barras terminais do ramo k – m;

P_{km} – Fluxo de potência ativa no ramo k – m;

Q_{km} – Fluxo de potência reativa o ramo k – m;

Q_k^{sh} – Componente de injeção de potência reativa devido ao elemento shunt da barra k;

As equações apresentadas acima são funções não lineares das variáveis: magnitude da tensão (V_k, V_m), ângulos (θ_k, θ_m) para cada barra do sistema, geração (Pg_k, Qg_k) e carga das barras (Pl_k, Ql_k). Podendo, ainda, ser dependentes das variáveis, (a_{km}) para taps dos transformadores

e (Φ_{km}) para ângulos do deslocamento de fase, em aplicações que utilizam sua modelagem completa.

As equações algébricas para este sistema de fluxo de potência consistem em um problema não linear, requerendo a resolução por meio de métodos iterativos. No caso do ORGANON, o método de Newton Raphson é usualmente empregado, justificado por suas características de robustez, propriedade de convergência e baixo custo computacional. A aplicação deste método permite a solução simultânea dos mais diversos tipos de controle (tap, geração remota, derivações, HVDC, etc.), sendo que um ajuste de passo pode ser requerido para melhorar a convergência em casos mais difíceis de obtenção de solução.

4.3.1.1 Método de Newton-Raphson

Uma breve revisão do método de Newton-Raphson é apresentada a seguir [28].

Partindo-se de um sistema de equações algébricas não lineares, o problema geral para determinação da solução pode ser formulado como segue abaixo:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) = y_1 \\ f_2(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) = y_2 \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) = y_n \end{cases} \quad (4.3)$$

Onde:

x_1, \dots, x_n são os estados;

f_1, \dots, f_n funções não lineares que dependem destes estados;

y_1, \dots, y_n constantes destas equações.

Expandindo-se o conjunto de equações em série de Taylor, em torno de um ponto ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), obtém-se o seguinte conjunto de equações lineares:

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ y_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ y_n - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Reescrevendo a expansão indicada em (4.4), tem-se assim o seguinte problema linearizado:

$$\Delta y = J \cdot \Delta x \quad (4.5)$$

Onde J é a matriz quadrada de ordem n que contém valores numéricos das derivadas parciais de primeira ordem de todas as funções $f(x)$, com relação a todas as incógnitas x , denominada matriz jacobiana e a solução de interesse é dada pelo vetor de correções Δx .

A partir de uma determinada estimativa inicial $x_i^{(0)}$, uma nova estimativa pode ser obtida por:

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i \quad (4.6)$$

Corrige-se a solução estimativa com valores de Δx , calcula-se o novo vetor Δy e a nova matriz J . O processo é repetido continuamente até que os erros Δy_i sejam menores que a tolerância especificada.

4.3.1.2 Aplicação do Método de Newton ao Fluxo de Potência

A solução do problema de fluxo de potência via método de Newton-Raphson inicia-se com um processo iterativo de estimação dos valores iniciais para a magnitude e ângulo das tensões nas barras do sistema. Posteriormente, realiza-se o cálculo dos desbalanços de potência ativa ΔP para barras PV e PQ, e de potência reativa para as barras PQ, utilizando-se as equações a seguir [29]:

$$\begin{aligned} \vec{\Delta P} &= \vec{P}^{esp} - \vec{P}(\vec{V}, \vec{\theta})^{cal} \\ \vec{\Delta Q} &= \vec{Q}^{esp} - \vec{Q}(\vec{V}, \vec{\theta})^{cal} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Em seguida, é realizada a comparação do resultado do cálculo dos desbalanços de potência ativa e reativa com uma tolerância pré-especificada, e caso a tolerância seja satisfeita o processo iterativo é interrompido. Caso a tolerância não seja atendida, há a necessidade da formação de uma matriz Jacobiana para a resolução de um sistema algébrico linear do tipo:

$$\begin{bmatrix} \Delta \vec{P} \\ \Delta \vec{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \vec{\theta} \\ \Delta \vec{V} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Os elementos das submatrizes jacobianas H, N, M e L são dados por:

$$\begin{aligned} H \begin{cases} H_{km} = \partial P_k / \partial \theta_m = V_k V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \\ H_{kk} = \partial P_k / \partial \theta_k = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) = -Q_k - V_k^2 B_{kk} \end{cases} \\ N \begin{cases} N_{km} = \partial P_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\ N_{kk} = \partial P_k / \partial V_k = V_k G_{kk} + \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) = V_k^{-1} (P_k + V_k^2 G_{kk}) \end{cases} \\ M \begin{cases} M_{km} = \partial Q_k / \partial \theta_m = -V_k V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\ M_{kk} = \partial Q_k / \partial \theta_k = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) = P_k - V_k^2 G_{kk} \end{cases} \\ L \begin{cases} L_{km} = \partial Q_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \\ L_{kk} = \partial Q_k / \partial V_k = -V_k B_{kk} + \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) = V_k^{-1} (Q_k - V_k^2 B_{kk}) \end{cases} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Onde:

$$Y_{km} = G_{km} + jB_{km} \quad - \text{Admitância de transferência entre a barra } k \text{ e } m \text{ (} k \neq m \text{)};$$

$$Y_{kk} = G_{kk} + jB_{kk} \quad - \text{Admitância própria da barra } k.$$

A cada resolução do sistema linear atualizam-se os valores de tensão e ângulo nas barras do sistema e calculam-se as novas injeções de potência ativa e reativa. Esse processo iterativo é executado continuamente até que os desvios de potência obtidos sejam inferiores à tolerância pré-definida.

4.3.2. Fluxo de Potência Continuado

O fluxo de potência continuado possui várias funcionalidades, sendo muito conhecido por permitir a obtenção de uma margem de carregamento para sistema elétrico de potência [30]. Este consiste basicamente em uma estimativa linear, para calcular um novo ponto de operação de um sistema de energia, processando sequencialmente as simulações de vários casos, através do aumento gradativo de carga do sistema, que pode ser efetuado através da variação do fator de carregamento. A solução do fluxo de potência continuado é realizada na direção tangente à função no ponto de operação inicial e com o incremento de carga pré-definido de um conjunto de barramentos específicos.

O método continuado é constituído de duas etapas principais, interligadas através de um parâmetro de continuação. A primeira etapa é chamada de predição e a segunda correção, conforme apresentado na figura 4.1. Durante a etapa predição, variáveis, tais como, módulos e ângulos de tensão e geração e carga, são alteradas com o objetivo de definir uma estimativa do novo ponto de operação. Para realizar tal estimativa, calcula-se o vetor tangente a partir de um ponto inicial sobre a curva de operação do sistema com incremento de carga pré-definido. A etapa de correção consiste em processar um fluxo de potência convencional, a partir da aproximação do passo de predição, basicamente neste passo, o fluxo de potência convencional é acrescido de uma variável (λ) e uma equação. O ciclo predição-correção é efetuado sistematicamente até que o máximo carregamento seja obtido.

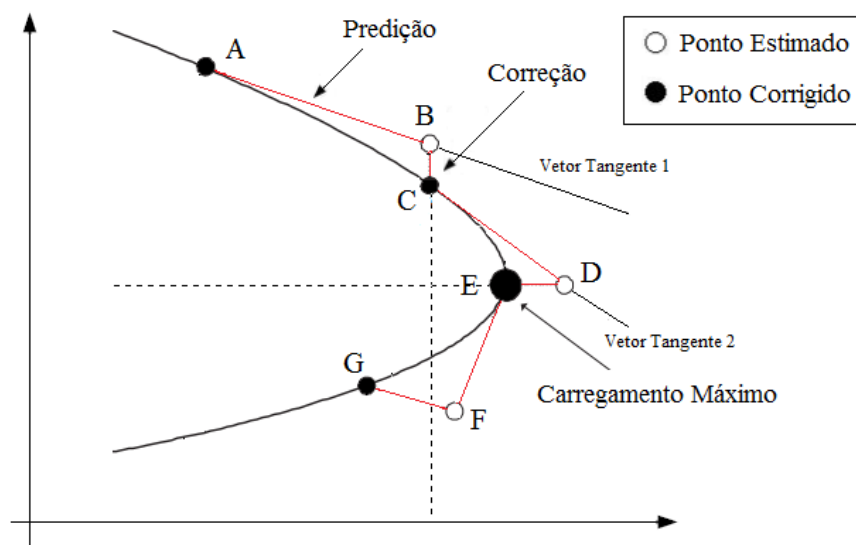


Fig. 4.1: Metodologia de Predição e Correção.

Seja uma solução conhecida do ponto de operação (A), um preditor tangente é usado para estimar a solução (B) para um padrão específico de aumento de carga. O passo corretor determina a solução exata (C), usando a análise convencional de fluxo de potência com a carga fixa. A tensão para um aumento adicional de carga é predita, baseada em um novo preditor tangente. Se a nova carga estimada (D) é agora maior que o carregamento máximo da solução exata, um passo corretor com cargas fixadas não permitiria a convergência e, portanto, um passo corretor com uma tensão fixada no barramento monitorado é aplicado para buscar a solução exata (E). Como o limite de estabilidade de tensão é atingido, para determinar o máximo tamanho exato de incremento de carga, deve-se reduzir gradualmente o preditor [31].

4.3.2.1. Metodologia de Predição e Correção

A formulação do conjunto das equações de fluxo de potência convencional, acrescida do fator de carregamento λ , responsável por conduzir o sistema de um ponto de equilíbrio estável para outro, apresenta a seguinte forma:

$$\left. \begin{array}{l} \lambda P^{esp} - P(V, \theta) = 0 \\ \lambda Q^{esp} - Q(V, \theta) = 0 \end{array} \right\} G(V, \theta, \lambda) = 0 \quad (4.10)$$

Onde λ representa o fator de carregamento, i.e., o incremento nas potências ativa e reativa das cargas, acompanhado pelo aumento correspondente de geração. Assim como, V representa o vetor das magnitudes de tensões nodais, θ é o vetor dos ângulos de fase nodais e G é um vetor composto pelas equações dos balanços de potências ativa e reativa nodais.

O passo preditor tem como objetivo determinar um ponto aproximado para próxima solução. A etapa de predição, utilizando-se da técnica do vetor tangente, consiste em estimar a próxima solução através de um passo, de tamanho apropriadamente escolhido, na direção do vetor tangente à curva PV. O vetor tangente t pode ser obtido tomando-se o diferencial das equações de fluxo de potência continuado [32].

$$d[G(\theta, V, \lambda)] = G_{\theta}d\theta + G_VdV + G_{\lambda}d\lambda = 0 \quad (4.11)$$

$$[G_\theta \quad G_V \quad -G_\lambda] \cdot \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = [J \quad -G_\lambda] \cdot t = 0 \quad (4.12)$$

Onde:

$$G_\theta = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad G_V = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad G_\lambda = \begin{bmatrix} P^{esp} \\ Q^{esp} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Nota-se que com a inserção de λ , o número de incógnitas é maior que o número de equações, exigindo a existência de mais uma equação para solucionar o sistema. Em função disto, uma variável do vetor t deve ser especificada com um valor diferente de zero. Esta variável é conhecida como de parâmetro da continuação. Uma nova equação ($e_k \cdot t = t_k = \pm 1$) é acrescida ao sistema de equações (4.12), que passa a ser dado pela seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} G_\theta & G_V & -G_\lambda \\ & e_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = [J_a] \cdot t = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Por outra definição, a seguinte equação foi adicionada ao problema:

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda \quad (4.8)$$

Em que:

$$\frac{\Delta\lambda}{\partial\lambda} = 1 \quad (4.15)$$

Neste sentido, λ é o incremento de cada interação, onde para o fluxo de potência convencional $\lambda_0 = 1$ e $\Delta\lambda = 0$.

Sendo e_k é um vetor linha de elementos nulos, com exceção para o $k^{\text{ésimo}}$ elemento, que apresenta o valor 1 (ou -1, caso o parâmetro represente uma variável que diminui). A escolha do índice $k^{\text{ésimo}}$ é feita de forma que o vetor t tenha uma norma não nula e garanta que a matriz Jacobiana aumentada (J_a) seja não singular no ponto de máximo carregamento (PMC). Assim, obtido o vetor t , a estimativa para a próxima solução será dada por:

$$\begin{bmatrix} \theta^e \\ V^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^i \\ V^i \\ \lambda^i \end{bmatrix} + \sigma \cdot \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Onde o sobrescrito “e” indica estimativa, “i” a solução atual e σ o tamanho do passo predictor para que a solução prevista seja abrangida dentro do raio de convergência do passo corretor.

Por fim, é necessário corrigir o erro. Durante a etapa de correção, qualquer método numérico pode ser utilizado como corretor, usualmente o fluxo de potência é solucionado pelo próprio método de Newton-Raphson.

4.4. Processamento Distribuído

Os processos de avaliação de segurança efetuados pelo ORGANON são baseados em processamento distribuído. O esquema é empregado através de uma arquitetura do tipo Mestre – Escravo. Primeiramente, um processo Mestre designa diversas tarefas, que são executadas por processos Escravos. Cada processo Escravo, por sua vez, processa uma determinada tarefa e encaminha ao Mestre o diagnóstico dessa tarefa, colocando-se à disposição para processar uma nova tarefa. A figura 4.1 apresenta o esquema desta arquitetura.

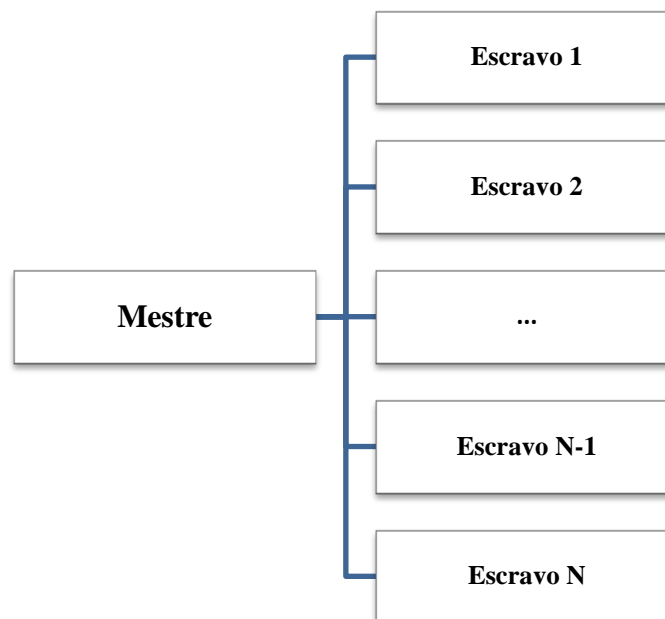


Fig. 4.2: Arquitetura Mestre–Escravo do Processamento Distribuído.

O processamento distribuído deve ser realizado, preferencialmente, em uma rede local de computadores, entretanto não há nenhum impedimento de ser realizado em uma máquina apenas. Quando o sistema de processamento é formado por apenas um computador, o Mestre e o Escravo utilizam o mesmo processador. Nesse caso, o Mestre designa as tarefas de uma forma sequencial ao Escravo, que processa cada tarefa e encaminha um relatório com o resultado ao Mestre. Baseado nos resultados de todas as tarefas, o Mestre gera um diagnóstico de avaliação de segurança para o sistema elétrico analisado [33].

Quando o sistema de processamento é formado por um conjunto de computadores (rede local), um processador é destinado ao Mestre e cada um dos demais processadores é utilizado por um Escravo. Nesse caso, o Mestre designa uma tarefa para cada Escravo, que processa a tarefa e encaminha ao Mestre um relatório com o resultado e aguarda a designação de uma nova tarefa para processar. Como nessa situação existem vários Escravos operando em paralelo, o tempo total para o Mestre obter os resultados de todas as tarefas tende a ser menor do que quando se tem um sistema de processamento composto por apenas um processador.

4.5. Região de Segurança

4.5.1. Metodologia

A construção da região de segurança consiste em avaliar a condição do sistema elétrico em um ponto de operação inicial e em sua vizinhança. Essa análise pode ser de natureza estática ou dinâmica. Para a análise em âmbito estático se identificam problemas de violação de faixas operativas e de sobrecargas em equipamentos, limites de tensão e de máximo carregamento da rede. Na região de segurança dinâmica, além dos problemas citados anteriormente, também são avaliados critérios, tais como nível de amortecimento das oscilações, afundamento da tensão e a própria condição de instabilidade eletromecânica [34].

Para calcular a região de segurança em torno do ponto de operação é necessária a definição de três grupos de geração. A região de segurança é calculada caminhando-se radialmente em diferentes direções, a partir do ponto de operação inicial, através da alteração do despacho de potência ativa de grupos geradores G1, G2 e G3. O primeiro grupo G1 e o segundo grupo G2 são compostos pelas unidades geradoras que governam a região de segurança, ou seja, correspondem aos grupos geradores dentro da área de estudo que terão o despacho de

potência ativa alterado. Contudo, é necessário estabelecer um terceiro grupo de geração que é responsável por acomodar os excessos ou déficits de geração que ocorrem quando há a elevação ou redução simultânea da geração em G1 e G2. Por exemplo, em uma situação onde G1 e o G2 tenham suas gerações reduzidas, o G3 deve possuir uma capacidade de geração suficiente para compensar a redução do G1 e do G2, deste modo evita-se sobrecarregar a barra *Swing* do sistema responsável por variação das perdas.

O processo de avaliação de segurança em torno de um ponto de operação corresponde à simulação de uma lista de contingência previamente estabelecidas para verificar o comportamento eletromecânico do sistema para cada uma delas. O número de direções que compõem a região de segurança podem variar de 4 a 40, de acordo com os parâmetros pré-definidos pelo usuário. Para cada novo ponto de operação, é solucionada uma lista de contingências, até que se encontre um ponto de limite de segurança. Esse limite pode realmente corresponder a um limite de segurança, ou apenas a um limite de geração, no qual todos os geradores de um grupo atingiram sua capacidade máxima ou mínima de geração. O limite de segurança na região de segurança estática indica a falta de convergência do fluxo de potência na simulação de pelo menos uma contingência. Na região de segurança dinâmica, o limite de segurança indica a ocorrência de instabilidade na simulação eletromecânica de pelo menos uma contingência, neste caso o ponto de operação é considerado inseguro. O limite de segurança é obtido quando se encontra um ponto de operação estável e outro instável e a distância entre eles é inferior a uma tolerância definida pelo usuário. Caso o sistema ainda seja estável, mas algum limite térmico, de tensão ou critério para simulação dinâmica seja violado, a busca do ponto instável não é interrompida, mas a violação é armazenada para ser apresentada na região de segurança.

Para exemplificação, a figura 4.2 ilustra como a geração de potência ativa dos grupos de geração 1 e 2 variam no plano G1 x G2 durante o processo de cálculo da região de segurança em torno do ponto de operação inicial.

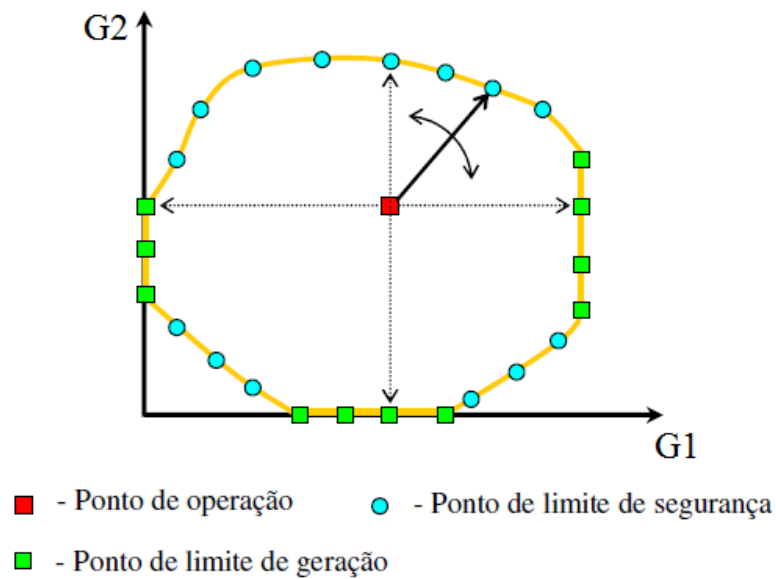


Fig. 4.3: Nomograma da Região de Segurança [10][11].

Para estes cálculos, é utilizado um esquema do fluxo de potência continuado partindo do deslocamento de geração no plano $G1 \times G2$. Para cada novo ponto de operação obtido pelo fluxo de potência continuado, processa-se um conjunto de contingências para esse ponto. O limite de segurança é definido como sendo a interseção dos limites da região para todas as contingências [35] (ver figura 4.3).

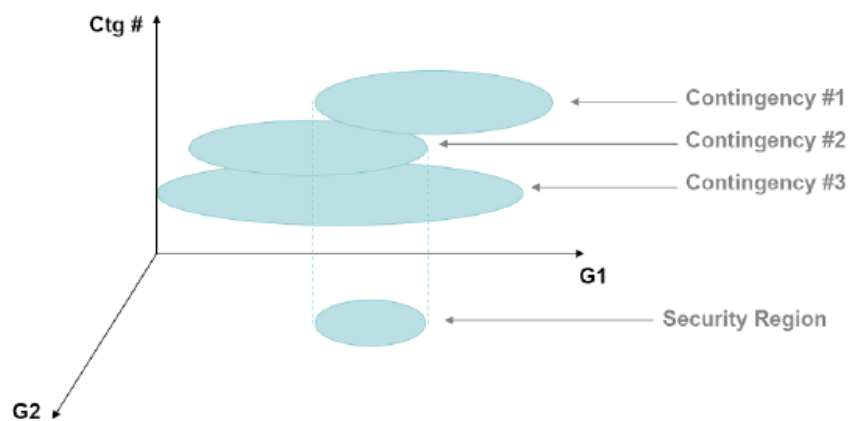


Fig. 4.4: Região de Segurança em torno de um ponto de operação [10][11].

4.5.2. Breve Consideração da Região de Segurança Dinâmica

O cálculo da região de segurança dinâmica adota a mesma filosofia apresentada na seção anterior, ou seja, os novos pontos de operação são obtidos através do fluxo de potência continuado, assim, como na região de segurança estática. Porém, a diferença está no método

de solução da lista de contingência. Em outras palavras, para a região de segurança estática a análise de contingências é simulada através do fluxo de potência convencional, enquanto para a região de segurança dinâmica, a análise de contingências é simulada através da simulação no domínio do tempo.

O resultado da região de segurança é apresentado na forma de nomogramas (gráficos bidimensionais) com as diferentes combinações dos grupos de geração (G1 x G2 – gráfico principal, G1 x G3 e G2 x G3). Cabe ressaltar que cada um desses gráficos é uma projeção de uma região de segurança. Sendo assim, a informação presente em qualquer um dos gráficos estará presente nos demais [36].

4.5.3. Interpretação das Tabelas de Resultados

Ao finalizar a construção da região de segurança, o ORGANON elabora, além dos nomogramas mencionados, uma tabela indicando os tipos de limite atingidos em cada direção denominada “*Security Region*”. Nessa tabela são apresentadas as informações de cada ponto detectado nos três nomogramas. Além dos pontos limitantes são apresentadas as informações sobre o próprio ponto de operação e as gerações máxima e mínima para os três grupos de geração.

Cada linha da tabela está associada a um limite identificado na região de segurança. Esse limite pode ser do tipo limite de segurança, térmico, de tensão ou associado aos critérios de simulação dinâmica. São também apresentadas informações sobre qual contingência e qual elemento de rede estão associados ao limite detectado, bem como as coordenadas definidas pelas gerações dos três grupos de geração. Caso não seja possível encontrar nenhum limite em uma determinada direção, a tabela apresenta uma linha para essa direção com o código NO DS na coluna *Limit Type*.

O programa emite em sua tabela de resultados com os pontos limites atingidos em cada direção, no qual a nomenclatura associada é *DS_Out* e *DS_In*. O significado desses limites é apresentado a seguir:

- **DS_Out:** Indica que além desse ponto, haverá o cruzamento do limite da região de segurança dinâmica de dentro para fora, ou seja, o sistema estava em uma região segura (estável) e além desse ponto, o sistema passa a operar em uma região insegura (instável);
- **DS_In:** Indica que a partir desse ponto, haverá o cruzamento do limite da região de segurança dinâmica de fora para dentro, ou seja, o sistema estava em uma região insegura e a partir desse ponto, o sistema passa a operar em uma região segura.

A relação entre o tipo do limite (*Limit Type*) e o código do limite (*DS Code*) é explicada na tabela 4.2.

TABELA 4.2 – SUMÁRIO DA REGIÃO DE SEGURANÇA [36].

Limit Type	DS Code	Comentários
<i>DS_In</i>	<i>Security Limit</i>	<i>Contingency</i> mostra a contingência que passou a ser estável fazendo o sistema ficar seguro.
<i>Ds_Out</i>	<i>Maximum generation</i>	Não é possível avançar naquela direção, pois algum grupo de geração atingiu o limite máximo ou mínimo.
	<i>Nose Limit</i>	Não é possível avançar naquela direção, pois o sistema atingiu de forma explícita o ponto de máximo carregamento (esgotamento de reativos para a transmissão).
	<i>Convergence Limit</i>	Não é possível avançar naquela direção, pois o sistema atingiu o ponto de máximo carregamento (esgotamento de reativos para a transmissão), mas não de forma explícita.
	<i>Security Limit</i>	<i>Contingency</i> mostra a contingência que passou a ser instável fazendo o sistema ficar inseguro.
<i>TL_IN</i>	Circuito mais próximo da violação da capacidade.	<i>Contingency</i> mostra a contingência que passou a não apresentar mais a violação de limite térmico.
<i>TL_OUT</i>	Circuito com a maior violação da capacidade.	<i>Contingency</i> mostra a contingência que passou a apresentar a violação de limite térmico.
<i>VL_IN</i>	Barra mais próxima da violação da faixa de tensão.	<i>Contingency</i> mostra a contingência que passou a não apresentar mais a violação de limite de tensão.
<i>VL_OUT</i>	Barra com a maior violação da faixa de tensão.	<i>Contingency</i> mostra a contingência que passou a apresentar a violação de limite de tensão.
<i>TD_IN</i>	Elemento mais próximo da violação do critério de simulação dinâmica.	<i>Contingency</i> mostra a contingência que passou a não apresentar mais a violação de limite associado ao critério de simulação dinâmica.
<i>TD_OUT</i>	Elemento com a maior violação do critério de simulação dinâmica.	<i>Contingency</i> mostra a contingência que passou a apresentar a violação de limite associado ao critério de simulação dinâmica.

4.6. Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a ferramenta computacional ORGANON, empregada nos estudos e análises de resultados deste trabalho, que serão apresentados nos capítulos posteriores. Além disto, foram detalhadas as principais funcionalidades do programa, dando maior destaque para a região de segurança do sistema elétrico de potência.

Para tanto, deve-se destacar que para se efetuar uma avaliação típica da segurança do sistema de potência, é necessária a utilização das funcionalidades de fluxo de potência e fluxo de potência continuado, com o intuito de se verificar a condição de estado estacionário do sistema. O processo de utilização do fluxo de potência continuado é automatizado, e é executado para obtenção da trajetória das soluções em torno da região de segurança, sempre partindo do ponto de operação inicial da rede elétrica de potência.

CAPÍTULO 5

Estudos Preliminares de Estabilidade

5.1. Considerações Iniciais

ESTE capítulo tem por objetivo realizar uma análise abrangente e bem detalhada do índice de margem positiva fornecido pelo programa ORGANON em âmbito de estudos da região de segurança dinâmica. Sendo assim, este capítulo propõe o exame de uma metodologia complementar ao processo de avaliação da estabilidade em sistemas elétricos de potência por índices de segurança, de forma que também sejam caracterizadas análises da máxima capacidade de geração e de sua coerência frente a possíveis ocorrências limitantes da região de segurança.

O índice de margem positiva descrito em *Lima* [06] para avaliação de estabilidade transitória de sistema de potência é aplicada neste capítulo para diferentes condições operativas da rede, obtidas por intermédio da região de segurança dinâmica. O método de avaliação de segurança é aplicado a um sistema fictício, e testado para 5 casos ao longo de direções pré-definidas, compondo os resultados preliminares que serão empregados no capítulo subsequente, como ferramenta auxiliar de comparação com a metodologia proposta neste trabalho.

5.2. Sistema Teste *Brazilian Birds*

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos por intermédio de um sistema teste fictício chamado de *Brazilian Birds* [37]. O sistema é composto por 43 barras, 21 linhas e 19 transformadores, além de 4 usinas geradoras, totalizando uma geração disponível de 2010 MW e de duas áreas, interligadas por linhas de transmissão em 440 kV. O diagrama unifilar do sistema é apresentado na figura 5.1.

As principais características do sistema *Brazilian Birds*, tais como parâmetros de linhas de transmissão, transformadores, capacitores série, equipamentos shunt e cargas, assim como os dados dinâmicos do sistema, são apresentados no Apêndice A.

Para realização dos estudos no sistema *Brazilian Birds*, o mesmo foi dividido em dois subsistemas de áreas, denominadas A e B. A área A é composta das barras de Canário, Cardeal, Sanhaço, Curió, Tiziu, Sabiá, Pardal, Azulão, Bicudo e Chopim. Já, a área B é composta das barras de Tucano, Gavião, Garça, Urubu, Arara, Pelicano e Coruja.

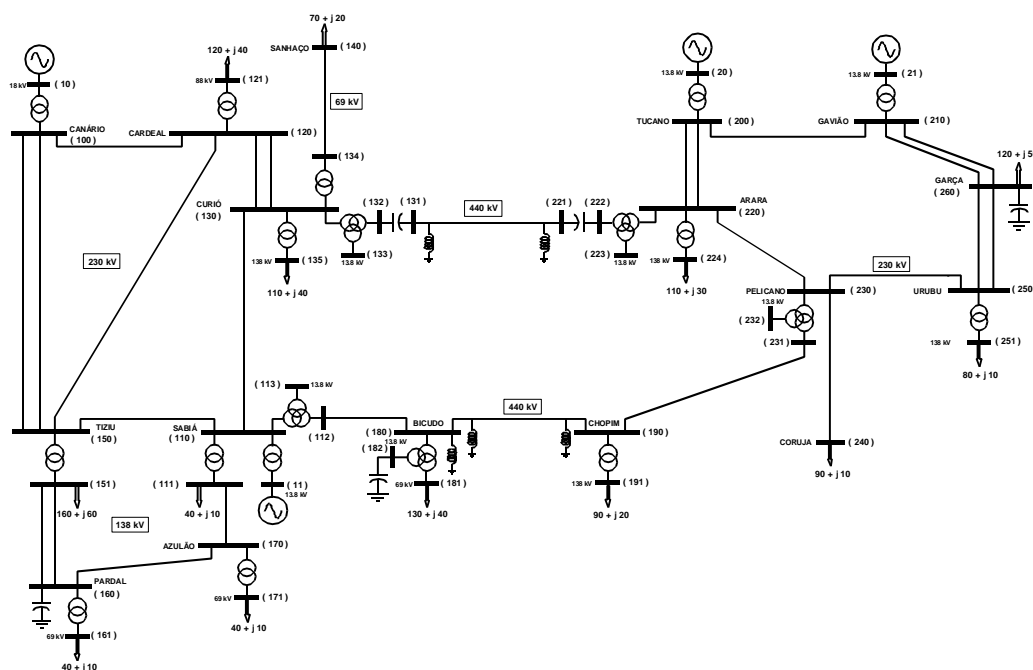


Fig. 5.1: Diagrama unifilar do Sistema Brazilian Birds.

5.3. Determinação das Contingências para Realização dos Estudos

As contingências em sistemas elétricos são muito comuns, estando normalmente relacionadas a curtos-circuitos, surtos, sobrecargas e a intervenções para manutenção de equipamentos. Em estudos de sistemas elétricos, o sistema de potência deve ser capaz de atender o critério denominado N-1. Segundo este critério, o sistema deve suportar contingências simples, sem que as anormalidades possam danificar componentes e prejudicar o atendimento dos consumidores.

Para se determinar as contingências a serem analisadas dinamicamente, utilizou-se como critério de seleção, um pequeno estudo de curto-circuito sobre o sistema teste *Brazilian Birds*. Os resultados obtidos foram listados e organizados conforme a tabela 5.1, na ordem decrescente da maior corrente de curto apresentada por barramento.

TABELA 5.1 –CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO PARA ANÁLISE DO SISTEMA BRAZILIAN BIRDS.

Barra em Curto-Circuito			Corrente de Falta	
Barra	Número	Tipo	I [pu]	Ângulo [graus]
Cúrio--CS5	131	PQ	12,1085	-0,3440
Sabiá---13	113	PQ	11,6183	-0,7482
Sabiá--440	112	PQ	12,9229	-0,3302
Sabiá---13	11	PV	11,8461	-0,5912
Sabiá--230	110	PQ	13,0451	-0,2048
Sabiá--138	111	PQ	10,6454	-0,8268
Sabiá-Fictícia	1110	PQ	12,8892	-0,3334
Cúrio--13	133	PQ	10,4008	-0,7244
Cúrio--440	132	PQ	11,8695	-0,3596
Cúrio--230	130	PQ	12,7464	-0,2364
Cúrio---69	134	PQ	6,8649	-1,2969
Cúrio--138	135	PQ	8,8388	-1,1220
Cúrio-Fictícia	1130	PQ	11,8079	-0,3626
Canário-18	10	V0	7,8484	-0,6521
Canário-230	100	PQ	8,7241	-0,5809
Cardeal-230	120	PQ	10,5568	-0,5273
Cardeal--88	121	PQ	8,4042	-0,9492
Tiziu--230	150	PQ	11,1443	-0,4735
Tiziu--138	151	PQ	10,5324	-0,6978
Azulão-138	170	PQ	9,1238	-0,8668
Azulão-69	171	PQ	5,9782	-1,3128
Bicudo--13	182	PQ	8,7739	-1,1617
Bicudo--69	181	PQ	9,9532	-1,0142
Bicudo-440	180	PQ	12,8029	-0,3397
Bicudo-Fictício	1180	PQ	9,9635	-1,0129
Sanhaço-69	140	PQ	5,0507	-1,3077
Pardal--138	160	PQ	9,0071	-0,8215
Pardal---69	161	PQ	7,5833	-1,0750
Chopim-440	190	PQ	1,4038	-0,3668
Chopim-138	191	PQ	7,0330	-1,2858
Arara-CS5	221	PQ	11,0535	-0,3330
Tucano-13	20	PV	8,4152	-0,3762
Coruja-230	200	PQ	9,4492	-0,2655
Gavião--13	21	PV	8,1599	-0,4180
Gavião-230	210	PQ	8,7496	-0,3399
Arara---13	223	PQ	9,7685	-0,6868
Arara--440	222	PQ	11,1030	-0,3486
Arara--230	220	PQ	10,7806	-0,2354
Arara--138	224	PQ	7,7559	-0,8972
Arara-Fictício	1220	PQ	11,1139	-0,3517
Garça--230	260	PQ	9,1565	-0,3854
Pelicano--13	232	PQ	10,5266	-0,7413
Pelicano-440	231	PQ	11,7780	-0,3745
Pelicano-230	230	PQ	11,2102	-0,2897
Pelicano-Fictício	1230	PQ	11,7968	-0,3760
Coruja--230	240	PQ	9,3577	-0,6131
Urubu--230	250	PQ	9,5502	-0,3960
Urubu--138	251	PQ	5,7023	-1,0832

Como a realização de um estudo detalhado de curto-circuito não era foco principal deste trabalho, um critério simplificado foi adotado para obtenção de uma lista de contingências. Este critério consistiu basicamente em selecionar os dez barramentos que apresentaram as maiores correntes de falta.

Para complementar, às contingências consideradas foram acrescidas ainda mais duas contingências, sendo a primeira contingência caracterizada pela perda da linha de transmissão que liga a barra de Tucano a Gavião e, sendo a segunda contingência, a perda da linha de transmissão que liga as barras de Canário e Cardeal, ambas de 230 kV. Estas contingências foram numeradas no trabalho, por contingências 11 e 12, respectivamente.

A tabela 5.2, apresenta as contingências selecionadas que serão aplicadas ao sistema. Já, a tabela 5.3 apresenta os dados dos despachos equivalentes de geração adotados para o sistema teste em sua condição operativa inicial.

TABELA 5.2 – LISTA DE CONTINGÊNCIAS SIMULADAS PARA O SISTEMA BRAZILIAN BIRDS.

Contingência	Local do Curto	Equipamentos abertos para eliminação do defeito
1	SE 230 kV Sabiá	LT 230 kV Sabiá -Tiziu
2	SE 440 kV Sabiá	LT 440 kV Sabiá - Bicudo
3	SE 440 kV Bicudo	LT 440 kV Bicudo - Chopim
4	SE 230 kV Curió	LT 230 kV Curió - Cardeal
5	SE 440 kV Chopim	LT 440 kV Chopim - Pelicano
6	SE 440 kV Curió-CS5	LT 440 kV Curió - CS – Arara - Cs5
7	SE 440 kV Curió	LT 440 Curió – Curió - CS5
8	SE 440 kV Pelicano	LT 440 kV Pelicano - Chopim
9	SE 230 kV Pelicano	LT 230 kV Pelicano - Arara
10	SE 230 kV Tiziu	LT 230 kV Tiziu - Canário
11	SE 230 kV Tucano	LT 230 kV Tucano - Gavião
12	SE 230 KV Canário	LT 230 kV Canário - Cardeal

TABELA 5.3 – DADOS DO CASO BASE PARA O SISTEMA BRAZILIAN BIRDS.

Caso Base	Geração em MW			
	Canário	Sabiá	Tucano	Gavião
1	357,2	200	400	300

A figura 5.2 apresenta, no sistema teste *Brazilian Birds*, os pontos onde os respectivos curtos-circuitos serão aplicados.

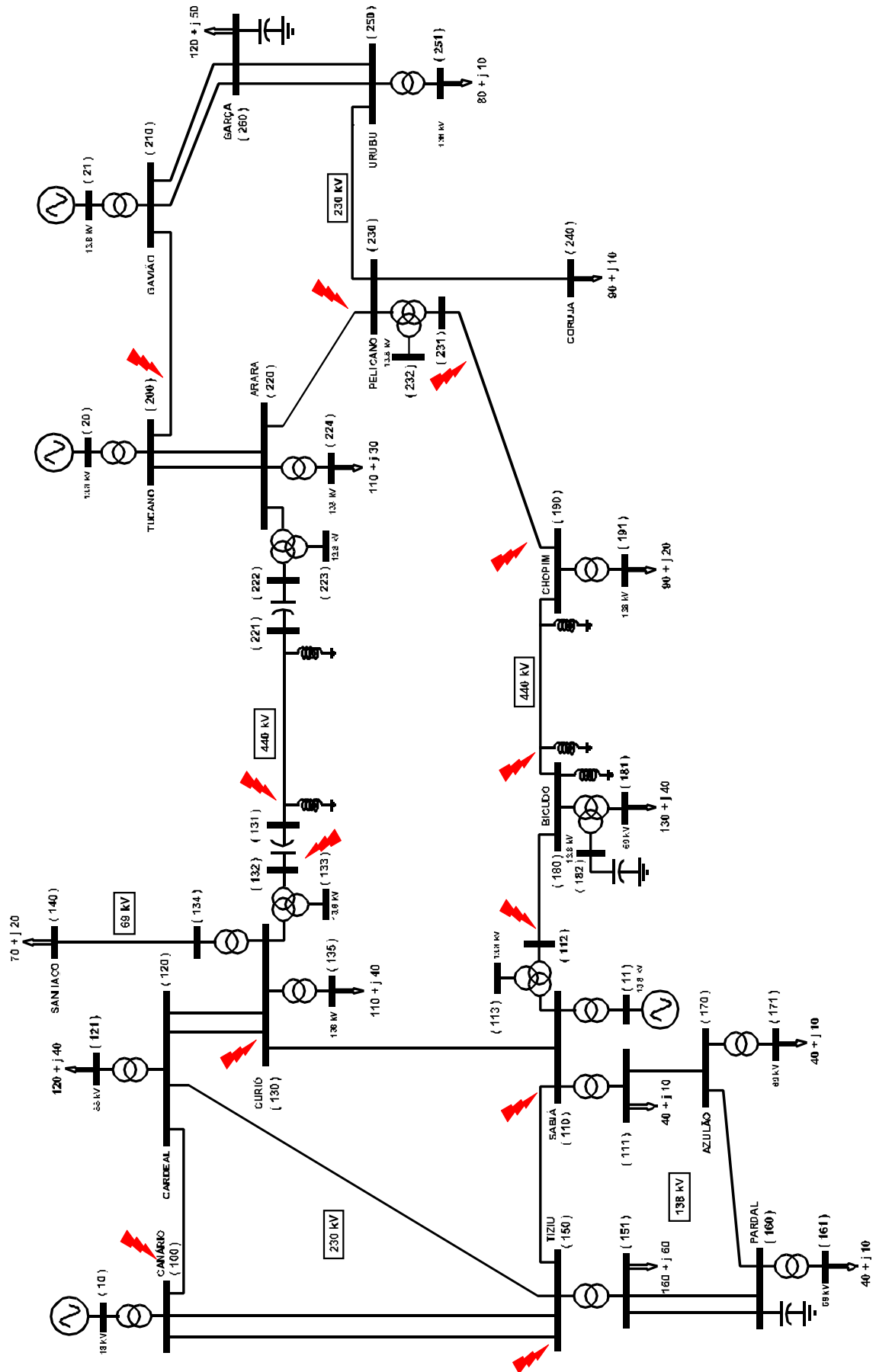


Fig. 5.2: Local do curto para análise dinâmica Sistema do Brazilian Birds.

5.4. Resultados e Testes Computacionais

Nesta seção serão apresentados os resultados computacionais obtidos através do cálculo dos índices de estabilidade associados às simulações no domínio do tempo, para o caso base do sistema teste *Brazilian Birds*.

Para as contingências propostas, utilizou-se um valor padrão de admitância shunt igual a 1000 pu. Além disto, para a realização da análise dinâmica, considerou-se como perturbação a ocorrência de um eventual curto-circuito aplicado no instante de 200 ms, e com duração de falta de 200 ms.

5.4.1. Análise Convencional: Simulações Dinâmicas e Índices de Estabilidade

A figura 5.3 apresenta uma planilha de resultados obtidos pelo programa ORGANON, onde a margem de estabilidade, a qual representa quanto de energia em MW seria necessário para a máquina perder o sincronismo, e o índice de estabilidade descrito no Capítulo 3 deste trabalho são calculados.

Contingency	NCI Index	NCI Bus	Island	Margin(MW)	BackSwing	StabIndex	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Bus 110 LT ...	0.00		1	198.9	No	0.850	10					
Bus 112 LT4...	0.00		1	158.1	No	0.909	10					
Bus 180 LT 4...	0.00		1	443.8	Yes	0.968	11	10				
Bus 130 LT ...	0.00		1	533.7	Yes	0.976	10	11				
Bus 190 LT 4...	0.00		1	215.8	Yes	0.926	11	10				
Bus 131 LT 4...	0.00		1	38.6	Yes	0.925	11	10				
Bus 132 LT ...	0.00		1	0.1	Yes	0.873	11	10				
Bus 231 440 ...	0.00		1	277.3	Yes	0.952	11	10				
Bus 230 230 ...	0.00		1	292.6	Yes	0.949	11					
Bus 150 LT 2...	0.00		1	184.6	No	0.767	10					
Bus 200 LT 2...	0.00		1	117.0	No	0.434	20					
Bus 100 LT 2...	0.00		1	42.9	No	0.207	10					

Fig. 5.3: Planilha de resultados fornecida pelo programa ORGANON.

A tabela 5.4 contém um resumo dos resultados obtidos pelo programa, considerando a margem e o índice de estabilidade para cada contingência escolhida para análise. Esta tabela apresenta os índices de estabilidade do sistema, considerando a aplicação de cada uma das 12

contingências analisadas para o ponto de operação inicial, o qual será usado como ponto de partida para a análise da região de segurança do ORGANON. A primeira coluna que representa o número da contingência analisada; a segunda coluna que representa o cálculo da margem obtida; a terceira coluna que representa o valor do índice de estabilidade já discutido em capítulos anteriores. Finalmente, as duas últimas colunas representam as máquinas críticas encontradas no sistema para cada contingência em análise.

TABELA 5.4 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE – PONTO DE OPERAÇÃO INICIAL.

Contingência	Margem (MW)	Índice de Estabilidade	C1	C2
1	198,9	0,850	10	
2	158,1	0,909	10	
3	443,8	0,968	11	10
4	533,7	0,976	10	11
5	215,8	0,926	11	10
6	38,6	0,925	11	10
7	0,1	0,873	11	10
8	277,3	0,952	11	10
9	292,6	0,949	11	
10	184,6	0,767	10	
11	117,0	0,434	20	
12	42,9	0,207	10	

Ainda pela tabela 5.4, pode-se observar que a característica de margem não está diretamente associada ao índice de estabilidade, uma vez que o menor valor de margem não corresponde ao menor índice de estabilidade. Sendo assim, é possível admitir que os índices de estabilidade devem qualificar melhor o grau de estabilidade que o sistema se encontra, uma vez que o índice é uma grandeza adimensional. Além disto, o índice de estabilidade varia de -1 a 1, permitindo identificar mais facilmente as contingências mais severas para o ponto de equilíbrio em análise.

Portanto, para o resultado apresentado na tabela 5.4, verifica-se que a contingência mais severa é a de número 12, uma vez que esta possui o menor índice calculado, ou seja, igual a 0,207.

5.4.2. Definição dos Grupos

Nesta seção, serão definidos os grupos de geração descritos no Capítulo 4. Para realizar o cálculo das regiões de segurança dinâmica, como mencionado anteriormente, é necessário definir três grupos de geração, sendo assim serão estabelecidos os grupos para o sistema teste *Brazilian Birds*.

O primeiro grupo G1 e o segundo grupo G2 são compostos pelas unidades geradoras dentro da área de estudo que terão o despacho de potência ativa alterado. O terceiro grupo G3 é formado por um conjunto de geradores que pode estar ou não fora da área de estudo e é utilizado para o fechamento de balanço de geração do sistema, ou seja, é um grupo de geradores que se comporta como uma “*Swing*”.

Para o sistema *Brazilian Birds*, o processo de construção dos grupos é feito de forma imediata, dado que este sistema é de pequeno porte e possui apenas 4 unidades geradoras. Os grupos foram definidos pelas unidades geradoras de cada área. A unidade geradora Canário caracteriza a máquina *Swing* do sistema, sendo assim esta não é considerada na seleção dos grupos. A unidade geradora de Sabiá pertence à área A do sistema *Brazilian Birds* e as unidades de Tucano e Gavião pertencem à área B do sistema.

Como critério de análise para a formação de grupos, foram monitoradas as interligações entre duas áreas distintas, para se obter as condições de máximo e mínimo intercâmbio de energia entre elas. O intercâmbio de potência no sistema *Brazilian Birds* ocorre da área B para a área A, em duas situações: o considerado baixo intercâmbio, ou seja, no entorno de 220 a 260 MW, que é a maneira usual de operação, e o considerado alto intercâmbio, ou seja, no entorno de 400 a 450 MW, considerando que a disponibilidade energética na área A está baixa e a usina de Canário realiza manutenção em suas máquinas e opera com limitação. Sendo assim, os grupos geradores G1, G2 e G3 foram definidos como:

- Grupo 1: UTE – Sabiá;
- Grupo 2: UHE – Tucano;
- Grupo 3: UHE – Gavião;

5.4.3. Construção da Região de Segurança Dinâmica

A figura 5.4 apresenta a região de segurança dinâmica construída para avaliação das 12 contingências previamente definidas. Na figura, o sinal “+” em azul indica o ponto de operação inicial correspondente ao caso base, sendo este o ponto de partida para a construção da região de segurança.

Foram consideradas 24 direções de busca para a construção da região. Uma vez atingida a fronteira limitante desta região, são marcados sinais para indicar o último ponto eletricamente estável. Por exemplo, o ponto fronteira indicando “○”, representa a situação limite de estabilidade (*Security Limit*). Já, o ponto fronteira indicando “□”, representa que houve limite de geração naquela direção, podendo significar que, ou a geração atingiu seu limite máximo, ou a geração que está reduzindo pode ter atingido seu limite mínimo (*Generation Limit*).

Ainda na figura, há em destaque duas mensagens referentes ao ponto fronteira, a saber:

- “DS_OUT#13T: SECURITY LIMIT”
- “DS_OUT#04T: GENERATION LIMIT”.

A primeira mensagem indica que o ponto fronteira “○” é limitante na região de segurança para a chamada direção 13, sendo este o último ponto estável, podendo ocorrer a perda de sincronismo das unidades geradoras caso haja avanço do sistema nesta direção.

Já, a segunda mensagem indica outro ponto fronteira “□”, também limitante na região de segurança, para a chamada direção 04, porém, nesta situação, pelo menos um dos grupos geradores alcançou seu respectivo limite de geração.

As siglas “C” e “D” nas mensagens representam, respectivamente, a indicação de qual contingência é responsável pela condição limite de estabilidade, e a indicação da distância, em MW, do ponto inicial até o ponto fronteira.

Finalmente, é considerada como região segura na figura toda a área em vermelho, e por conseguinte, a área em branco como região insegura de operação do sistema de potência.

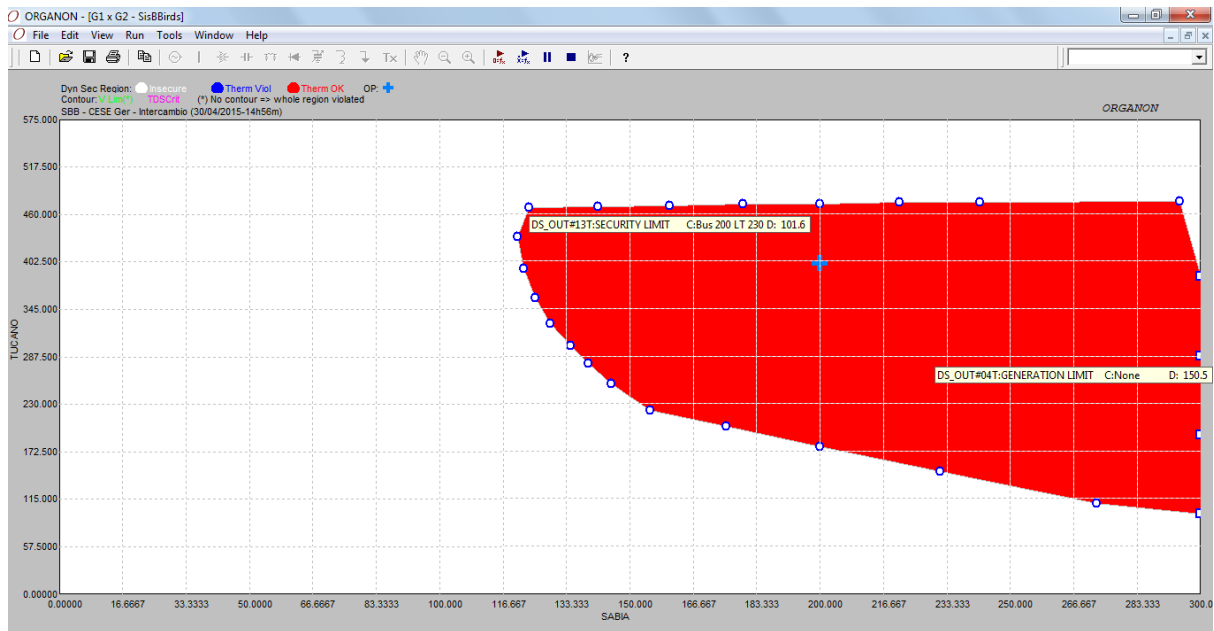


Fig. 5.4: Região de Segurança Dinâmica para 12 contingências.

Uma forma alternativa para compreensão dos resultados indicados pela região de segurança é através da análise da tabela 5.5. Pode-se observar que os resultados apresentados na primeira linha mostram os valores despachados inicialmente para os grupos geradores G1, G2 e G3, do sistema. Já, a segunda e terceira linha da tabela especificam os valores de despacho máximo e mínimo de cada grupo gerador.

Os resultados apresentados a partir da quarta linha da tabela indicam valores obtidos para cada uma das 24 direções de busca realizados para construção da região de segurança. Vale destacar que é possível verificar quais direções alcançaram limites de estabilidade (*Security Limit*) e quais alcançaram limite de geração (*Generation Limit*).

TABELA 5.5 – SUMÁRIO DA REGIÃO DE SEGURANÇA FORNECIDO PARA O CASO BASE.

Direction	Limit Type	DS Code	Contingency	Distance in G1xG2xG3 (MW)	UG1 (MW)	UG2 (MW)	UG3 (MW)
0	OpPoint	Operating Point	-	0,0	200,0	400,0	300,0
0	MaxVal	Maximum Value	-	0,0	300,0	575,0	632,0
0	MinVal	Minimum Value	-	0,0	0,0	0,0	23,8
1	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	300,0	272,7	109,0	518,2
2	DS_OUT	GENERATION LIMIT	12	320,2	300,0	95,8	504,2
3	DS_OUT	GENERATION LIMIT	12	231,1	300,0	191,7	408,3
4	DS_OUT	GENERATION LIMIT	12	150,5	300,0	287,5	312,5
5	DS_OUT	GENERATION LIMIT	12	101,4	300,0	383,3	216,7
6	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	120,6	294,6	474,9	130,5
7	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	84,8	242,1	473,7	184,3
8	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	76,1	220,9	473,2	205,9
9	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	71,8	200,0	471,8	228,2
10	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	73,8	179,7	471,0	249,3
11	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	79,8	160,4	469,3	270,3
12	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	89,8	141,5	468,2	290,3
13	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	101,6	123,5	466,9	309,6
14	DS_OUT	SECURITY LIMIT	12	85,5	120,5	431,5	348,0
15	DS_OUT	SECURITY LIMIT	12	78,1	122,2	393,5	384,3
16	DS_OUT	SECURITY LIMIT	12	86,0	125,1	357,9	417,1
17	DS_OUT	SECURITY LIMIT	12	102,3	129,2	326,2	444,6
18	DS_OUT	SECURITY LIMIT	12	119,5	134,3	300,1	465,6
19	DS_OUT	SECURITY LIMIT	12	136,3	139,0	278,1	482,9
20	DS_OUT	SECURITY LIMIT	12	156,2	145,2	253,7	501,1
21	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	183,9	155,4	221,6	523,0
22	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	199,6	175,2	201,9	522,8
23	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	222,4	200,0	177,6	522,4
24	DS_OUT	SECURITY LIMIT	11	254,0	231,5	147,9	520,6

5.4.4 Estudo e Análise de Índices de Estabilidade

Nesta seção, será realizada uma análise detalhada dos índices de estabilidade da região de segurança de modo a se avaliar a evolução dos mesmos em uma determinada direção. A figura 5.5 apresenta uma região de segurança, exemplo no qual vale ressaltar que o ponto de operação PO 1 não foi destacado na figura por representar o caso base inicial, caracterizado pela cruz vermelha “+”.

Sendo assim, ao longo de uma dada direção, serão analisados 7 pontos de operação (PO) até atingir o ponto fronteira limite de estabilidade. Este ponto fronteira que será chamado de PO 8 corresponderá teoricamente ao último ponto de operação, classificado como estável na região de segurança (ver direção 22 figura 5.5).

Com o objetivo de evitar a apresentação demasiada de resultados obtidos através das 24 direções, serão escolhidos casos de maior interesse para serem analisados e apresentados neste capítulo, ficando as demais direções apresentadas no Apêndice C.

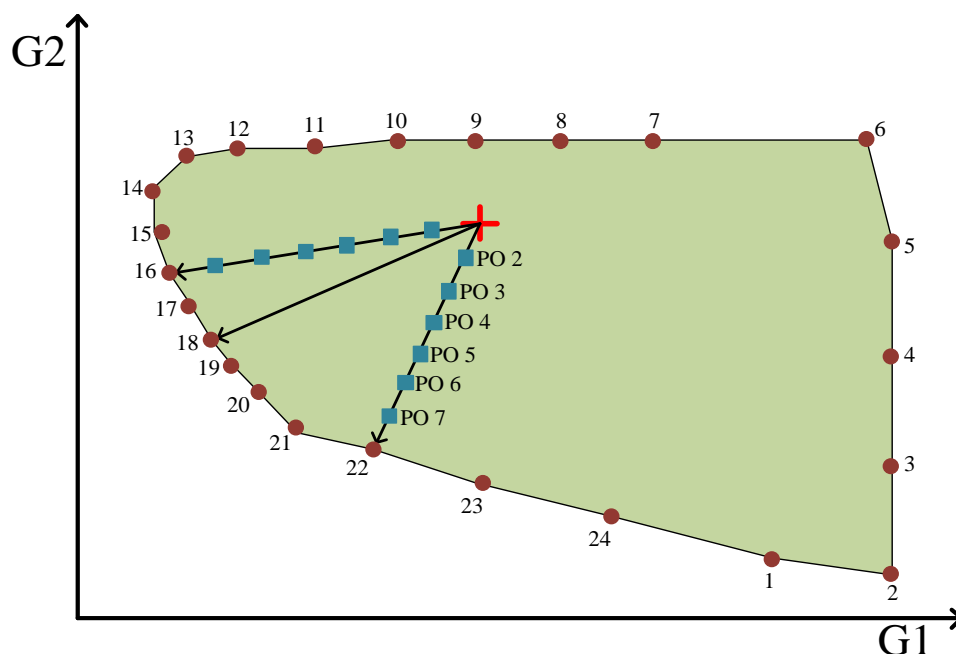


Fig. 5.5: Análise Detalhada da Região de Segurança.

Como para cada direção analisada haverá o ponto inicial e mais 7 pontos de operação, então os resultados serão apresentados da seguinte forma: será destacada a contingência mais severa, o valor do índice de estabilidade na direção em questão e a curva de simulações dos deslocamentos angulares dos rotores das máquinas síncronas do sistema.

5.4.5. Análise de Índices de Estabilidade por Direção de busca

Para demonstrar o resultado de quatro direções de busca são ilustrados cinco cenários de análise distintos. No primeiro cenário, monitora-se a evolução do índice de estabilidade fornecido pelo ORGANON na direção 16, considerando-se para análise a contingência crítica 12, i.e., a contingência determinante para a perda de sincronismo nesta direção. No segundo cenário é avaliado a evolução do índice de estabilidade ao longo da direção 22, considerando-se para análise a contingência não-crítica 04. No terceiro cenário, monitora-se a evolução do índice de estabilidade até atingir o ponto limite de fronteira da direção 08, considerando-se para análise a contingência crítica 11. No quarto cenário é avaliado a evolução do índice de estabilidade ao longo da direção 18, considerando-se para análise a contingência crítica 06.

Por fim, no quinto cenário avalia-se novamente a direção 22, porém, neste cenário considera-se para análise a contingência 11, sendo esta crítica para o sistema nesta direção de busca.

Os cenários de análise, obtidos por intermédio da região de segurança dinâmica, são listados neste trabalho como segue:

- A. *Direção 16 - Contingência 12*
- B. *Direção 22 - Contingência 04*
- C. *Direção 08 - Contingência 11*
- D. *Direção 18 - Contingência 06*
- E. *Direção 22 - Contingência 11*

A. DIREÇÃO 16 - CONTINGÊNCIA 12

A contingência 12 corresponde a um curto-circuito na linha de transmissão ligada na barra 100 e barra 120. Esta direção corresponde a uma redução nos grupos de geração de G1 e G2.

Nesta direção, a máquina crítica ocorre na barra 10 no qual há uma unidade geradora de Canário (curva em vermelho, ver tabela 5.6). Nesta situação, o índice apresenta um comportamento não esperado, uma vez que, este índice deveria reduzir à medida que se avança na direção de busca. Entretanto, no PO 8 o índice captura a proximidade da condição de instabilidade. Finalmente, a curva em vermelho apresenta sempre uma sobre elevação no chamado primeiro *Swing*.

TABELA 5.6 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE: Direção 16.

PO 1			PO 5		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
200,00	400,00	0,207	157,29	375,97	0,118
PO 2			PO 6		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
188,76	393,68	0,156	146,05	369,65	0,145
PO 3			PO 7		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
178,27	387,78	0,204	135,56	363,75	0,122
PO 4			PO 8		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
167,78	381,88	0,167	125,07	357,85	0,106

B. DIREÇÃO 16 - CONTINGÊNCIA 12

A contingência 04, apresentada na tabela 5.7, corresponde a um curto-circuito na linha de transmissão ligada nas barras 130 e barra 120. Esta direção também corresponde a uma redução nos grupos de geração de G1 e G2.

Nesta direção, observa-se que o índice apresenta pouca variação de valores na direção de busca. O valor próximo a “1” representa adequadamente o comportamento dinâmico do sistema, ilustrando um caso com alto grau de estabilidade.

Já que o índice varia pouco nesta direção, é de se concluir que a contingência 04 não apresenta fator determinante para a instabilidade do sistema na direção 22. Sendo assim, para esta situação, é possível observar através das curvas de deslocamento angular, que as mesmas não apresentam um padrão de coerência no tempo, ao longo da direção de busca.

TABELA 5.7 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE: Direção 22.

PO 1			PO 5		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
200,00	400,00	0,976	185,89	287,09	0,886
PO 2			PO 6		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
196,53	372,27	0,916	182,42	259,36	0,876
PO 3			PO 7		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
192,82	342,55	0,908	178,71	229,64	0,876
PO 4			PO 8		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
189,35	314,82	0,895	175,24	201,91	0,865

C. DIREÇÃO 08 - CONTINGÊNCIA 11

A contingência 11 corresponde a um curto-circuito na linha de transmissão ligada nas barras 200 e barra 210. Esta direção corresponde a um aumento de geração nos grupos G1 e G2 (ver tabela 5.8).

Nesta direção, observa-se que este índice apresenta variação de seu valor coerente uma vez que o índice diminui tendendo a zero à medida que se aproxima do limite de estabilidade.

Nesta situação, as curvas de deslocamento angular apresentam como máquina crítica a máquina de Tucano localizada na barra 20. Observa-se que o pico máximo de ângulo (Primeiro *Swing*) nesta máquina aumenta a cada PO, seguindo a direção de busca na qual há aumento de geração. Nota-se ainda que há uma maior distância angular, em regime permanente, entre as máquinas do sistema.

TABELA 5.8 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE: Direção 08.

PO 1			PO 5		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
200,00	400,00	0,434	211,92	441,72	0,269
PO 2			PO 6		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
203,35	411,71	0,408	215,06	452,69	0,209
PO 3			PO 7		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
206,06	421,22	0,348	217,77	462,21	0,192
PO 4			PO 8		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
209,20	432,20	0,310	220,91	473,18	0,083

D. DIREÇÃO 18 - CONTINGÊNCIA 06

A contingência 06 corresponde a um curto-circuito na linha de transmissão ligada nas barras 131 e barra 221. Sendo esta direção caracterizada pela redução de geração nos grupos G1 e G2, a evolução do índice de estabilidade é apresentada na tabela 5.9.

Nesta direção, o que se observa é que este índice diminui gradativamente, porém na condição limitante PO 8, o sistema apresenta instabilidade. Além disto, as curvas de deslocamento angular apresentam como máquinas críticas as barras 11 e 10. É possível perceber que a máquina 11 apresenta a característica chamada de “*Back-Swing*”, ou seja, quando de um eventual distúrbio, a abertura angular do rotor da máquina diminui, e, é possível verificar que esta diminuição se acentua à medida que o PO segue na direção de busca.

É possível observar também que a cada PO, o pico máximo de deslocamento angular da máquina da barra 21 se distancia do pico mínimo de deslocamento angular da máquina da barra 11.

TABELA 5.9 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE: Direção 18.

PO 1			PO 5		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
200,00	400,00	0,925	132,39	297,18	0,782
PO 2			PO 6		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
183,39	374,75	0,916	115,79	271,92	0,599
PO 3			PO 7		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
166,79	349,49	0,881	97,99	244,87	0,150
PO 4			PO 8		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
149,00	322,43	0,838	81,39	219,61	-0,082

E. DIREÇÃO 22 - CONTINGÊNCIA 11

A contingência 11 corresponde a um curto-circuito na linha de transmissão ligado nas barras 200 e barra 210. Esta direção também corresponde a uma redução de geração nos grupos G1 e G2 (ver tabela 5.10).

Nesta direção, o que se observa é que este índice aumenta gradativamente até o PO 6, tendendo a 1 o que caracteriza em um comportamento anormal, haja visto que a medida que se aproxima do ponto de fronteira, o índice converge para zero, ou seja, em geral, tende a diminuir de valor, caminhando para uma situação de instabilidade.

Pela curva de deslocamento angular, o que se percebe é que à medida que se caminha na direção de busca, há uma troca de máquinas críticas, ou seja, inicialmente a máquina crítica é a da barra 20 (curva em rosa), porém, ao final da direção de busca, percebe-se que a máquina crítica passa a ser a máquina da barra 21 (curva em preto).

TABELA 5.10 – ÍNDICE DE ESTABILIDADE: Direção 22.

PO 1			PO 5		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
200,00	400,00	0,434	185,89	287,09	0,852
PO 2			PO 6		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
196,53	372,27	0,574	182,42	259,36	0,856
PO 3			PO 7		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
192,82	342,55	0,685	178,71	229,64	0,769
PO 4			PO 8		
G1 (MW)	G2 (MW)	Índice	G1 (MW)	G2 (MW)	Índice
189,35	314,82	0,862	175,24	201,91	0,151

5.5. Análise dos Resultados Preliminares

Interpretando os resultados dos índices calculados, observa-se principalmente pelas tabelas 5.7, 5.8 e 5.9 que estes são capazes de captar adequadamente o comportamento do sistema para as condições propostas. Pela conceituação da região de segurança, a redução dos despachos dos grupos G1 e G2, assim como ocorre nas direções 18 e 22 (ver tabelas 5.9 e 5.10), obriga que o grupo G3 eleve sua geração para suprir o déficit do sistema. Com isto, o que se verifica com os resultados é que o grupo G3 apresentará alguma máquina crítica e, portanto, irá guiar a direção de busca no sistema a uma condição de perda de sincronismo entre suas unidades geradoras.

É importante destacar que o ORGANON calcula o índice de margem positiva baseado no método SIME (*Single Machine Equivalent*), porém, o índice de margem negativa é calculado através da razão entre a energia cinética mínima pós-falta da trajetória SIME com a energia cinética máxima pós-falta. Sendo assim, é possível perceber que a metodologia de cálculo aplicada difere, quando em uma dada direção, o sistema atravessa a fronteira de estabilidade. Vale lembrar, também que este trabalho não investigou o cálculo da margem negativa, sendo o foco a elaboração de índices de margem positiva que melhor caracterize a condição de proximidade à instabilidade.

5.6. Considerações do Índice de Margem Positiva

Para melhor compreensão de como o programa ORGANON determina a margem positiva, a figura 5.6 ilustra o estabelecimento do critério das áreas iguais para cálculo do índice de estabilidade. Já foi visto que este índice (I_p) é dado por $I_p = \frac{\delta_u - \delta_r}{\delta_u - \delta_s}$.

Na figura 5.6 (a), observa-se que existe uma grande área de desaceleração (A_{DEC}) e o nível de potência mecânica é baixo, permitindo verificar que o sistema apresentará grande área de margem (A_{MAR}), caracterizando um índice I_p com elevado nível de estabilidade.

Já na figura 5.6 (b), observa-se que o nível de potência mecânica é mais elevado, caracterizando uma área de desaceleração (A_{DEC}) menor e conseqüentemente menor área de margem (A_{MAR}).

Estas considerações ficam evidenciadas ao analisar a razão entre as diferenças angulares $\delta_u - \delta_r$ e $\delta_u - \delta_s$. Na figura 5.6 (a), o índice I_p seria muito próximo de 1, uma vez que a diferença $\delta_u - \delta_r$ é elevada. Por outro lado, na figura 5.6 (b), o índice I_p se aproxima de zero uma vez que a diferença angular $\delta_u - \delta_r$ se aproxima de zero.

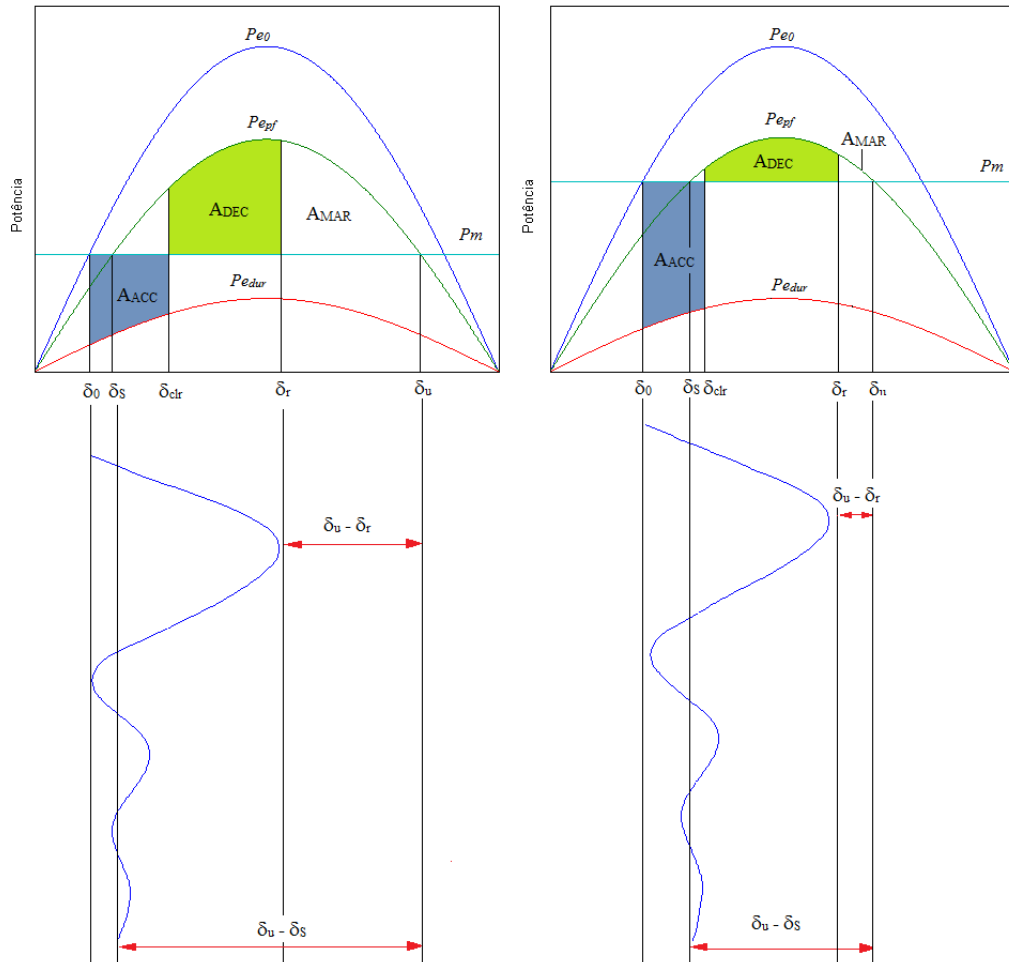


Fig. 5.6: Análise do Índice de Margem Positiva.

CAPÍTULO 6

Cálculo de Índices de Estabilidade: Resultados

6.1. Considerações Iniciais

O presente capítulo descreve os índices de estudo propostos nesta dissertação e outras metodologias para avaliação de estabilidade transitória. Na sequência, discutem-se os resultados obtidos com o auxílio da região de segurança dinâmica, e realiza-se uma análise comparativa destes resultados com as respostas apresentadas pelo programa ORGANON.

É importante ressaltar que as metodologias propostas fundamentam-se em diferentes abordagens, focadas na proximidade das trajetórias angulares do gerador em atingir o limite de energia potencial, e também, no conhecido “Critério das Áreas Iguais”.

6.2. Desenvolvimento Conceitual

Nesta seção, serão apresentados três índices de estabilidade para análise de contingências, bem como, serão apresentados cálculos da margem de estabilidade partindo de respostas no domínio do tempo. Estes índices serão chamados como segue:

- Margem pela Integral da Área de Desaceleração Excedente
- Margem por Aproximação Triangular da Integral da Área
- Índice de Abertura Angular de Máquinas Críticas e Não-Críticas
- Índice baseado no Primeiro *Swing*
- Índice baseado nas Áreas da Curva $P - \delta$

6.2.1. Margem pela Integral da Área de Desaceleração Excedente

A margem estável é definida como sendo a área delimitada pela curva de potência elétrica na condição pós-falta (P_{epf}) e a potência mecânica (P_m), para o intervalo de deslocamento angular de δ_r a δ_u . Observando que o OMIB (*One Machine Infinite Bus*) permanecerá estável se P_e retornar antes de cruzar com P_m , utilizando o conceito básico de integração, esta margem pode ser calculada como na equação (6.1):

$$A_{mar} = \int_{\delta_r}^{\delta_u} (P_e - P_m) d\delta = - \int_{\delta_r}^{\delta_u} P_a d\delta \quad (6.1)$$

A Figura 6.1, apresenta o cálculo da área de margem pela área de desaceleração excedente:

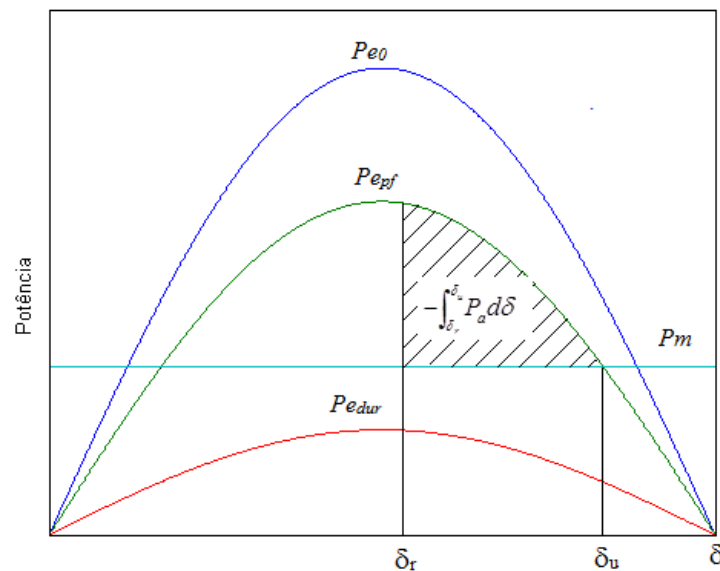


Fig. 6.1: Cálculo da Área de Margem por Integração da Curva P- δ .

Onde, a P_e do sistema OMIB é expressa por:

$$P_e = \frac{E' E_\infty}{X_e} \text{sen}(\delta) \quad (6.2)$$

Sendo E' , a tensão interna da máquina equivalente atrás de sua reatância transitória, E_∞ é a tensão na barra infinita, que é assumida como constante e δ representa o ângulo da tensão E' em relação ao ângulo da tensão da barra infinita, isto é, o próprio ângulo do rotor da máquina equivalente. Substituindo a P_e na equação (6.1), tem-se a correspondente expressão para o

cálculo da margem estável:

$$A_{mar} = \int_{\delta_r}^{\delta_u} \left(\frac{E' E_\infty}{X_e} \text{sen}(\delta) - P_m \right) d\delta \quad (6.3)$$

Realizando a integração:

$$A_{mar} = - \left(P_m (\delta_u - \delta_r) + \frac{E' E_\infty}{X_e} (\cos(\delta_u) - \cos(\delta_r)) \right) \quad (6.4)$$

Como os dados são extraídos através da análise no domínio do tempo, a expressão (6.4) pode ser reescrita:

$$A_{mar} = - \left(P_m (\delta_u - \delta_r) + \frac{Pe_{pf}(\delta_r)}{\text{sen}(\delta_r)} (\cos(\delta_u) - \cos(\delta_r)) \right) \quad (6.5)$$

6.2.2. Margem pela Aproximação Triangular da Integral da Área

A aproximação triangular consiste em utilizar uma trajetória linearizada nos planos $P_a - \delta$, no intervalo $[\delta_r, \delta_u]$ para definir a área de margem. Denotando-se por P_{ar} o valor da potência acelerante em $\delta = \delta_r$, a margem de energia positiva pode ser calculada através do cálculo da área de um triângulo cuja base é igual a $\delta_u - \delta_r$ e com altura igual P_{ar} , obtendo assim a equação (6.6).

$$A_{mar} = \frac{1}{2} |P_{ar}| (\delta_u - \delta_r) \quad (6.6)$$

Podendo ser expressa por:

$$A_{mar} = \frac{1}{2} |Pe_{pf}(\delta_r) - P_m| (\delta_u - \delta_r) \quad (6.7)$$

A figura 6.2 ilustra o conceito da aproximação triangular para duas situações distintas, na qual o ângulo de retorno δ_r assume o valor de δ_{r1} na primeira condição e δ_{r2} na segunda condição. Nota-se que a aproximação triangular introduz grandes erros na primeira condição, uma vez que este método não é capaz de assimilar grande parte da área de margem positiva,

adequadamente em situações nas quais δ_r não atinge grandes excursões. Sendo esta aproximação bem sucedida somente na segunda condição, na qual o ângulo de retorno se aproxima o suficientemente do ponto de equilíbrio instável δ_u .

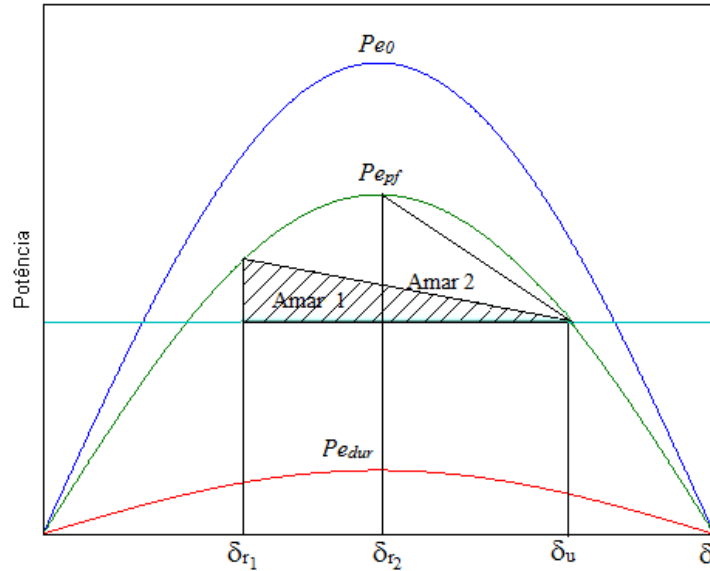


Fig. 6.2: Aproximação Triangular aplicada à Curva P - δ

6.2.3. Índice de Abertura Angular entre Máquinas Críticas e Não-Críticas

O índice proposto nessa seção I_{d1} baseia-se na diferença angular do ângulo limite de estabilidade δ_u com o ângulo máximo atingido pela curva no domínio do tempo δ_r .

Esta diferença angular é normalizada pela diferença de ângulo das máquinas críticas δ_s^C pelas máquinas não-críticas δ_s^N , na condição de regime permanente.

Sendo assim, a equação (6.8) define o cálculo do índice I_{d1} .

$$I_{d1} = \frac{\delta_u^C - \delta_r^C}{|\delta_s^C - \delta_s^{NC}|} \quad (6.8)$$

Onde δ_u^C é o ângulo SIME no ponto de equilíbrio instável para o grupo das máquinas críticas, δ_r^C é o ângulo de retorno para o grupo das máquinas críticas, δ_s^C e δ_s^{NC} são os ângulos alcançados em regime permanente no ponto de equilíbrio pós-falta para o grupo das máquinas críticas e não-críticas, respectivamente. A figura 6.3 apresenta conceitualmente a metodologia

utilizada para cálculo do índice I_{dl} , aplicada à curva $P - \delta$. Para exemplificação, considera-se um sistema composto por três unidades geradoras. O cálculo do índice de estabilidade é ilustrado pela resposta dos rotores, apresentada na figura 6.4. Observa-se que as máquinas não-críticas 1 e 2 compõem o OMIB, enquanto o grupo de máquinas críticas é composto unicamente por uma unidade geradora. A abertura angular entre estes grupos é dada pela medida de distância representada na figura 6.4.

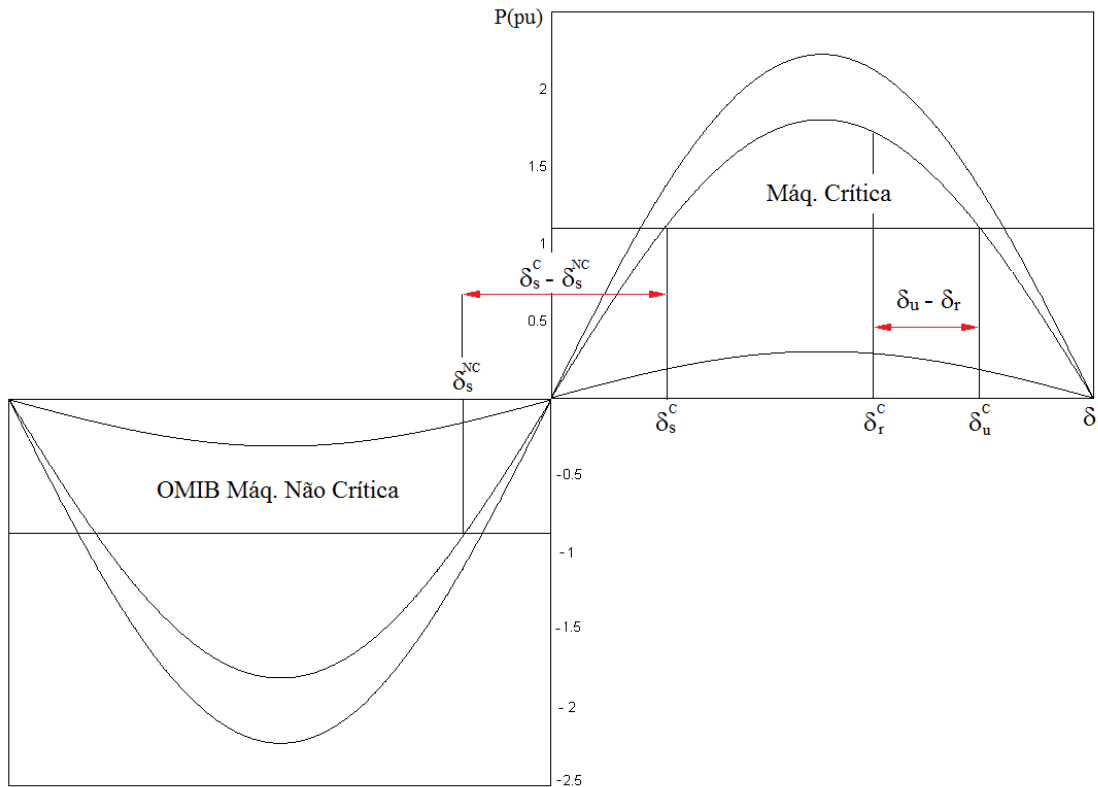


Fig. 6.3: Estrutura de I_{dl} baseado na Curva $P-\delta$.

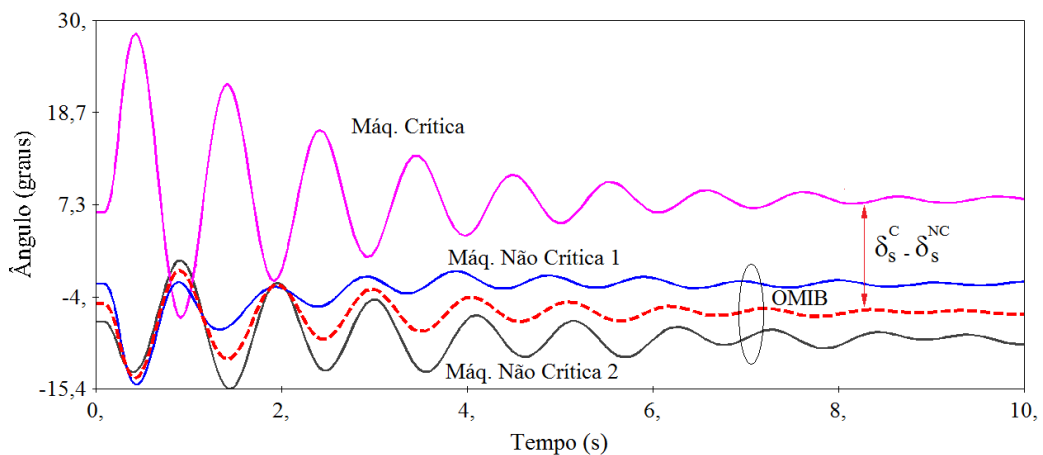


Fig. 6.4: Cálculo de I_{dl} aplicado à resposta no tempo.

Observa-se que, em geral, este índice apresenta resultados superiores ao valor “1”, principalmente em se tratando de casos estáveis. Isto porque a diferença angular, em regime permanente, entre δ_s^C e δ_s^{NC} deve ser pequena.

Para casos próximos à instabilidade, a diferença entre δ_u e δ_r tenderá a zero. Porém, a diferença angular em regime permanente entre máquinas críticas e não críticas dependerão dos modos de oscilação entre as máquinas. Sendo assim, se a diferença angular for grande, o índice será próximo de zero, o que sinaliza adequadamente a ideia principal deste índice. Caso a diferença seja pequena, então o índice pode estar indicando uma condição ainda de estabilidade adequada, mesmo que este esteja mascarando o efeito de proximidade de instabilidade observada na diferença angular entre δ_u e δ_r no qual se sabe que este último tende a zero nestas condições.

6.2.4. Índice baseado no Primeiro *Swing*

A filosofia adotada na elaboração do índice denominado I_{d2} baseia-se no fato de que na proximidade da condição de instabilidade, as respostas angulares apresentarão grandes excursões, podendo este fenômeno ser observado através do monitoramento dos ângulos dos rotores durante o período chamado de “Primeiro Balanço”, ou “Primeiro *Swing*”.

Com base na figura 6.5, define-se o índice de estabilidade baseado na excursão angular do OMIB, dado por:

$$I_{d2} = \frac{\delta_r - \delta_0}{\delta_u - \delta_0} \quad (6.9)$$

Onde, δ_u é o ângulo SIME no ponto de equilíbrio instável, δ_r é o ângulo de retorno, e δ_0 é o ângulo inicial do rotor.

O índice proposto nessa seção apresenta resultados que tendem ao valor “0” para casos extremamente estáveis, e apresenta valores próximos a “1” para casos próximos da instabilidade, ou seja, δ_r tende para o ângulo δ_u , fazendo com que a área de margem tenda a zero.

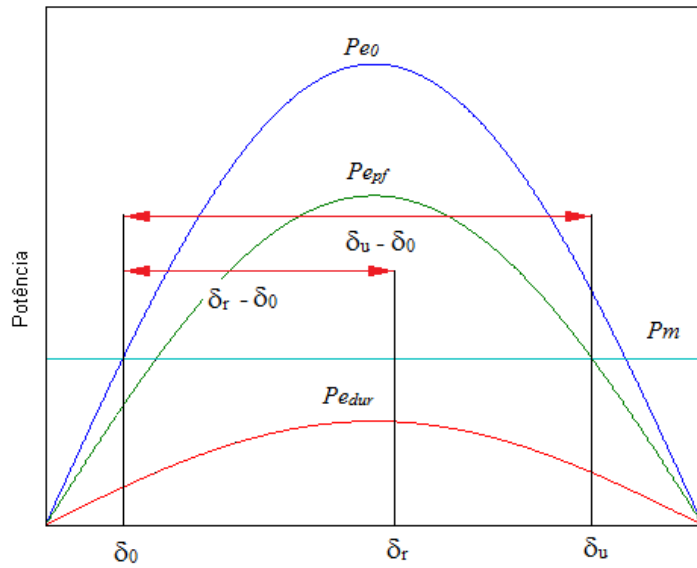


Fig. 6.5: Estrutura de I_{d2} baseado na Curva $P-\delta$.

6.2.5. Índice baseado nas Áreas da Curva $P-\delta$

Considere novamente a figura (6.6) abaixo:

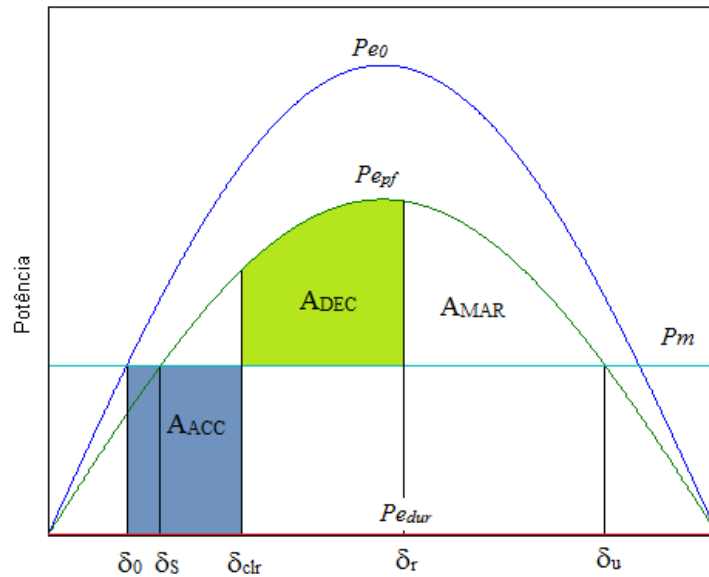


Fig. 6.6: Estrutura de I_{d3} baseado no Critério das Áreas.

Considerando que a área A_{ACC} representa a área de aceleração, a área A_{DEC} representa a área de desaceleração e que A_{MAR} representa a margem de estabilidade, então é possível definir o índice I_{d3} apresentado pela equação (6.10) a seguir:

$$I_{d3} = \frac{A_{ACC}}{A_{DEC} + A_{MAR}} \quad (6.10)$$

Neste caso, é importante observar que este índice pode ser estabelecido apenas para casos em que o sistema apresente estabilidade, uma vez que a relação (6.11) é verdadeira:

$$A_{ACC} = A_{DEC} \quad (6.11)$$

Para o curto-circuito trifásico franco, durante o defeito, a potência elétrica de saída do gerador é zero. Para esta condição, A_{ACC} pode ser facilmente calculada, aproximando-se a área a um retângulo. Considerando-se que δ_{clr} represente o ângulo associado ao tempo de remoção do defeito, extraído diretamente da resposta no domínio do tempo, e a área A_{ACC} seja igual à área A_{DEC} para a condição específica do sistema estável após o isolamento do defeito, obtém-se a equação (6.12):

$$A_{ACC} = P_m (\delta_{clr} - \delta_0) \quad (6.12)$$

A expressão para cálculo da A_{MAR} encontra-se neste capítulo na subseção 6.2.1. Para maior precisão dos resultados, é adotado o cálculo da margem por integração da área de desaceleração excedente.

O índice I_{d3} pode ser facilmente interpretado através da análise da figura 6.6, observando que o mesmo assume valores que tendem a “1”, em casos de grande estresse já que a área de margem tende a ser nula. Por outro lado, o índice tende a “0” para casos em que a área de aceleração é pequena, já que o impacto não é tão severo para o sistema.

6.3. Resultados

A aplicação do método SIME (ver Capítulo 3) para determinação de índices de estabilidade em conjunto com a região de segurança dinâmica (ver Capítulo 4), ilustra na presente seção a metodologia empregada para obtenção e comparação dos índices propostos com os resultados fornecidos pela ferramenta computacional ORGANON.

6.3.1. Análise de Índices de Estabilidade por Direção de busca

Assim como realizado no Capítulo 5 seção 5.4.5, o estudo dos índices propostos será efetuado para 5 cenários de análise, em 4 direções de busca, para contingências distintas já descritas no capítulo anterior. Os resultados obtidos para os índices propostos serão comparados com os resultados do índice I_p fornecido pelo programa ORGANON (ver Capítulo 3).

A. DIREÇÃO 16 - CONTINGÊNCIA 12

Conforme relatado no Capítulo 5, esta situação de estudo considera a direção 16 e a análise da contingência 12 que corresponde a um curto-circuito na linha de transmissão ligada na barra 100 e barra 120. Esta direção se caracteriza pela redução nos grupos de geração de G1 e G2. Obtendo como máquina crítica a unidade geradora de Canário localizada na barra 10. A tabela 6.1 apresenta os resultados obtidos para os índices de estabilidade.

É importante observar que o índice I_{d1} é maior que “1” para os 5 primeiros pontos de operação, o que significa que a abertura angular entre δ_u e δ_r é grande e as máquinas críticas e não-críticas possuem pequena diferença angular em regime permanente. Mas, à medida que o sistema avança na direção de busca, a diferença δ_s^C e δ_s^{NC} aumenta, além disto, a diferença angular δ_r e δ_u fica cada vez menor, fazendo com que o índice comece a sinalizar a perda de sincronismo. Contudo, esta variação é pouco efetiva e este índice não se aproxima o suficientemente zero no último ponto operativo.

Já, o índice I_{d2} sabe-se que δ_u é um ângulo superior a 90 graus, e que o ângulo δ_0 sendo ângulo de regime permanente será sempre menor que 90 graus, porém à medida que o sistema caminha na direção de busca, o ângulo δ_r tende para δ_u fazendo com que o índice vá para “1”. Pela tabela 6.1, observa-se pouca variação do mesmo quando comparado o ponto de operação inicial (PO 1) e ponto final (PO 8). Os valores elevados do índice e a pouca variação descrita caracterizam um caso com alto grau de deterioração, mesmo em sua condição inicial.

No índice I_{d3} , há pouca variação de valores, sinalizando que a área de margem A_{MAR} seja muito menor que a A_{DEC} . Como a perda da interligação entre as barras 100 e 120 representa uma contingência severa ao sistema, então, o índice captura adequadamente a variação de potência na direção de busca, permanecendo predominantemente com valores próximos a “1”.

É possível verificar ainda, que o índice fornecido pelo ORGANON está apresentando um resultado “oscilatório”, uma vez que este não reduz progressivamente ao se caminhar na direção de busca. Contudo, estas oscilações são pouco significativas. Além disto, este apresenta um comportamento semelhante a I_{d2} e I_{d3} , apresentando pouca variação e rápida tendência ao limite de estabilidade, o que evidencia o alto grau de severidade da contingência 12.

TABELA 6.1 – ÍNDICES DE ESTABILIDADE: DIR. 16 – CONTINGÊNCIA 12.

PO	Geração			Índices de Estabilidade				Cálculo da Margem	
	G1 (MW)	G2 (MW)	G3 (MW)	Organon	I_{d1}	I_{d2}	I_{d3}	A_{MAR} -Integral	A_{MAR} -Triangular
1	200,00	400,00	300,00	0,207	1,3329	0,7545	0,8113	0,4279	0,2055
2	188,76	393,68	317,60	0,156	1,2700	0,7649	0,8204	0,4095	0,1994
3	178,27	387,78	333,90	0,204	1,1937	0,7772	0,8388	0,3675	0,1814
4	167,78	381,88	350,30	0,167	1,1098	0,7906	0,8680	0,2918	0,1464
5	157,29	375,97	366,70	0,118	1,0191	0,8052	0,8840	0,2534	0,1294
6	146,05	369,65	384,30	0,145	0,9132	0,8230	0,9100	0,1936	0,1011
7	135,56	363,75	400,70	0,122	0,7873	0,8449	0,9330	0,1419	0,0762
8	125,07	357,85	417,10	0,106	0,6374	0,8725	0,9634	0,0761	0,0431

A figura 6.7 apresenta os ângulos dos rotores da máquina crítica para os 8 pontos de operação (PO), na direção 16, considerando a contingência 12. Nota-se que as curvas apresentam praticamente o mesmo comportamento dinâmico para os diferentes pontos de operação. Nesta condição, a máquina crítica é a unidade geradora de Canário na barra 10 que não pertence a grupos geradores da região de segurança, permanecendo com geração praticamente inalterada, uma vez que esta é responsável por atender às perdas do sistema.

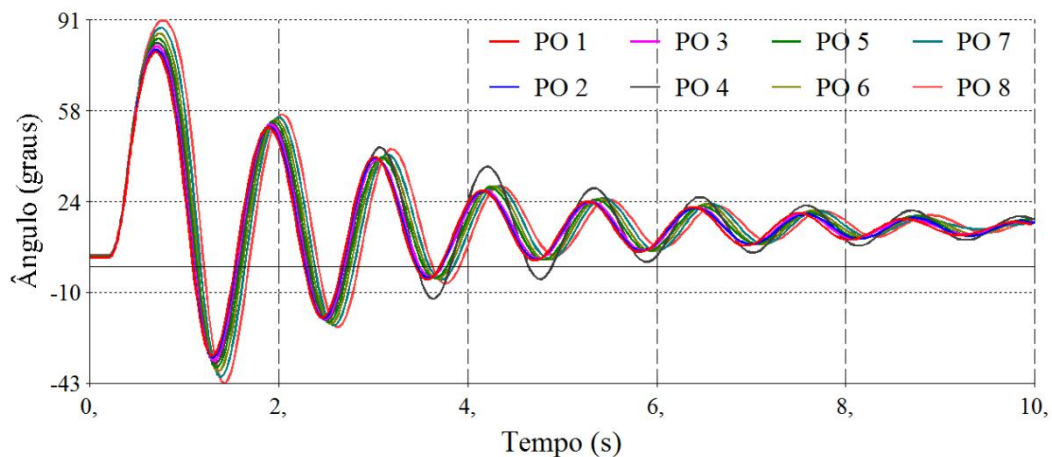


Fig. 6.7: Ângulo delta da máquina crítica Dir. 16 e Contingência 12.

B. DIREÇÃO 22 - CONTINGÊNCIA 04

A contingência 04 corresponde a um curto-circuito na linha de transmissão que interliga as barras 130 e 120. A direção 22 também corresponde a uma redução nos grupos de geração de G1 e G2.

A tabela 6.2 apresenta os valores dos índices de estabilidade para os 8 pontos de operação (PO), na direção 22. As colunas G1, G2 e G3 apresentam as variações dos grupos geradores na direção escolhida.

É importante notar que o índice I_{d1} permanece com valores muito superiores a “1”, o que significa que esta contingência não causa grandes impactos angulares no sistema, uma vez que a diferença angular, δ_u e δ_r é grande durante toda a direção de busca. Além disto, as máquinas críticas e não-críticas irão permanecer com uma diferença angular em regime permanente, praticamente inalterada.

Já para o índice I_{d2} , sabe-se que δ_u é um ângulo superior a 90 graus, e que o ângulo δ_0 , sendo ângulo de regime permanente será sempre menor que 90 graus. Porém o que se observa, é que à medida que o sistema caminha na direção de busca, o ângulo δ_r permanecerá praticamente estático e conseqüentemente distante de δ_u , fazendo com que o índice seja pequeno e tenha pouca variação.

Como era de se esperar, o índice I_{d3} não sofre variações significativas, mantendo sempre valores muito pequenos, indicando que a área $A_{DEC}+A_{MAR}$ é muito maior do que a área A_{ACC} durante toda a direção de busca.

Os resultados mostrados nesta direção revelam que o índice apresentado pelo ORGANON aproxima-se sempre de “1”, o que reflete um alto grau de estabilidade, tendo portanto elevada margem de estabilidade, o que está coerente com os demais índices calculados e apresentados na tabela.

Na coluna “Cálculo da Margem”, é possível perceber que há um grande erro de aproximação entre o cálculo da margem através da aproximação triangular quando comparada com a margem calculada pela integral da área. Este fato é justificado pela característica deste evento

em impactar muito pouco nas excursões angulares, o que faz com que a aproximação triangular tenha maior erro de aproximação da curva característica $P - \delta$.

TABELA 6.2 – ÍNDICES DE ESTABILIDADE: DIR. 22 – CONTINGÊNCIA 04.

PO	Geração			Índices de Estabilidade			Cálculo da Margem		
	G1 (MW)	G2 (MW)	G3 (MW)	Organon	I_{d1}	I_{d2}	I_{d3}	$A_{MAR-Integral}$	$A_{MAR-Triangular}$
1	200,00	400,00	300,00	0,976	9,9765	0,1536	0,0458	8,3488	0,4331
2	196,53	372,27	331,20	0,916	10,0546	0,1538	0,0464	8,3432	0,4395
3	192,82	342,55	364,60	0,908	10,1458	0,1544	0,0471	8,2502	0,4476
4	189,35	314,82	395,80	0,895	9,9401	0,1562	0,0488	8,0799	0,4493
5	185,89	287,09	427,00	0,886	9,6092	0,1583	0,0511	7,8450	0,4517
6	182,42	259,36	458,20	0,876	9,1692	0,1614	0,0539	7,5824	0,4586
7	178,71	229,64	491,60	0,876	8,6320	0,1654	0,0575	7,2426	0,4636
8	175,24	201,91	522,80	0,865	8,0122	0,1705	0,0625	6,8767	0,4683

A figura 6.8 apresenta os ângulos dos rotores da máquina crítica para os 8 pontos de operação (PO), na direção 22, considerando a contingência 04. O que pode se perceber é que as curvas apresentam praticamente o mesmo comportamento dinâmico para os diferentes pontos de operação. Nesta condição, a máquina crítica é a unidade geradora de Canário na barra 10, além disto, a contingência 04 corresponde à perda de um dos circuitos em paralelo ligados às barras 130 e 120, permanecendo o corredor de transmissão reduzido em sua capacidade de transferência de potência, impactando muito pouco o sistema. É importante observar, ainda, que esta máquina crítica não pertence a grupos geradores da região de segurança, e é responsável apenas por atender às perdas do sistema. Finalmente, a contingência 04 não apresenta fator determinante para a instabilidade na direção 22. Maiores detalhes de análise são apresentados no Apêndice C.

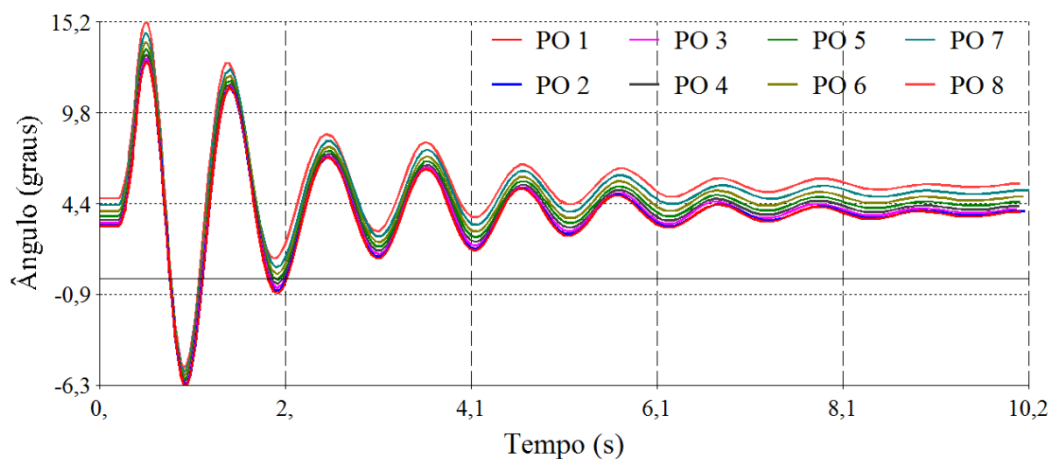


Fig. 6.8: Ângulo delta da máquina crítica Dir. 22 e Contingência 04.

C. DIREÇÃO 08 - CONTINGÊNCIA 11

Considerando-se, agora, a contingência 11 no decorrer da direção 08, a qual corresponde a um curto-circuito na linha de transmissão ligada nas barras 200 e barra 210, nesta direção ocorre aumento de geração nos grupos G1 e G2.

A tabela 6.3 apresenta os valores dos índices de estabilidade para os 8 pontos de operação escolhidos, na direção 8, contingência 11.

Diante deste caso, o índice I_{d1} apresenta inicialmente valores muito superiores a “1”, porém seguindo a direção de busca, o mesmo tende para zero, o que significa que a diferença angular δ_u e δ_r se torna cada vez menor com grandes alterações nos valores de δ_s^C e δ_s^{NC} , sinalizando que esta contingência terá grande impacto para a estabilidade do sistema.

Como já mencionado anteriormente, sabe-se que δ_u é um ângulo superior a 90 graus, e que o ângulo δ_0 , sendo ângulo de regime permanente, será sempre menor que 90 graus, sendo assim, observando a tabela 6.3, é possível verificar que o ângulo δ_r tenderá para δ_u , fazendo com que o índice I_{d2} se aproxime de “1” na condição limite de estabilidade.

Explorando-se, agora, o índice I_{d3} , para o qual se observa que à medida que se caminha na direção de busca, a área A_{MAR} tende a diminuir, fazendo com que o índice vá para o valor “1”, uma vez que $A_{DEC}+A_{MAR}$ se aproxima do valor de A_{ACC} .

Finalmente, é possível verificar que o índice apresentado pelo ORGANON, na direção de busca, diminui de forma progressiva, sinalizando adequadamente a proximidade com a fronteira de estabilidade.

Pela análise da coluna “Cálculo da Margem”, é possível notar ainda que há um grande erro de aproximação no cálculo da margem através da aproximação triangular quando comparada com a margem calculada pela integral da área. Mesmo diante de um caso com maiores excursões angulares, a aproximação triangular despreza uma área significativa da margem excedente de desaceleração da curva $P - \delta$.

TABELA 6.3 – ÍNDICES DE ESTABILIDADE: DIR. 08 – CONTINGÊNCIA 11.

PO	Geração			Índices de Estabilidade			Cálculo da Margem		
	G1 (MW)	G2 (MW)	G3 (MW)	Organon	I_{d1}	I_{d2}	I_{d3}	$A_{MAR-Integral}$	$A_{MAR-Triangular}$
1	200,00	400,00	300,00	0,434	4,1606	0,4551	0,3314	2,8851	0,8010
2	203,30	411,71	284,90	0,408	3,3236	0,4960	0,3956	2,3590	0,7138
3	206,10	421,22	272,70	0,348	2,7351	0,5328	0,4582	1,9609	0,6337
4	209,20	432,20	258,60	0,310	2,2038	0,5767	0,5389	1,5210	0,5264
5	211,90	441,72	246,40	0,269	1,8009	0,6098	0,6074	1,2107	0,4381
6	215,06	452,69	232,30	0,209	1,3883	0,6770	0,7250	0,7647	0,3014
7	217,77	462,21	220,00	0,192	1,0510	0,7332	0,8279	0,4387	0,1821
8	220,91	473,18	205,90	0,083	0,6401	0,8223	0,9521	0,1061	0,0465

A figura 6.4 apresenta os ângulos dos rotores da máquina crítica para os 8 pontos de operação ao decorrer da direção 08, contingência 11. O que se percebe é que as curvas apresentam praticamente o mesmo comportamento dinâmico para os diferentes pontos de operação, com exceção para curva de deslocamento angular referente ao PO 8, no qual o sobressinal máximo é elevado e o período de oscilação da máquina crítica aumenta, quando comparado com as curvas anteriores.

A proximidade da fronteira de estabilidade transitória é sinalizada pelos índices apresentados na tabela 6.3. A máquina crítica neste caso é a barra 20 (unidade geradora de Tucano), pertencente ao grupo G2 e que, portanto, está tendo aumento da potência gerada na direção de busca. O impacto de curto-circuito da contingência 11 remove o circuito entre as barras 200 e 210, o qual representa um importante corredor de transmissão para a máquina de Tucano, ocasionando, uma maior deterioração da estabilidade a cada ponto na direção de busca.

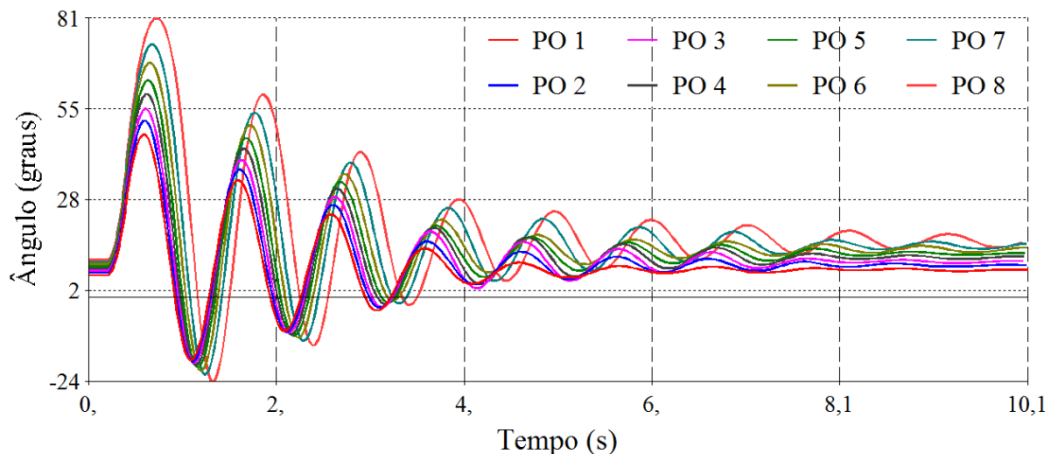


Fig. 6.9: Ângulo delta da máquina crítica Dir. 08 e Contingência 11.

D. DIREÇÃO 18 - CONTINGÊNCIA 06

A contingência 06 corresponde a simulação de um curto-circuito na linha de transmissão que interliga a barra 131 com a barra 221. Sendo esta direção caracterizada pela redução de geração nos grupos G1 e G2.

Na tabela 6.4, são apresentados os valores dos índices de estabilidade para os 8 pontos de operação escolhidos, na direção 18, contingência 06.

Na situação particular estudada nesta direção, o índice I_{d1} inicialmente possui valores superiores a “1” e à medida que a o sistema caminha na direção de busca, este índice tende a zero. Porém para o PO 8, o sistema apresenta instabilidade, o qual não é possível calcular um valor para o índice I_{d1} , uma vez que neste ponto operativo se detecta a condição de instabilidade, mas não se mede o grau de instabilidade do sistema.

Já, para o índice I_{d2} é possível verificar que o ângulo δ_r tenderá para δ_u , fazendo com que o índice vá para “1” na condição limite de estabilidade.

No índice I_{d3} , novamente, observa-se que à medida que se caminha na direção de busca, a área A_{MAR} tende a diminuir, fazendo com que o índice vá para o valor “1”, uma vez que $A_{DEC}+A_{MAR}$ se aproxima do valor de A_{ACC} .

Nota-se ainda que o índice fornecido pelo ORGANON está apresentando um resultado satisfatório. Nesta situação, ressalta-se que o índice apresenta um comportamento condizente com o esperado, diminuindo à medida que se avança na direção de busca. No PO 8 o índice sinaliza adequadamente a perda de sincronismo.

TABELA 6.4 – ÍNDICES DE ESTABILIDADE: DIR. 18 – CONTINGÊNCIA 06.

PO	Geração			Índices de Estabilidade			Cálculo da Margem		
	G1 (MW)	G2 (MW)	G3 (MW)	Organon	I_{d1}	I_{d2}	I_{d3}	$A_{MAR-Integral}$	$A_{MAR-Triangular}$
1	200,00	400,00	300,00	0,925	1,3951	0,2934	0,0083	3,6573	0,1003
2	183,39	374,75	341,90	0,916	1,1605	0,3269	0,0114	2,7989	0,0992
3	166,79	349,49	382,10	0,881	0,9377	0,3717	0,0119	1,8921	0,0926
4	149,00	322,43	428,60	0,838	0,7028	0,4434	0,0827	1,1412	0,0840
5	132,39	297,18	470,40	0,782	0,5545	0,5321	0,2304	0,6479	0,0687
6	115,79	271,92	512,30	0,599	0,4064	0,6546	0,5089	0,3060	0,0519
7	97,99	244,87	557,18	0,150	0,2823	0,8934	0,9011	0,0441	0,0161
8	81,39	219,61	599,00	-0,082	Instável	Instável	Instável	Instável	Instável

Na figura 6.10, encontram-se as evoluções das respostas dos ângulos dos rotores da máquina crítica para os 8 pontos distintos de operação (PO), na direção 18.

Nesta figura, observa-se que o ângulo inicial da máquina crítica muda à medida que a direção de busca varia, porém os ângulos máximos nas simulações não apresentam valores superiores a 60 graus, salvo o último ponto operativo para o qual há perda de sincronismo das unidades geradoras do sistema.

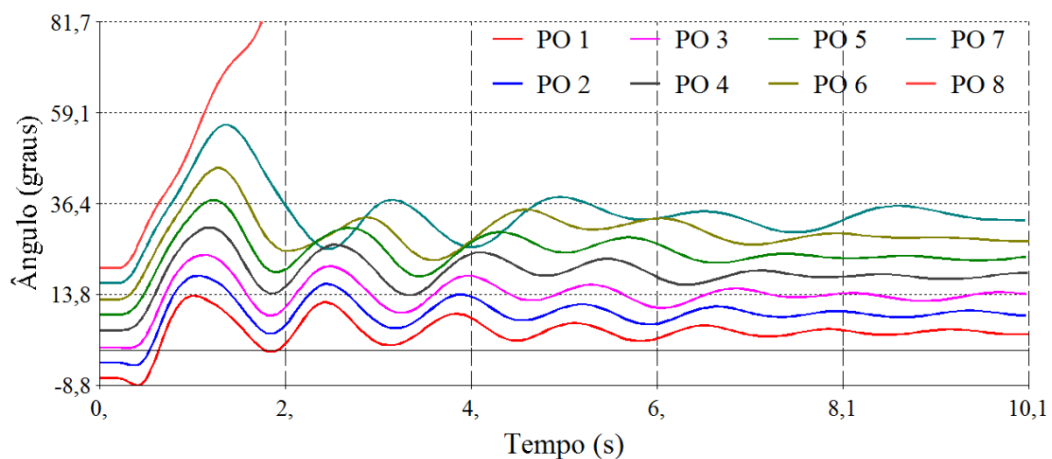


Fig. 6.10: Ângulo delta da máquina crítica Dir. 18 e Contingência 06.

E. DIREÇÃO 22 - CONTINGÊNCIA 11

Novamente, será considerada a direção 22 e analisada a contingência 11, que corresponde a um curto-circuito na linha de transmissão ligada nas barras 200 e barra 210. Esta direção também corresponde a uma redução de geração nos grupos G1 e G2.

A tabela 6.5 apresenta os resultados dos índices de estabilidade para os 8 pontos de operação adotados, na direção 22 contingência 11.

Prosseguindo com a análise desta direção, tem-se que o índice I_{d1} nos três primeiros PO's apresentam um resultado inesperado, porém esta resposta pode ser justificada pelo fato de que o ângulo δ_r , que representa o ângulo máximo na simulação, não sofre grandes variações nos três pontos de operação iniciais (ver figura 6.11). O comportamento deste índice é grandemente influenciado pela máxima excursão angular do rotor. Aliado a isto, os ângulos de regime δ_s^C e δ_s^{NC} para máquinas críticas e não-críticas, respectivamente, ao longo da direção não apresentam grandes aberturas angulares, o que faz com que o índice aumente nos primeiros pontos de operação. Porém, como o ângulo δ_r passa a aumentar, então o índice começa a diminuir. É importante ressaltar que como este índice não possui um valor de limite superior, a aproximação à região de fronteira de estabilidade pode acontecer de forma repentina. Esta análise pode ser justificada pela comparação de valores do índice nas condições de operação PO 7 e PO 8, aliado a isto observa-se que o ângulo δ_r não atinge valores superiores a 70 graus, o que faz pensar que a diferença entre as máquinas críticas e não críticas seja determinante para que o índice vá a zero, no PO 8.

Nota-se que o índice I_{d2} apresenta uma leve redução no valor entre os PO 1 e PO 2, o qual é justificado pelas mesmas razões que já foram mencionadas para o índice I_{d1} , uma vez que esse índice também é influenciado pelo ângulo δ_r . Posteriormente, o índice volta a aumentar, sendo que δ_r tenderá para δ_u na condição limite de estabilidade.

Ainda, neste caso, o índice I_{d3} começa próximo a zero. Porém, à medida que se caminha na direção de busca, a área A_{MAR} tende a diminuir, uma vez que $A_{DEC}+A_{MAR}$ se aproxima do valor de A_{ACC} , gerando, então, para I_{d3} valores de índices próximos a 1.

TABELA 6.5 – ÍNDICES DE ESTABILIDADE: DIR. 22 – CONTINGÊNCIA 11.

PO	Geração			Índices de Estabilidade			Cálculo da Margem		
	G1 (MW)	G2 (MW)	G3 (MW)	Organon	I_{d1}	I_{d2}	I_{d3}	$A_{MAR-Integral}$	$A_{MAR-Triangular}$
1	200,00	400,00	300,00	0,434	5,2522	0,2174	0,0278	13,6073	0,7681
2	196,53	372,27	331,20	0,574	9,6604	0,2025	0,0219	12,0613	0,5924
3	192,82	342,55	364,60	0,685	13,2327	0,1730	0,0104	12,0195	0,4535
4	189,35	314,82	395,80	0,862	9,8315	0,2491	0,0100	5,6828	0,3260
5	185,89	287,09	427,00	0,852	4,1466	0,3281	0,0745	3,2195	0,2556
6	182,42	259,36	458,20	0,856	2,0764	0,4447	0,2335	1,6197	0,1888
7	178,71	229,64	491,60	0,769	1,0129	0,6238	0,5876	0,5365	0,0931
8	175,24	201,91	522,80	0,151	0,0600	0,9711	0,9956	0,0045	0,0018

A figura 6.11 apresenta os ângulos dos rotores da máquina crítica para os 8 pontos de operação (PO), na direção 22 e contingência 11. Como pode ser observado no PO 8, o ângulo do rotor da máquina crítica aumenta abruptamente, indicando a iminência de perda de sincronismo.

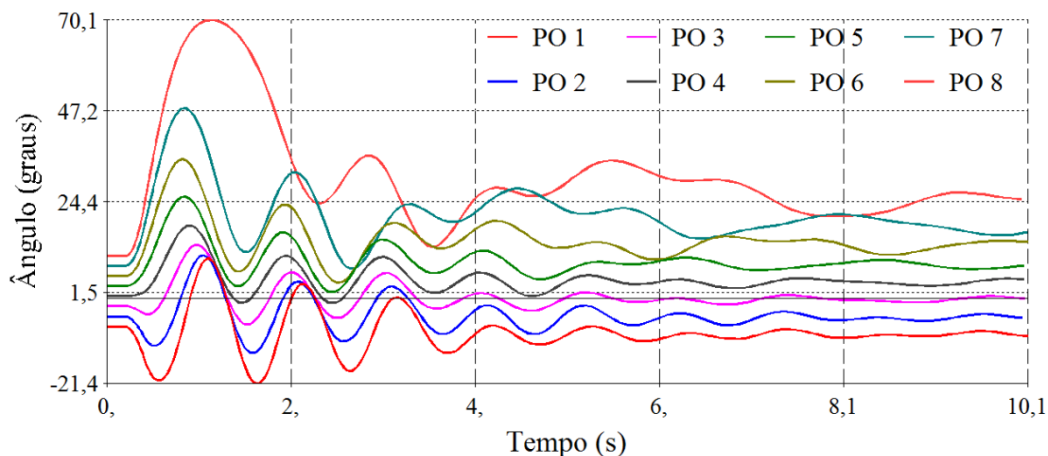


Fig. 6.11: Ângulo delta da máquina crítica Dir. 22 e Contingência 11.

Nesta figura, deve ser notado que o ângulo final da máquina crítica (PO 8) muda significativamente seu comportamento se comparado aos demais pontos operativos nesta direção de busca, e além disto, os ângulos máximos nas simulações não apresentam valores superiores a 90 graus.

Para esta direção, é possível verificar que o índice fornecido pelo ORGANON eleva-se do ponto de operação inicial (PO 1) em direção ao PO 6. Somente em PO 7, o índice começa a reduzir, caracterizando uma maior proximidade da perda de estabilidade. Este comportamento

pode ser justificado uma vez que o ORGANON monitora a máquina 20 ao decorrer de quase toda direção, salvo os pontos operativos PO 7 e PO 8, que têm o grupo de máquinas críticas definido pela unidade geradora de Gavião, a qual representa a máquina determinante para a instabilidade na direção considerada. Em outras palavras, há uma mudança da máquina classificada como crítica para o cálculo do índice no ORGANON.

6.4. Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentadas diferentes metodologias para mensurar o grau de estabilidade do sistema, dentre elas os índices baseados no método SIME (*Single Machine Equivalent*) e o cálculo da margem de estabilidade definida por área. O evento padrão é a aplicação de um curto-circuito trifásico para 12 casos previamente selecionados, tendo como ponto de partida a geração da região de segurança dinâmica. O ponto de operação PO 1 corresponde ao caso base inicial por onde a região de segurança começa a realizar a busca nas 24 direções. Todas as direções encerradas em pontos extremos (PO 8) definidos como limite de estabilidade, são mapeadas com informações de diferentes condições operativas do sistema, geradas ao longo de cada direção, utilizados para execução das simulações no domínio do tempo e extração dos índices de estabilidade.

Os índices propostos para cálculo do grau de estabilidade do sistema corresponderam adequadamente, sendo capazes de mensurar o impacto do evento e fornecer informações relativamente precisas para classificação de contingência em diferentes situações, permitindo a obtenção da avaliação de segurança apropriada. Porém, é possível perceber que assim como quaisquer outros índices de estabilidade, os mesmos não representam uma medida absoluta, pois em muitos casos a dependência de variáveis não modeladas pode influenciar no resultado obtido. Por outro lado, a investigação de tais componentes fornece uma ordem de grandeza associada ao grau de estabilidade em que um determinado sistema se encontra.

CAPÍTULO 7

Conclusões

7.1. Considerações Gerais

Índices que informem o quanto o sistema é estável ou instável perante um determinado distúrbio têm sido um assunto de grande interesse entre pesquisadores, de forma que várias técnicas têm sido propostas para analisar a estabilidade transitória de sistemas. Neste trabalho, foram apresentadas as vantagens e desvantagens de algumas metodologias aplicadas para determinação de índices individuais para a análise da estabilidade transitória e segurança operativa de um dado sistema.

Este trabalho procurou apresentar diferentes metodologias de avaliação de estabilidade transitória de sistemas de potência através de índices não interativos adimensionais, partindo da proposição de metodologias fundamentadas no método SIME (*Single Machine Equivalent*), apoiado na análise da curva Potência-Ângulo ($P - \delta$) do OMIB (*One Machine Infinite Bus*) de um sistema multimáquina.

A implementação da metodologia foi realizada com base na análise das curvas, dados de simulações eletromecânicas e principalmente através dos nomogramas de regiões de segurança dinâmica, funcionalidades do programa computacional ORGANON.

Primeiramente, foi utilizado um sistema de teste de pequeno porte chamado *Brazilian Birds*. A validação dos índices de estabilidade foi realizada através da construção da região de segurança dinâmica, efetuada por meio do redespacho de dois grupos geradores para condução do sistema a um ponto de operação limite de estabilidade. Neste sentido, foram obtidas 24 direções em torno do ponto inicial. Estas direções têm por objetivo conduzir o sistema à fronteira de estabilidade, estabelecendo assim todos os pontos seguros de operação para uma lista de perturbações aplicadas ao sistema. Contingências distintas foram selecionadas para avaliação de segurança. As direções que compunham estes casos para diferentes condições operativas preestabelecidas foram utilizadas para validar os índices. Além disto, foram efetuadas comparações com diferentes metodologias de cálculo direto de

margem de estabilidade, dentre os quais estão o cálculo de margem por integração, aproximação triangular e o próprio índice para avaliação fornecido pelo ORGANON.

Nos resultados apresentados, a determinação de δ_u é realizada através do uso de uma extrapolação na curva $P - \delta$. Nas simulações no qual a modelagem dinâmica completa de máquina é representada, o comportamento transitório da curva $P - \delta$ do OMIB não corresponde a uma senóide “pura”. Isto pode ser observado verificando que os resultados no ORGANON nem sempre tendem para zero quando comparado com as demais metodologias propostas. Nestas metodologias, a estimativa de δ_u foi obtida através de simulações no domínio do tempo, de modo que os resultados fossem mais próximos de resultados reais para obtenção de δ_u . Ou seja, por tentativa e erro, o impacto é gradativamente aumentado para se detectar o ponto em que este ângulo máximo ocorrerá, o que torna o resultado mais preciso. Por outro lado, impossibilita seu uso automático de determinação.

De acordo com o exposto, conclui-se que os resultados foram considerados atrativos. O método da máquina equivalente constitui uma importante ferramenta para auxiliar a avaliação do desempenho transitório de sistemas elétricos de potência. Os índices propostos se mostraram muito eficientes para avaliar cenários distintos. Salienta-se ainda que a abordagem no domínio do tempo permite a adoção de uma modelagem dinâmica completa com maior nível de detalhamento, tendo um reflexo positivo nos resultados fornecidos. As limitações das metodologias propostas são estabelecidas apenas pela determinação do ângulo limite de estabilidade δ_u no qual boas estimativas conduzem a bons resultados.

7.2. Trabalhos Futuros

A aplicação de índices de estabilidade neste trabalho se limitou ao mapeamento e validação de índices com auxílio da região de segurança. Contudo, a região de segurança apresenta uma extensa gama de assuntos a serem explorados, tais como: Como funciona o mecanismo de detecção de instabilidade aplicados a análises dinâmicas?

A recomendação de continuidade deste trabalho consiste em:

1. Realizar teste dos índices apresentados neste trabalho para sistemas de grande porte;

2. Aprimorar os índices de determinação da estabilidade associado à metodologia SIME;
3. Estudar o mecanismo de detecção de instabilidade;
4. Avaliar o uso da função energia no auxílio a verificação da estabilidade do sistema, salvaguardando esforços computacionais desnecessários.
5. Estudar o cálculo de um índice para a margem negativa de estabilidade.
6. Avaliar a sensibilidade dos índices em função de critérios de determinação de grupos de geração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] C. M. B. M. Ferreira, J. A. D. Pinto, F. P. M. Barbosa, “Dynamic Security Analysis of an Electric Power System Using a Combined Monte Carlo Hybrid Transient Stability Approach,”. *2001 IEEE Porto Power Tech Conference*, Porto, Portugal, Sep. 2001.
- [02] C. M. B. M. Ferreira, “Análise de Estabilidade Transitória de Sistemas de Energia Utilizando Formulações Híbridas,” Tese de Doutorado, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2005.
- [03] H. M. Tan, D. J. Vowles and R. Zivanovic, “Implementation of the Enhanced Binary-SIME Method for Finding Transient Stability Limits With PSS/E,” *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, Bucharest, Romania, Jun.-Jul. 2009.
- [04] M. G. Santos, “Segurança de Sistemas de Potência em Regime Transitório Considerando Incertezas”, Tese de Doutorado em Computação de Potência, UFF, Niterói, Brasil, 2009.
- [05] A. Pizano-Martinez, C.R. Fuerte-Equivel, D. Ruiz-Veja, “Global Transient Stability-Constrained Optimal Power Flow Using the SIME Method,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 1, pp. 392-403, Feb. 2010.
- [06] L. R. Lima, “Metodologia Probabilística para Classificação de Subestação considerando os Desempenhos Estático e Dinâmico da Rede,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UNIFEI, Itajubá, Brasil, 2013.
- [07] A. M. Leite da Silva, J. L. Jardim, A. M. Rei, J. C. O. Mello, “Dynamic Security Risk Assessment,” *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 1, pp. 198-205, Jul. 1999.
- [08] J. L. A. Jardim, C. S. Neto, W. T. Kwasnicki, “Design Features of a Dynamic Security Assessment System,” *IEEE Power Systems Conference and Exposition*, Vol. 1, pp. 446-452, Oct. 2004.
- [09] J. L. A. Jardim, C. S. Neto, M. G. Santos, “Brazilian System Operator Online Security Assessment System,” *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, Atlanta, USA, Oct. 2006.
- [10] S. B. Chaves, “Análise Estática e Dinâmica de Sistemas de Potência via Aplicativo Computacional Integrado: ORGANON,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [11] P. H. L. Santos, L. Monteath, C. A. S. Neto, M. G. Santos, S. B. Chaves, M. C. Passaro, “Utilização de Regiões de Segurança em Estudos de Planejamento da Ampliação da Rede,” in XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação

e Expansão Elétrica - SEPOPE , Rio de Janeiro, Maio 2012, p.11.

- [12] A. A. Fouad, K. C. Kruempel, V. Vittal, A. Ghafurian, K. Nodehi, J. V. Mitsche, "Transient Stability Program Output," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 2-8, Feb. 1986.
- [13] M. H. Haque, "Further Developments of the Equal Area Criterion for Multi-machine Power Systems," *Electric Power System Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 175-183, June 1995.
- [14] M. H. Haque, "Hybrid Method of Determining the Transient Stability Margin of a Power System," *IEE Proceeding-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 143, No. 1, pp. 27-32, Jan. 1996.
- [15] M. H. Haque, "Novel Method of Finding the First Swing Stability Margin of a Power System from Time Domain Simulation," *IEE Proceeding-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 143, No. 5, pp. 413-419, Sep. 1996.
- [16] Y. Zhang, L. Wehenkel, P. Rousseaux, M. Pavella, "First and Multi-Swing Transient Stability Limits of a Longitudinal System Using the SIME Method", *Electrotechnical Conference*, Vol. 2, pp. 809-815, May. 1996.
- [17] M. Suzuki, W. Fujii, S. Iwamoto, "Consideration on Transient Stability Assessment using Deceleration Area by SIME", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 2, pp.1695-1700, June 2005.
- [18] P. P. C. Mendes, "Estabilidade de Sistemas Elétricos," Notas de Aula, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.
- [19] Y. Zahng, L. Wehenkel, M. Pavella, "SIME: A comprehensive Approach to Fast Transient Stability Assessment," *IEE Japan'96 Conf.*, Osaka, Japan, pp.177-182, Aug. 1998.
- [20] Y. Zhang, L. Wehenkel, P. Rousseaux, M. Pavella, "SIME: A hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection," *Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier Science, Vol. 19, No. 3, pp. 195-208, 1997
- [21] W. D Stevenson, Jr., *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, 2nd ed. São Paulo: McGraw Hill, 1986.
- [22] M. Pavella, D. Ernst, D. Ruiz-Vega, *Transient Stability of Power Systems: A Unified Approach to Assessment and Control*, Norwell, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [23] J. L. A. Jardim, "Manual of ORGANON – User Guide," Vol. I, Version 1.1, April 2006.
- [24] Organon [Online]. Disponível: www.hppa.com.br.
- [25] J. L. A. Jardim, A. Y. Takahata, G. N. Taranto, M. T. Schilling, "Fluxo de Potência

- Robusto: Formulação Dinâmica Sintética,” in XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, Curitiba, Out. 2005, p.7.
- [26] J. L. A. Jardim, B. Stott, "Synthetic Dynamics Power Flow," *IEEE General Meeting*, San Francisco, June 2005.
- [27] A. J. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, São Paulo: Edgard Blücher, 1983.
- [28] D. S. Ramos, *Sistemas Elétricos de Potência: Regime Permanente II*, Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.
- [29] D. Dotta, "Modelagem e Implementação de Aplicações Usando uma Base Computacional Orientada a Objetos para Sistemas de Energia Elétrica," Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 2003.
- [30] V. Ajjarapu, C Christy, "The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, pp. 416-423, Feb. 1992.
- [31] D. A. A. Gomez, "Identificação das Barras Críticas do Ponto de Vista de Estabilidade de Tensão," Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
- [32] D. Alves, "Esquema alternativo para o passo de parametrização do método da continuação baseado em parâmetro físico," *Revista Coontrole e Automação*, Vol. 13, No. 3, 2002.
- [33] J. L. A. Jardim, "Manual of ORGANON – Introduction Methodology," Vol. III, Version 1.1, April 2005.
- [34] L. D. Penna, M. A. Quadros, S. D. Ticom, G. Pires, M. C. Passaro, R. A. Leites, R. V. D. Faria, C. A. Neto, "Utilização da Ferramenta ORGANON nos processos do ONS," in XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, Florianópolis, Out. 2011, p.9.
- [35] J. L. A. Jardim, C. S. Neto, M. G. Santos e P. Gomes, "ORGANON Um Sistema de Avaliação da Segurança Dinâmica de Sistemas de Potência," Ciclo Interno de Debates do ONS - Cinter, Rio de Janeiro, Nov. 2003.
- [36] J. L. A. Jardim, "Tutorial Básico sobre Região de Segurança Dinâmica," Out. 2009.
- [37] Dados do Sistema de Teste Brazilian Birds [Online]. Disponível: <https://sites.google.com/site/powersystemdata/brazilian-data>.

APÊNDICE A

Dados do Sistema Brazilian Birds

Os dados do sistema de teste fictício Brazilian Birds são apresentados nas tabelas abaixo de A.1 a A.11:

TABELA A.1 – DADOS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO I.

Tensão (kV)	Base 100 MVA							
	Sequência positiva			Sequência zero			Mútua Sequência Zero	
	R(%/km)	X(%/km)	Q(MVAR/km)	R(%/km)	X(%/km)	Q(MVAR/km)	R(%/km)	X(%/km)
440	0,0013	0,0159	0,7737	0,0165	0,0439			
230	0,0256	0,0967	0,1707	0,0883	0,3114	0,1196	0,0168	0,0262
138	0,1270	0,2640	0,0621	0,2710	0,9530	0,0366	0,1654	0,6080
69	0,5060	0,8700	0,0189	1,1460	4,1330	0,0086		

TABELA A.2 – DADOS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO II.

Barramento		Tensão (kV)	Comprimento (km)	Reator (MVar) não chaveável	
Lado 1	Lado 2			Lado 1	Lado 2
Canário	Cardeal	230	108		
Canário	Tiziu	230	230		
Cardeal	Tiziu	230	225		
Cardeal	Curió	230	180		
Sabiá	Curió	230	50		
Sabiá	Tiziu	230	94		
Curió	Sanhaço	69	5,75		
Tiziu	Pardal	138	40		
Sabiá	Azulão	138	19		
Pardal	Azulão	138	26		
Sabiá	Bicudo	440	60		
Bicudo	Chopim	440	150	40	40
Curió	Arara	440	450	80	80
Chopim	Pelicano	440	240		
Pelicano	Coruja	230	41		
Pelicano	Urubu	230	65		
Urubu	Garça	230	44		
Gavião	Garça	230	90		
Tucano	Gavião	230	85		
Tucano	Arara	230	96		
Arara	Pelicano	230	101		

TABELA A.3 – DADOS DE LINHAS DE TRANSFORMADORES DE 2 ENROLAMENTOS.

Barra	Tensão (kV)		X(%) Base do transformador	S (MVA) por unidade	Nº de unidades	Tap			Ligação	
	Enr. 1	Enr. 2				Tipo	local	passo	Enr1	Enr2
Canário	18	230	11,70	110	5	fixo	alta	4 x +/-2,5%	Delta	Yat
Sabiá	13,8	230	13,10	85	4	fixo	alta	4 x +/-2,5%	Delta	Yat
Sabiá	230	138	13,76	150	1	LTC	alta	5 x +/-2,0%	Yat	Delta
Cardeal	230	88	9,46	80	2	LTC	alta	5 x +/-2,0%	Yat	Delta
Curió	230	138	14,00	140	1	LTC	alta	5 x +/-2,0%	Yat	Delta
Curió	230	69	12,57	30	2	LTC	alta	5 x +/-2,0%	Yat	Delta
Curió	230	69	12,85	30	1	LTC	alta	5 x +/-2,0%	Yat	Delta
Pardal	138	69	9,40	120	2	LTC	alta	5 x +/-2,0%	Yat	Delta
Azulão	138	69	8,80	100	1	LTC	alta	5 x +/-2,0%	Yat	Delta
Tiziu	230	138	13,92	150	2	LTC	alta	5 x +/-2,0%	Yat	Delta
Chopim	440	138	13,27	100	1	LTC	alta	5 x +/-2,0%	Yat	Yat
Tucano	13,8	230	12,00	110	5	fixo	alta	4 x +/-2,5%	Delta	Yat
Gavião	13,8	230	12,40	180	4	fixo	alta	4 x +/-2,5%	Delta	Yat
Arara	230	138	11,10	120	1	LTC	alta	5 x +/-2,0%	Yat	Delta
Urubu	230	138	12,92	100	1	LTC	alta	5 x +/-2,0%	Yat	Delta

TABELA A.4 – DADOS DE TRANSFORMADORES DE 3 ENROLAMENTOS.

Barra	Tensão (kV)			X(%) base do transformador			S (MVA) por unidade	Número de unidades	LTC		Tap Fixo		Conexão
	(P)	(S)	(T)	P-S	S-T	T-P			local	passo	local	passo	
Curió	230	440	13,8	14,00	10,50	26,00	150	2	S	4 x +/-1,25%	P	218,5/241,5	Y-Y-Δ
Arara	230	440	13,8	14,00	10,50	26,00	150	2	S	4 x +/-1,25%	P	218,5/241,5	Y-Y-Δ
Sabiá	230	440	13,8	14,00	10,50	26,00	150	2	S	4 x +/-1,25%	P	218,5/241,5	Y-Y-Δ
Pelicano	230	440	13,8	14,00	10,50	26,00	150	2	S	4 x +/-1,25%	P	218,5/241,5	Y-Y-Δ
Bicudo	440	69	13,8	12,00	3,55	15,50	80	2	P	4 x +/-1,25%	Não tem		Y-Y-Δ

TABELA A.5 – DADOS DA COMPENSAÇÃO PARALELA.

Barramento	Tipo	Tensão Nominal (kV)	Potência (MVA)	Número de unidades	Chaveável
Pardal	Capacitor	138	20	2	Sim
Bicudo	Capacitor	13,8	5	2	Sim
Bicudo	Reator	440	40	1	Sim
Garça	Capacitor	230	10	5	Sim

TABELA A.6 – DADOS DA COMPENSAÇÃO SÉRIE.

Local	Tipo	Tensão Nominal (kV)	Valor
Curió	Capacitor	440	14,0% da LT Curió-Arara
Arara	Capacitor	440	14,0% da LT Curió-Arara

TABELA A.7 – DADOS DE CARGAS.

Barramento	Tensão Nominal (kV)	Potência		Tipo		
		Ativa (MW)	Reativa (MVar)	P Constante	Z Constante	I Constante
Sabiá	138	40,0	10,0	100	0	0
Cardeal	88	120,0	40,0	100	0	0
Curió	138	110,0	40,0	100	0	0
Sanhaço	69	70,0	20,0	100	0	0
Tiziu	138	160,0	60,0	100	0	0
Pardal	69	40,0	10,0	100	0	0
Azulão	69	40,0	10,0	100	0	0
Bicudo	69	130,0	40,0	100	0	0
Chopim	138	90,0	20,0	100	0	0
Arara	138	110,0	30,0	100	0	0
Coruja	230	90,0	20,0	100	0	0
Urubu	138	80,0	20,0	100	0	0
Garça	230	120,0	50,0	100	0	0

TABELA A.8 – DADOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS (REGIME PERMANENTE).

Máquina	Tensão Nominal (kV)	Potência/Máq. Nominal (MVA)	Limite/Máq. de reativos (MVar)		Número de Unidades	Tipo
			Máximo	Mínimo		
Canário	18	100	35,0	-35,0	5	hidráulica
Sabiá	13,8	75	25,0	-25,0	4	térmica
Tucano	13,8	115	35,0	0,0	5	hidráulica
Gavião	13,8	158	45,0	-45,0	4	hidráulica

TABELA A.9 – DADOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS (REGIME TRANSITÓRIO).

Máquina	Base de Potência da Máquina								T'd0 (s)	T'q0 (s)	T''d0 (s)	T''q0 (s)	H (MJ/MVA)
	X _d (%)	X _q (%)	X' _d (%)	X' _q (%)	X'' _d (%)	XI(%)	R _a (%)	D(pu)					
Canário	101,4	77,0	31,4		28,0	16,3	0,50	2,0	6,55		0,04	0,07	3,12
Sabiá	105,0	98,0	18,5	36,0	13,0	7,0	0,31	2,0	6,10	0,30	0,04	0,10	6,19
Tucano	106,0	61,0	31,5		25,0	14,7	0,24	2,0	8,68		0,04	0,08	3,82
Gavião	92,0	51,0	30,0		22,0	13,0	0,20	2,0	5,20		0,03	0,03	3,18

TABELA A.10 – DADOS DOS REGULADORES DE TENSÃO I.

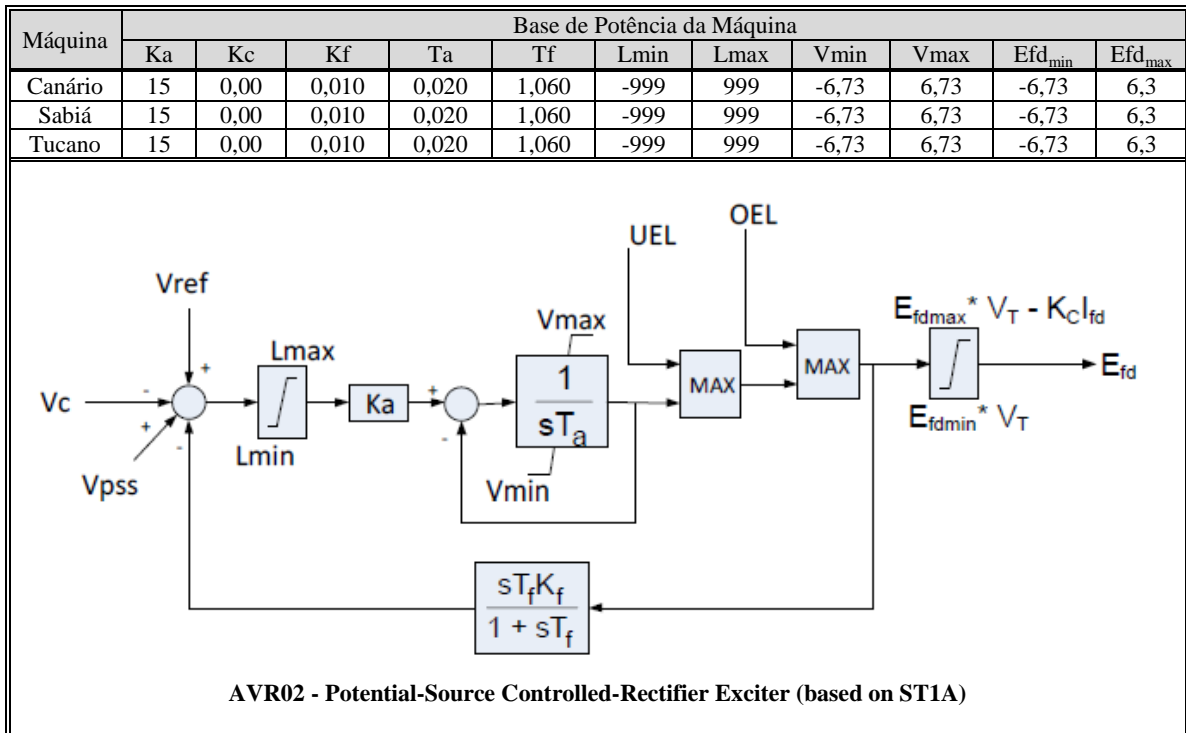


TABELA A.11 – DADOS DOS REGULADORES DE TENSÃO II.

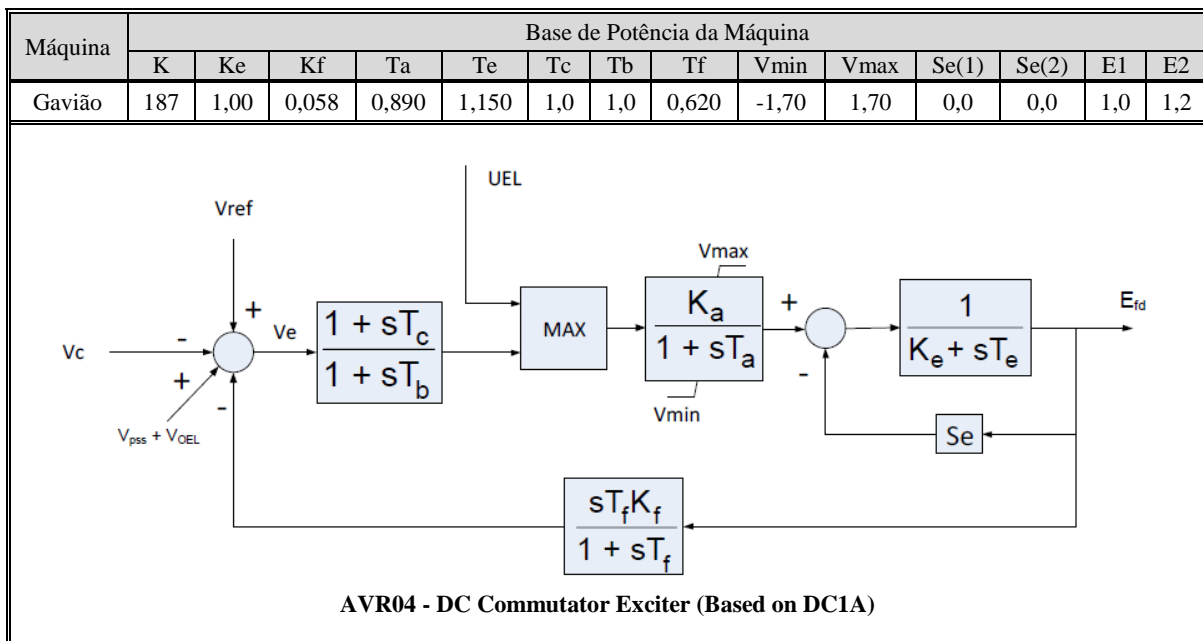


TABELA A.12 – DADOS DOS REGULADORES DE VELOCIDADE I.

Base Potência das Máquinas																
Máquinas	At	Tg	Tw	Rt	Tr	Rp	Tf	Td	Lmin	Lmax	Vmin	Vmax	qnl	Kd	Dt	D
Canário	1,20	0,50	1,50	0,05	7,00	0,38	0,05	1,00	-2,00	0,98	0,001	2,00	0,15	0,00	0,50	1,00
Tucano	1,20	0,50	1,50	0,05	7,00	0,38	0,05	1,00	-2,00	0,98	0,001	2,00	0,15	0,00	0,50	1,00
Gavião	1,20	0,50	1,50	0,05	7,00	0,38	0,05	1,00	-2,00	0,98	0,001	2,00	0,15	0,00	0,50	1,00

GOV03 - PTI HYGOV + Compensation - Non-linear Turbine

Os modelos que representam a compensação de desfasamento temporária como segue na figura A.1, uma vez em cascata pode ser convertido para a representação acima utilizando a seguinte relação:

$$T_f = \frac{T_r T_s}{T_s + r T_r} \tag{A.1}$$

$$R_t = \frac{T_s}{T_r} + r \tag{A.2}$$

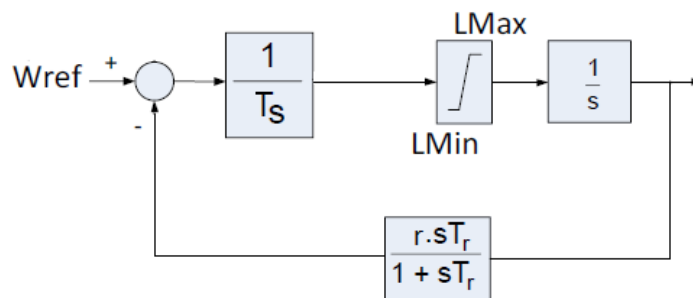


Fig. A.1: Modelo de compensação de desfasamento temporário.

TABELA A.13 – DADOS DOS REGULADORES DE VELOCIDADE II.

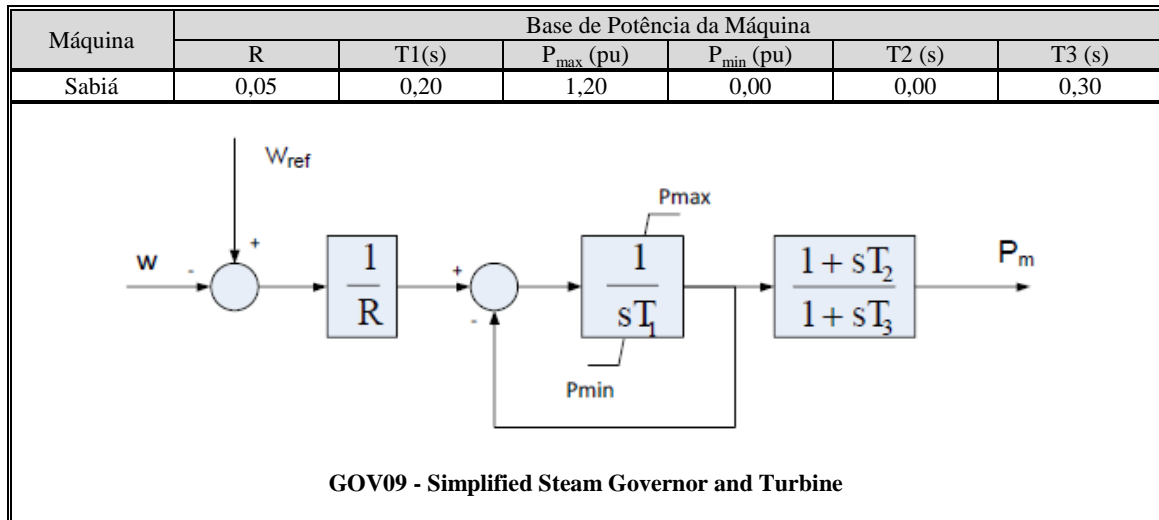
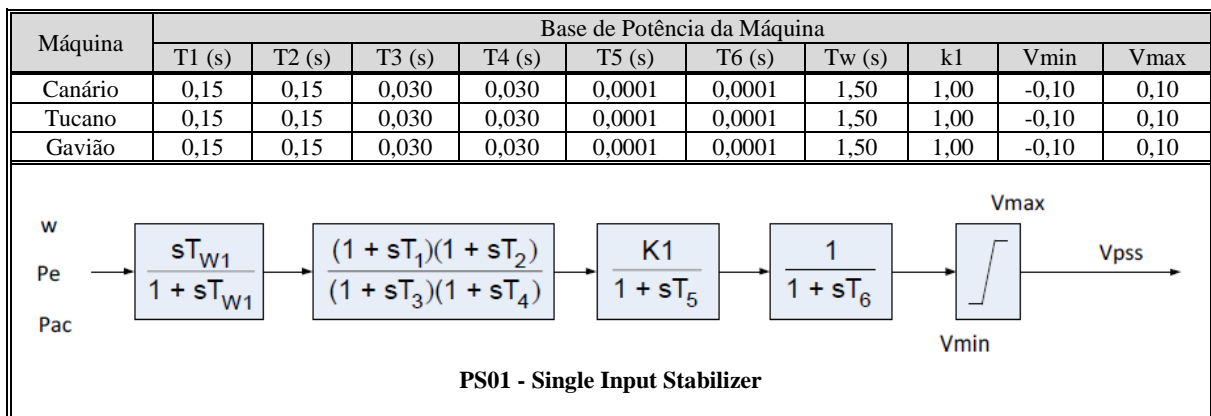


TABELA A.14 – DADOS DOS PSS.



APÊNDICE B

Dados de Entrada da Ferramenta ORGANON

B.1. Dados de entrada da topologia do sistema Brazilian Birds (.pwf)

```
(ARQUIVO GRAVADO A PARTIR DO PROGRAMA ORGANON)
TITU
SBB - CESE Ger - Intercambio
DOPC
(Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E
NEWT L STEP L CREM L CELO L CPHS L
RCVG L RMON L MOST L MOSG L MOSF L FILE L CONT L
QLIM L
CTAP L
TAPD D
CSCA L
99999
(Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val)
DCTE
BASE 100.
TEPA .1
TEPR .1
VFLD 80.
ACIT 90
99999
DBAR
(Num)OETGb( nome )G1( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc )( Pl)( Ql)(
Sh)Are(Vf)M(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10
10 L2 ACANARIO-18 A10300. 357.2-48.6-175.175. 11000
11 L1 ASABIA---13 A1030-11.200. -32. -100.100. 11000
20 L1 ATUCANO--13 A10309.8 400. -39.4-250.250. 21000
21 L1 AGAVIAO--13 A10305.62300. -43.3-180.180. 21000
100 L BCANARIO230 A1043-4.1 11000
110 L BSABIA--230 A1045-15. 11000
111 L CSABIA--138 A1027-19. 40. 10. 11000
112 L DSABIA--440 A1078-17. 11000
113 L ASABIA---13 A1080-17. 11000
120 L BCARDEAL230 A1028-14. 11000
121 L ECARDEAL-88 A1002-18. 120. 40. 11000
130 L BCURIO--230 A1047-15. 11000
131 L DCURIO--CS5 A1078-13. -80. 11000
132 L DCURIO--440 A1087-12. 11000
133 L ACURIO---13 A1089-12. 11000
134 L FCURIO---69 A1010-21. 11000
135 L CCURIO--138 A1001-21. 130. 40. 11000
140 L FSANHACO-69 A 979-23. 70. 20. 11000
150 L BTIZIU--230 A1022-15. 11000
151 L CTIZIU--138 A1005-20. 160. 60. 11000
160 L CPARDAL-138 A1012-21. 40. 11000
161 L FPARDAL--69 A1008-22. 40. 10. 11000
170 L CAZULAO-138 A1012-20. 11000
171 L FAZULAO--69 A1003-22. 40. 10. 11000
180 L DBICUDO-440 A1082-17. -40. 11000
181 L FBICUDO--69 A1058-22. 130. 40. 11000
182 L ABICUDO--13 A1060-22. 10. 11000
190 L DCHOPIN-440 A1093-17. -80. 11000
191 L CCHOPIN-138 A1062-23. 100. 40. 11000
200 L BCORUJA-230 A10463.98 21000
210 L BGAVIAO-230 A10382.86 21000
220 L BARARA--230 A1042-5.6 21000
221 L DARARA--CS5 A1079-8.1 -80. 21000
222 L DARARA--440 A1090-8.7 21000
223 L AARARA---13 A1093-8.9 21000
224 L CARARA--138 A1009-11. 110. 30. 21000
```

230	L	BPELICAN230	A1048-12.																	21000
230	L	BPELICAN230	A1048-12.																	21000
231	L	DPELICAN440	A1095-15.																	21000
232	L	APELICANO13	A1098-15.																	21000
240	L	BCORUJA-230	A1036-14.					90.	10.											21000
250	L	BURUBU--230	A1025-7.4																	21000
251	L	CURUBU--138	A1007-13.					80.	10.											21000
260	L	BGARCA--230	A1025-5.					200.	50.	50.										21000
1110	L	ASABIA--FIC	A1080-17.																	11000
1130	L	ACURIO--FIC	A1089-12.																	11000
1180	L	ABICUDO-FIC	A1058-22.																	11000
1220	L	AARARA--FIC	A1093-8.9																	21000
1230	L	APELICANFIC	A1098-15.																	21000

99999

DLIN

(De)d O d(Pa)NcEP (R%) (

X%) (Mvar) (Tap) (Tmn) (Tmx) (Phs) (Bc) (Cn) (Ce)Ns (Cq) (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10)

10		100	1					2.13												1.
11		110	1					3.85												1.
20		200	1					2.73												1.
21		210	1					1.72												1.
100		120	1			2.76		10.44		18.43										
100		150	1			5.29		20.		35.3										
100		150	2			5.29		20.		35.3										
110		130	1			1.28		4.84		8.53										
110		150	1			2.41		9.09		16.04										
110		111	1					9.17												1.
110		1110	1					4.92												1.
111		170	1			2.41		5.02		1.18										
112		180	1			.08		.95		46.42										
112		1110	1					-.25												1.
113		1110	1					3.75												1.
120		130	1			4.61		17.41		30.72										
120		130	2			4.61		17.41		30.72										
120		150	1			5.76		21.76		38.4										
120		121	1					5.91												1.
130		134	1					20.95												1.
130		134	2					42.83												1.
130		135	1					10.												1.
130		1130	1					4.92												1.
131		132	1					-1.												
131		221	1	T	.59			7.16		348.2										
132		1130	1					-.25												1.
133		1130	1					3.75												1.
134		140	1			2.91		5.		.11										
150		151	1					4.64												1.
151		160	1			5.08		10.56		2.48										
151		160	2			5.08		10.56		2.48										
160		170	1			3.3		6.86		1.61										
160		161	1					3.92												1.
170		171	1					8.8												1.
180		190	1			.2		2.39		116.1										
180		1180	1					7.48												1.
181		1180	1					.02												1.
182		1180	1					2.2												1.
190		231	1	T	.31			3.82		185.7										
190		191	1					13.27												1.
200		210	1			2.18		8.22		14.51										
200		220	1			2.46		9.28		16.39										
200		220	2			2.46		9.28		16.39										
210		260	1			2.3		8.7		15.36										
210		260	2			2.3		8.7		15.36										
220		230	1			2.59		9.77		17.24										
220		224	1					9.25												1.
220		1220	1					4.92												1.
221		222	1					-1.												
222		1220	1					-.25												1.
223		1220	1					3.75												1.
230		240	1			1.05		3.96		7.										
230		250	1			1.66		6.29		11.09										
230		1230	1					4.92												1.
231		1230	1					-.25												1.
232		1230	1					3.75												1.
250		260	1			1.13		4.25		7.51										
250		260	2			1.13		4.25		7.51										
12.92																				
99999																				

250

251 1

DCSC
 (De) O (Pa) NcEP (Xmin) (Xmax) (Xv) C (Vsp) (Ext) Nst (1) (2) (3) (4) (5) (6)
 99999
 DCAI
 (Num) O Gr E (U) UOp (P) (Q) (A) (B) (C) (D) (Vfl) (Vf)
 99999
 DGEI
 (Num) OA Gr E(U)UOpUOn(Pg) (Qg) (Qn) (Qm) (Xtrf) (Xd) (Xq) (Xl) (fp) (Sn) (Ptu)
 99999
 DBSH
 99999
 DSHL
 (De) O (Pa) Nc (Shde) (Shpa) ED EP
 99999
 DGER

10	500.	1.
11	300.	1.
20	575.	1.
21	632.	1.

 99999
 DCAR
 (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) O (A) (B) (C) (D) (Vfl)
 99999
 DCER
 (No) O Gr Un (Kb) (Incl) (Qg) (Qn) (Qm) C E
 99999
 DCTR
 (Nf) O (Nt) Nc Vmin Vmax C M (Fmin) (Fmax) C (Vsp) (Ext) Ns
 99999
 DGLT
 (G (Vmn) (Vmx) (Vmne) (Vmxe)
 A .9 1.1 .9 1.1
 99999
 DARE
 (Ar (Xchg) (Identificacao da area) (Xmin) (Xmax)
 1 AREA A
 2 AREA B
 99999
 DTPF CIRC
 (De) (Pa) Nc (De) (Pa) Nc (De) (Pa) Nc (De) (Pa) Nc (De) (Pa) Nc O
 99999
 DMTE
 (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) C (tp) (no) O F
 99999
 DMFL CIRC
 (De) (Pa) Nc (De) (Pa) Nc (De) (Pa) Nc (De) (Pa) Nc (De) (Pa) Nc O
 99999
 DGBT
 (G (kV)
 D 440.
 B 230.
 C 138.
 E 88.
 F 69.
 A 1.
 99999
 DINJ
 99999
 FIM

B.2. Arquivo de dados dinâmicos (.dyn)

```

SM04
10 2 1 3 0 0.0000 0.0000 0.0000 0 0 10 'xxxxxxxxx'
1.014 0.314 0.280 0.770 0.000 0.280 0.005 100.0
0.163 0.000 6.550 0.039 0.000 3.120 2.00 0.071 0.000
0.000 /
15.0 0.02 0.010 1.06 -999. 999. -6.73 6.73 -6.73
6.73 0.0 1.0 /
0.15 0.15 0.03 0.03 0.0001 0.0001 1.5 1.00 -0.1
0.1 1 /
1.2 0.5 1.5 0.05 7.0 0.38 0.05 -2.0 0.98 -
2.0 2.0 0.15 0.0 1.0 0.5 1.0 /
SM05
11 2 0 9 0 0.0000 0.0000 0.0100 0 0 10 'xxxxxxxxx'
1.050 0.185 0.130 0.980 0.360 0.130 0.0031 75.0
0.070 0.000 6.100 0.038 0.300 6.187 2.000 0.099 0.000
0.000 /
15.0 0.02 0.010 1.06 -999. 999. -6.73 6.73 -6.73
6.73 0.0 /
0.05 0.2 1.2 0.0 0.0 0.3 /
SM04
20 2 1 3 0 0.0000 0.0000 0.0000 0 0 10 'xxxxxxxxx'
1.060 0.315 0.250 0.610 0.000 0.250 0.0024 115.0
0.147 0.000 8.680 0.040 0.000 3.817 2.000 0.080 0.000
0.000 /
15.0 0.02 0.010 1.06 -999. 999. -6.73 6.73 -6.73
6.73 0.0 /
0.15 0.15 0.03 0.03 0.0001 0.0001 1.5 1.00 -0.1
0.1 1 /
1.2 0.5 1.5 0.05 7.0 0.38 0.05 -2.0 0.98 -
2.0 2.0 0.15 0.0 1.0 0.5 1.0 /
SM04
21 4 1 3 0 0.0000 0.0000 0.0000 0 0 10 'xxxxxxxxx'
0.920 0.300 0.220 0.510 0.000 0.220 0.002 158.0
0.130 0.000 5.200 0.029 0.000 3.177 2.000 0.034 0.000
0.000 /
187.0 0.89 1.0 1.15 1.0 1.0 0.058 0.62 -1.7
1.7 1.0 0.0 1.2 0.0 1.0 1.0 /
0.15 0.15 0.03 0.03 0.0001 0.0001 1.5 1.00 -0.1
0.1 1 /
1.2 0.5 1.5 0.05 7.0 0.38 0.05 -2.0 0.98 -
2.0 2.0 0.15 0.0 1.0 0.5 1.0 /
-999 /
1 A 2 1.00 0.0 0.00 1.0 0.0 0.0 0. 0. 2. 1. 0. 2. 1. 0.
2 A 2 1.00 0.0 0.00 1.0 0.0 0.0 0. 0. 2. 1. 0. 2. 1. 0.
-999 /
1 0.8 0.08 13.8 1 1.2 0.2 138. 1 0.6 13.8 1 1.3 13.8 1 0.1 13.8 1 1 0.35 1 140.
70. 10 /
-999 /
/

```


APÊNDICE C

Mapeamento das Direções: Região de Segurança

Este Apêndice apresenta os resultados completos de mapeamento da Região de Segurança Dinâmica, fornecidos pelo software ORGANON.

TABELA C.1 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 1.

Variação do índice de Estabilidade na Direção 1																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	210,18	359,26	221,10	315,61	231,28	274,87	241,47	234,17	251,65	193,39	262,56	149,74	272,75	109,00
1	110 - 150	0,850		0,870		0,878		0,884		0,889		0,922		0,894		0,737	
2	112 - 180	0,909		0,943		0,949		0,988		0,968		0,840		0,845		0,708	
3	180 - 190	0,968		0,960		0,967		0,967		0,951		0,951		0,847		0,823	
4	130 - 120	0,976		0,845		0,846		0,859		0,861		0,864		0,866		0,869	
5	190 - 231	0,926		0,930		0,936		0,938		0,945		0,945		0,934		0,911	
6	131 - 221	0,925		0,938		0,941		0,944		0,931		0,927		0,943		0,935	
7	132 - 131	0,873		0,890		0,889		0,891		0,896		0,902		0,910		0,910	
8	231 - 190	0,952		0,955		0,963		0,964		0,964		0,971		0,964		0,908	
9	230 - 220	0,949		0,950		0,985		0,925		0,923		0,920		0,912		0,900	
7	150 - 100	0,767		0,768		0,769		0,769		0,769		0,769		0,771		0,771	
11	200 - 210	0,434		0,638		0,762		0,855		0,946		0,784		0,620		0,174	
12	100 - 120	0,207		0,179		0,190		0,198		0,196		0,186		0,165		0,145	

TABELA C.2 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 6.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 6																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	213,24	410,48	227,43	421,72	240,68	432,20	253,92	442,69	268,11	463,92	281,35	464,40	294,59	474,89
1	110 - 150	0,850		0,881		0,891		0,900		0,868		0,848		0,829		0,830	
2	112 - 180	0,909		0,898		0,912		0,871		0,872		0,886		0,895		0,904	
3	180 - 190	0,968		0,959		0,954		0,951		0,939		0,917		0,908		0,927	
4	130 - 120	0,976		0,863		0,886		0,902		0,907		0,913		0,909		0,914	
5	190 - 231	0,926		0,931		0,939		0,939		0,942		0,921		0,907		0,895	
6	131 - 221	0,925		0,938		0,944		0,943		0,940		0,861		0,833		0,806	
7	132 - 131	0,873		0,891		0,889		0,891		0,896		0,892		0,886		0,879	
8	231 - 190	0,952		0,957		0,961		0,963		0,962		0,900		0,840		0,800	
9	230 - 220	0,949		0,952		0,964		0,951		0,955		0,888		0,811		0,759	
7	150 - 100	0,767		0,767		0,769		0,772		0,776		0,826		0,834		0,841	
11	200 - 210	0,434		0,419		0,364		0,321		0,278		0,218		0,165		0,124	
12	100 - 120	0,207		0,182		0,201		0,194		0,200		0,205		0,226		0,223	

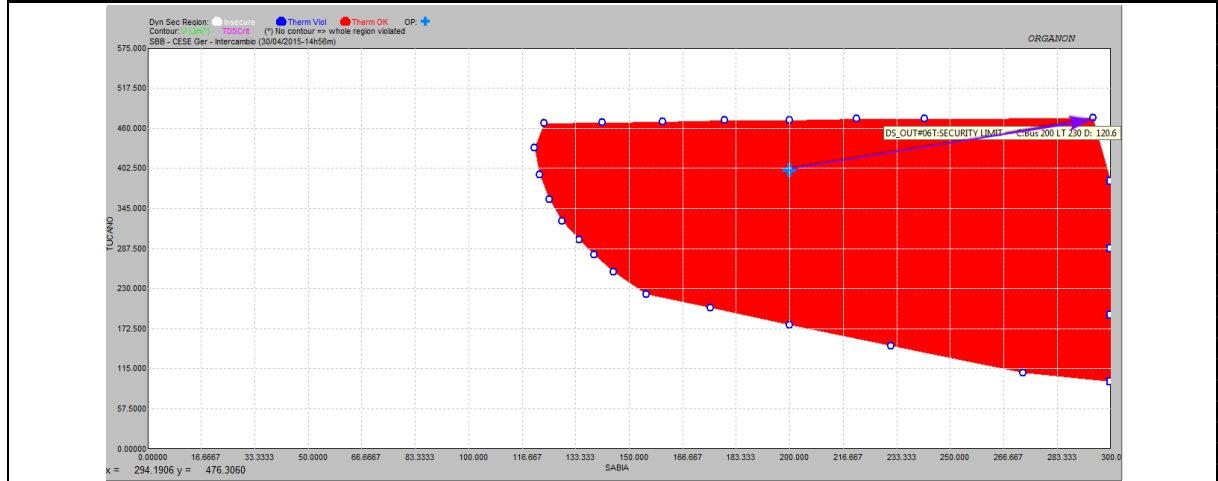


TABELA C.3 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 7.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 7																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	206,73	411,78	212,21	421,36	218,1	431,67	224,41	442,71	229,88	452,29	236,19	463,33	242,09	473,65
1	110 - 150	0,850		0,868		0,880		0,885		0,893		0,896		0,896		0,900	
2	112 - 180	0,909		0,901		0,898		0,900		0,887		0,880		0,975		0,869	
3	180 - 190	0,968		0,956		0,958		0,964		0,953		0,954		0,953		0,943	
4	130 - 120	0,976		0,860		0,870		0,872		0,884		0,897		0,899		0,902	
5	190 - 231	0,926		0,928		0,931		0,934		0,938		0,937		0,938		0,902	
6	131 - 221	0,925		0,936		0,937		0,939		0,944		0,946		0,948		0,948	
7	132 - 131	0,873		0,881		0,889		0,892		0,887		0,889		0,892		0,890	
8	231 - 190	0,952		0,955		0,958		0,959		0,960		0,962		0,962		0,957	
9	230 - 220	0,949		0,948		0,951		0,952		0,958		0,956		0,961		0,959	
7	150 - 100	0,767		0,767		0,767		0,767		0,767		0,768		0,769		0,770	
11	200 - 210	0,434		0,409		0,349		0,314		0,268		0,218		0,196		0,085	
12	100 - 120	0,207		0,170		0,176		0,184		0,189		0,193		0,196		0,199	

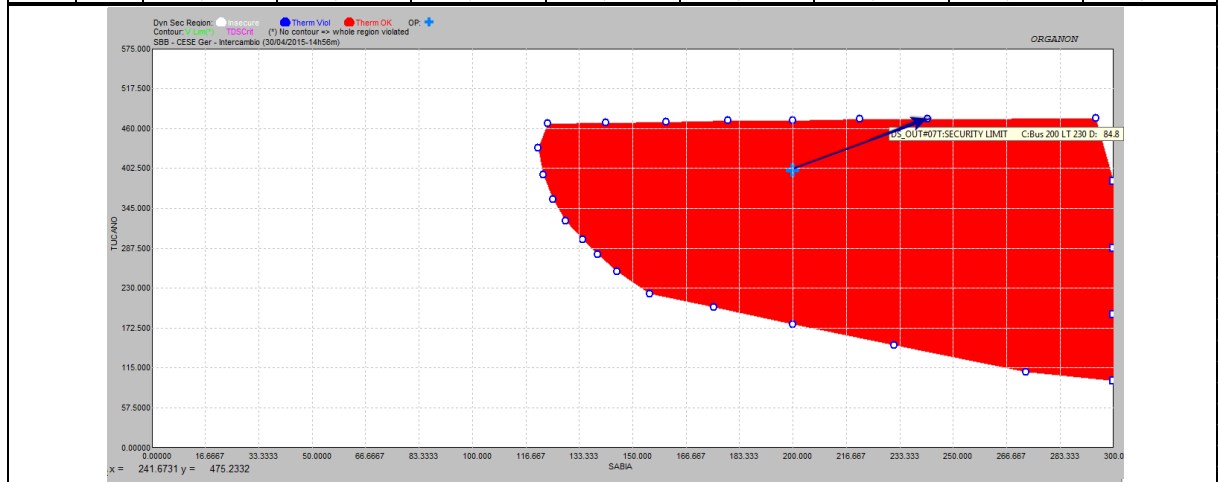


TABELA C.4 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 8.

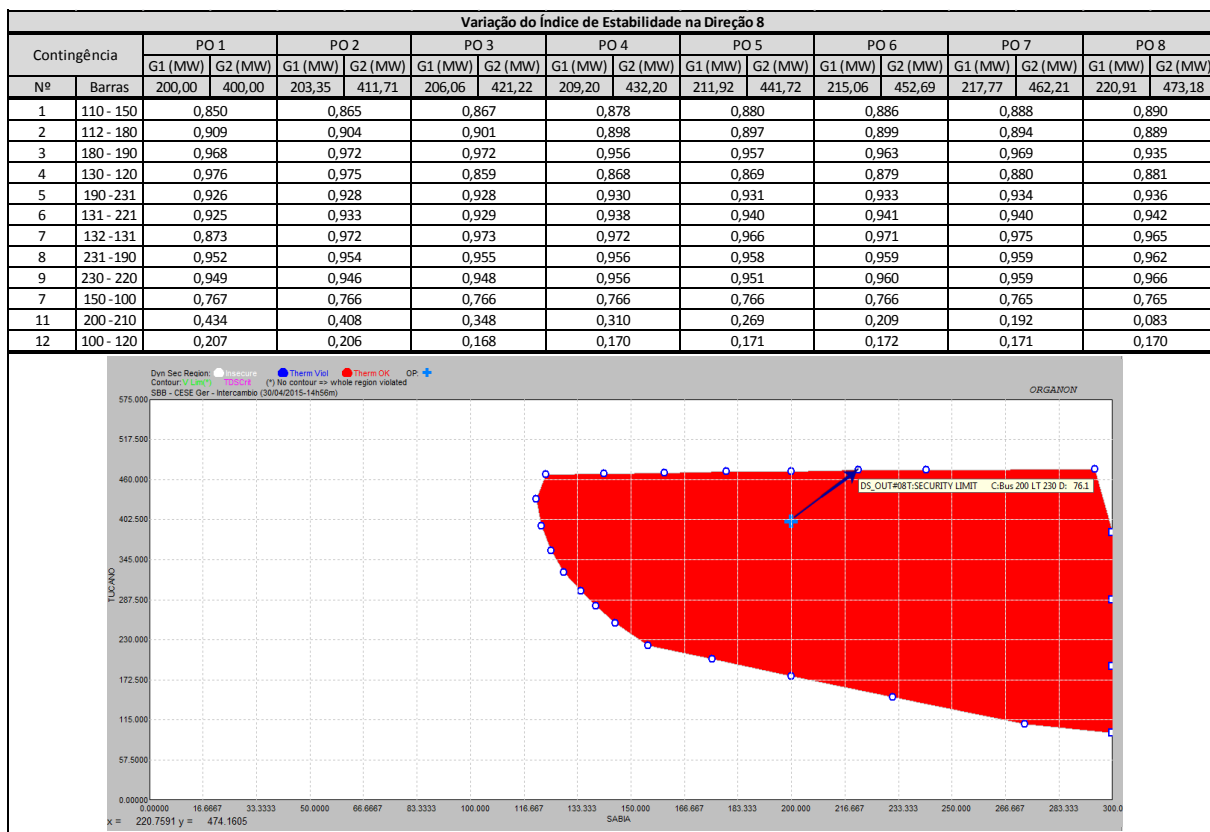


TABELA C.5 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 9.

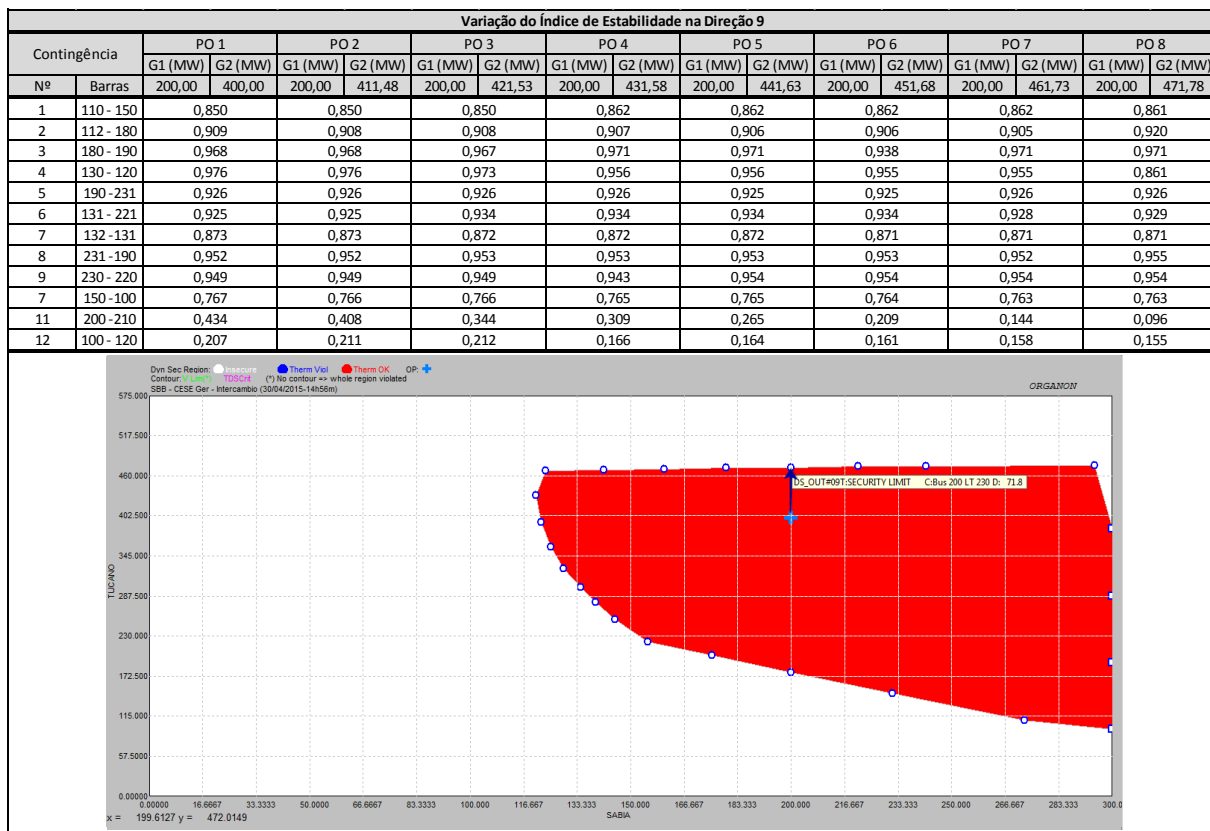


TABELA C.6 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 10.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 10																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	196,96	410,65	194,12	420,56	191,28	430,53	188,44	440,47	185,60	450,51	182,76	460,35	179,72	471,00
1	110 - 150	0,850		0,847		0,844		0,841		0,838		0,835		0,832		0,828	
2	112 - 180	0,909		0,912		0,915		0,918		0,922		0,925		0,928		0,932	
3	180 - 190	0,968		0,966		0,965		0,964		0,962		0,961		0,959		0,974	
4	130 - 120	0,976		0,920		0,911		0,902		0,892		0,882		0,871		0,858	
5	190 - 231	0,926		0,929		0,926		0,923		0,920		0,917		0,915		0,913	
6	131 - 221	0,925		0,922		0,930		0,928		0,926		0,924		0,921		0,907	
7	132 - 131	0,873		0,870		0,866		0,862		0,858		0,855		0,848		0,839	
8	231 - 190	0,952		0,951		0,950		0,949		0,948		0,947		0,944		0,942	
9	230 - 220	0,949		0,948		0,947		0,946		0,945		0,950		0,949		0,948	
7	150 - 100	0,767		0,766		0,766		0,765		0,764		0,763		0,763		0,762	
11	200 - 210	0,434		0,411		0,347		0,309		0,266		0,229		0,146		0,088	
12	100 - 120	0,207		0,165		0,160		0,154		0,194		0,175		0,142		0,194	

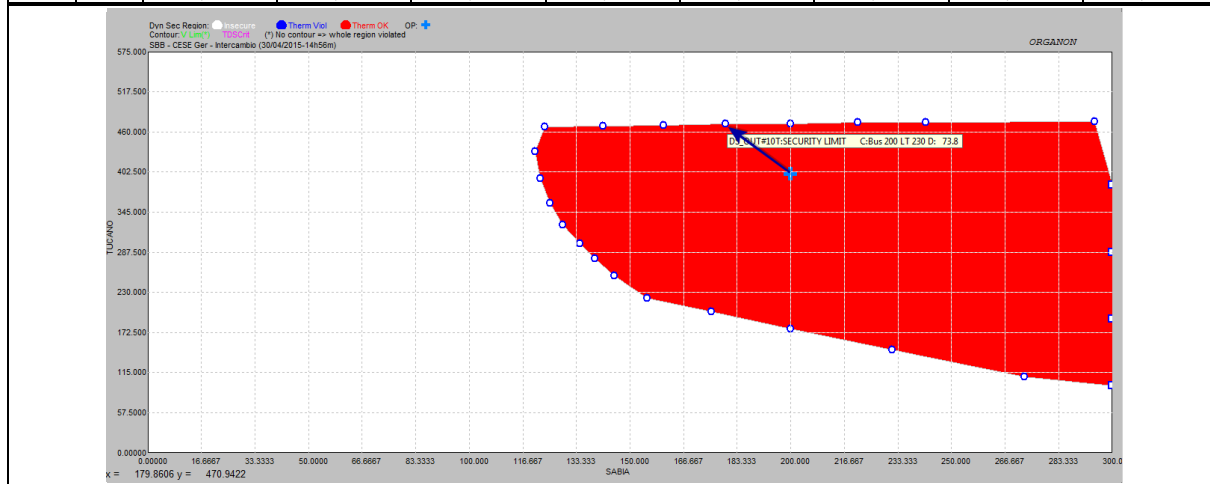


TABELA C.7 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 11.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 11																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	194,06	410,39	188,52	420,09	182,98	429,79	177,04	440,18	171,50	449,88	165,56	460,28	160,41	469,28
1	110 - 150	0,850		0,844		0,825		0,821		0,816		0,812		0,809		0,966	
2	112 - 180	0,909		0,916		0,919		0,919		0,925		0,931		0,938		0,999	
3	180 - 190	0,968		0,965		0,963		0,961		0,958		0,962		0,958		0,973	
4	130 - 120	0,976		0,912		0,894		0,876		0,850		0,826		0,792		0,754	
5	190 - 231	0,926		0,926		0,919		0,914		0,909		0,904		0,896		0,887	
6	131 - 221	0,925		0,919		0,925		0,921		0,913		0,906		0,894		0,880	
7	132 - 131	0,873		0,867		0,859		0,851		0,833		0,812		0,785		0,750	
8	231 - 190	0,952		0,950		0,948		0,943		0,938		0,933		0,928		0,923	
9	230 - 220	0,949		0,947		0,944		0,940		0,939		0,963		0,961		0,964	
7	150 - 100	0,767		0,766		0,765		0,765		0,764		0,763		0,762		0,761	
11	200 - 210	0,434		0,411		0,343		0,295		0,257		0,229		0,132		0,098	
12	100 - 120	0,207		0,161		0,151		0,178		0,138		0,167		0,144		0,116	

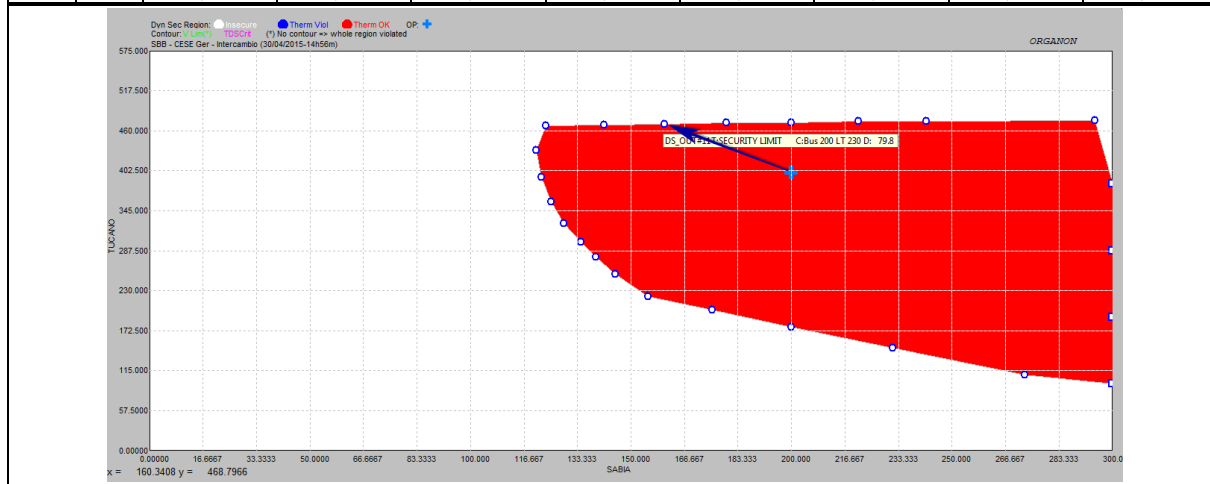


TABELA C.8 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 12.

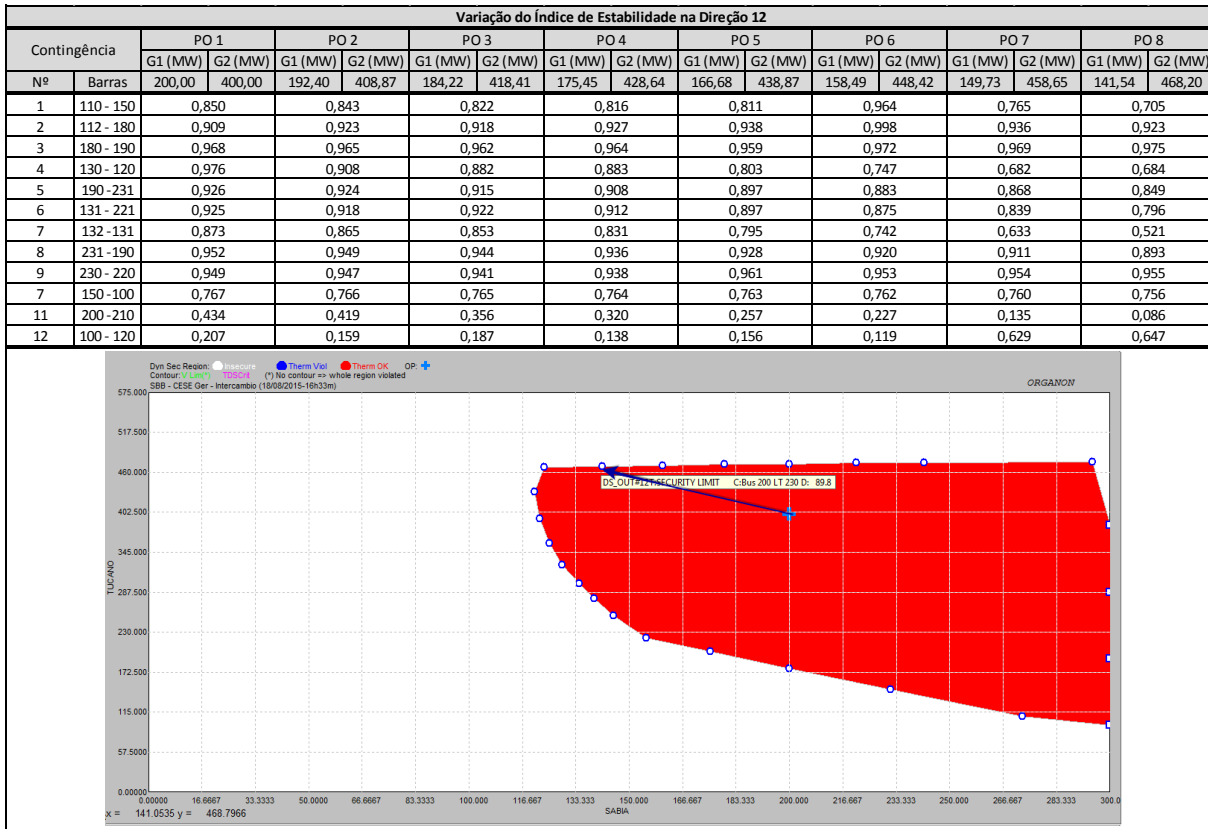


TABELA C.9 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 13.

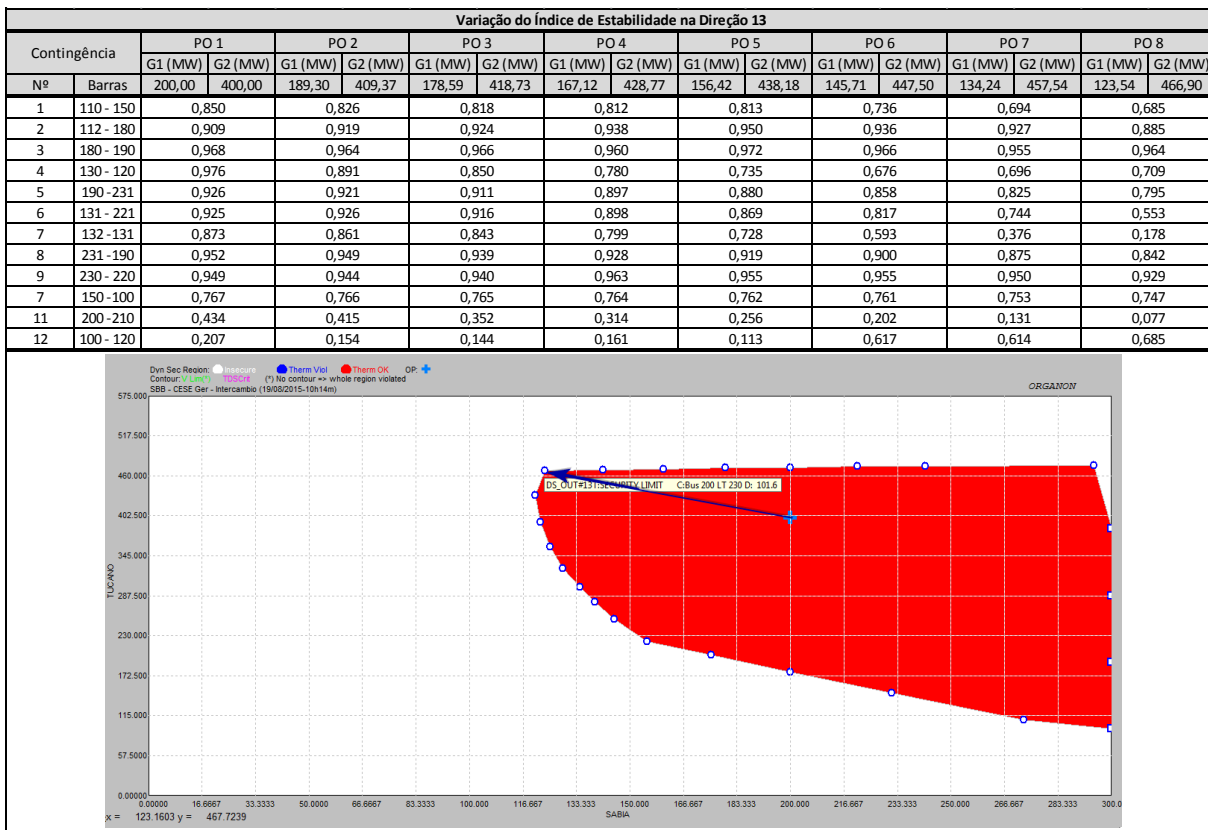


TABELA C.10 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 14.

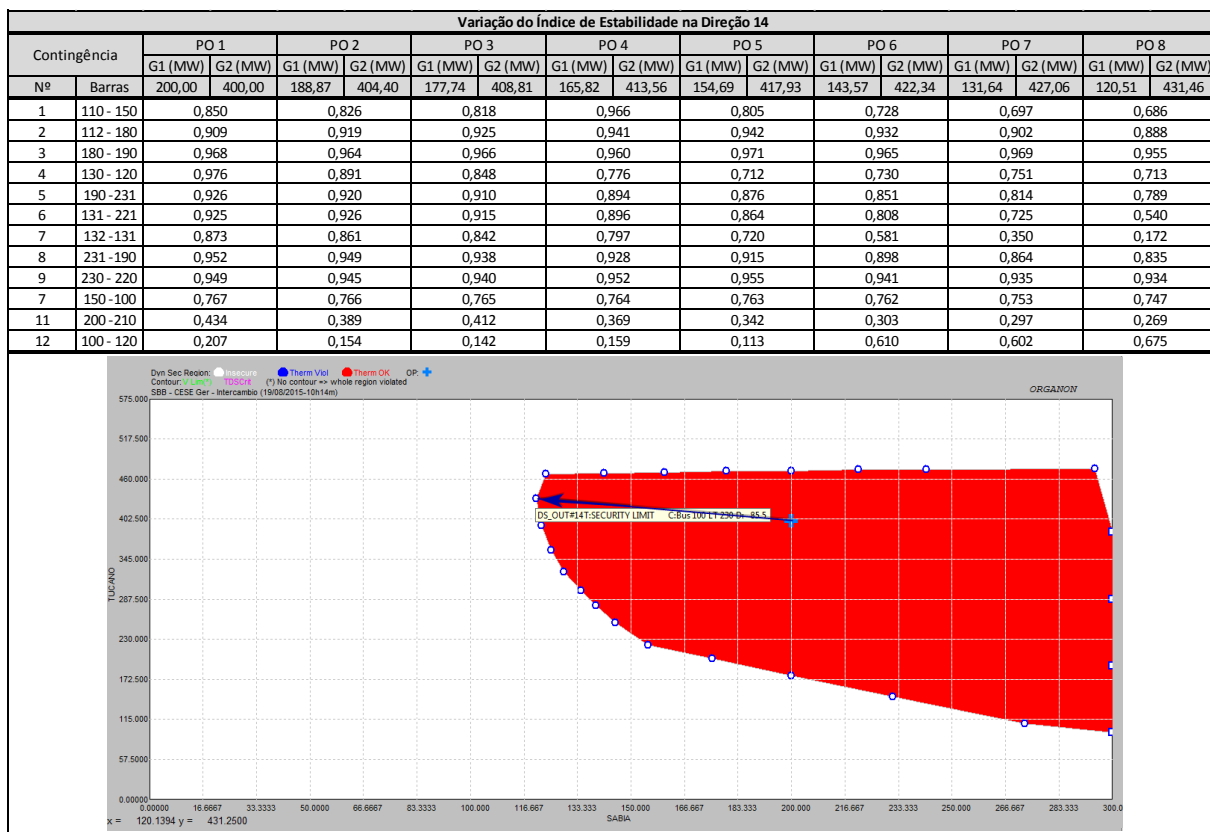


TABELA C.11 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 15.

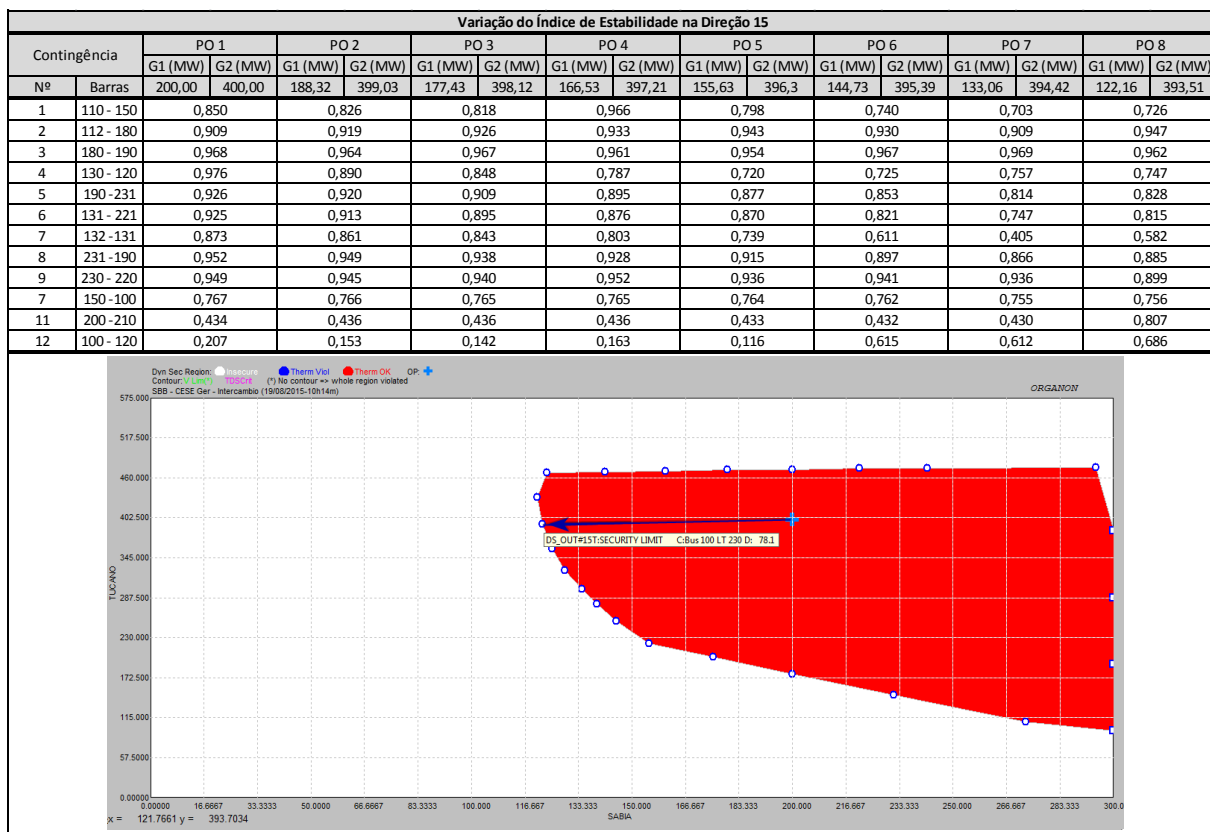


TABELA C.12 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 16.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 16																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	188,76	393,68	178,27	387,78	167,78	381,88	157,29	375,97	146,05	369,65	135,56	363,75	125,07	357,85
1	110 - 150	0,850		0,827		0,819		0,965		0,811		0,754		0,711		0,701	
2	112 - 180	0,909		0,919		0,926		0,933		0,973		0,934		0,914		0,865	
3	180 - 190	0,968		0,964		0,968		0,962		0,957		0,968		0,949		0,966	
4	130 - 120	0,976		0,892		0,854		0,801		0,732		0,728		0,754		0,758	
5	190 - 231	0,926		0,921		0,910		0,897		0,879		0,855		0,822		0,779	
6	131 - 221	0,925		0,914		0,896		0,879		0,854		0,834		0,765		0,613	
7	132 - 131	0,873		0,862		0,847		0,812		0,761		0,954		0,937		0,933	
8	231 - 190	0,952		0,948		0,938		0,929		0,916		0,897		0,872		0,835	
9	230 - 220	0,949		0,945		0,922		0,952		0,936		0,942		0,913		0,920	
7	150 - 100	0,767		0,766		0,766		0,765		0,764		0,763		0,756		0,750	
11	200 - 210	0,434		0,469		0,482		0,500		0,536		0,569		0,726		0,700	
12	100 - 120	0,207		0,156		0,204		0,467		0,118		0,154		0,122		0,106	

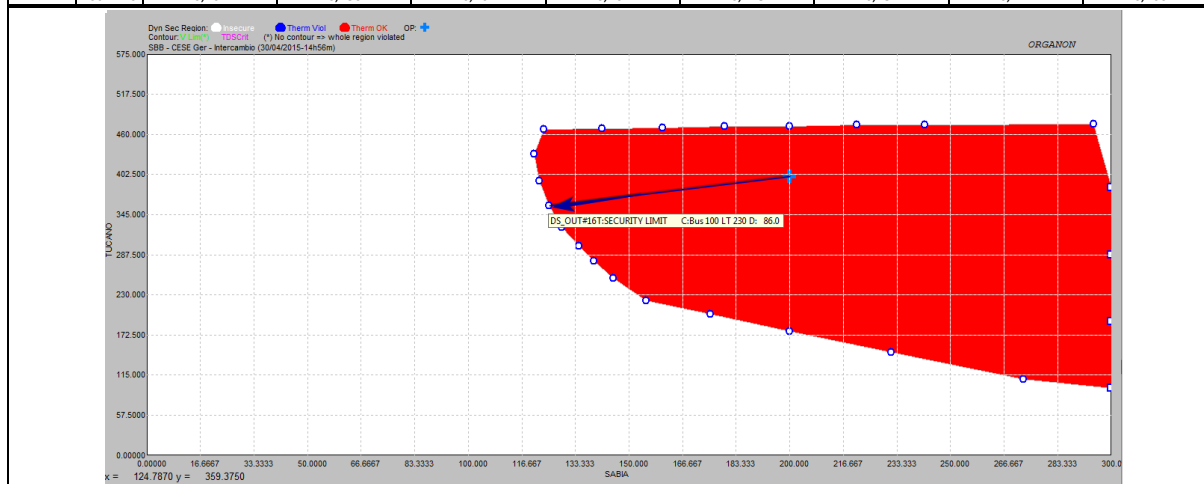


TABELA C.13 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 17.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 17																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	190,08	389,67	179,46	378,91	169,54	368,27	159,62	357,94	146,87	344,66	139,08	366,54	129,16	326,21
1	110 - 150	0,850		0,827		0,820		0,965		0,827		0,762		0,722		0,708	
2	112 - 180	0,909		0,919		0,944		1,000		0,971		0,966		0,964		0,890	
3	180 - 190	0,968		0,965		0,961		0,964		0,959		0,971		0,966		0,968	
4	130 - 120	0,976		0,896		0,861		0,815		0,751		0,731		0,742		0,765	
5	190 - 231	0,926		0,922		0,911		0,899		0,883		0,856		0,835		0,788	
6	131 - 221	0,925		0,916		0,898		0,884		0,864		0,824		0,804		0,675	
7	132 - 131	0,873		0,864		0,850		0,820		0,784		0,663		0,588		0,439	
8	231 - 190	0,952		0,950		0,939		0,929		0,918		0,897		0,879		0,847	
9	230 - 220	0,949		0,945		0,923		0,941		0,937		0,917		0,916		0,924	
7	150 - 100	0,767		0,766		0,766		0,765		0,764		0,762		0,760		0,751	
11	200 - 210	0,434		0,487		0,531		0,585		0,634		0,767		0,782		0,760	
12	100 - 120	0,207		0,156		0,171		0,177		0,121		0,622		0,641		0,671	

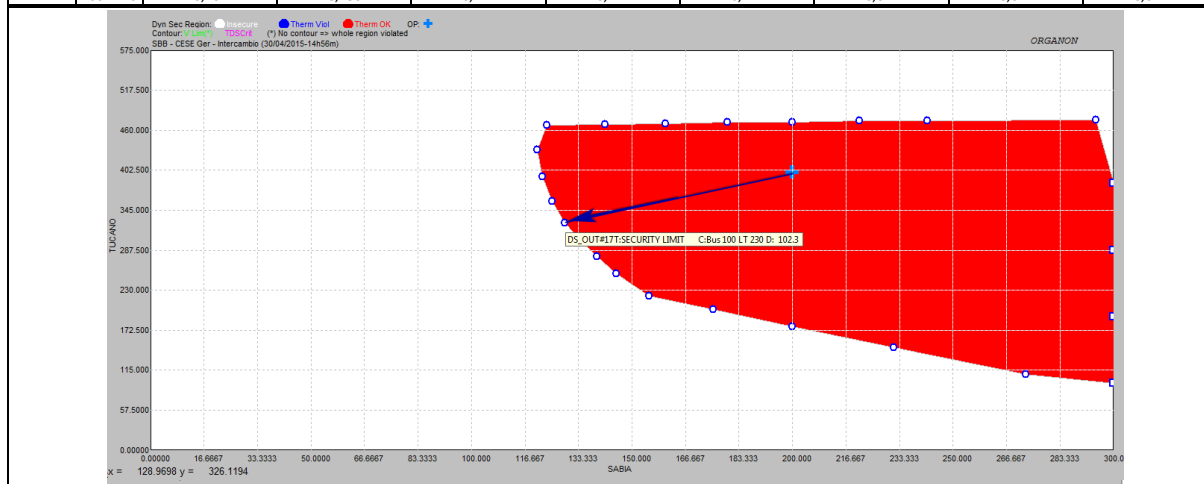


TABELA C.14 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 18.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 18																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	190,80	386,02	180,95	371,03	171,76	357,05	162,56	343,06	152,71	328,08	143,52	314,10	134,32	300,11
1	110 - 150	0,850		0,828		0,821		0,818		0,845		0,801		0,744		0,716	
2	112 - 180	0,909		0,920		0,946		0,934		0,969		0,967		0,963		0,949	
3	180 - 190	0,968		0,965		0,962		0,959		0,962		0,973		0,968		0,957	
4	130 - 120	0,976		0,899		0,868		0,830		0,777		0,731		0,738		0,760	
5	190 - 231	0,926		0,923		0,912		0,902		0,888		0,868		0,843		0,811	
6	131 - 221	0,925		0,924		0,905		0,888		0,872		0,849		0,837		0,789	
7	132 - 131	0,873		0,865		0,854		0,830		0,803		0,746		0,653		0,509	
8	231 - 190	0,952		0,950		0,941		0,931		0,920		0,905		0,890		0,868	
9	230 - 220	0,949		0,945		0,924		0,91		0,937		0,924		0,946		0,911	
7	150 - 100	0,767		0,766		0,766		0,765		0,764		0,762		0,760		0,753	
11	200 - 210	0,434		0,501		0,575		0,626		0,803		0,807		0,799		0,786	
12	100 - 120	0,207		0,157		0,176		0,188		0,131		0,641		0,658		0,624	

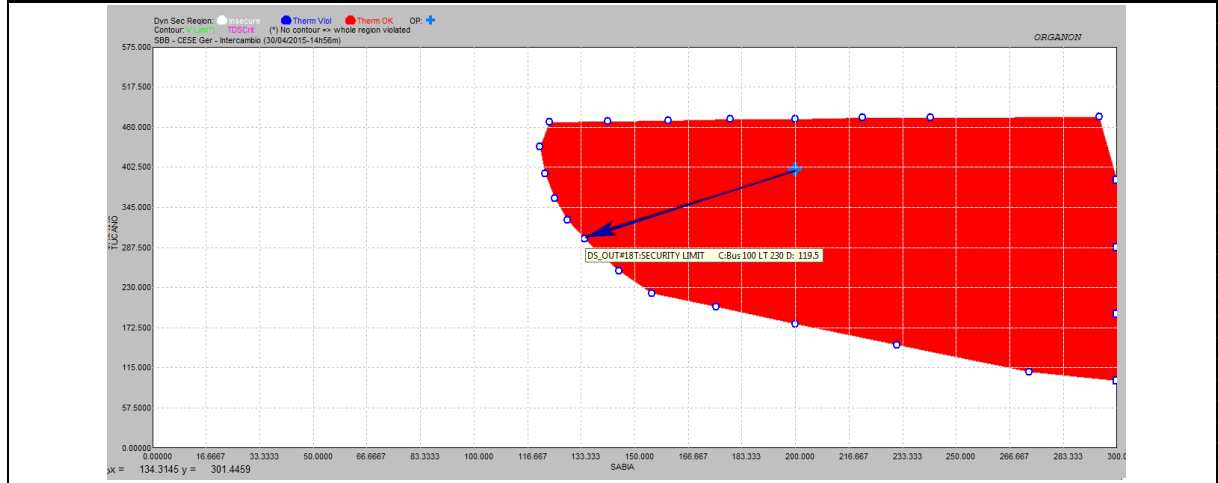


TABELA C.15 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 19.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 19																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	191,47	382,47	182,93	365,86	173,79	347,57	165,25	330,51	156,11	312,22	147,57	295,15	139,04	278,08
1	110 - 150	0,850		0,829		0,822		0,818		0,965		0,822		0,771		0,726	
2	112 - 180	0,909		0,920		0,948		0,959		0,968		0,966		0,950		0,947	
3	180 - 190	0,968		0,965		0,963		0,960		0,964		0,955		0,969		0,962	
4	130 - 120	0,976		0,901		0,876		0,841		0,798		0,744		0,734		0,747	
5	190 - 231	0,926		0,924		0,915		0,904		0,892		0,875		0,855		0,828	
6	131 - 221	0,925		0,925		0,916		0,892		0,880		0,862		0,840		0,815	
7	132 - 131	0,873		0,866		0,858		0,840		0,818		0,780		0,699		0,582	
8	231 - 190	0,952		0,951		0,943		0,933		0,923		0,913		0,897		0,885	
9	230 - 220	0,949		0,945		0,925		0,912		0,906		0,953		0,917		0,899	
7	150 - 100	0,767		0,766		0,766		0,765		0,764		0,762		0,759		0,756	
11	200 - 210	0,434		0,514		0,602		0,666		0,816		0,818		0,814		0,807	
12	100 - 120	0,207		0,158		0,182		0,189		0,132		0,651		0,672		0,686	

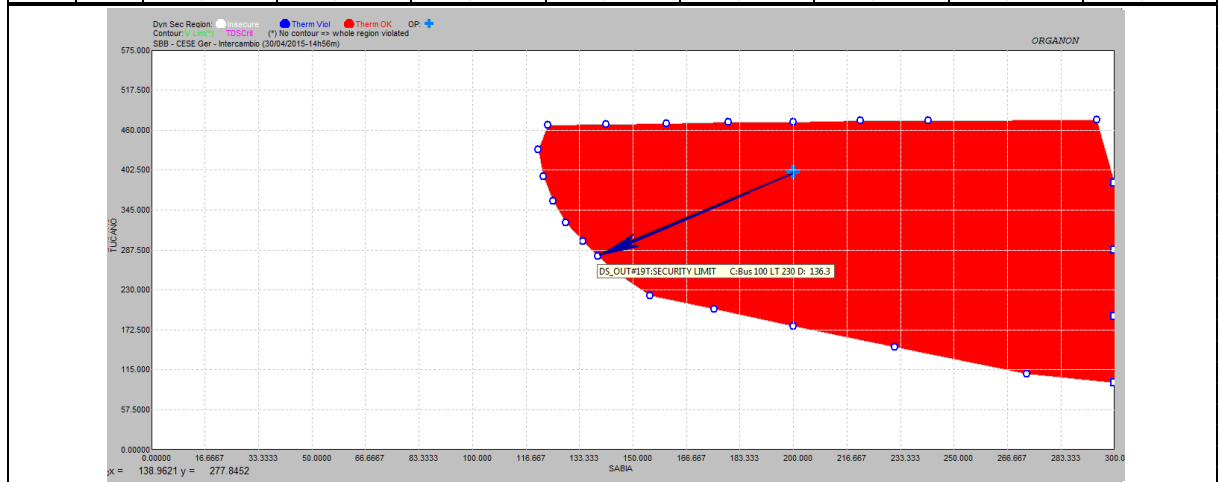


TABELA C.16 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 20.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 20																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	192,32	379,53	184,09	357,58	176,41	337,11	168,74	316,63	160,51	294,69	152,83	274,21	145,15	253,73
1	110 - 150	0,850		0,829		0,823		0,818		0,965		0,966		0,805		0,757	
2	112 - 180	0,909		0,921		0,948		0,961		0,966		0,959		0,950		0,935	
3	180 - 190	0,968		0,966		0,963		0,961		0,966		0,959		0,970		0,968	
4	130 - 120	0,976		0,904		0,881		0,839		0,796		0,774		0,739		0,738	
5	190 - 231	0,926		0,925		0,916		0,907		0,897		0,884		0,868		0,849	
6	131 - 221	0,925		0,926		0,918		0,897		0,888		0,875		0,871		0,852	
7	132 - 131	0,873		0,868		0,861		0,851		0,832		0,812		0,773		0,726	
8	231 - 190	0,952		0,952		0,944		0,936		0,926		0,916		0,919		0,887	
9	230 - 220	0,949		0,93		0,925		0,915		0,910		0,932		0,910		0,864	
7	150 - 100	0,767		0,766		0,766		0,765		0,763		0,761		0,759		0,755	
11	200 - 210	0,434		0,533		0,628		0,703		0,830		0,831		0,830		0,819	
12	100 - 120	0,207		0,159		0,185		0,134		0,134		0,663		0,687		0,664	

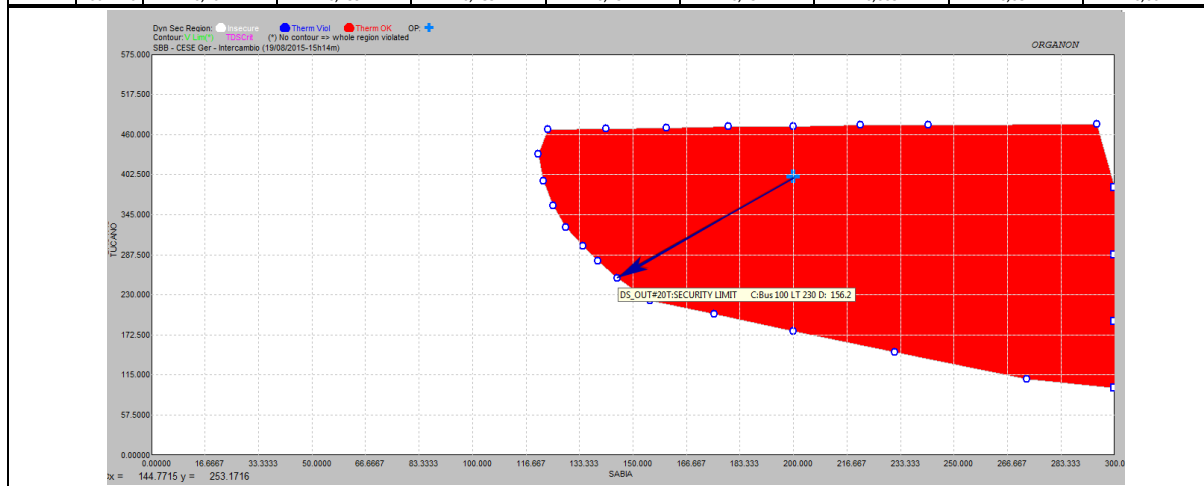


TABELA C.17 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 21.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 21																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	193,76	375,02	187,06	348,26	180,82	323,28	174,58	298,30	167,88	271,54	162,09	248,34	155,40	221,58
1	110 - 150	0,850		0,830		0,825		0,82		0,816		0,811		0,966		0,971	
2	112 - 180	0,909		0,922		0,951		0,963		0,966		0,955		0,946		0,931	
3	180 - 190	0,968		0,966		0,965		0,963		0,959		0,973		0,969		0,966	
4	130 - 120	0,976		0,908		0,892		0,862		0,835		0,798		0,793		0,752	
5	190 - 231	0,926		0,926		0,919		0,913		0,905		0,912		0,887		0,908	
6	131 - 221	0,925		0,928		0,922		0,903		0,898		0,904		0,898		0,889	
7	132 - 131	0,873		0,870		0,866		0,862		0,853		0,843		0,821		0,793	
8	231 - 190	0,952		0,953		0,947		0,940		0,943		0,924		0,916		0,917	
9	230 - 220	0,949		0,931		0,914		0,924		0,959		0,920		0,891		0,845	
7	150 - 100	0,767		0,767		0,766		0,765		0,763		0,761		0,758		0,753	
11	200 - 210	0,434		0,559		0,665		0,847		0,842		0,846		0,830		0,143	
12	100 - 120	0,207		0,162		0,149		0,155		0,152		0,639		0,707		0,693	

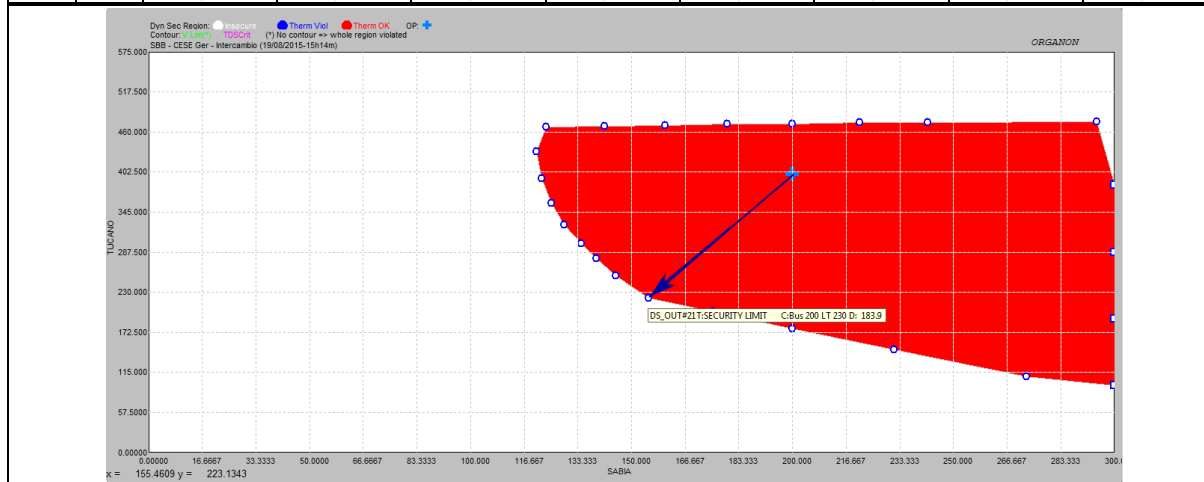


TABELA C.18 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 22.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 22																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	196,53	372,27	192,82	342,55	189,35	314,82	185,89	287,09	182,42	259,36	178,71	229,64	175,24	201,91
1	110 - 150	0,850		0,832		0,829		0,825		0,822		0,817		0,812		0,921	
2	112 - 180	0,909		0,927		0,956		0,968		0,970		0,962		0,950		0,935	
3	180 - 190	0,968		0,967		0,967		0,968		0,966		0,964		0,974		0,968	
4	130 - 120	0,976		0,916		0,908		0,895		0,886		0,876		0,876		0,865	
5	190 - 231	0,926		0,929		0,926		0,924		0,916		0,911		0,908		0,909	
6	131 - 221	0,925		0,930		0,928		0,925		0,910		0,923		0,922		0,921	
7	132 - 131	0,873		0,873		0,873		0,874		0,876		0,878		0,877		0,871	
8	231 - 190	0,952		0,956		0,953		0,950		0,951		0,937		0,938		0,935	
9	230 - 220	0,949		0,932		0,924		0,932		0,949		0,932		0,895		0,852	
7	150 - 100	0,767		0,767		0,766		0,765		0,764		0,761		0,758		0,754	
11	200 - 210	0,434		0,574		0,685		0,862		0,852		0,856		0,769		0,151	
12	100 - 120	0,207		0,165		0,156		0,185		0,148		0,144		0,666		0,687	

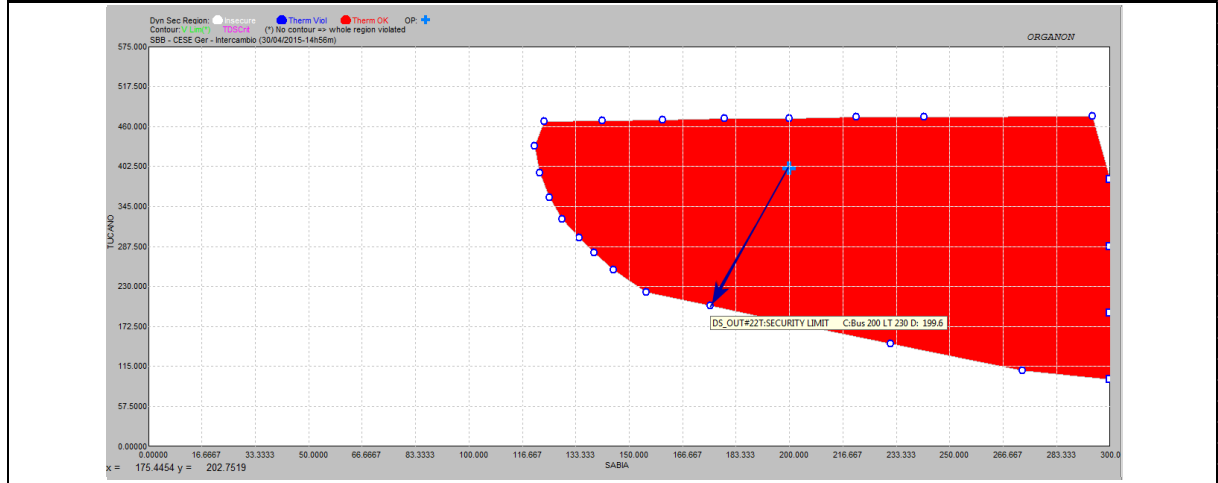


TABELA C.19 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 23.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 23																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	200,00	368,87	200,00	335,51	200,00	304,38	200,00	273,24	200,00	242,11	200,00	208,75	200,00	177,62
1	110 - 150	0,850		0,850		0,849		0,833		0,833		0,844		0,841		0,838	
2	112 - 180	0,909		0,931		0,962		0,973		0,973		0,971		0,922		0,876	
3	180 - 190	0,968		0,969		0,970		0,962		0,962		0,97		0,962		0,976	
4	130 - 120	0,976		0,924		0,927		0,923		0,923		0,973		0,955		0,948	
5	190 - 231	0,926		0,933		0,936		0,924		0,924		0,945		0,931		0,947	
6	131 - 221	0,925		0,933		0,934		0,935		0,935		0,935		0,937		0,931	
7	132 - 131	0,873		0,876		0,879		0,884		0,884		0,88		0,876		0,876	
8	231 - 190	0,952		0,959		0,959		0,95		0,950		0,959		0,959		0,958	
9	230 - 220	0,949		0,933		0,985		0,973		0,973		0,942		0,920		0,879	
7	150 - 100	0,767		0,767		0,767		0,766		0,766		0,762		0,758		0,754	
11	200 - 210	0,434		0,593		0,708		0,848		0,848		0,897		0,624		0,134	
12	100 - 120	0,207		0,206		0,207		0,158		0,158		0,156		0,119		0,102	

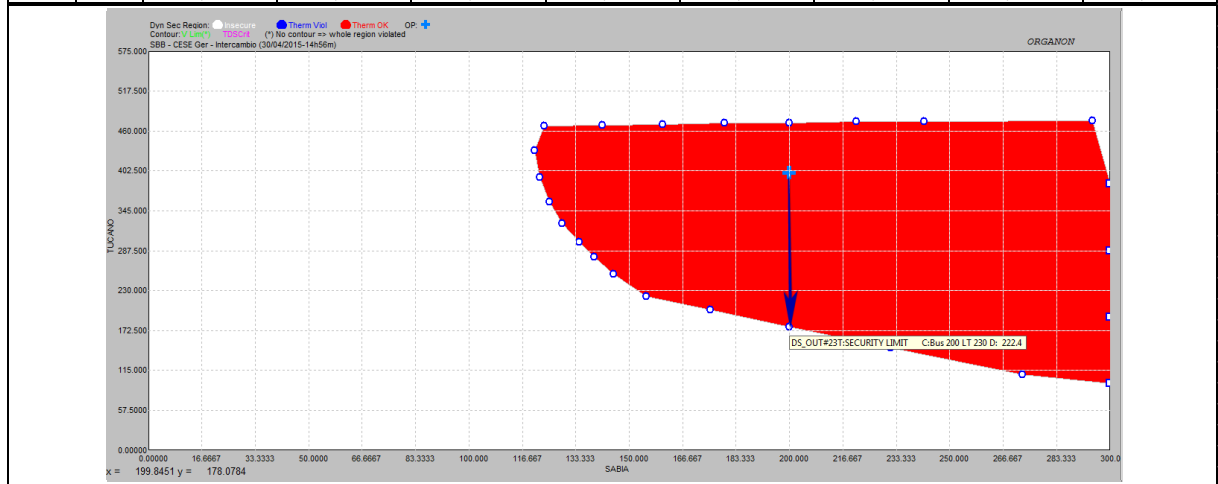


TABELA C.20 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE NA DIREÇÃO 24.

Variação do Índice de Estabilidade na Direção 24																	
Contingência		PO 1		PO 2		PO 3		PO 4		PO 5		PO 6		PO 7		PO 8	
		G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)	G1 (MW)	G2 (MW)
Nº	Barras	200,00	400,00	204,41	364,71	209,14	326,9	213,55	291,61	217,96	256,32	222,69	218,51	227,1	183,23	231,51	147,94
1	110 - 150	0,850		0,854		0,854		0,86		0,863		0,874		0,875		0,875	
2	112 - 180	0,909		0,936		0,936		0,977		0,973		0,890		0,895		0,828	
3	180 - 190	0,968		0,972		0,972		0,974		0,964		0,962		0,952		0,939	
4	130 - 120	0,976		0,974		0,974		0,843		0,842		0,84		0,959		0,945	
5	190 - 231	0,926		0,938		0,938		0,932		0,949		0,942		0,938		0,938	
6	131 - 221	0,925		0,935		0,935		0,941		0,945		0,939		0,947		0,952	
7	132 - 131	0,873		0,881		0,881		0,886		0,884		0,885		0,888		0,889	
8	231 - 190	0,952		0,953		0,953		0,964		0,965		0,961		0,961		0,960	
9	230 - 220	0,949		0,951		0,951		0,969		0,921		0,916		0,910		0,901	
7	150 - 100	0,767		0,768		0,768		0,767		0,765		0,763		0,760		0,756	
11	200 - 210	0,434		0,613		0,613		0,838		0,846		0,810		0,624		0,181	
12	100 - 120	0,207		0,168		0,168		0,165		0,159		0,203		0,139		0,145	