

unesp



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

***"ÍNDICES DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA
DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA"***

Oscar Cezar Fernandes Neto

Ilha Solteira - SP

1210001263



unesp



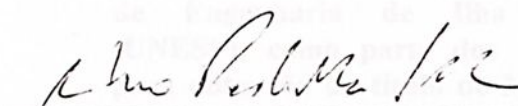
“INDICES DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA”

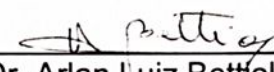
Oscar Cezar Fernandes Neto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA
SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA (ME).

Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira – Vice-Coordenador

COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin - orientador


Prof. Dr. Arlan Luiz Bettiol


Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi

Ilha Solteira – SP, dezembro de 2001

07/12/2001

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AGRADECIMENTOS

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

ÍNDICES DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA
DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Doc. 071/2002 - NPD 23

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
06.05.02	30.05.02
REGISTRADO POR	TOMBO
Aleza	Te. 1263
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Ilha Solteira antiga R\$ 10,00	F363i

"Dissertação apresentada a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica"

Oscar Cezar Fernandes Neto

Orientador: Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin

Ilha Solteira, Dezembro/01.

CD
Nº 197905 01/09/03
Nº 55472
30400007

BCpIS - FEIS - UNESP

1210001263



AGRADECIMENTOS

- Aos meus pais que tanto investiram em mim, e que insistiram tanto para que os filhos estudassem para assim terem um futuro melhor.
- Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica que tanto me ajudaram e sem os quais vários obstáculos seriam muito mais difíceis de transpor. Principalmente ao funcionário Deoclécio Mitsuiti Kosada que nunca mediu esforços para me ajudar.
- Aos meus colegas que muitas vezes me ajudaram a trabalhar com mais afinco e prazer.
- Ao meu orientador Antonio Padilha Feltrin, pelo estímulo e paciência que teve durante todo o período de minha formação.
- A FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) sem a qual não terminaria o mestrado.
- A minha namorada, Magda Lúcia Rodrigues Sanchez, que nos piores momentos sempre me animava a continuar.

ÍNDICE

RESUMO	1
ABSTRACT	2
I – INTRODUÇÃO.....	3
II - ESTUDO DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA	6
2.1. INTRODUÇÃO	6
2.2. EQUAÇÃO DE BALANÇO	7
2.3. RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA E ÂNGULO EM MÁQUINAS SÍNCRONAS ...	13
2.3.1. REPRESENTAÇÃO CLÁSSICA DA MÁQUINA SÍNCRONA EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE.....	14
2.3.2. SISTEMA MÁQUINA CONTRA BARRAMENTO INFINITO – O MODELO CLÁSSICO	16
2.4. FORMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE BALANÇO EM RELAÇÃO AO CENTRO DE INÉRCIA	22
2.5. SOLUÇÕES PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA	24
2.5.1. SIMULAÇÃO PASSO A PASSO	25
2.5.2. MÉTODOS DIRETOS.....	26
2.5.2.1. MÉTODO DA FUNÇÃO DE ENERGIA TRANSITÓRIA (TEF) OU DA FUNÇÃO DE LYAPUNOV.....	26
2.5.2.2. MÉTODO DA FUNÇÃO ENERGIA TRANSITÓRIA DA MÁQUINA CRÍTICA	33
2.5.2.3. MÉTODO DO CRITÉRIO DAS ÁREAS IGUAIS ESTENDIDO (EEAC)	34



2.5.3. MÉTODOS HÍBRIDOS	34
2.5.3.1. MÉTODO HÍBRIDO SIME (Single machine equivalent)	35
III – ÍNDICES DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA	36
3.1. INTRODUÇÃO	36
3.2. ALGORITMO PARA OBTENÇÃO DOS ÍNDICES DE ESTABILIDADE.....	37
3.3. CÁLCULO DE ÍNDICES PARA INDICAR O GRAU DE SEVERIDADE DAS PERTURBAÇÕES	38
3.3.1. ÍNDICES BASEADOS NA COERÊNCIA.....	40
3.3.2. ÍNDICES BASEADOS NA CONVERSÃO TRANSITÓRIA DE ENERGIA..	42
3.3.3. ÍNDICES BASEADOS NO PRODUTO ESCALAR	44
3.3.4. ÍNDICE COMPOSTO.....	47
IV - RESULTADOS OBTIDOS PARA A ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA ATRAVÉS DE ÍNDICES DE DESEMPENHO.....	48
V - CONCLUSÃO.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICE A - MÉTODO HÍBRIDO PARA OBTENÇÃO DA MARGEM DE ESTABILIDADE	107
A.1. MÉTODO DE OBTENÇÃO DA MÁQUINA CRÍTICA.....	107
A.2. DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE ESTABILIDADE	108
A.2.1. SITUAÇÃO INSTÁVEL.....	110
A.2.2. SITUAÇÃO ESTÁVEL	111

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Representação esquemática de um gerador.8

FIGURA 2.2: Um sistema simples de duas máquinas:(a)Representação esquemática; (b) Relação entre ângulo e potência.14

FIGURA 2.3: Representação da máquina síncrona por uma tensão constante atrás da reatância transitória.....15

FIGURA 2.4: Uma máquina conectada a um barramento infinito através de uma linha de transmissão:(a) diagrama da linha; (b) circuito equivalente.16

FIGURA 2.5: Circuito equivalente para um sistema de uma máquina contra um barramento infinito.....18

FIGURA 2.6: Representação do gerador para cálculo de δ_020

FIGURA 2.7: Obtenção do ângulo real da tensão.....21

FIGURA 2.8: Região de atração com os pontos de equilíbrio.....27

FIGURA 2.9: Ilustração do método BCU.....32

FIGURA 2.10:Energia cinética para a máquina crítica 9. Sistema de 16 geradores. Caso instável.33

FIGURA 2.11:Energia cinética para a máquina crítica 9. Sistema de 16 geradores. Caso estável.33



FIGURA 3.1: Diagrama Unifilar do Sistema de 16 geradores e 68 barras.....	39
FIGURA 3.2: Ângulos do gerador para um caso estável em um sistema de 16-geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um $t_{cl} = 0,216$ s.....	40
FIGURA 3.3: Ângulos do gerador para um caso estável em um sistema de 16-geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um $t_{cl} = 0,256$ s.....	41
FIGURA 3.4: Curvas de energia potencial e cinética para um caso estável em um sistema de 16-geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um $t_{cl} = 0,216$ s.....	43
FIGURA 3.5: Curvas de energia potencial e cinética para um caso estável em um sistema de 16-geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um $t_{cl} = 0,256$ s.....	43
FIGURA 3.6: Curvas do primeiro produto escalar, para casos A e B, para um sistema de 16 geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um $t_{cl} = 0,216$ s (caso estável) e $t_{cl} = 0,256$ s (caso instável).....	45
FIGURA 3.7: Curvas do segundo produto escalar, para casos A e B, para um sistema de 16 geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um $t_{cl} = 0,216$ s (caso estável) e $t_{cl} = 0,256$ s (caso instável).....	46
FIGURA 3.8: Curvas do terceiro produto escalar, para casos A e B, para um sistema de 16 geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um $t_{cl} = 0,216$ s (caso estável) e $t_{cl} = 0,256$ s (caso instável).....	46
FIGURA 4.1: Critério de parada no 1º e 2º pico de energia potencial.....	51
FIGURA 4.2: Critérios de parada com tempo de simulação fixo.....	51
FIGURA 4.3: Critério de parada utilizando o segundo pico de potência elétrica da máquina crítica.....	52
FIGURA 4.4: Critério de parada utilizando o 2º pico de potência elétrica total.....	52
FIGURA 4.5: Sistema de 4 geradores e 6 barras.....	54
FIGURA 4.6.: Margem de estabilidade para o sistema de 4 geradores.....	55
FIGURA 4.7: Ângulo dos geradores para o sistema de 4 geradores, $t_{cl} = 0,530$ s. Caso instável.....	57
FIGURA 4.8: Energias cinética e potencial para o sistema de 4 geradores, $t_{cl} = 0,530$ s. Caso instável.....	57

FIGURA 4.9: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl}=0,300s$. Caso estável.	59
FIGURA 4.10: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl}=0,410s$. Caso estável.	59
FIGURA 4.11: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl}=0,430s$. Caso estável.	59
FIGURA 4.12: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl}=0,470s$. Caso instável.	59
FIGURA 4.13: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl}=0,530s$. Caso instável.	60
FIGURA 4.14: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl}=0,540s$. Caso instável.	60
FIGURA 4.15: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl} = 0,560s$. Caso instável.	60
FIGURA 4.16: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,300s$. Caso estável.	61
FIGURA 4.17: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,410s$. Caso estável.	61
FIGURA 4.18: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,430s$. Caso estável.	61
FIGURA 4.19: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,470s$. Caso instável.	61
FIGURA 4.20: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,530s$. Caso instável.	62
FIGURA 4.21: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,540s$. Caso instável.	62
FIGURA 4.22: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,560s$. Caso instável.	62
FIGURA 4.23.(a): Energia cinética e potencial para o sistema de 16 geradores, simulação completa. Caso instável.	64
FIGURA 4.23.(b): Ampliação da área marcada no caso (a).	65
FIGURA 4.24.(a): Produto escalar usado no cálculo em PI4 para o sistema de 16 geradores. Caso instável.	65
FIGURA 4.24.(b): Ampliação da área marcada no caso (a).	66
FIGURA 4.25: Energia cinética e potencial para uma falta ocorrida na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54. Sistema instável.	67
FIGURA 4.26: Energia cinética e potencial para uma falta ocorrida na barra 45, extinta em $t_{cl} = 0,451 s$, através do desligamento da linha 45-39. Sistema estável.	68
FIGURA 4.27: Energia cinética e potencial para uma falta ocorrida na barra 51, extinta em $t_{cl} = 0,351 s$, sem o desligamento da linha 51-45. Sistema estável.	68
FIGURA 4.28: Ângulos dos rotores para os 16 geradores do sistema. Usado no cálculo de PI1. Caso instável.	70

FIGURA 4.29: Energia cinética e potencial para o sistema de 16 geradores. Usado no cálculo de PI2. Caso instável.....70

FIGURA 4.30: Produto escalar (DOT1) usado no cálculo de PI3 para o sistema de 16 geradores. Caso instável.....70

FIGURA 4.31: Produto escalar (DOT2) usado no cálculo de PI4 para o sistema de 16 geradores. Caso instável.....70

FIGURA 4.32: Produto escalar (DOT3) usado no cálculo em PI5 para o sistema de 16 geradores. Caso instável.....71

FIGURA 4.33: Potência elétrica para a máquina crítica 9, para um curto-circuito 3φ ocorrido na barra 29, eliminado com o desligamento da linha 29-28, em $t_{cl} = 0,366$ s. O sistema é instável.72

FIGURA 4.34: Potência elétrica para a máquina crítica 8, para um curto-circuito 3φ ocorrido na barra 25, eliminado com o desligamento da linha 25-26, em $t_{cl} = 0,301$ s. O sistema é instável.72

FIGURA 4.35: Potência elétrica para a máquina crítica 2, para um curto-circuito 3φ ocorrido na barra 6, eliminado sem o desligamento da linha 6-54, em $t_{cl} = 0,316$ s. O sistema é instável.73

FIGURA 4.36: Potência elétrica para a máquina crítica 2, para um curto-circuito 3φ ocorrido na barra 7, eliminado com o desligamento da linha 7-6, em $t_{cl}=0,301$ s. O sistema é instável.73

FIGURA 4.37: Potência elétrica para a máquina crítica 16, para um curto-circuito 3φ ocorrido na barra 45, eliminado com o desligamento da linha 45-39, em $t_{cl} = 0,500$ s. O sistema é estável.73

FIGURA 4.38: Potência elétrica para a máquina crítica 16, para um curto-circuito 3φ ocorrido na barra 51, eliminado sem o desligamento da linha 51-45, em $t_{cl}=0,351$ s. O sistema é estável.73

FIGURA 4.39: Potência elétrica para a máquina crítica 16, para um curto-circuito 3φ ocorrido na barra 45, eliminado com o desligamento da linha 45-39, em $t_{cl} = 0,451$ s. O sistema é estável.74

FIGURA 4.40: Potência elétrica para a máquina crítica 16, para um curto-circuito 3φ ocorrido na barra 51, eliminado sem o desligamento da linha 51-45, em $t_{cl}=0,301$ s. O sistema é estável.74

FIGURA 4.41: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3φ ocorrido na barra 29, eliminado com o desligamento da linha 29-28, em $t_{cl} = 0,366$ s. O sistema é instável.75

FIGURA 4.42: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 19, eliminado sem o desligamento da linha 19-20, em $t_{cl} = 0,416$ s. O sistema é instável.....	75
FIGURA 4.43: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 25, eliminado com o desligamento da linha 25-26, em $t_{cl} = 0,301$ s. O sistema é instável.	76
FIGURA 4.44: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 6, eliminado sem o desligamento da linha 6-54, em $t_{cl} = 0,316$ s. O sistema é instável.....	76
FIGURA 4.45: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 7, eliminado com o desligamento da linha 7-6, em $t_{cl} = 0,301$ s. O sistema é instável.	76
FIGURA 4.46: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 45, eliminado com o desligamento da linha 45-39, em $t_{cl} = 0,500$ s. O sistema é estável.	76
FIGURA 4.47: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 51, eliminado sem o desligamento da linha 51-45, em $t_{cl} = 0,351$ s. O sistema é estável.....	77
FIGURA 4.48: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 45, eliminado com o desligamento da linha 45-39, em $t_{cl} = 0,451$ s. O sistema é estável.	77
FIGURA 4.49: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 51, eliminado sem o desligamento da linha 51-45, em $t_{cl} = 0,301$ s. O sistema é estável.....	77
FIGURA 4.50: Ângulos dos geradores. Caso estável.....	78
FIGURA 4.51: Ângulos dos geradores. Caso instável.	78
FIGURA 4.52: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Instável. Falta na barra 72, extinta em 0,610s. Máquina crítica 12.	79
FIGURA 4.53: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Instável. Falta na barra 70, extinta em 0,600s. Máquina crítica 5.	79
FIGURA 4.54: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Instável. Falta na barra 26, extinta em 0,210s. Máquina crítica 6.	80
FIGURA 4.55: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Instável. Falta na barra 110, extinta em 0,400s. Máquina crítica 10.	80
FIGURA 4.56: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Estável. Falta na barra 56, extinta em 0,180s. Máquina crítica 2.	80
FIGURA 4.57: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Estável. Falta na barra 117, extinta em 0,400s. Máquina crítica 16.	80
FIGURA 4.58: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Estável. Falta na barra 110, extinta em 0,250s. Máquina crítica 10.	81

FIGURA 4.59: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Estável. Falta na barra 26, extinta em 0,180s. Máquina crítica 6.	81
FIGURA 4.60: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada no tempo total de simulação. Casos estáveis e instáveis.	82
FIGURA 4.61.(a): Energia cinética, potencial e total para uma falta ocorrida na barra 110, para um $t_{cl}=0,400s$. Critério de parada no 1º Pico de Energia Potencial. Caso instável.....	83
FIGURA 4.61.(b): Energia cinética, potencial e total para uma falta ocorrida na barra 110, para um $t_{cl} = 0,400s$. Critério de parada no tempo total de simulação. Caso instável.	83
FIGURA 4.62: Produto escalar 1 (Dot1) para uma falta ocorrida na barra 72. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.....	84
FIGURA 4.63: Produto escalar 2 (Dot2) para uma falta ocorrida na barra 72. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.....	84
FIGURA 4.64: Produto escalar 1 (Dot1) para uma falta ocorrida na barra 70. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.....	84
FIGURA 4.65: Produto escalar 2 (Dot2) para uma falta ocorrida na barra 70. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.....	84
FIGURA 4.66: Produto escalar 1 (Dot1) para uma falta ocorrida na barra 110. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.....	85
FIGURA 4.67: Produto escalar 2 (Dot2) para uma falta ocorrida na barra 110. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.....	85
FIGURA 4.68: Produto escalar 3 (Dot3) para uma falta ocorrida na barra 26. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.....	85
FIGURA 4.69: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada no 1º pico de energia potencial. Casos estáveis e instáveis.	86
FIGURA 4.70: Energia cinética, potencial e total para uma falta ocorrida na barra 110, para um $t_{cl} = 0,400s$. Critério de parada no 2º Pico de Energia Potencial, em laranja. Caso instável.	88
FIGURA 4.71: Produto escalar 1 (Dot1) para uma falta ocorrida na barra 110. Critério de parada no 2º pico de energia potencial, em laranja. Caso instável.....	88
FIGURA 4.72: Produto escalar 2 (Dot2) para uma falta ocorrida na barra 110. Critério de parada no 2º pico de energia potencial em laranja. Caso instável.....	88
FIGURA 4.73: Energia cinética, potencial e total para uma falta ocorrida na barra 72, para um $t_{cl} = 0,610s$. Critério de parada no 2º Pico de Energia Potencial, em laranja. Caso instável.	88

FIGURA 4.74: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada no 2º pico de energia potencial. Casos estáveis e instáveis.89

FIGURA 4.75: Energia cinética, potencial e total para uma falta ocorrida na barra 26, para um $t_{cl} = 0,210s$. Critério de parada em TEXTIN+TS (TS=0,5s), em laranja. Caso instável.90

FIGURA 4.76: Produto escalar 2 (Dot2) para uma falta ocorrida na barra 26. Critério de parada em TEXTIN+TS (TS=0,5s), em laranja. Caso instável.....90

FIGURA 4.77: Produto escalar 3 (Dot3) para uma falta ocorrida na barra 26. Critério de parada em TEXTIN+TS (TS=0,5s), em laranja. Caso instável.....91

FIGURA 4.78: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada com tempo fixo de simulação de 0,5s após a extinção da falta. Casos estáveis e instáveis.....92

FIGURA 4.79: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada com tempo fixo de 1,0s após a extinção da falta.....94

FIGURA 4.80: Potência Elétrica para a máquina crítica (2), para uma falta ocorrida na barra 56. Caso estável.95

FIGURA 4.81: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada no 2º pico de potência elétrica para a máquina crítica. Casos estáveis e instáveis. ..97

FIGURA 4.82: Energia cinética, potencial e total para uma falta ocorrida na barra 110, para um $t_{cl} = 0,400s$. Critério de parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total, em laranja. Caso instável.98

FIGURA 4.83: Produto escalar 1 (Dot1) para uma falta ocorrida na barra 110. Critério de parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total, em laranja. Caso instável.....98

FIGURA 4.84: Produto escalar 2 (Dot2) para uma falta ocorrida na barra 110. Critério de parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total, em laranja. Caso instável.....99

FIGURA 4.85: Critério de parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total, em laranja, para uma falta ocorrida na barra 110. Caso instável.99

FIGURA 4. 86: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada no 2º pico de potência elétrica total. Casos estáveis e instáveis.100

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada com TTOT=2,0s.....56

TABELA 2: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada no 1º Pico de Energia Potencial.....56

TABELA 3: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Energia Potencial.....57

TABELA 4: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada em TTOT=TEXTIN+TS (TS=0,5s).....58

TABELA 5: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada em TTOT=TEXTIN+TS(TS=1,0s).....58

TABELA 6: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica da Máquina Crítica.59

TABELA 7: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total.....61

TABELA 8: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada no tempo total de simulação.....63

TABELA 9: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada no 1º Pico de Energia Potencial.....64

TABELA 10: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Energia Potencial.67

TABELA 11: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada em TEXTIN+TS (TS=0,5s).69

TABELA 12: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada em TEXTIN+TS (TS=1,0s).70

TABELA 13: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica para a Máquina Crítica.71

TABELA 14: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total.75

TABELA 15: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no tempo total de simulação.79

TABELA 16: Resultados do índice composto para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no tempo total de simulação.81

TABELA 17: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 1º Pico de Energia Potencial.83

TABELA 18: Resultados do índice composto para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 1º Pico de Energia Potencial.86

TABELA 19: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Energia Potencial.87

TABELA 20: Resultados do índice composto para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Energia Potencial.89

TABELA 21: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada em TEXTIN+TS (TS=0,5s).90

TABELA 22: Resultados do índice composto para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada em TEXTIN+TS (TS=0,5s).91

TABELA 23: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada em TEXTIN+TS (TS=1,0s).93

TABELA 24: Resultados do índice composto para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada em TEXTIN+TS (TS=1,0s).93

TABELA 25: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica para a Máquina Crítica.95

NOTAÇÃO

ABREVIATURAS

COI	Centro de Inércia
u.e.p.	Ponto de Equilíbrio Estável (<i>Unstable Equilibrium Point</i>)
MMF	Força Magnetomotriz
EMF	Força Eletromotriz
DSA	Análise de Segurança Dinâmica (<i>Dynamic Security Assessment</i>)
TEF	Função da Energia Transitória (<i>Transient Energy Function</i>)
IMEF	Função da Energia de uma Máquina (<i>Individual Machine Energy Function</i>)
PEBS	Superfície Limite de Energia Potencial (<i>Potential Energy Boundary Surface</i>)
BCU	Limite de Controle de u.e.p.
SIME	Máquina Equivalente (<i>Single Machine Equivalent</i>)
OMIB	Uma máquina e uma Barra Infinita (<i>One Machine Infinit Bus</i>)
EAC	Critério de Igualdade de Áreas (<i>Equal Area Criterion</i>)
MAT	Máxima Transferência com relação a Estabilidade Transitória (<i>Transient Stability-Constrained maximum allowable transfer</i>)

SIMBOLOS

Δt	passo de integração
t_{cl}	tempo de extinção da falta
t_{cr}	tempo crítico de eliminação da falta
t_m	tempo para energia cinética mínima
t_{ins}	tempo para reinserção da falta
T_a	torque de aceleração da máquina
T_e	torque elétrico
T_m	torque elétrico
J	momento de inércia da máquina
ω_m	velocidade angular mecânica do rotor
ω_R	velocidade síncrona
ω_{COI}	velocidade angular do centro de inércia
ϖ_i	velocidade angular do gerador i em relação ao COI
δ_m	ângulo do torque mecânico
δ_{el}	ângulo elétrico da máquina
δ	ângulo do rotor da máquina
δ_{COI}	ângulo do centro de inércia
$\delta_i(t - \Delta t)$	ângulo no instante $(t - \Delta t)$ da máquina i
$\delta_i(t_{cl})$	ângulo no instante t_{cl} da máquina i
δ^*	ponto de saída (<i>exit point</i>)
δ_{co}^*	ponto de equilíbrio instável de controle
θ_i	ângulo do gerador i com relação ao COI
θ_m	ângulo mecânico do eixo da máquina com respeito ao eixo de referência fixa
θ_i^{cl}	ângulo do rotor para o tempo de extinção da falta para o gerador i
α	ângulo de defasagem entre a referência fixa e a referência girante no tempo
P_a	potência de aceleração

P_m	potência mecânica de entrada
P_e	potência elétrica de saída
P_{COI}	potência de aceleração em relação ao COI
M_m	constante de inércia da máquina
M	constante de inércia em pu, corrigida pelo número de pólos da máquina
H	constante de inércia da máquina
W_k	energia cinética da massa rotacional
p	número de pólos da máquina
S_{B3}	potência de base trifásica
f_0	freqüência nominal do sistema
E	tensão de excitação da máquina
x_d'	é a reatância transitória do eixo direto
$\bar{Z}_{TL}$	impedância série da rede de transmissão (incluindo transformadores)
$\bar{Z}_s$	impedância shunt equivalente para a máquina terminal, incluindo a carga local
$\bar{V}_t$	tensão terminal da máquina síncrona
$\bar{V}$	tensão do barramento infinito
Q	potência reativa
I_{gi}	Corrente no gerador i
I_{gi}'	Corrente total nas barras geradoras, barra terminal curto-circuitada ao terra
Z_{gi}	Impedância do gerador i
Z	Impedância do sistema
V_{Ri}	Tensões nas barras, sujeita ao curto-circuito
X_s	ponto de equilíbrio estável pós-falta
x_0	ponto de operação pré-falta
X_{cr}	ponto pelo qual a trajetória do sistema em falta abandona a área de atração
V_{cr}	energia crítica
$acel_i$	aceleração da máquina i
V_s	energia total do sistema

V_{ke}	energia cinética transitória
V_{pe}	energia potencial transitória
V_{KEi}^{min}	energia cinética mínima
V_{PEi}^{max}	energia potencial máxima
$V_{PEi}(t_{cl})$	energia potencial no tempo t_{cl}
MS	margem de estabilidade
DOT1	produto escalar para o vetor de diferença de potência em falta e o vetor de velocidade em falta
DOT2	produto escalar para o vetor de diferença de potência em falta e o vetor do ângulo do rotor
DOT3	produto escalar para o vetor de potência de aceleração e o vetor de velocidade do rotor
PI1	índice de desempenho baseado no conceito de coerência
PI2	índice de desempenho baseado na conversão transitória de energia
PI3	índice baseado no produto escalar DOT1
PI4	índice baseado no produto escalar DOT2
PI5	índice baseado no produto escalar DOT3
NG	número total de geradores

RESUMO

Este trabalho investigou soluções para o cálculo da estabilidade transitória em sistemas de energia elétrica. Atualmente, a simulação, através de integração numérica, é a melhor ferramenta disponível, por permitir a representação de modelos mais abrangentes e fornecer resultados confiáveis. As limitações ficam por conta do tempo computacional envolvido, e pela ausência de resultados que informem o grau de estabilidade ou instabilidade. Por outro lado, os métodos diretos de resolução, que exigem menor custo computacional, ainda não se mostraram amplamente aplicáveis e confiáveis. O melhor caminho parece ser através da utilização de soluções híbridas, em que um método direto é incorporado em um programa de simulação passo a passo, ou através de obtenção de índices a partir de análises das variáveis envolvidas no problema. Este trabalho buscou concentrar esforços em uma solução, utilizando simulação com cálculo de índices que indiquem a estabilidade ou instabilidade, e que sirvam, também, para finalizar a simulação, produzindo, portanto, soluções mais rápidas. Desta forma, foram realizadas investigações de algumas técnicas propondo-se melhorias, e buscando novas soluções, principalmente na busca de pesos que possam ser atribuídos a cada índice de forma a obter um único.



ABSTRACT

This work deals with searching solutions for the calculation of the transient stability in electric power systems. Currently the simulation through numeric integration is the best available tool, because it allows the representation of more detailed models and for providing reliable results. The limitation are due to the computational time involved, and for the absence of results that inform the degree of stability or instability. On the other hand, the direct methods of resolution that demand smaller processing time, were not yet shown enough applicable and reliable. The best way seems to be through the use of hybrid solutions, where a direct method is incorporated in a step-by-step simulation program or obtaining indices starting from analyses of the variables involved in the problem. This work has dedicated efforts in a solution using simulation with indices calculation indicating stability or instability, and, also, producing, therefore, faster solutions. This way, investigations of some techniques were accomplished with improvements, and looking for new solutions, mainly in those weights that can attributed to each form indices to obtain an only one.

I – INTRODUÇÃO

Os estudos de estabilidade em sistemas de energia elétrica têm como objetivo verificar o comportamento de sistemas de energia elétrica após a ocorrência de uma perturbação do tipo: curto-circuito, desligamento de linha de transmissão, perda de unidades geradoras etc. Basicamente, busca-se determinar se os geradores permanecerão em sincronismo e se ocorrem oscilações de tensão.

A análise de sistemas de energia elétrica pode ser classificada de diferentes maneiras. Uma classificação freqüentemente utilizada usa como base o tempo de análise após a perturbação [12]. Assim, define-se como estabilidade transitória, ou de curto prazo, o comportamento dinâmico observado até poucos segundos, após a perturbação, no qual concentram-se as soluções desse problema.

O estudo da estabilidade transitória, para várias situações de operação e para diferentes localizações de defeitos, constitui um dos maiores problemas em estudos de planejamento e operação de sistemas de energia elétrica. Tradicionalmente, a estabilidade é determinada através de simulação passo a passo no domínio do tempo. Estas soluções requerem a solução de dois conjuntos de equações, provenientes da modelagem dos diversos componentes dos sistemas: um conjunto de equações diferenciais, que descreve

basicamente os geradores síncronos e seus controles, e um conjunto de equações algébricas que representa o estator das máquinas síncronas, rede de transmissão e cargas.

Atualmente, a simulação passo a passo é a melhor ferramenta disponível, por permitir a representação de modelos mais abrangentes e fornecer resultados confiáveis. As limitações ficam por conta do esforço computacional envolvido e pela ausência de resultados que informem o grau de estabilidade ou instabilidade. Por outro lado, os métodos diretos de resolução, que exigem menor custo computacional, apresentam resultados conservativos, o que pode ser um problema para sistemas com altos carregamentos. Métodos híbridos têm sido propostos com o objetivo de explorar as vantagens dos métodos diretos para diminuir o tempo de simulação via método indireto, obtendo-se, assim, resultados confiáveis, em menor tempo e com índices do grau de estabilidade.

Quando se pensa em classificar uma série de contingências para análise de segurança dinâmica do sistema, deve-se buscar métodos de análise que apresentem resultados precisos. Porém, como existe, normalmente, um grande número de contingências para análise (o estudo deve ser realizado para cada uma das prováveis perturbações para várias condições de operação), é preciso que cada resultado seja obtido da forma mais rápida possível. Estes métodos devem classificar as contingências em estáveis ou instáveis, e apresentar índices de quanto estável ou instável é o sistema frente àquela perturbação.

Neste trabalho, a busca em torno da obtenção de índices foi feita a partir da informação da variação de potência ativa, ângulos, velocidade e aceleração dos geradores, além de índices de sensibilidade. Convencionalmente esta análise não é realizada em tempo real, porém, é desejável que seja realizada em tempo real, devido a situação de operação, em alto carregamento, dos sistemas elétricos atuais.

O principal ponto é a identificação rápida da situação de operação de um sistema elétrico frente às contingências, classificando situações estáveis ou instáveis de acordo com índices de severidade. Verificamos o desempenho de uma proposta que utiliza uma série de índices descritos em [1]. Assim, buscamos investigar os índices propostos na literatura, almejando melhorias nas soluções propostas anteriormente, e utilizá-los de forma conjunta, atribuindo pesos a cada um deles, de forma a obter um único índice.

Basicamente este trabalho exigiu a implementação de um programa computacional usando linguagem FORTRAN. Para tanto, buscamos o aprendizado dos conceitos físicos



envolvidos no problema de estabilidade transitória com a correspondente representação matemática. Esses conceitos fundamentais foram retirados de clássicos da literatura técnica, como [2,11] além de outros. A teoria dos métodos diretos foi encontrada em [4,11,13], e uma excelente fonte sobre simulação passo a passo foi encontrada em [12]. Além disso, foram utilizados vários artigos publicados em revistas e congressos, que foram de grande importância.

A dissertação está dividida da seguinte maneira:

- No capítulo II, descrevemos o estudo da estabilidade de sistemas de energia elétrica, apresentando, de uma forma geral, o conceito de estabilidade e suas possíveis classificações. Apresentamos os modelos matemáticos elementares de sistemas, contendo as equações de balanço e a representação do Modelo Clássico, o qual é adotado nos cálculos. Descrevemos os possíveis tipos de solução para análise da estabilidade transitória em sistemas de energia elétrica, encontrados na literatura.
- No capítulo III, falamos sobre índices de severidade em análise de segurança dinâmica. Estes índices são baseados nos conceitos de coerência, conversão transitória de energia, entre energia cinética e energia potencial, e três produtos escalares de variáveis de sistemas. Destes índices, chegamos a um único índice composto, adotando pesos para cada índice individual.
- No capítulo IV, apresentamos os resultados para um sistema de potência teste de porte razoável, com 16 geradores, e outro, de pequeno porte, com 4 geradores. Também apresentamos resultados para um sistema real de 17 geradores (IEEE17). Os resultados são obtidos para os cinco índices de ordenação e o índice composto, mais a margem de estabilidade, que serve de comparação para os índices.
- No Capítulo V, temos as conclusões gerais sobre o trabalho apresentado.



II - ESTUDO DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1. INTRODUÇÃO

Os rotores dos geradores em sistemas de energia elétrica, em condições normais, estão em velocidade síncrona, havendo, assim, um balanceamento entre a potência mecânica de entrada e a potência elétrica na saída [2]. É sabido também que dificilmente um sistema, com grande número de máquinas, estará em regime permanente pela variação das cargas e pela ação corretora dos equipamentos de controle.

Quando ocorre uma grande perturbação no sistema, durante o transitório, o equilíbrio entre a potência mecânica e a potência elétrica é rompido, principalmente nos geradores mais próximos da falta. Desse modo, ocorrerão acelerações diferentes nos rotores das máquinas, levando eventualmente à perda de sincronismo de algumas das máquinas em relação ao restante do sistema. Caso o sistema consiga amortecer as oscilações causadas pela perturbação, o sistema permanecerá estável, atingindo um novo estado de operação em regime permanente ou retornando ao mesmo ponto de trabalho. O sistema ainda pode ser

estável ou instável dependendo do tempo de religamento da linha de transmissão, ou do tempo de extinção do curto-circuito. Se o sistema for instável, pelo menos a velocidade de uma das máquinas tende a se afastar das demais, ocorrendo assim o seu desligamento pelo sistema de proteção.

Uma grandeza conveniente para testar a estabilidade é o ângulo do rotor da máquina, medida com respeito à referência de rotação síncrona. Se a diferença no ângulo entre quaisquer duas máquinas aumenta indefinidamente ou se a oscilação transitória não é suficientemente amortecida, o sistema é instável.

Para se operar um sistema de energia elétrica, de maneira confiável e otimizada, torna-se necessário o conhecimento do comportamento do sistema diante de várias situações, ou seja, durante sua operação normal, durante a ocorrência da perturbação e após a extinção da falta.

2.2. EQUAÇÃO DE BALANÇO

No estudo da estabilidade de um sistema de energia elétrica, é necessário que este seja descrito através de equações matemáticas. As equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico podem ser obtidas através de um balanço de potência em cada máquina do sistema [19].

Seja a máquina representada na Figura 2.1, sabe-se, através de leis físicas, que o momento de inércia (J), multiplicado pela aceleração angular, é igual ao torque aplicado ao rotor da máquina (T_a), isto é:



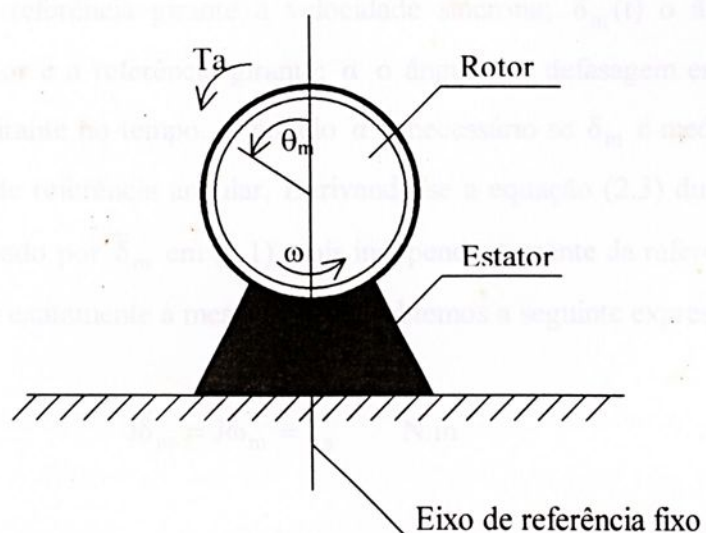


FIGURA 2.1: Representação esquemática de um gerador.

$$J\ddot{\theta}_m = T_a \quad \text{N.m} \quad (2.1)$$

sendo J o momento de inércia, em Kg.m^2 , de todas massas rotacionais; θ_m o ângulo mecânico do eixo da máquina com respeito ao eixo de referência fixa, em radianos; e T_a o torque de aceleração da máquina, em N.m.

O torque de aceleração T_a é a diferença entre o torque mecânico e o torque elétrico. Para o caso da máquina funcionando como gerador, o torque mecânico atua no sentido de acelerar o rotor do gerador, e o torque elétrico desacelera o mesmo. Assim:

$$T_a = T_m - T_e \quad \text{N.m} \quad (2.2)$$

Em regime permanente, θ_m será uma função do tempo, pois a velocidade da máquina possui um valor muito próximo da velocidade síncrona. Para acabar com este problema, tomamos como referência angular um eixo girando à velocidade síncrona, ou seja:

$$\theta_m(t) = (\omega_R t + \alpha) + \delta_m \quad \text{rad} \quad (2.3)$$

sendo $(\omega_R t + \alpha)$ a referência girante à velocidade síncrona; $\delta_m(t)$ o ângulo mecânico formado entre o rotor e a referência girante; α o ângulo de defasagem entre a referência fixa e a referência girante no tempo. O ângulo α é necessário se δ_m é medido em um eixo diferente da forma de referência angular. Derivando-se a equação (2.3) duas vezes, vemos que $\ddot{\theta}$ pode ser trocado por $\ddot{\delta}_m$ em (2.1), pois independentemente da referência utilizada, a aceleração angular é exatamente a mesma. Assim, obtemos a seguinte expressão [2]:

$$J\ddot{\delta}_m = J\dot{\omega}_m = T_a \quad \text{N.m} \quad (2.4)$$

sendo J o momento de inércia, em Kg.m^2 ; δ_m o ângulo do torque mecânico, em radianos, com respeito à forma de referência da rotação síncrona; ω_m a velocidade angular mecânica do rotor, em rad/s; e T_a o torque de aceleração, em N.m.

Outra forma de (2.4), que é algumas vezes usada, é obtida com a multiplicação de ambos os lados por ω_m , a velocidade angular da máquina em rad/s. Relembrando que o produto do torque T e a velocidade angular ω é a potência da máquina P em Watts, nós temos [2]:

$$J\omega_m\ddot{\delta}_m = P_m - P_e \quad \text{W} \quad (2.5)$$

sendo P_m a potência mecânica de entrada e P_e a potência elétrica de saída.

Supondo-se que ω_m não se afaste significativamente de ω_R , caso contrário ocorreria perda de sincronismo, pode ser feita a seguinte simplificação $J\omega_m \cong J\omega_R$. Assim, a grandeza $J\omega_m$ é chamada constante de inércia da máquina e é denotada por M_m . Ela é relacionada à energia cinética da massa rotacional W_k , onde $W_k = (1/2) J \cdot \omega_m^2$, em joules. Então, M_m é calculado como:

$$\text{MomentoAngular} = M_m = J\omega_m = 2W_k / \omega_m \quad \text{J.s} \quad (2.6)$$

A equação de movimento do rotor é chamada de equação de balanço. É dada na literatura na forma (2.4), ou em termos de potência por [2]:

$$M_m \ddot{\delta}_m = M_m \dot{\omega}_m = P_m - P_e = P_a \quad W \quad (2.7)$$

sendo M_m dado em J.s; δ_m dado em radianos; ω_m dado em rad/s; P_a a potência de aceleração dada em W.

A potência elétrica P_e injetada na rede é uma função dos ângulos elétricos da rede; logo, é necessário relacionar os ângulos mecânicos das máquinas (δ_m) com os ângulos elétricos da rede (δ_{el}). Assim, o ângulo elétrico δ_{el} é relacionado ao ângulo mecânico do rotor δ_m (medida para forma de rotação síncrona) por:

$$\delta = \delta_{el} = (p/2)\delta_m \quad (2.8)$$

sendo p o número de pólos (Na Europa $\delta_{el} = p\delta_m$, sendo p o número de pares de pólos).

Para simplificar, abandonamos o subscrito “el”, escrevemos simplesmente δ , o qual é sempre sustentado pelo ângulo elétrico definido por (2.8). De (2.7) e (2.8) escrevemos:

$$(2M_m / p)\ddot{\delta} = (2M_m / p)\dot{\omega} = P_a \quad W \quad (2.9)$$

O qual relaciona à potência de aceleração para o ângulo elétrico δ e a velocidade angular do campo magnético giratório ω .

Em grandes sistemas de potência, achamos conveniente normalizar as equações de potência dividindo todas equações por uma grandeza de base trifásica, S_{B3} (potência de base). Então, a equação em pu (2.9), passa a ser:

$$(2M_m / pS_{B3})\ddot{\delta} = (2M_m / pS_{B3})\dot{\omega} = P_a / S_{B3} = P_{au} \quad pu \quad (2.10)$$



sendo M_m , p , δ e ω com as mesmas unidades de antes; mas P_{au} é agora a potência de aceleração em pu.

Para simplificar a representação matemática desta equação, fazemos $M = \frac{2.M_m}{p.S_{B3}}$,

sendo M a nova constante de inércia em pu, corrigida pelo número de pólos da máquina.

Então, a equação (2.10) pode ser escrita como [19]:

$$M\ddot{\delta} = M\dot{\omega} = P_a = P_m - P_e \quad \text{pu} \quad (2.11)$$

Definiremos agora uma grandeza importante [2]:

$$H = \frac{\Delta}{W_k / S_{B3}} \quad \text{s} \quad (2.12)$$

sendo: S_{B3} = potência de base do sistema, em MVA;

W_k = energia cinética da massa rotacional.

Então, escrevemos que a equação de balanço na forma mais usual é, na prática [2]:

$$(2H / \omega_R) \dot{\omega} = P_a \quad \text{pu} \quad (2.13)$$

sendo H dado em s; ω em rad/s; e P em W. Note que ω é a velocidade angular do campo magnético giratório e está relacionado diretamente à rede de tensões e correntes.

A grandeza H é freqüentemente dada para uma máquina particular normalizada para a base de potência (VA) avaliada para esta máquina. Isto é conveniente, desde que a grandeza H desta máquina normalizada seja freqüentemente previsível em tamanho e possa ser estimada para máquinas que não existem fisicamente.

A relação entre as constantes de inércia H e M pode ser dada como:

$$M = \frac{2.H}{\omega_R} = \frac{H}{\pi.f_o} \quad (2.14)$$

Assim, chegamos à forma mais usual das equações de balanço dada por [5]:

$$M.\dot{\omega} \cong P_m - P_e \quad (2.15)$$

Sendo que:

$$\dot{\omega} = \ddot{\delta} \quad (2.16)$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_R \quad (2.17)$$

sendo:

δ = é o ângulo do rotor da máquina;

ω = velocidade instantânea da turbina;

$\omega_R = 2.\pi.f_0$ (velocidade síncrona);

f_0 = frequência nominal do sistema (60 Hz).

Aplicando-se o método trapezoidal de integração numérica às equações que descrevem o comportamento dinâmico das partes girantes das máquinas síncronas, obtém-se as seguintes equações algébricas [3]:

$$\omega(t) = -\frac{\omega_R \Delta t}{4H} P_e(t) + \omega(t - \Delta t) + \frac{\omega_R \Delta t}{4H} [2P_m - P_e(t - \Delta t)] \quad (2.18)$$

$$\delta(t) = \frac{\Delta t}{2} \omega(t) + \delta(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [\omega(t - \Delta t) - 2\omega_R] \quad (2.19)$$

Sendo que Δt é o passo de integração.



2.3. RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA E ÂNGULO EM MÁQUINAS SÍNCRONAS

Discutiremos agora uma simplificação através da potência síncrona, pois muitas expressões usuais têm relação entre a potência de saída da máquina e o ângulo do rotor.

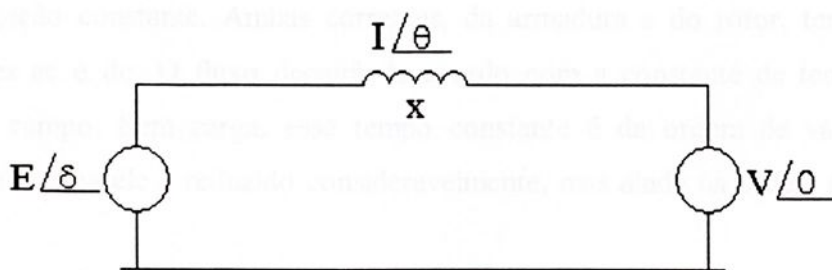
Considere duas fontes $\bar{V} = V\angle 0$ e $\bar{E} = E\angle \delta$ conectadas através de uma reatância x como mostra a Figura 2.2.(a). Note que a fonte V é escolhida como referência. A corrente flui entre duas fontes. Assim, de [2] temos que a potência P_e é dada por:

$$P_e = (EV/x)\sin\delta \quad (2.20)$$

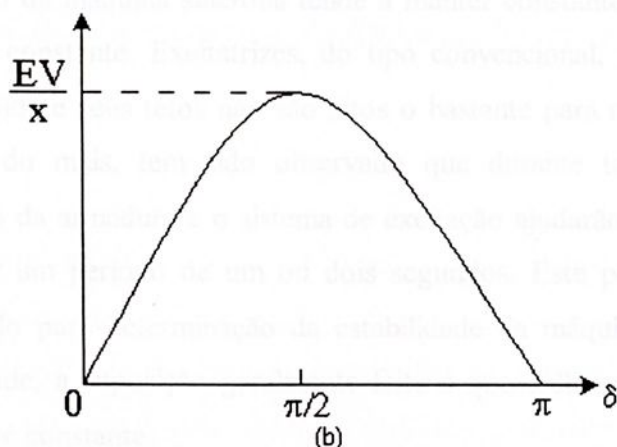
Desde que E , V e x são constantes, a relação entre P_e e δ é uma curva senoidal, como mostra Figura 2.2.(b). Notamos que a mesma potência entregue pela fonte $\bar{E}$ é recebida pela fonte $\bar{V}$, desde que a rede seja puramente reativa.

Considerando a máquina de rotor liso conectada em um barramento infinito, no estado estável, a máquina pode ser representada aproximadamente pelo circuito abaixo se V é a tensão terminal da máquina, a qual é a tensão do barramento infinito; x é a reatância síncrona do eixo direto; e E é a tensão de excitação da máquina, a qual é a EMF (força eletromotriz) ao longo do eixo em quadratura. Mas (2.20) está basicamente correta para uma máquina de rotor liso no estado estável, esta equação indica que se E , V e x são constantes, EV/x é uma constante que podemos designar como $P_{\max}$ para escrever $P_e = P_{\max} \sin\delta$; e a potência de saída da máquina é uma função somente do ângulo δ associado a E . Note que E pode ser escolhida para ser qualquer EMF (força eletromotriz) conveniente, não necessariamente a tensão de excitação, mas então o x e δ apropriados devem ser definidos de acordo.





(a)



(b)

FIGURA 2.2: Um sistema simples de duas máquinas:
(a) Representação esquemática; (b) Relação entre ângulo e potência.

2.3.1. REPRESENTAÇÃO CLÁSSICA DA MÁQUINA SÍNCRONA EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE

A EMF (força eletromotriz) da máquina (isto é, a tensão correspondente à corrente no circuito de campo principal) pode ser considerada como tendo dois componentes: um componente E' que corresponde ao fluxo da ligação do circuito de campo principal e um componente que cancela a reação de armadura. O último pode ser mudado instantaneamente porque corresponde às correntes, mas a anterior (a qual corresponde ao fluxo da ligação) não pode ser mudada instantaneamente.

Quando às mudanças, na rede ocorrem, repentinamente, os fluxos da ligação (e, por conseguinte, E') não mudarão, mas correntes serão produzidas na armadura; por conseguinte, outras correntes serão induzidas nos vários circuitos do rotor para manter este

fluxo da ligação constante. Ambas correntes, da armadura e do rotor, terão usualmente componentes ac e dc. O fluxo decairá de acordo com a constante de tempo efetiva do circuito de campo. Sem carga, esse tempo constante é da ordem de vários segundos, enquanto sob carga ele é reduzido consideravelmente, mas ainda na ordem de um segundo ou mais.

Podemos notar que para um período menor que um segundo, a característica natural do circuito de campo da máquina síncrona tende a manter constante o fluxo na ligação e, por conseguinte, E' constante. Excitatrizes, do tipo convencional, não têm normalmente resposta bastante rápida e seus tetos não são altos o bastante para mudar apreciavelmente este quadro. Além do mais, tem sido observado que durante um distúrbio, o efeito combinado da reação da armadura e o sistema de excitação ajudarão a manter constante o fluxo na ligação por um período de um ou dois segundos. Este período é muitas vezes considerado adequado para determinação da estabilidade da máquina. Assim, em alguns estudos de estabilidade, a suposição geralmente feita é que o fluxo na ligação do campo principal da máquina é constante.

O fluxo do circuito de campo principal é quase o mesmo fluxo fictício, que criará uma EMF atrás da reatância transitória de eixo direto da máquina. O modelo usado para a máquina síncrona é mostrado na Figura 2.3, onde x'_d é a reatância transitória do eixo direto.

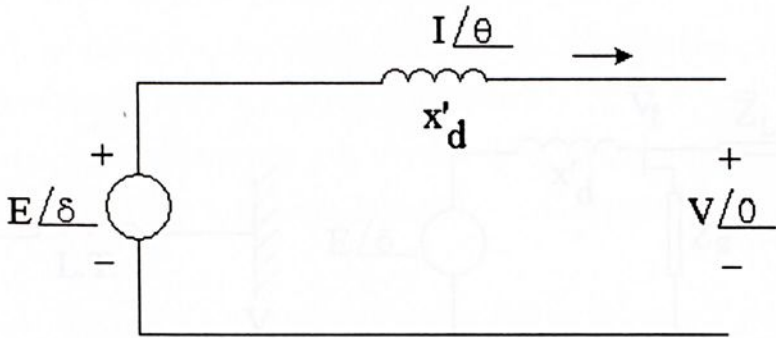


FIGURA 2.3: Representação da máquina síncrona por uma tensão constante atrás da reatância transitória.

A fonte de tensão constante E/δ é determinada das condições iniciais, isto é, condições pré-transitórias. Durante o transitório, a magnitude E é seguramente constante, enquanto o ângulo δ é considerado como um ângulo entre a posição do rotor e a tensão terminal V .

2.3.2. SISTEMA MÁQUINA CONTRA BARRAMENTO INFINITO – O MODELO CLÁSSICO

Um barramento infinito é uma fonte de tensão e frequência invariável (em magnitude e ângulo). Um barramento maior do sistema de potência de capacidade muito grande, comparada à avaliação da máquina, é aproximadamente um barramento infinito. A inércia da máquina, em um grande sistema, fará o barramento de tensão de vários barramentos de tensão de alta voltagem essencialmente constante para transitórios ocorrendo fora deste sistema.

Considere um sistema de potência consistindo de uma máquina conectada a um barramento infinito através de uma linha de transmissão. A representação esquemática para este sistema é mostrada na Figura 2.4.(a).

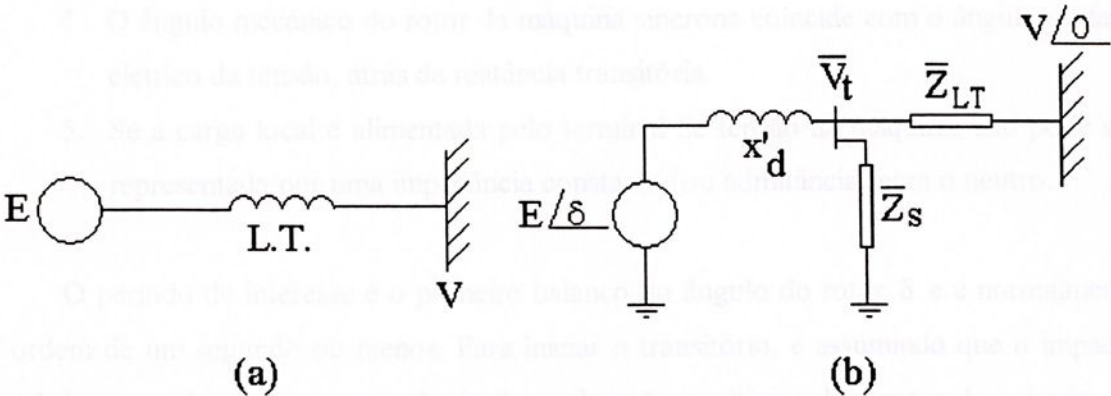


FIGURA 2.4: Uma máquina conectada a um barramento infinito através de uma linha de transmissão: (a) diagrama da linha; (b) circuito equivalente.

sendo:

$\bar{V}_t$ = tensão terminal da máquina síncrona;

$\bar{V} = V \angle 0^\circ$ = tensão do barramento infinito, o qual é usado como referência;

x_d' = reatância transitória do eixo direto da máquina;

$\bar{Z}_{TL}$ = impedância série da rede de transmissão (incluindo transformadores);

$\bar{Z}_s$ = impedância shunt equivalente para a máquina terminal, incluindo a carga local.

A equação de movimento do rotor da máquina finita é dada pela equação de balanço (2.7) ou (2.11). Para obter a solução no tempo para o ângulo do rotor, precisamos desenvolver expressões para potência elétrica e mecânica. Para isto, podemos utilizar o modelo matemático simplificado. Este modelo, que será referido ao modelo clássico, requer às seguintes suposições [2]:

1. A potência mecânica de entrada permanece constante durante o período transitório.
2. O amortecimento ou potência assíncrona é desprezível.
3. A máquina síncrona pode ser representada (eletricamente) por uma fonte constante de tensão atrás de uma reatância transitória.
4. O ângulo mecânico do rotor da máquina síncrona coincide com o ângulo de fase elétrico da tensão, atrás da reatância transitória.
5. Se a carga local é alimentada pelo terminal de tensão da máquina, isto pode ser representada por uma impedância constante (ou admitância) para o neutro.

O período de interesse é o primeiro balanço do ângulo do rotor δ e é normalmente da ordem de um segundo ou menos. Para iniciar o transitório, e assumindo que o impacto inicial do transitório cria uma potência de aceleração positiva sob o rotor da máquina, o ângulo do rotor da máquina aumentará. Se o ângulo do rotor aumenta indefinidamente, a máquina perde o sincronismo e a estabilidade é perdida. Se ele alcança um máximo e então



inicia um decréscimo, o movimento resultante será oscilatório e com amplitude constante. Assim, de acordo com este modelo e com as suposições usadas, a estabilidade é decidida no primeiro balanço (se o amortecimento está presente, a amplitude decrescerá com o tempo, mas no modelo clássico este amortecimento é muito pequeno).

O circuito elétrico equivalente para o sistema é dado na Figura 2.4.(b). Usando-se a transformação Y-Δ, a representação nodal da tensão terminal V_t na Figura 2.4 pode ser eliminada. Os nós a serem retidos (em adição ao nó de referência) são a tensão interna atrás do nó da reatância transitória e do barramento infinito. Estes são mostrados na Figura 2.5 como nós 1 e 2, respectivamente. Também mostrado na Figura 2.5 são as admitâncias obtidas pela redução da rede.

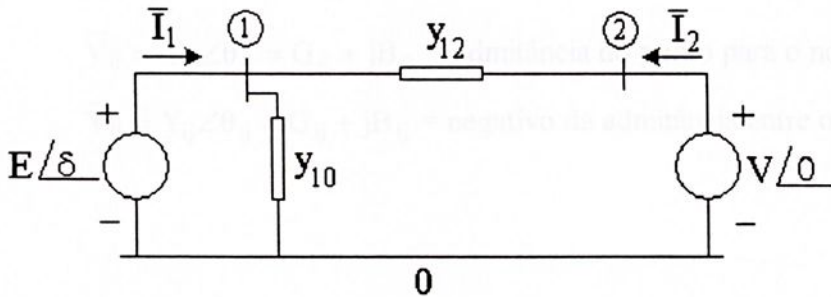


FIGURA 2.5: Circuito equivalente para um sistema de uma máquina contra um barramento infinito.

As duas portas da rede da Figura 2.5 são convenientemente descritas pela equação [2]:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E} \\ \bar{V} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

A admitância para o nó 1 é dada por $\bar{Y}_{11} = Y_{11} \angle \theta_{11} = \bar{y}_{12} + \bar{y}_{10}$, onde usamos minúsculas y 's para indicar admitâncias reais e maiúsculas Y 's para elementos da matriz. O

negativo da admitância de transferência $\bar{y}_{12}$ entre os nós 1 e 2 define o elemento da matriz de admitância (1,2) ou $\bar{Y}_{12} = Y_{12} \angle \theta_{12} = -\bar{y}_{12}$.

Do mesmo modo, que para o sistema de uma máquina, podemos generalizar para um sistema multimáquinas, seguindo as mesmas suposições anteriores. Assim, a matriz de admitância para uma rede de n-máquinas, olhando de dentro da rede para os terminais dos geradores é definida como [2]:

$$\bar{I} = \bar{Y} \cdot \bar{E} \quad (2.22)$$

sendo: $\bar{Y}$ tem, $\bar{Y}_{ii}$ como elementos da diagonal principal e $\bar{Y}_{ij}$ como elementos fora da diagonal. Por definição[2]:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{ii} &= Y_{ii} \angle \theta_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} = \text{admitância do ponto para o nó } i \\ \bar{Y}_{ij} &= Y_{ij} \angle \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} = \text{negativo da admitância entre o nó } i \text{ e } j. \end{aligned} \quad (2.23)$$

A tensão interna dos geradores $E_i = \angle \delta_{io}$ é calculada da seguinte maneira: considere a tensão terminal usada temporariamente como referência, como mostrado na Figura 2.6. Se definirmos $\bar{I} = I_1 + jI_2$, então, para a relação $P + jQ = \bar{V} \bar{I}^*$ temos

$$I_1 + jI_2 = \frac{(P - jQ)}{V}.$$

sendo:

E = magnitude da tensão interna do gerador i ;

δ_{io} = ângulo inicial do gerador i .

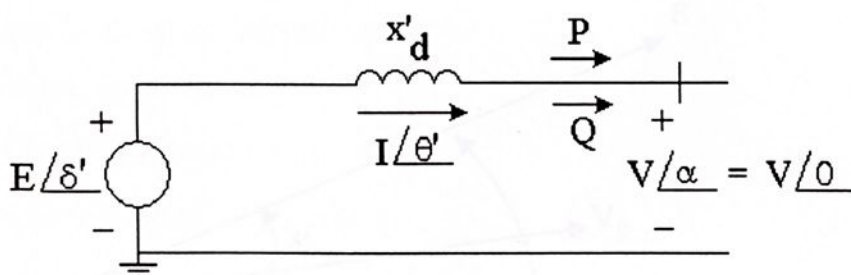


FIGURA 2.6: Representação do gerador para cálculo de δ_0 .

Mas visto que $E\angle\delta' = \bar{V} + jx'_d \bar{I}$, temos [2]:

$$E\angle\delta' = \left(\frac{V + Q \cdot x'_d}{V} \right) + j \left(\frac{P \cdot x'_d}{V} \right) \quad (2.24)$$

Sendo:

P = injeção de potência ativa na barra de geração;

Q = injeção de potência reativa na barra de geração;

V = tensão terminal da barra de geração;

α = ângulo da tensão terminal da barra de geração.

O ângulo inicial do gerador δ_0 , é então obtido pela adição da tensão subtransitória α com δ' [2]:

$$\delta_0 = \delta' + \alpha \quad (2.25)$$

ou graficamente

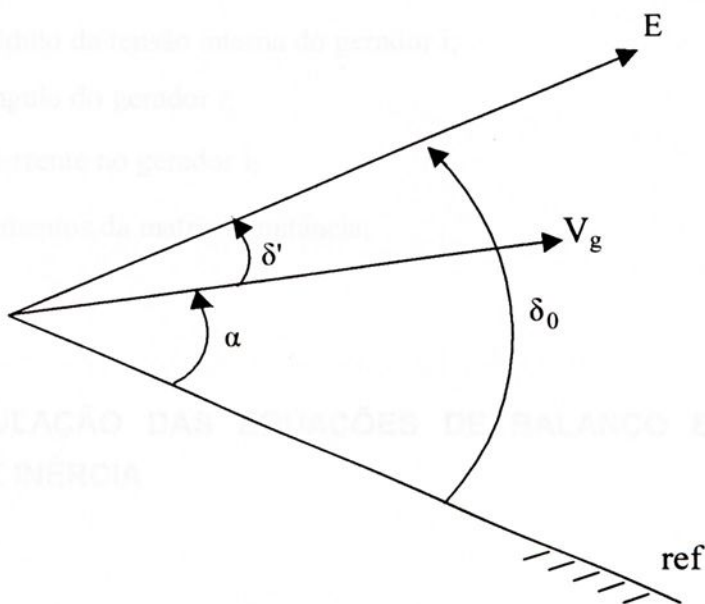


FIGURA 2.7: Obtenção do ângulo real da tensão.

A potência elétrica de saída para a máquina i é dada por:

$$P_{ei} = E_i \angle \delta_i \cdot I_{gi}^* = E_i \cdot (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \cdot I_{gi}^* \quad (2.26)$$

sendo que, da referência [2], temos:

$$\begin{bmatrix} I_g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & Y_{gr} \\ Y_{rg} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_g \\ V_r \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\begin{cases} I_n = Y_{nn} \cdot V_n + Y_{nr} \cdot V_r \\ 0 = Y_{rn} \cdot V_n + Y_{rr} \cdot V_r \end{cases} \quad (2.28)$$

sendo que “g” descreve os nós dos geradores e “r” descreve os nós restantes.

$$I_g = (Y_{gg} - Y_{gr} \cdot Y_{rr}^{-1} \cdot Y_{rg}) V_g \quad (2.29)$$

sendo:

E_i = módulo da tensão interna do gerador i ;

δ_i = ângulo do gerador i ;

I_{gi} = Corrente no gerador i ;

Y = elementos da matriz admitância;

2.4. FORMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE BALANÇO EM RELAÇÃO AO CENTRO DE INÉRCIA

No sistema de equações (2.15) dado até agora, os ângulos e velocidades dos geradores foram dados com respeito à forma de referência síncrona. Estes ângulos e velocidades também podem ser obtidos em relação ao centro de inércia (COI). O centro de inércia (COI) é definido como [4]:

$$\delta_{COI} = \frac{\sum_{i=1}^{n.\text{geradores}} M_i \cdot \delta_i}{\sum_{i=1}^{n.\text{geradores}} M_i} \quad (2.30)$$

$$\dot{\delta}_{COI} = \frac{\sum_{i=1}^{n.\text{geradores}} M_i \cdot \dot{\delta}_i}{\sum_{i=1}^{n.\text{geradores}} M_i} \quad (2.31)$$

sendo:

M_i = é a constante de inércia do gerador $i = 2.H(i)/\omega_R$

δ_{COI} = ângulo do centro de inércia



como:

$$\dot{\delta}_{COI} = \omega_{COI} \quad (2.32)$$

sendo:

ω_{COI} = velocidade angular do centro de inércia

Definimos, assim, os ângulos e velocidades dos geradores em relação ao centro de inércia como [4]

$$\theta_i = \delta_i - \delta_{COI} \quad (2.33)$$

$$\varpi_i = \dot{\delta}_i - \dot{\delta}_{COI} \quad (2.34)$$

sendo:

θ_i = ângulo do gerador i com relação ao COI

ϖ_i = velocidade angular do gerador i em relação ao COI

Assim, as equações de balanço do sistema tornam-se [4]

$$M_i \ddot{\omega} = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \quad (2.35)$$

$$\dot{\theta}_i = \varpi_i \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (2.36)$$

$$P_{COI} = M_T \dot{\omega}_{COI} = \sum_{i=1}^{n.ger.} P_{mi} - P_{ei} \quad (2.37)$$

sendo:

P_{COI} = potência de aceleração em relação ao COI

M_T = constante de inércia total de todos os geradores



Observe que as variáveis em relação ao COI satisfazem às seguintes equações [4]:

$$\sum_{i=1}^{n.\text{ger.}} M_i \theta_i = \sum_{i=1}^{n.\text{ger.}} M_i \varpi_i = 0 \quad (2.38)$$

2.5. SOLUÇÕES PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

A determinação do limite de estabilidade transitória e do tempo de extinção da falta, para vários tipos de faltas, é uma das maiores preocupações em operação e planejamento de sistemas de potência. O método convencional de determinação do limite de estabilidade transitória é baseado em simulações repetitivas, no domínio do tempo, de sistemas de equações dinâmicas. O método de simulação no domínio do tempo fornece resultados mais precisos e confiáveis, e sem a limitação da modelagem. Modelos de sistemas sofisticados e todos os controles associados podem ser facilmente incorporados neste método. Entretanto, há dois problemas inerentes a este método: a lentidão por consequência da integração numérica das equações dinâmicas, e a não informação sobre o grau de estabilidade (ou instabilidade) do sistema.

O método da função de energia transitória (TEF) é uma ferramenta alternativa para achar a estabilidade transitória de um sistema de potência [7]. Um aprimoramento significativo tem sido feito nas duas últimas décadas para fornecer precisão e confiabilidade a este método. Os trabalhos relacionados a este método são baseados no modelo clássico de sistemas de potência. As principais atrações deste método são a rapidez nos cálculos e a capacidade de produzir margens ou índices de estabilidade. Rapidez na determinação da margem de estabilidade tem sido alcançada com expressiva precisão. O método algumas vezes falha ao fornecer resultados práticos pelos problemas de não convergência associados aos cálculos do ponto de equilíbrio estável por iterações, especialmente para sistemas com altos carregamentos.

A referência [7] analisa a saída de resultados do método de simulação no domínio do tempo, através da função energia individual da máquina (IMEF) para achar a margem de



estabilidade transitória. Com o uso do IMEF não é necessário o cálculo da energia cinética corrigida. Para uma situação instável, o método pode fornecer a margem de estabilidade com cálculos triviais. Entretanto, para situações estáveis, ele requer simulações adicionais das equações dinâmicas do sistema em falta.

O melhor caminho parece ser através de uma solução híbrida, em que um método direto é incorporado em um programa de simulação passo a passo, ou através da obtenção de índices a partir de análises das variáveis envolvidas no problema. Além de fornecerem uma margem de estabilidade ou instabilidade, estes métodos podem também exigir menor esforço computacional.

2.5.1. SIMULAÇÃO PASSO A PASSO

A modelagem dos diversos componentes de um sistema de energia elétrica leva ao estabelecimento de: um conjunto de equações diferenciais que descrevem os geradores síncronos e seus controles; e outro conjunto composto por equações algébricas, que representam o estator das máquinas síncronas e a rede de transmissão, incluindo as cargas. Estas equações podem ser expressas de forma geral, como [11]:

$$\dot{x} = f(x,t) \text{ (equações diferenciais)} \tag{2.39}$$

$$g(x,t) = 0 \text{ (equações algébricas)} \tag{2.40}$$

sendo:

- f = funções vetoriais que definem as equações diferenciais;
- g = funções vetoriais que definem as equações algébricas;
- x = vetor das variáveis de estado das equações diferenciais;
- t = vetor das variáveis de estado das equações algébricas.



Os procedimentos para a resolução das equações diferenciais / algébricas são classificados como [3]:

Esquema Alternado: os conjuntos de equações diferenciais e algébricas são resolvidos separadamente para x e y para cada passo de integração. Se na resolução das equações diferenciais as variáveis u (subconjunto das variáveis x que aparecem nas equações diferenciais) não são atualizadas durante o passo de integração, então, são introduzidos erros de interface.

Esquema Simultâneo: os conjuntos de equações diferenciais são resolvidos ao mesmo tempo. Neste caso, as equações diferenciais são transformadas em equações algébricas usando fórmulas de integração. Deste modo, todas as equações algébricas são resolvidas em um único sistema.

2.5.2. MÉTODOS DIRETOS

2.5.2.1. MÉTODO DA FUNÇÃO DE ENERGIA TRANSITÓRIA (TEF) OU DA FUNÇÃO DE LYAPUNOV

Normalmente, desejamos conhecer o comportamento global do sistema do ponto de vista da estabilidade, por ser fundamental no estudo de sistemas dinâmicos. Em sistemas não-lineares, a estabilidade global nem sempre ocorre; em geral, apenas um conjunto de condições iniciais, contido no espaço R^n , possui trajetórias que convergem para o ponto de equilíbrio estável x_0 . Em sistemas de potência isso acontece, e a determinação deste conjunto de condições iniciais é o principal objetivo das análises. Matematicamente esse conjunto é denominado área de atração ou região de estabilidade e é definida por [19]:



$$A(x_0) \triangleq \left\{ x \in \mathbb{R}^n : \varphi(t, x) \rightarrow x_0, \text{ quando } t \rightarrow \infty \right\} \quad (2.41)$$

A determinação da área de atração de um ponto de equilíbrio não é tarefa trivial, mas, uma vez determinada, o problema de análise de estabilidade transitória fica resolvido segundo o esquema a seguir:

- Determina-se a área de atração A do ponto de equilíbrio estável do sistema pós-falta;
- Simula-se o sistema em falta até que sua órbita abandone a área de atração A do sistema pós-falta;
- O tempo em que a órbita do sistema em falta abandona a área de atração do pós-falta é o tempo crítico de abertura.

Portanto, se o defeito for eliminado antes do tempo crítico de abertura, a condição inicial do pós-falta estará contida na área de atração. Dessa forma, o sistema permanecerá estável. A Figura 2.8 ilustra o procedimento [19].

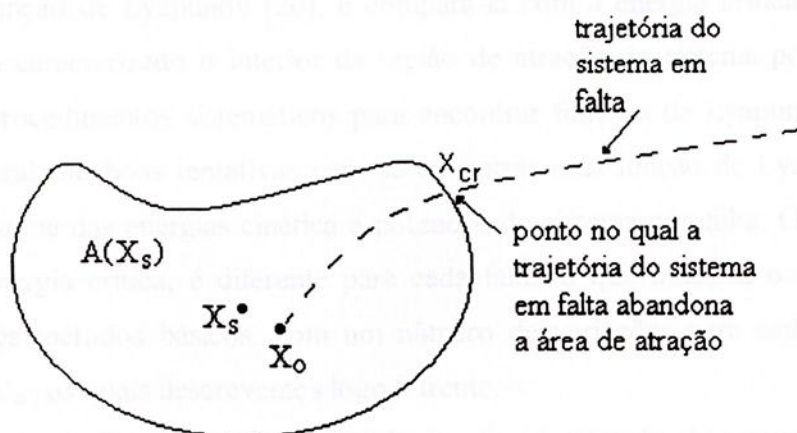


FIGURA 2.8: Região de atração com os pontos de equilíbrio.

X_s é ponto de equilíbrio estável pós-falta, x_0 é o ponto de operação pré-falta. Um defeito ocorre no sistema, tornando-o instável de tal forma que este começa a se afastar indefinidamente do ponto de operação devido a aceleração das máquinas. A órbita tracejada é a órbita do sistema quando sujeito a falta. X_{cr} é o ponto pelo qual a trajetória do sistema em falta abandona a área de atração. Se o defeito é eliminado antes do tempo crítico, a condição inicial do sistema pós-falta pertencerá à área de atração. Logo, a órbita correspondente a essa condição inicial x_1 convergirá para o ponto de equilíbrio estável x_0 . Caso contrário, isso não ocorrerá como pôde ser visto na figura anterior. As órbitas que se iniciam fora da região de atração poderão convergir para outros pontos de equilíbrio estáveis, desinteressantes do ponto de vista de sistemas de potência, ou tender ao infinito.

Resta, portanto, criar metodologias que permitam determinar a área de atração do sistema pós-falta. Nesse sentido, o método de Lyapunov tem sido um dos mais adequados à estimação da área de atração, pois é um método direto que permite a análise da estabilidade sem a necessidade do conhecimento da solução da equação diferencial, e fornece informações a respeito da área de atração.

O problema dessa metodologia é a necessidade de criação de funções auxiliares que permitam a análise da estabilidade. A criação dessas funções não é trivial, e uma boa escolha é fundamental para uma boa estimativa da área de atração.

O método de Lyapunov consiste basicamente em encontrar uma função $V_s(x)$ denominada função de Lyapunov [20], e compará-la com a energia crítica V_{cr} . Assim, se $V_s(x) < V_{cr}$ está caracterizado o interior da região de atração do sistema pós-falta, embora não existam procedimentos sistemáticos para encontrar funções de Lyapunov. As funções energia em geral são boas tentativas para se encontrar uma função de Lyapunov. $V_s(x)$ é geralmente a soma das energias cinética e potencial do sistema pós-falta. O cálculo de V_{cr} , ou seja, da energia crítica, é diferente para cada falta, o que dificulta o seu cálculo. Há atualmente três métodos básicos, com um número de variações para cada método, para resolução de V_{cr} , os quais descrevemos logo à frente.

O cálculo de V_{cr} , isto é, da região limite de estabilidade, é o passo mais difícil na aplicação do método TEF. Como podemos observar, os pontos de equilíbrio instáveis são os elementos limitantes da área de atração do ponto de equilíbrio estável em estudo. Esses pontos não pertencem à área de atração, no entanto, pertencem à fronteira da área de



atração. Por isso, esses pontos de equilíbrio instáveis serão os responsáveis pela estimativa da área de atração [19]. Logo, foram propostos vários métodos para calcular os pontos de equilíbrio instáveis, e, assim, estimar a área de atração. Dessa maneira, surgiram os métodos descritos a seguir [19]:

1. *Ponto de Equilíbrio (u.e.p) de Menor Energia;*
2. *Método PEBS - Superfície Limite de Energia Potencial;*
3. *Método BCU – Ponto de Equilíbrio Instável de Controle.*

1. Ponto de Equilíbrio de Menor Energia

Neste método, propõe-se o cálculo de todos pontos de equilíbrio instáveis (u.e.p) ao redor do ponto de equilíbrio estável em estudo. Sejam x_i 's os pontos de equilíbrio. Calcula-se $V_s(x_i)$ em todos os pontos de equilíbrio instáveis e a energia crítica é definida como sendo a energia do ponto de equilíbrio que tivesse a menor energia entre eles [19]:

$$V_{cr} = \min V_s(x_i) \quad (2.42)$$

O ponto de equilíbrio instável que possui a menor energia é conhecido como “*closest equilibrium point*”, pois é o ponto mais próximo energeticamente do ponto de equilíbrio estável em estudo. Determinada a energia crítica, simula-se numericamente o sistema durante a falta e calcula-se, a cada passo de integração, a energia do sistema. O instante de tempo que a energia do sistema atingir o valor da energia crítica, será uma aproximação do tempo crítico de abertura.

Segundo a teoria de Lyapunov esse método deve gerar uma estimativa da área de atração, que poderá ser muito menor que a verdadeira área de atração, gerando estimativas de tempo de abertura muito menores que os verdadeiros.

Observa-se que somente informações do sistema pós-falta foram utilizadas para se estimar a área de atração. A informação da trajetória do sistema durante a falta não foi levada em consideração. Portanto, para alguns defeitos, a estimativa do tempo crítico pode ser satisfatória, enquanto que para outros não.



Embora esse método seja uma extensão natural dos resultados de Lyapunov, o cálculo dos pontos de equilíbrio em um sistema de potência de grande porte é algo bastante complexo e exige um tempo de processamento muito elevado. Tal motivo inviabilizou a utilização prática deste método.

2. Método PEBS

O método PEBS (*Potential Energy Boundary Surface*) surgiu para tentar solucionar o problema da estimativa da área de atração, eliminando a necessidade do cálculo dos pontos de equilíbrio instáveis. Levando em consideração um sistema de uma máquina versus barramento infinito [19], temos a função energia para o sistema que pode ser dividida em energia cinética e energia potencial:

$$V_s = V_{ke} + V_{pe} \quad (2.43)$$

sendo:

V_{ke} = energia cinética transitória

V_{pe} = energia potencial transitória

V_s = energia total do sistema

Nos pontos de equilíbrio do sistema, a velocidade é nula e $V_{pe}(\delta)$ é um ponto de extremo com relação a δ .

Ao redor da posição de equilíbrio estável δ^s , existe uma bacia energética cuja fronteira é conhecida como PEBS. A fronteira é formada pelos pontos extremos de energia potencial que, neste caso, coincidem com as posições dos pontos de equilíbrio instáveis. O método PEBS aproveita essas idéias para encontrar o ponto de equilíbrio de controle. Integra-se numericamente a equação diferencial do sistema durante a falta, até que a projeção da trajetória do sistema em falta no eixo do ângulo δ cruze a PEBS. O ponto em que a trajetória cruzar a PEBS será conhecido como *exit point*.

A extensão dessas idéias para sistemas multimáquinas não é trivial. O ponto de equilíbrio estável está localizado na parte mais baixa da bacia com a menor energia



potencial, e os pontos de equilíbrio instáveis são máximos locais da energia potencial ao longo de alguma direção. Logicamente, os pontos de equilíbrio instáveis não são suficientes para limitar a bacia energética ao redor do ponto de equilíbrio instável. A fronteira é composta por pontos extremos (máximos) de V_{pe} e por linhas perpendiculares às curvas de nível de V_{pe} , de tal forma, que as linhas interligam os pontos extremos. O conjunto formado por elas e pelos pontos extremos é conhecido como PEBS.

O método PEBS tem o intuito de evitar o cálculo dos pontos de equilíbrio para estimativa da área de atração. Por este motivo, é um método bastante rápido, porém pode efetuar estimativas não conservativas do ponto de vista da estabilidade.

3. Método BCU

Os métodos que calculam o u.e.p. de controle sofrem sérios problemas de convergência quando o solucionam, especialmente quando o sistema é altamente carregado ou muito pouco carregado, ou se o modo de instabilidade do problema é muito complexo. Esses problemas usualmente aparecem se o ponto de saída para a solução do u.e.p. de controle não for suficientemente próximo do u.e.p. de controle exato. Alguns problemas de convergência podem ser superados pelo método BCU o qual tem a capacidade de produzir um melhor ponto de saída para solução do u.e.p. de controle [11].

O método BCU calcula o u.e.p. de controle de um sistema de potência, utilizando-se da relação entre a fronteira de estabilidade do sistema original e a fronteira de estabilidade do sistema reduzido, dado por[19]:

$$\dot{\delta} = P_m - P_e \quad (2.44)$$

O ponto de equilíbrio do sistema reduzido é o mesmo do sistema original. Assim, o método BCU calcula o u.e.p. de controle como segue:

1. da trajetória do sistema em falta, detecta-se o ponto de saída (exit point) δ^* que é o ponto em que a projeção da trajetória do sistema em falta $\delta(t)$ cruza a fronteira de estabilidade do sistema reduzido (PEBS);



2. utiliza-se δ^* como condição inicial e resolvem-se numericamente as equações diferenciais do sistema reduzido para encontrar o mínimo local de $\sum_{i=1}^n \|f_i(\delta)\|$; seja este ponto δ_0^* .
3. utiliza-se o ponto δ_0^* como condição inicial para encontrar o zero da função $f(\delta)$, ou seja, encontrar o ponto de equilíbrio instável de controle do sistema reduzido δ_{co}^* .
4. o ponto de equilíbrio instável de controle será $(\delta_{co}^*, 0)$.

Para encontrar o ponto no qual a projeção da trajetória do sistema em falta cruza a fronteira de estabilidade do sistema reduzido pós-falta no passo (1), verifica-se o momento em que a energia potencial atinge um máximo, durante a trajetória. No passo (2), a função $\sum_{i=1}^n \|f_i(\delta)\|$ é uma medida da distância entre um ponto δ qualquer e os pontos de equilíbrio do sistema reduzido. A Figura 2.9 ilustra o método.



FIGURA 2.9: Ilustração do método BCU.

O BCU tem-se mostrado eficiente para várias situações de defeito, nos mais variados sistemas de potência, mas todos os métodos que utilizam o ponto de equilíbrio de controle, por mais eficientes que sejam, garantem apenas a existência de estabilidade para o primeiro *swing* (balanço).

2.5.2.2. MÉTODO DA FUNÇÃO ENERGIA TRANSITÓRIA DA MÁQUINA CRÍTICA

Em geral [7], para um dado distúrbio em um grande sistema de potência, somente poucas máquinas são seriamente perturbadas. A dinâmica destas máquinas, em geral, dita a estabilidade de todo o sistema. É esperado que, para uma situação instável, uma das máquinas mais seriamente perturbadas, chamada de máquina crítica, perca inicialmente o sincronismo e, conseqüentemente, outras máquinas seriamente perturbadas, talvez se juntem à máquina crítica para formar um grande grupo de máquinas instáveis. Portanto, a estabilidade do sistema pode ser avaliada, conferindo-se somente o limite de estabilidade da máquina crítica, que inicia a instabilidade.

Analisando somente a máquina crítica podemos dizer que um sistema é estável, no primeiro balanço, se o ângulo pós-falta da máquina tiver um ângulo de pico (e, portanto, velocidade zero). Caso contrário, ou seja, caso não haja um ângulo de pico no primeiro balanço o sistema será considerado instável. Logo, neste método basta analisar a energia cinética da máquina crítica durante o primeiro balanço de energia. Se esta energia passar por zero, o sistema é estável, como podemos observar na Figura 2.10, caso a energia cinética não passe por zero, este sistema é instável, como podemos ver na Figura 2.11.

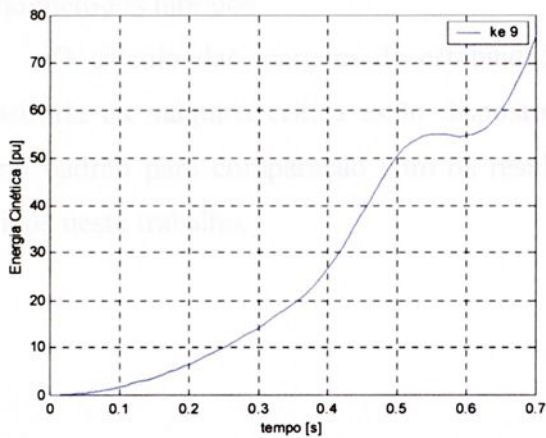


FIGURA 2.10:Energia cinética para a máquina crítica 9. Sistema de 16 geradores. Caso instável.

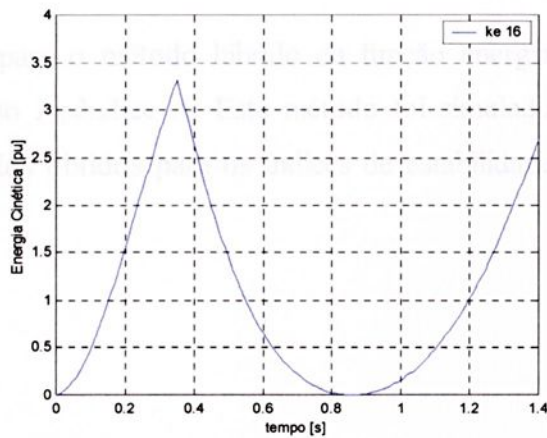


FIGURA 2.11:Energia cinética para a máquina crítica 9. Sistema de 16 geradores. Caso estável.

2.5.2.3. MÉTODO DO CRITÉRIO DAS ÁREAS IGUAIS ESTENDIDO (EEAC)

Neste método, a idéia fundamental é de se fazer sucessivas transformações do sistema multimáquinas para sistemas equivalentes de duas máquinas e, depois, em um sistema equivalente máquina barramento infinito (OMIB) para aplicação do Critério das Áreas Iguais (EAC). Estas transformações requerem a identificação adequada do grupo de máquinas que perdem o sincronismo para cada perturbação [21].

2.5.3. MÉTODOS HÍBRIDOS

Nos métodos híbridos incorpora-se um dos métodos diretos já apresentados em um programa de simulação passo a passo. Neste caso, além de informações sobre o grau de estabilidade ou instabilidade, o esforço computacional é menor, pois em muitos casos pode-se tirar uma conclusão a respeito do caso estudado antes do tempo total de simulação. Este método tem-se mostrado mais eficiente que os métodos diretos puros e que simulações completas no domínio do tempo.

O método direto baseado na função energia da máquina crítica assim como o método EEAC são mais utilizados em conjunto com simulações passo a passo, ou seja, como métodos híbridos.

O cálculo das margens de estabilidade para o método híbrido da função energia transitória da máquina crítica estão dispostos no Apêndice A. Este método foi simulado como padrão para comparação com os resultados obtidos para os índices de estabilidade obtidos neste trabalho.



2.5.3.1. MÉTODO HÍBRIDO SIME (Single machine equivalent)

O método SIME [21] conta com uma transformação no OMIB (uma máquina contra barramento infinito) onde a trajetória do OMIB é calculada da trajetória das máquinas do sistema de potência. Dependendo de como as trajetórias são fornecidas pelo programa no domínio do tempo ou por medidas de tempo real, o SIME tem duas formas diferentes, o SIME preventivo e o emergencial.

O SIME preventivo é desenvolvido para análise de estabilidade transitória em tempo real e controle preventivo. Isto fornece técnicas de pré e pós-processamento: pré-processamento das contingências filtrando e ordenando; pós-processamento avaliação do grau de estabilidade em vista de contingências perigosas (severas) e as ações corretivas correspondentes. Tal técnica em particular é desenvolvida no método MAT (*transient stability-constrained maximum allowable transfer*), o qual determina as ações corretivas necessárias para estabilizar todas as contingências perigosas simultaneamente, enquanto garante transferência máxima de potência entre áreas predefinidas [21].



III – ÍNDICES DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

3.2. ALGORITMO PARA OBTENÇÃO DOS ÍNDICES DE ESTABILIDADE

3.1. INTRODUÇÃO

É esperado que uma classificação rápida das contingências seja parte integral de qualquer prática, em tempo real, de análise dinâmica de segurança (DSA). A ordenação das contingências requer o uso de índices de severidade, e para o DSA tal índice deve ser uma medida de estabilidade. Para DSA, os índices de severidade são complexos e muito pouco têm sido testados para classificação. Na referência [1], vários índices são propostos para classificação das contingências em DSA em tempo real. Estes índices são baseados nos conceitos de coerência, conversão transitória de energia entre energia cinética e energia potencial, e três produtos escalares de sistemas variáveis.

Embora a simulação no domínio do tempo seja a análise mais precisa de estabilidade transitória, um método de classificação de contingências próspero deve ser usado para limitar os cálculos a um nível controlável. Usualmente há três requisitos básicos em classificação de contingências em DSA [1]:

- Precisão Não se deve perder qualquer contingência séria, isto é, evitar o mascaramento do problema.
- Velocidade Deve ser muito mais rápido que a simulação completa.
- Número Deve ser capaz de conduzir um grande número de contingências.

A ordenação é utilizada para se calcular os índices, os quais são relativos às medidas de severidade na condição transitória. Os índices são importantes para o sucesso da classificação. Bons índices podem produzir resultados rápidos e precisos.

3.2. ALGORITMO PARA OBTENÇÃO DOS ÍNDICES DE ESTABILIDADE

O programa, para obtenção dos índices de desempenho em análise da estabilidade transitória, segue o algoritmo apresentado a seguir.

1. Leitura do caso base e dos dados do sistema em operação normal são lidas as configurações do sistema, variáveis de geração, e a característica de carga. Esses dados são obtidos pelo fluxo de carga do sistema. São lidos, no próximo passo, os dados referentes à contingência ocorrida. Neste trabalho, a contingência adotada foi um curto-circuito trifásico em uma linha de transmissão, próximo a uma das barras.

2. Monta-se a parte estática da rede representada pela equação :

$$\bar{I} = \bar{Y} \cdot \bar{E}$$

que é mantida na forma expandida sem redução às barras internas de geração, o que permite incorporar outros modelos de carga.



3. Iniciamos a simulação passo a passo. Utilizamos o Modelo Clássico de geradores e o Método Trapezoidal para solucionar as equações diferenciais.

4. Armazenam-se os índices de desempenho ao longo da simulação passo a passo.

5. Encerram-se as simulações de acordo com o critério de parada escolhido e obtêm-se os índices de desempenho.

3.3. CÁLCULO DE ÍNDICES PARA INDICAR O GRAU DE SEVERIDADE DAS PERTURBAÇÕES

O método de simulação passo a passo com cálculo de índices de estabilidade foi escolhido pois tem algumas vantagens em relação aos outros métodos. Os inconvenientes nestes métodos que se tenta evitar são:

- Necessidade do cálculo explícito da superfície limite de energia;
- Necessidade do cálculo da energia do sistema, reinserindo a falta (situação fictícia usada para obter a margem de estabilidade);
- Necessidade de obtenção do OMIB equivalente.

Os testes, apresentados para ilustração dos índices, foram realizados com um sistema de potência teste, extraído de [9]. O diagrama unifilar é mostrado na Figura 3.1. Este é um sistema de porte razoável, englobando 16 geradores, 35 cargas, 68 barras e 86 ligações (linhas de transmissão e transformadores), que permite realizar testes para avaliar com detalhes os índices propostos em [1].



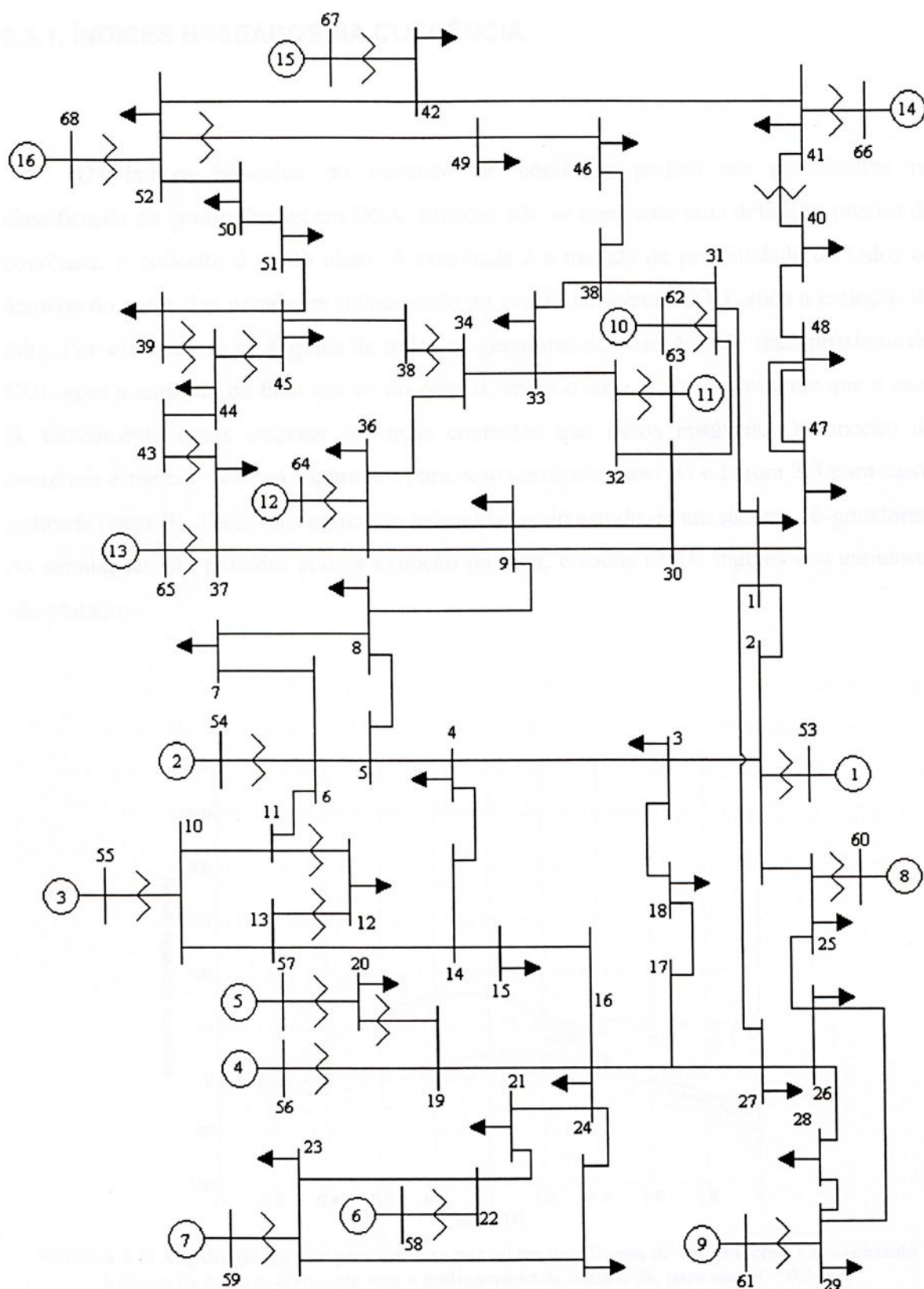


FIGURA 3.1: Diagrama Unifilar do Sistema de 16 geradores e 68 barras.

3.3.1. ÍNDICES BASEADOS NA COERÊNCIA

Os índices baseados no conceito de coerência podem ser promissores na classificação de contingências em DSA. Embora não se apresente uma definição precisa de coerência, o conceito é muito claro. A coerência é a medida de proximidade de todos os ângulos do rotor dos geradores (relacionado ao centro de inércia COI), após a extinção da falta. Por exemplo, se os ângulos de todos os geradores do caso A estão mais próximos do COI, após a extinção da falta que os do caso B, então o caso A é mais coerente que o caso B. Obviamente casos estáveis são mais coerentes que casos instáveis. O conceito de coerência é melhor visto na Figura 3.2 para casos estáveis (caso A) e Figura 3.3 para casos instáveis (caso B). Estes dois casos são selecionados do estudo de um sistema 16-geradores. As simulações são plotadas após a extinção da falta, e todos os 16 ângulos dos geradores são plotados.

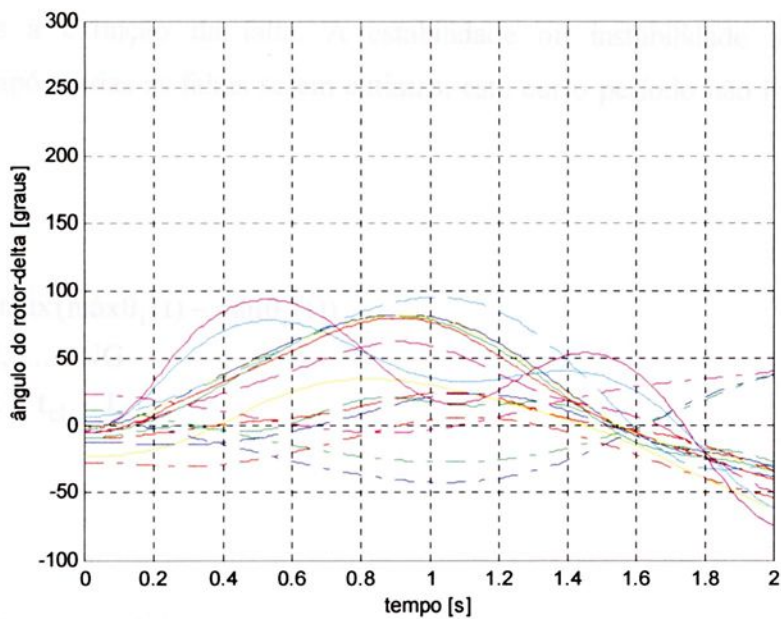


FIGURA 3.2: Ângulos do gerador para um caso estável em um sistema de 16-geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um tcl = 0,216 s.

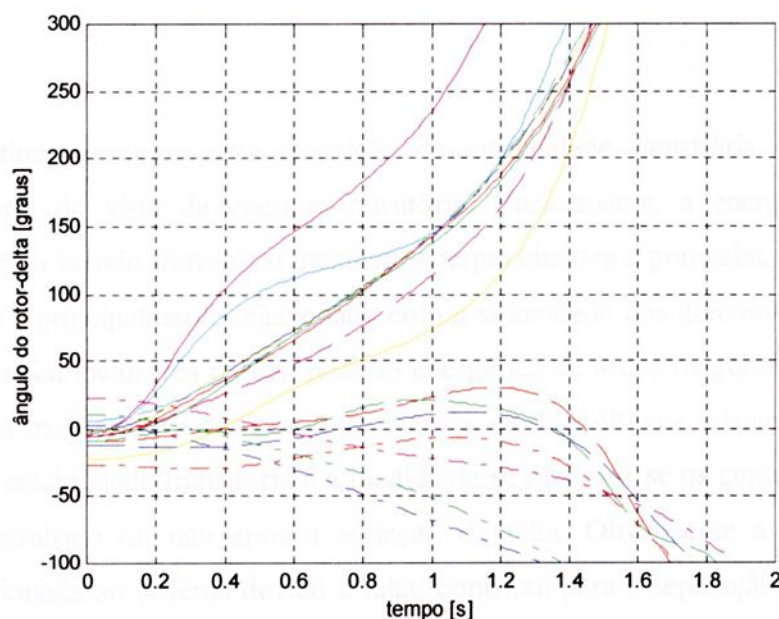


FIGURA 3.3: Ângulos do gerador para um caso estável em um sistema de 16-geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um $t_{cl} = 0,256$ s.

A seguir, o índice de desempenho [1] é definido para o conceito de coerência. Ele é dado pela máxima diferença entre o ângulo máximo e o ângulo mínimo, em um curto período após a extinção da falta. A estabilidade ou instabilidade somente pode ser determinada após todas as faltas serem extintas, este curto período não inclui o período em falta.

$$PII = \max(\max \theta_i(t) - \min \theta_i(t))$$

$$i = 1, 2, \dots, NG$$

$$t_{cl} \leq t \leq t_{cl} + T$$

sendo:

NG: número total de geradores.

t_{cl} : tempo de extinção da falta.

T: duração do curto período após a extinção da falta.

3.3.2. ÍNDICES BASEADOS NA CONVERSÃO TRANSITÓRIA DE ENERGIA

Apresentaremos agora uma descrição da estabilidade transitória em sistemas de energia do ponto de vista da energia transitória. Basicamente, a energia transitória é definida a partir do estudo transitório incluindo energia cinética e potencial. O transitório de energia cinética é principalmente relacionado com a velocidade dos geradores. O transitório de energia potencial inclui três partes: posição energética de todos os geradores em relação ao COI, energia magnética, e dissipação de energia, os dois últimos relacionados à rede de transmissão. A estabilidade transitória é a medida de se observar se os geradores do sistema perdem o sincronismo ou não após a extinção da falta. Obviamente a energia cinética transitória adicionada ao sistema devido a falta, contribui para a separação do sistema. E o estudo também mostra que somente a energia cinética corrigida contribui para a separação do sistema. Se o sistema tem capacidade suficiente de energia potencial, então o excesso de energia cinética, injetada dentro do sistema, pode ser absorvida, o sistema não perderá o sincronismo, e alcançará um novo ponto de equilíbrio estável.

Baseado na análise intuitiva da conversão de energia após a falta ser extinta, dois exemplos de energia cinética e energia potencial são obtidos ao longo da trajetória pós-falta, isto é, após a extinção de todas as faltas. Figura 3.4 (caso A) e 3.5 (caso B) mostram as curvas de energia pós-falta para os mesmos casos estáveis e instáveis para um sistema de 16 geradores.



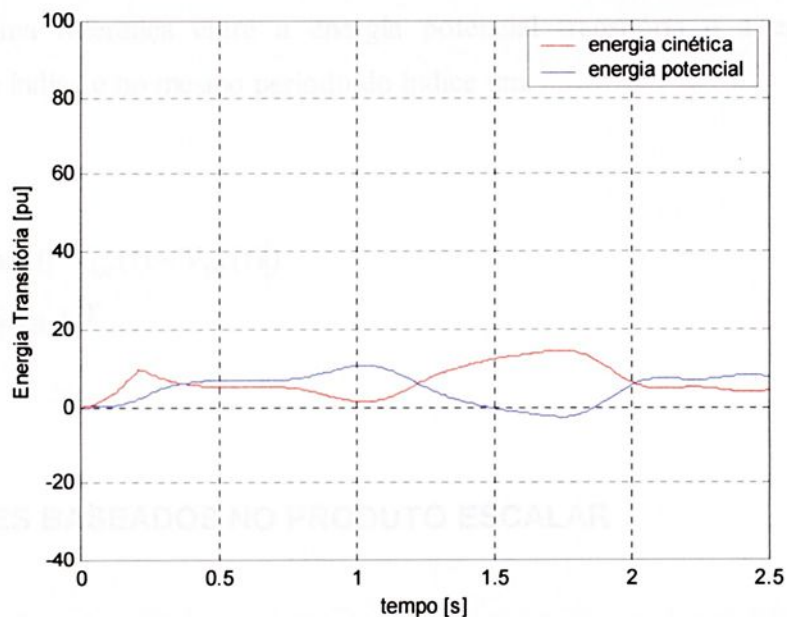


FIGURA 3.4: Curvas de energia potencial e cinética para um caso estável em um sistema de 16-geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um $t_{cl} = 0,216$ s.

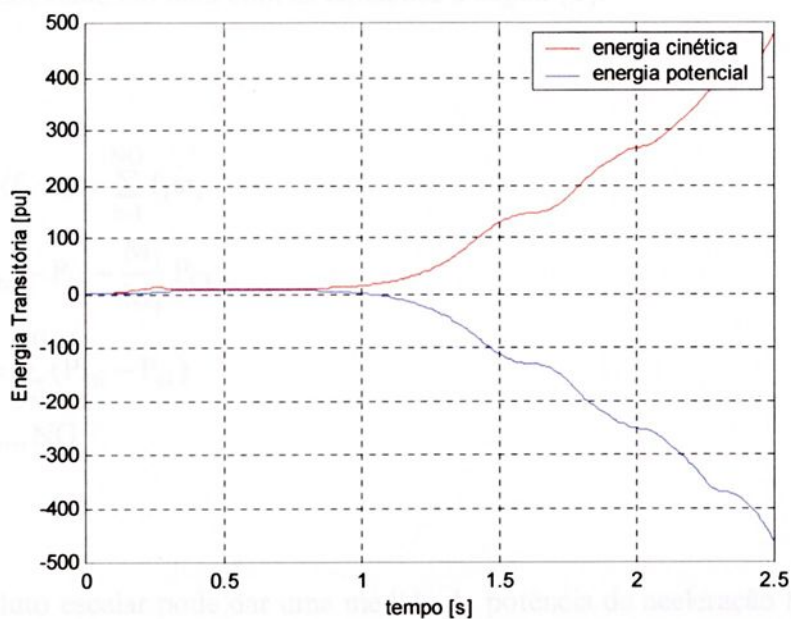


FIGURA 3.5: Curvas de energia potencial e cinética para um caso estável em um sistema de 16-geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um $t_{cl} = 0,256$ s.

Em seguida, é definido o índice do conceito de conversão de energia [1]. O índice dois é a máxima diferença entre a energia potencial transitória e a energia cinética transitória. Este índice é no mesmo período do índice um.

$$PI2 = \max(|V_{ke}(t) - V_{pe}(t)|)$$

$$t_{cl} \leq t \leq t_{cl} + T$$

3.3.3. ÍNDICES BASEADOS NO PRODUTO ESCALAR

O produto escalar foi definido para detectar o ponto de saída no método TEF. O ponto de saída é caracterizado pela máxima energia potencial transitória com respeito a rede pós-falta. Calculamos o produto escalar para o vetor de diferença de potência em falta e o vetor de velocidade em falta com as equações a seguir [1]:

$$dot1 = \langle f, \varpi \rangle = \sum_{i=1}^{NG} f_i \varpi_i$$

$$f_i = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_t} P_{COI}$$

$$P_{COI} = \sum_{i=1}^{NG} (P_{mi} - P_{ei})$$

$$i = 1, \dots, NG$$

O produto escalar pode dar uma medida da potência de aceleração total, e o sistema de potência (incluindo geradores e rede) a resposta para esta potência de aceleração. Logo, este pode ser um bom índice para a ordenação dinâmica das contingências.



são definidos:

$$\text{dot2} = \langle f, \theta \rangle = \sum_{i=1}^{NG} f_i \theta_i$$

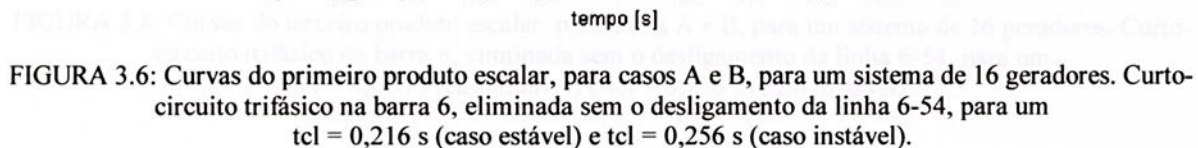
$$\text{dot3} = \langle \varpi, \theta \rangle = \sum_{i=1}^{NG} \varpi_i (\theta_i - \theta_i^{cl})$$

onde:

$$\text{dot3} = \langle \varpi, \theta \rangle = \sum_{i=1}^{\text{NG}} \varpi_i (\theta_i - \theta_i^{\text{cl}})$$

θ_i^{cl} : ângulo do rotor para o tempo de extinção da falta para o gerador i .

Dois exemplos para os três produtos escalares são obtidos ao longo da trajetória pós-falta. As Figuras 3.6, 3.7 e 3.8 mostram duas curvas de produtos escalares para casos estáveis e instáveis, respectivamente.



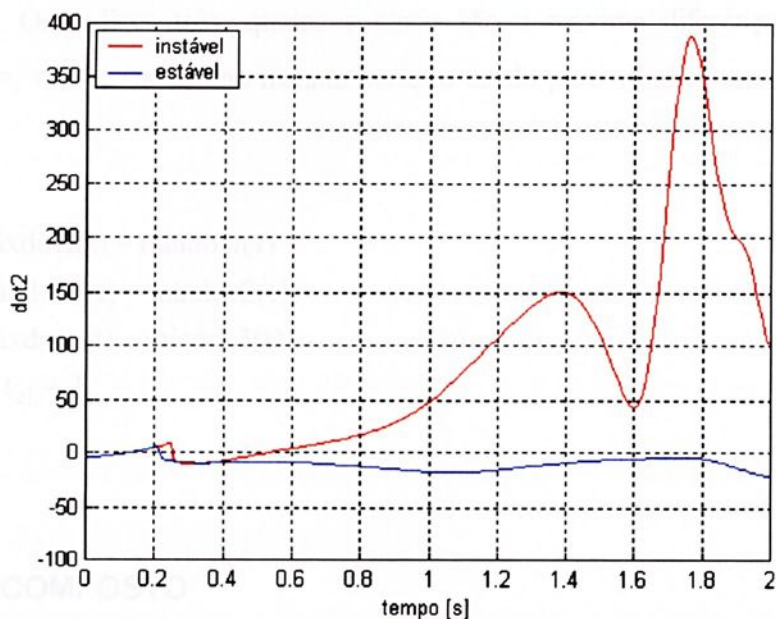


FIGURA 3.7: Curvas do segundo produto escalar, para casos A e B, para um sistema de 16 geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um $t_{cl} = 0,216$ s (caso estável) e $t_{cl} = 0,256$ s (caso instável).

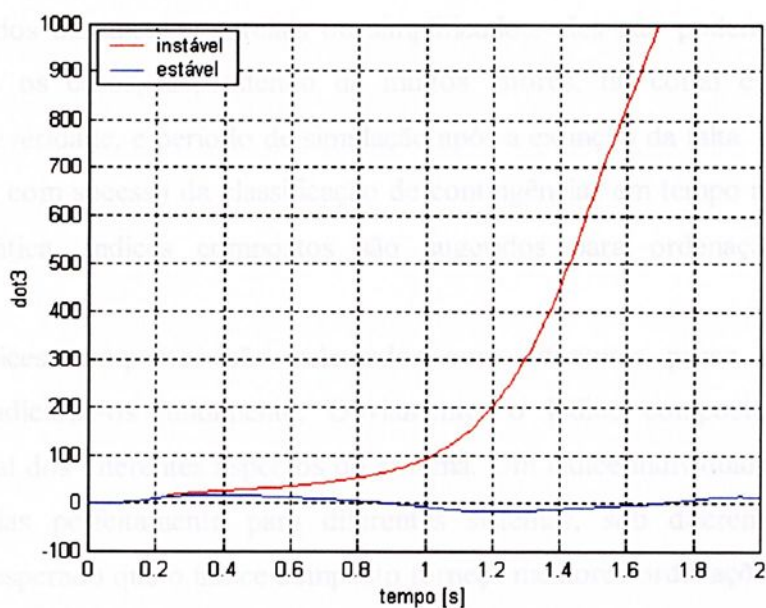


FIGURA 3.8: Curvas do terceiro produto escalar, para casos A e B, para um sistema de 16 geradores. Curto-circuito trifásico na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54, para um $t_{cl} = 0,216$ s (caso estável) e $t_{cl} = 0,256$ s (caso instável).

Existem três índices definidos do conceito destes três produtos escalares respectivamente. Os índices três, quatro e cinco são a máxima diferença dos produtos escalares $\langle f, \varpi \rangle$, $\langle f, \theta \rangle$, $\langle \varpi, \theta \rangle$ no mesmo período usado para o índice um.

$$PI3 = \text{máxdot1}(t) - \text{míndot1}(t)$$

$$PI4 = \text{máxdot2}(t) - \text{míndot2}(t)$$

$$PI5 = \text{máxdot3}(t) - \text{míndot3}(t)$$

$$t_{cl} \leq t \leq t_{cl} + T$$

3.3.4. ÍNDICE COMPOSTO

O conceito de classificação de contingências implica na apresentação de um conjunto de cálculos simplificados e rápidos, usando seus resultados para ordenar as severidades de cada contingência. Enquanto vários novos índices propõem ser calculados usando resultados de cálculos parciais ou simplificados, eles não podem, confiavelmente, capturar todos os casos, dependendo de muitos fatores, tal como escala do sistema, distúrbios de severidade, e período de simulação após a extinção da falta. Da experiência de implementação com sucesso da classificação de contingências em tempo real, em análise de segurança estática, índices compostos são sugeridos para ordenação e seleção de contingências.

Os índices compostos são calculados com diferentes pesos para cada índice individual e adiciona-os juntamente. Obviamente, o índice composto pode dar uma avaliação global dos diferentes aspectos do sistema. Um índice individual não pode ordenar as contingências perfeitamente para diferentes sistemas, sob diferentes condições de severidade. É esperado que o índice composto forneça melhores ordenações.



IV - RESULTADOS OBTIDOS PARA A ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA ATRAVÉS DE ÍNDICES DE DESEMPENHO

Para verificar a metodologia apresentada até agora, foi utilizado um programa que realiza os processos descritos anteriormente. Este programa foi feito utilizando-se da linguagem Fortran, sendo executado na plataforma do Microsoft Developer Studio do Fortran PowerStation 4.0 .

Vários sistemas foram simulados e mostram claramente o grau de estabilidade ou instabilidade dos sistemas após a perturbação. A avaliação da estabilidade na apresentação dos resultados é feita, comparando-se com a margem de estabilidade obtida com o método [7]. Os graus de estabilidade ou instabilidade são dados pelo método híbrido da função de energia transitória para a máquina crítica (Margem de Estabilidade) e pelos índices baseados na coerência, na conversão transitória de energia e nos três produtos escalares apresentados. Os índices classificam as contingências em reduzido tempo de simulação, sendo que o modelo utilizado é o modelo clássico.



Também atribuímos pesos individuais a cada índice para obtermos um único índice composto, o qual é esperado que forneça melhores resultados. Este índice composto foi normalizado para facilitar o entendimento dos resultados.

Foram utilizados vários sistemas para testar a eficiência do programa de análise de estabilidade transitória. Descrevemos agora estes sistemas:

- Um sistema de pequeno porte com 4 geradores e 6 barras (Figura A.1), do qual retiramos alguns valores para comparação de resultados, pois com esse sistema torna-se mais fácil observar a eficiência do processo;
- Um sistema, também de pequeno porte, com 3 geradores e 9 barras, extraído de [2], do qual retiramos também vários resultados referentes aos índices em questão;
- Um sistema teste de porte razoável, englobando 16 geradores, 35 cargas, 68 barras e 86 ligações (linhas de transmissão e transformadores), extraído de [9], com o qual foram realizados testes mais complexos, com maior detalhamento, pois este sistema já se assemelha mais a um sistema real de potência. O diagrama unifilar do sistema é mostrado na Figura 3.1.
- Um sistema real de potência, extraído de [15], constituído por 17 geradores, 162 barras e 284 ligações (IEEE17), da rede do estado de Iowa, ao longo das margens do rio Missouri. Para uma falta próxima às unidades geradoras, um grande número de máquinas são seriamente perturbadas.

As contingências abordadas são sempre um curto-circuito trifásico ocorrendo em uma barra, sendo eliminadas com desligamentos em linhas de transmissão ou em outros casos sem desligamentos, com um tempo t_{cl} de eliminação da falta. O passo de integração utilizado na simulação dos casos apresentados é de 10^{-3} .

Os resultados estão apresentados seqüencialmente, sendo que, apresentamos primeiro os critérios de parada (tempo máximo de simulação para obtenção do resultado), que no total são sete, para os sistemas descritos acima. Estes critérios tendem a deixar o processo mais rápido, e se possível com a mesma confiabilidade.

Utilizamos sete critérios de parada, relacionados ao tempo de simulação. Um dos critérios consiste em realizar as simulações até um tempo fixo de 2,5 segundos ou 3,0



segundos, dependendo do caso. Em dois dos critérios utilizamos a energia potencial como parâmetro de parada. Em um utilizamos o primeiro balanço da energia potencial, ou seja, o primeiro pico de energia potencial, como critério de parada. No outro utilizamos o segundo pico de energia potencial como parada. Utilizamos também mais dois critérios de parada com um tempo fixo, após a extinção da falta em t_{cl} . Um deles usa um tempo de 0,5 segundos, enquanto o outro utiliza o tempo de 1,0 segundo. Outro critério utilizado relaciona-se com a potência elétrica para a máquina crítica, sendo que nesse método usamos o segundo pico de potência elétrica para finalizar as simulações. E por último um método baseado na potência elétrica total, no qual usamos como critério de parada o segundo pico de potência elétrica.

Na Figura 4.1 podemos observar os dois critérios de parada relacionados aos balanços de energia potencial. Um deles utiliza o primeiro pico de energia potencial como critério de parada, enquanto o outro utiliza o segundo pico de energia potencial para finalizar as simulações. Esta figura nos mostra os tempos de simulação relacionados à energia transitória, para uma falta ocorrida na barra 29, eliminada sem o desligamento da linha 29-28, no sistema de 16 geradores e 68 barras. O tempo de eliminação do defeito é de 0,366 segundos. Pela figura, podemos observar que os tempos de simulação são, respectivamente, 0,600 s e 0,810 s.

Na Figura 4.2 é utilizado como critério de parada um tempo fixo de simulação, após a extinção da falta. Os tempos utilizados são de 0,5 s e de 1,0 s. Os mesmos parâmetros anteriores foram utilizados para facilitar comparações entre os critérios. Assim os tempos de simulação são, respectivamente, 0,866 s e 1,366 s.

Na Figura 4.3 é mostrado o tempo de simulação utilizando como critério de parada o segundo pico de potência elétrica para a máquina crítica. A falta ocorre na barra 29 e é eliminada sem o desligamento da linha 29-28, no sistema de 16 geradores, com um tempo de eliminação do defeito de 0,366 s. A máquina crítica obtida através do método apresentado no Apêndice A é a máquina número nove. O tempo de simulação é de 0,790 s.

Na Figura 4.4 mostramos uma análise do tempo de simulação utilizando como critério de parada o segundo pico de potência elétrica total. Os parâmetros do sistema são os mesmos apresentados acima. O tempo de simulação, neste caso, foi de 0,760 s.

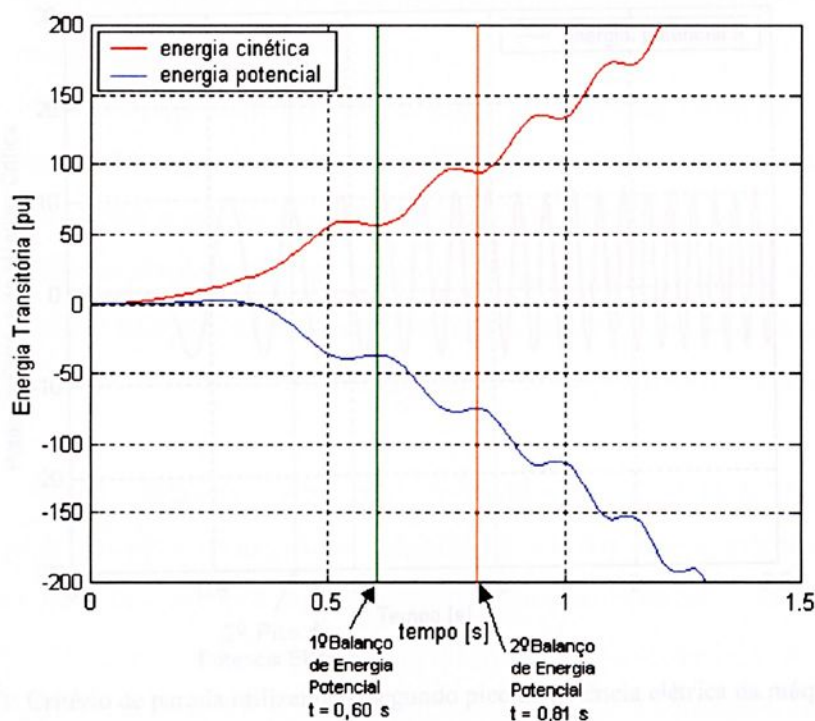


FIGURA 4.1: Critério de parada no 1º e 2º pico de energia potencial.

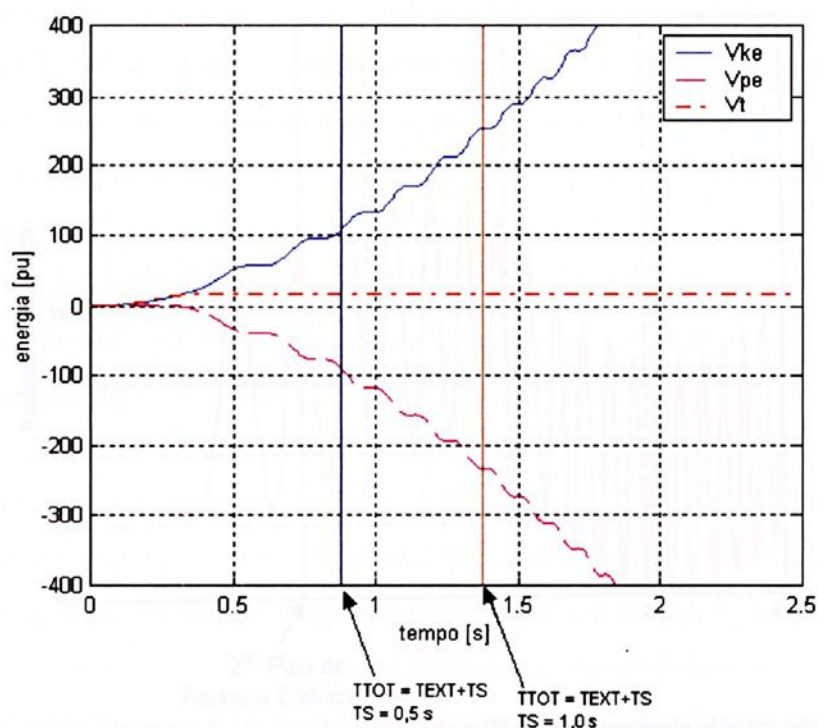


FIGURA 4.2: Critérios de parada com tempo de simulação fixo.

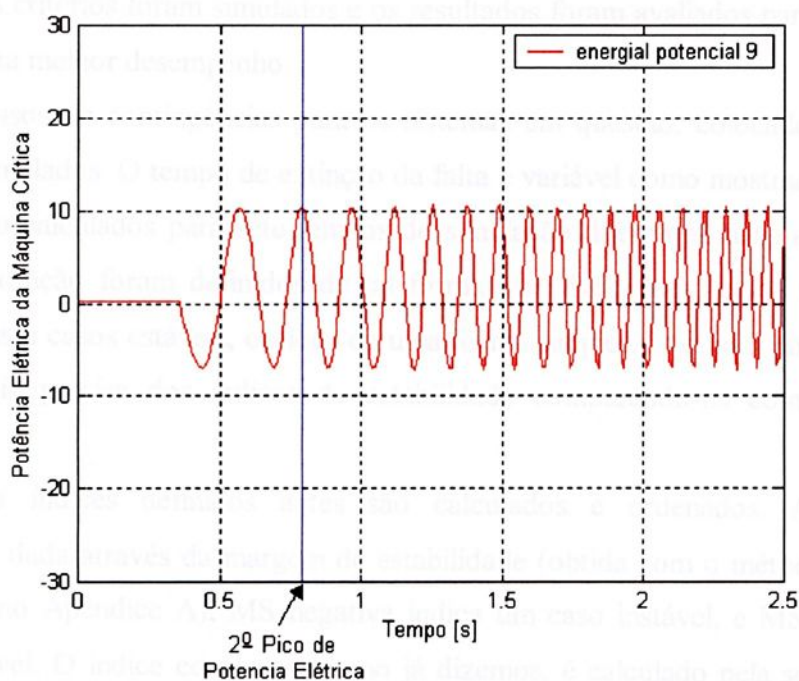


FIGURA 4.3: Critério de parada utilizando o segundo pico de potência elétrica da máquina crítica.

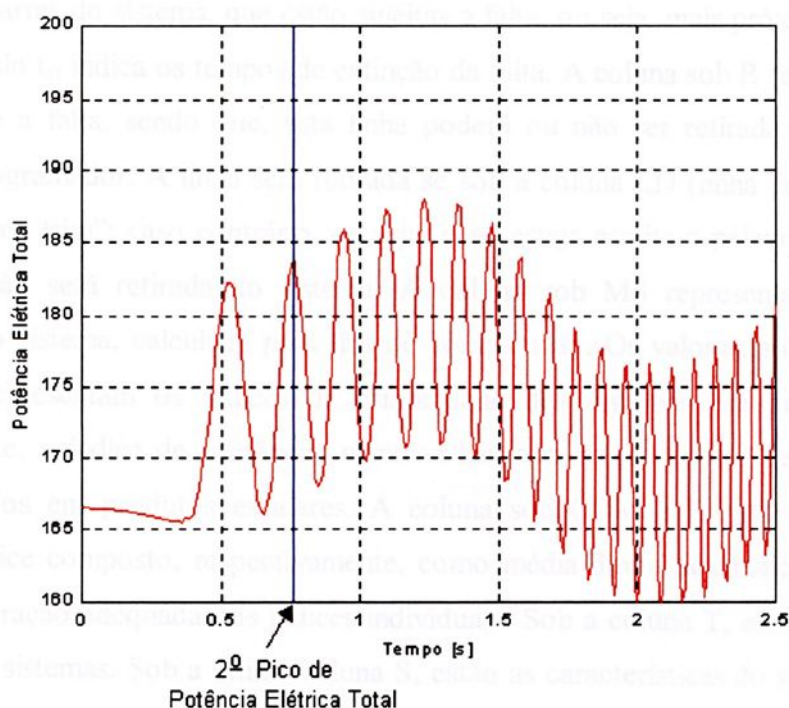


FIGURA 4.4: Critério de parada utilizando o 2º pico de potência elétrica total.

Todos os critérios foram simulados e os resultados foram avaliados para sabermos qual deles apresenta melhor desempenho.

Vários casos de contingências para os sistemas em questão, colocados nas tabelas a seguir, são simulados. O tempo de extinção da falta é variável como mostrado nas tabelas, e os índices são calculados para sete tempos de simulação diferentes já apresentados. Estes tempos de extinção foram definidos de tal forma que tivéssemos, casos muito instáveis, casos instáveis e casos estáveis, obtidos de uma forma simples. Isto para podermos ter uma avaliação mais precisa dos índices de estabilidade comparando-os com a margem de estabilidade.

Os cinco índices definidos antes são calculados e ordenados. A avaliação da estabilidade é dada através da margem de estabilidade (obtida com o método da referência [7], descrito no Apêndice A), MS negativa indica um caso instável, e MS positiva indica um caso estável. O índice composto, como já dizemos, é calculado pela soma dos índices ponderados. O índice composto é normalizado, ou seja, todos os números são escalonados dentro de um limite entre zero e um.

Das Tabelas 1 a 28 podemos dizer que os valores sob a coluna F representam os números das barras do sistema, que estão sujeitas a falta, ou seja, mais próximos da falta. A coluna sob título t_{cl} indica os tempos de extinção da falta. A coluna sob R representa a linha na qual houve a falta, sendo que, esta linha poderá ou não ser retirada do sistema por escolha do programador. A linha será retirada se sob a coluna LD (linha desligada) estiver escrita a palavra “sim”; caso contrário, ou seja, caso esteja escrita a palavra “não”, a linha em questão não será retirada do sistema. A coluna sob MS representa a margem de estabilidade do sistema, calculada para fins de comparação. Os valores, sob as colunas de PI1 a PI5, representam os índices de estabilidade dos sistemas em questão, indicam respectivamente, o índice de coerência, o índice baseado no transitório de energia, e três índices baseados em produtos escalares. A coluna sob COM e COM1 representam os valores do índice composto, respectivamente, como média direta dos índices individuais e com uma calibração adequada dos índices individuais. Sob a coluna T, estão os tempos de simulação dos sistemas. Sob a última coluna S, estão as características do sistema quanto a avaliação da estabilidade, ou seja, a situação do sistema. Esta avaliação do sistema é feita através da margem de estabilidade.



Agora, apresentaremos os resultados obtidos do sistema de 4 geradores e 6 barras, apresentado na Figura 4.5, extraído da referência [10]. Como já dissemos, este é um sistema de pequeno porte, mas que nos serve como base para investigação dos índices. Os resultados apresentados a seguir são para um defeito que ocorre na barra 3, sendo eliminado sem o desligamento da linha de transmissão 3-2. O tempo de extinção da falta varia de acordo com as tabelas, ele foi escolhido de acordo com o grau de estabilidade, ou seja, alguns índices muito instáveis, outros instáveis (e marginalmente estáveis) e alguns estáveis.

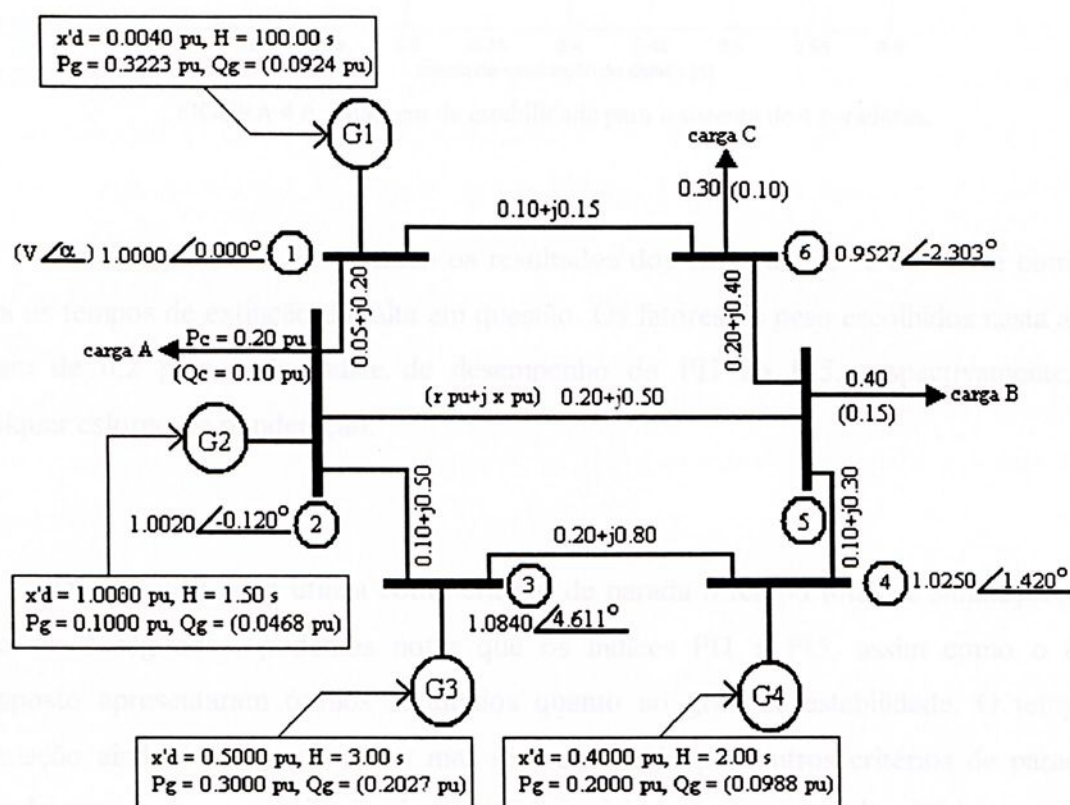


FIGURA 4.5: Sistema de 4 geradores e 6 barras.

A Figura 4.6 ilustra a margem de estabilidade em função do tempo de eliminação do defeito (t_{cl}) para o caso descrito acima.

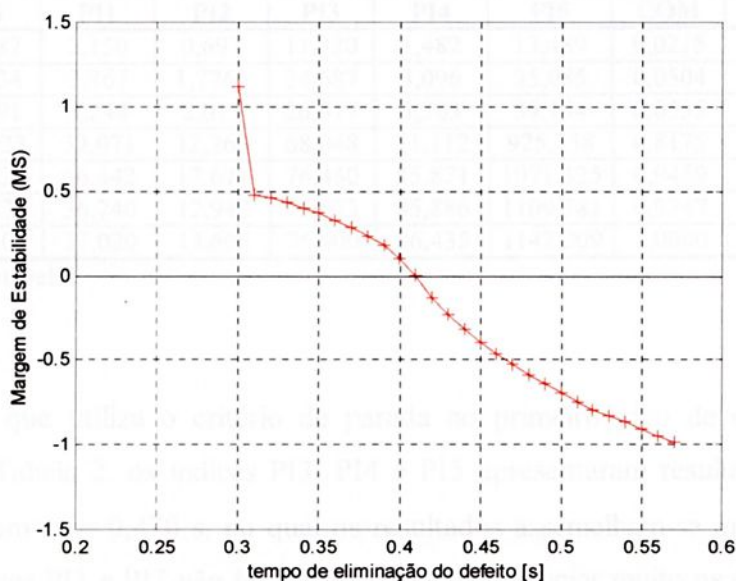


FIGURA 4.6.: Margem de estabilidade para o sistema de 4 geradores.

As Tabelas 1 a 7 apresentam os resultados dos cinco índices e do índice composto para os tempos de extinção da falta em questão. Os fatores de peso escolhidos nesta análise foram de 0,2 para cada índice de desempenho do PI1 ao PI5, respectivamente, sem qualquer esforço de ponderação.

Da Tabela 1, que utiliza como critério de parada o tempo total de simulação, neste caso de 2 segundos, podemos notar que os índices PI1 a PI5, assim como o índice composto apresentaram ótimos resultados quanto ao grau de estabilidade. O tempo de simulação ainda é um pouco alto, mas será diminuído por outros critérios de parada. O método proposto para avaliação da estabilidade foi capaz de discernir perfeitamente entre os casos estáveis e instáveis.

TABELA 1: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada com TTOT=2,0s.

t_{cl} [s]	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
0,300	0,6587	2,150	0,697	11,320	1,482	13,489	0,0215	2,0	E
0,410	0,1534	3,767	1,7765	24,687	3,096	35,085	0,0504	2,0	E
0,430	0,1591	4,244	2,013	26,517	3,303	39,194	0,0555	2,0	E
0,470	-0,4923	32,071	12,263	68,048	71,112	925,158	0,8175	2,0	I
0,530	-0,8220	36,442	12,677	76,450	85,871	1071,325	0,9459	2,0	I
0,540	-0,8572	36,740	12,942	76,673	85,886	1109,581	0,9747	2,0	I
0,560	-0,9306	37,020	13,606	76,900	86,435	1142,209	1,0000	2,0	I

* I – instável; E – estável.

No caso que utiliza o critério de parada no primeiro pico de energia potencial, apresentado na Tabela 2, os índices PI3, PI4 e PI5 apresentaram resultados satisfatórios, exceto o caso com $t_{cl} = 0,470$ s, no qual os resultados assemelham-se muito ao dos casos estáveis. Os índices PI1 e PI2 não foram capazes de diferenciar muito os casos estáveis dos instáveis, devido ao baixo tempo de simulação, como observado nas Figuras 4.7 e 4.8, que mostram, respectivamente, os ângulos dos geradores e a energia transitória do sistema. O índice composto obteve bons resultados, devido a normalização de seus índices. Nele é possível observar a estabilidade do sistema para praticamente todos os tempos de extinção da falta, exceto para t_{cl} igual a 0,470 segundos, que é um caso marginalmente estável. Os tempos de simulação obtidos foram ótimos para uma análise em tempo real, no entanto em muitos casos os índices não foram capazes de informar sobre a estabilidade devido a este baixo tempo.

TABELA 2: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada no 1º Pico de Energia Potencial.

t_{cl} [s]	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
0,300	0,6587	1,356	0,666	5,215	1,351	4,367	0,0591	0,370	E
0,410	0,1534	2,379	1,664	6,929	2,007	11,420	0,1114	0,520	E
0,430	0,1591	2,728	1,909	6,554	1,976	13,729	0,1228	0,610	E
0,470	-0,4923	3,211	1,715	5,580	1,854	19,537	0,1456	0,560	I
0,530	-0,8220	9,612	4,752	46,538	15,441	140,633	0,9907	0,900	I
0,540	-0,8572	9,677	4,783	46,673	15,466	141,326	0,9950	0,900	I
0,560	-0,9306	9,734	4,805	47,060	15,475	141,947	1,0000	0,900	I

* I – instável; E – estável.

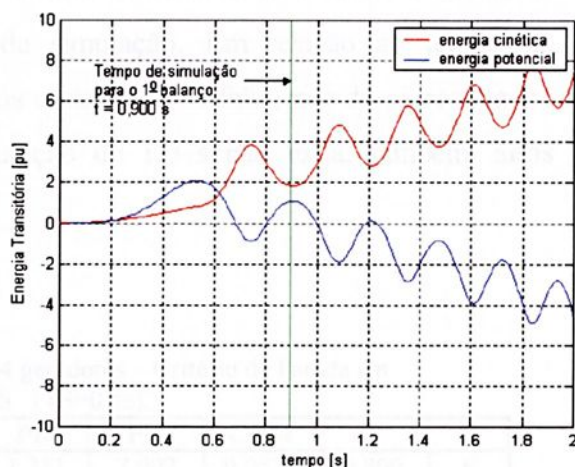
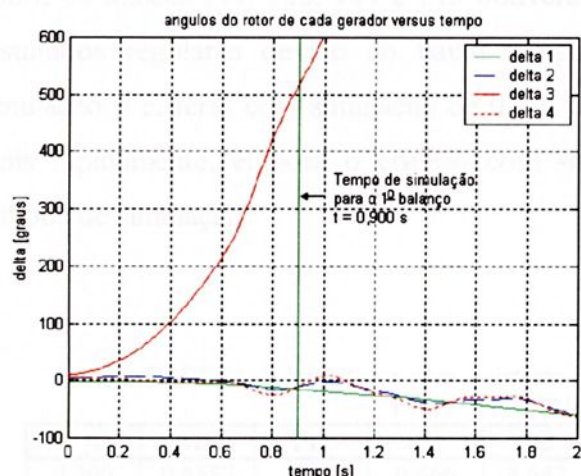


FIGURA 4.7: Ângulo dos geradores para o sistema de 4 geradores, $t_{cl} = 0,530$ s. Caso instável.

FIGURA 4.8: Energias cinética e potencial para o sistema de 4 geradores, $t_{cl} = 0,530$ s. Caso instável.

Na Tabela 3 apresentamos os resultados da análise de estabilidade utilizando como critério de parada o segundo pico de energia potencial. Neste caso, obtivemos ótimos valores para os índices PI1 a PI5 e, principalmente, para o índice composto. Em todos os índices pudemos observar com precisão a estabilidade ou instabilidade dos casos em questão. O tempo de simulação foi baixo se comparado à simulação total, o que é de grande valia em análise em tempo real.

TABELA 3: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Energia Potencial.

t_{cl} [s]	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
0,300	0,6587	2,144	6,663	8,642	1,351	7,902	0,0496	0,860	E
0,410	0,1534	3,619	1,664	16,786	2,356	23,277	0,1142	1,060	E
0,430	0,1591	4,244	1,909	23,227	2,708	30,930	0,1509	1,170	E
0,470	-0,4923	9,654	4,339	44,785	15,414	131,075	0,4915	0,990	I
0,530	-0,8220	15,824	6,778	54,463	30,795	306,715	0,9926	1,210	I
0,540	-0,8572	15,943	6,833	54,759	30,899	307,959	0,9970	1,210	I
0,560	-0,9306	15,857	6,846	54,807	30,812	309,333	1,0000	1,200	I

* I – instável; E – estável.

Para as tabelas 4 e 5, que correspondem à análise de estabilidade usando como critério de parada um tempo fixo de, respectivamente, 0,5 e 1,0 segundo (após a extinção da

falta), os índices PI1, PI3, PI4 e PI5 obtiveram ótimos resultados. Já o índice PI2 obteve resultados regulares devido ao baixo tempo de simulação. Em relação ao tempo de simulação o critério com simulação de 0,5 s, após a extinção da falta, nos dá os resultados mais rapidamente, embora o critério com simulação de 1,0 s não exija, também, altos tempos de simulação.

TABELA 4: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada em $TTOT=TEXTIN+TS$ ($TS=0,5s$).

t_{cl} [s]	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
0,300	0,6587	1,948	0,666	8,642	1,351	7,902	0,0534	0,800	E
0,410	0,1534	3,277	1,664	16,588	2,237	23,003	0,1217	0,910	E
0,430	0,1591	2,729	1,909	18,526	2,376	29,336	0,1428	0,930	E
0,470	-0,4923	9,280	4,339	44,785	15,414	131,075	0,5331	0,970	I
0,530	-0,8220	11,671	4,752	49,690	23,908	239,673	0,8578	1,030	I
0,540	-0,8572	12,013	5,641	49,863	23,936	261,556	0,9184	1,040	I
0,560	-0,9306	12,600	6,679	50,031	23,933	291,120	1,0000	1,060	I

* I – instável; E – estável.

TABELA 5: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada em $TTOT=TEXTIN+TS$ ($TS=1,0s$).

t_{cl} [s]	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
0,300	0,6587	2,150	0,700	11,320	1,482	13,365	0,0362	1,300	E
0,410	0,1534	3,638	1,722	24,403	2,523	33,125	0,0816	1,410	E
0,430	0,1591	4,244	1,967	23,743	2,708	32,234	0,0810	1,430	E
0,470	-0,4923	18,705	8,151	56,212	39,839	458,190	0,7253	1,470	I
0,530	-0,8220	23,328	8,622	60,447	51,098	525,944	0,8356	1,530	I
0,540	-0,8572	23,764	8,661	61,738	54,957	573,853	0,9024	1,540	I
0,560	-0,9306	24,485	9,569	63,075	55,054	648,973	1,0000	1,560	I

* I – instável; E – estável.

Utilizando o critério de parada no segundo pico de potência elétrica para a máquina crítica, todos os índices obtiveram excelentes resultados, para todos os casos, dando precisão e confiabilidade ao critério, como podemos verificar na Tabela 6.

Quanto aos tempos de simulação são adequados para análise em tempo real. Podemos verificar os tempos de simulação relacionados ao segundo pico de potencia elétrica para a máquina crítica nas Figuras 4.9 a 4.15.



TABELA 6: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica da Máquina Crítica.

t_{cl} [s]	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
0,300	0,6587	1,070	2,150	0,666	9,100	1,351	0,1181	1,070	E
0,410	0,1534	3,638	1,765	24,687	3,096	35,085	0,1640	1,630	E
0,430	0,1591	4,244	1,967	26,517	2,708	37,272	0,1747	1,520	E
0,470	-0,4923	14,481	6,400	51,262	30,998	292,390	0,9502	1,250	I
0,530	-0,8220	14,451	6,778	54,463	30,795	306,715	0,9926	1,140	I
0,540	-0,8572	14,573	6,833	54,759	30,899	307,959	0,9970	1,140	I
0,560	-0,9306	14,474	6,846	54,807	30,812	309,333	1,0000	1,130	I

* I – instável; E – estável.

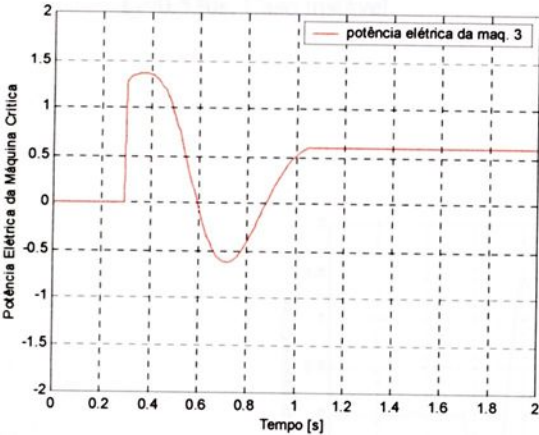


FIGURA 4.9: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl}=0,300s$. Caso estável.

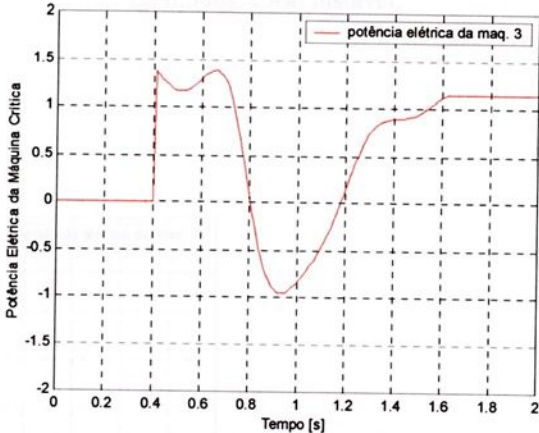


FIGURA 4.10: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl}=0,410s$. Caso estável.

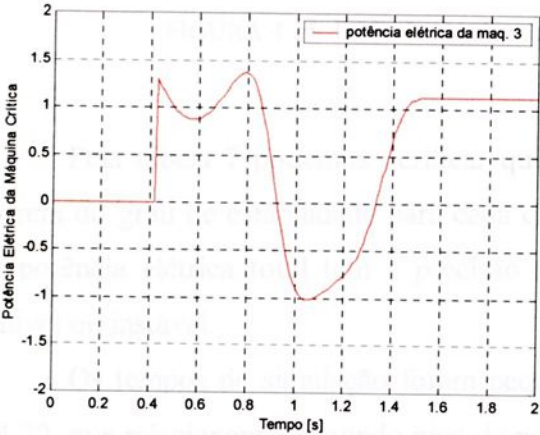


FIGURA 4.11: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl}=0,430s$. Caso estável.

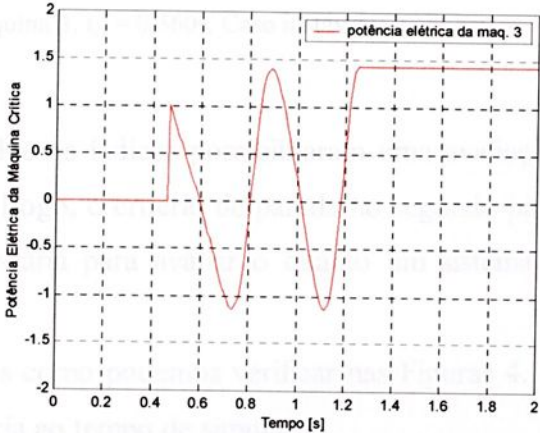


FIGURA 4.12: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl}=0,470s$. Caso instável.

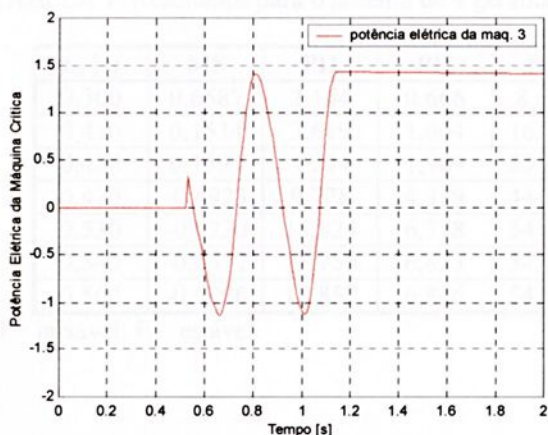


FIGURA 4.13: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl}=0,530s$. Caso instável.

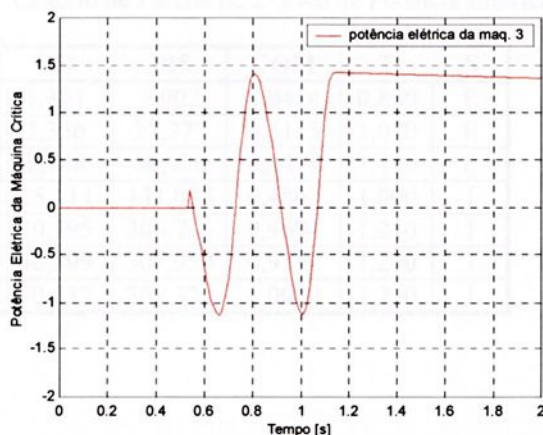


FIGURA 4.14: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl}=0,540s$. Caso instável.

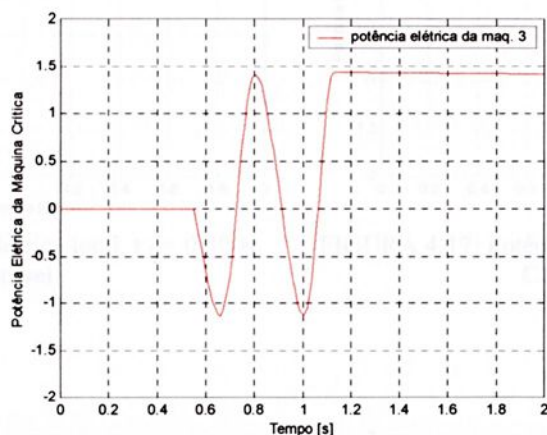


FIGURA 4.15: Potência elétrica da máquina 3, $t_{cl} = 0,560s$. Caso instável.

Pela tabela 7 podemos verificar que todos os índices possibilitaram uma avaliação correta do grau de estabilidade para cada caso. Logo, o critério de parada no segundo pico de potência elétrica total tem a precisão necessária para avaliar o quanto um sistema é estável ou instável.

Os tempos de simulação foram pequenos como podemos verificar nas Figuras 4.16 a 4.22, que relacionam o segundo pico de potência ao tempo de simulação.

TABELA 7: Resultados para o sistema de 4 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total.

t_{cl} [s]	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
0,300	0,6587	2,144	0,666	8,642	1,351	7,902	0,0484	0.860	E
0,410	0,1534	3,619	1,664	16,786	2,356	23,277	0,1115	1,070	E
0,430	0,1591	4,244	1,909	23,227	2,708	30,930	0,1474	1,190	E
0,470	-0,4923	9,778	4,339	44,785	15,414	131,075	0,4803	1,000	I
0,530	-0,8220	15,824	6,778	54,463	30,795	306,715	0,9694	1,210	I
0,540	-0,8572	15,750	6,833	54,759	30,899	307,959	0,9732	1,200	I
0,560	-0,9306	15,857	6,846	54,807	30,812	309,333	1,0000	1,200	I

* I – instável; E – estável.

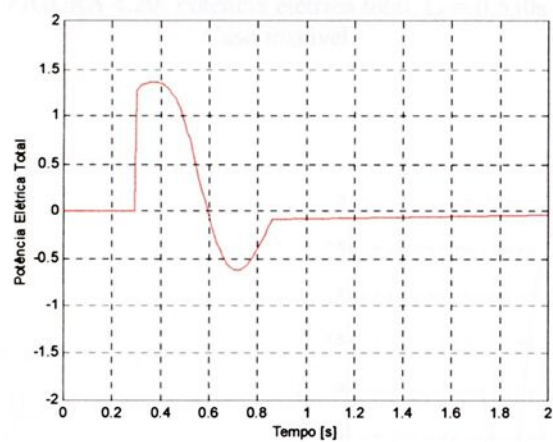


FIGURA 4.16: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,300s$.
Caso estável.

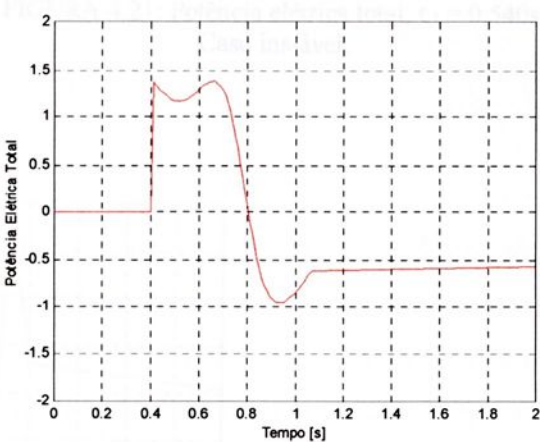


FIGURA 4.17: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,410s$.
Caso estável.

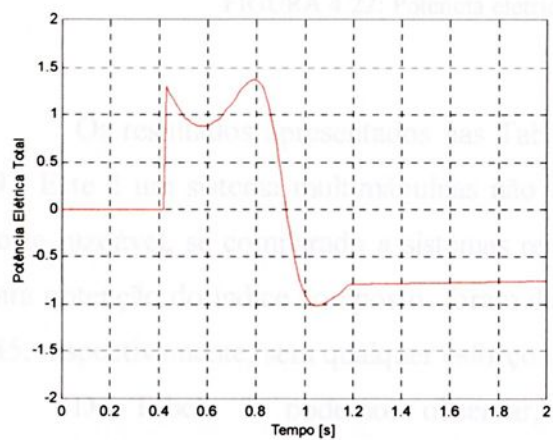


FIGURA 4.18: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,430s$.
Caso estável.

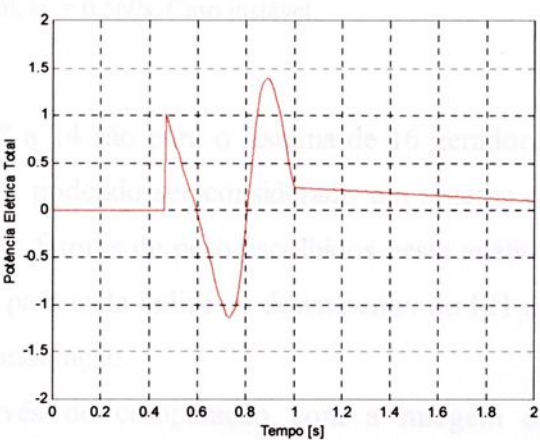


FIGURA 4.19: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,470s$.
Caso instável.



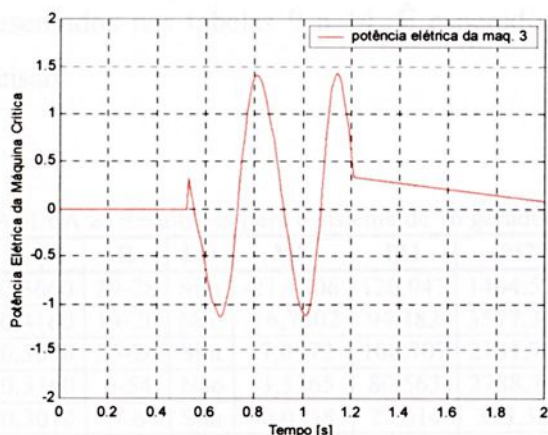


FIGURA 4.20: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,530s$. Caso instável.

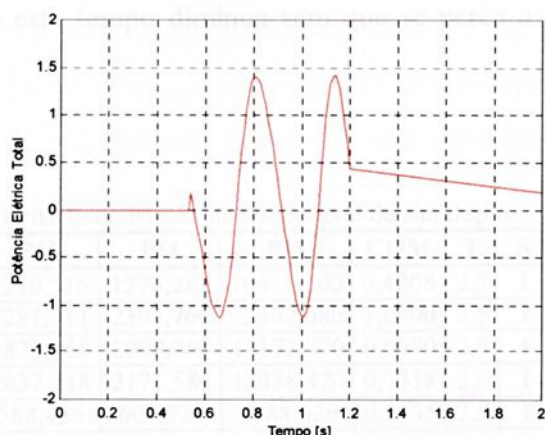


FIGURA 4.21: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,540s$. Caso instável.

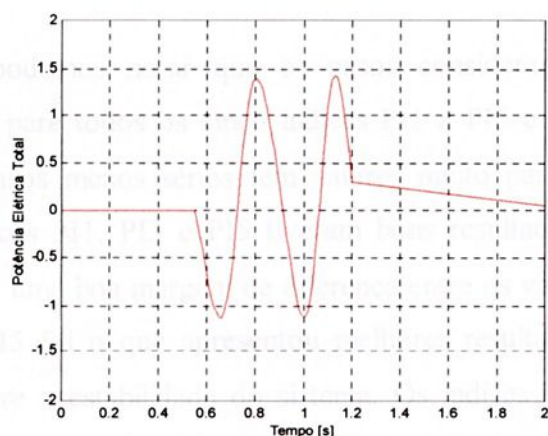


FIGURA 4.22: Potência elétrica total, $t_{cl} = 0,560s$. Caso instável.

Os resultados apresentados nas Tabelas 8 a 14 são para o sistema de 16 geradores [9]. Este é um sistema multimáquinas não trivial, podendo ser considerado um sistema de porte razoável, se comparado a sistemas reais. Os fatores de peso escolhidos nesta análise, para obtenção do índice composto, foram de 0,2 para cada índice de desempenho do PI1 ao PI5, respectivamente, sem qualquer esforço de ponderação.

Da Tabela 8, podemos observar, através de comparação com a margem de estabilidade (MS), que serve como referência, que os índices PI1 a PI5 e o índice composto tiveram bons desempenhos. Os índices capturaram todos os casos instáveis, dando uma boa margem de diferença entre os casos estáveis e instáveis, para que possamos diferenciá-los.

O tempo de simulação de 2,5 s ainda pode ser diminuído pelos critérios de parada apresentados nas tabelas 9 a 14. É esperado que este tempo diminua sem que se perca a precisão.

TABELA 8: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada no tempo total de simulação.

F	t _{cl} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
29	0,3660	29-28	Sim	-21,1306	120,047	1464,570	1210,516	1579,282	10411,500	0,4808	2,5	I
19	0,4160	19-20	Não	-16,7302	94,482	3577,337	2281,311	2395,760	22402,080	1,0000	2,5	I
25	0,3010	25-26	Sim	-7,0972	108,707	2181,748	1873,165	2099,060	15172,770	0,6970	2,5	I
6	0,3160	6-54	Não	-3,5365	80,563	2788,746	2037,748	2171,586	15488,420	0,7338	2,5	I
7	0,3010	7-6	Sim	-0,0238	21,614	393,363	588,426	604,738	2188,626	0,1235	2,5	I
45	0,5000	45-39	Sim	0,0263	2,288	10,141	57,885	13,873	5,888	0,0029	2,5	E
51	0,3510	51-45	Não	0,0676	2,082	6,800	36,576	11,391	3,389	0,0020	2,5	E
45	0,4510	45-39	Sim	0,3257	2,078	9,078	44,390	14,536	4,220	0,0024	2,5	E
51	0,3010	51-45	Não	0,5436	1,811	5,141	34,719	10,895	3,093	0,0018	2,5	E

*I – instável; E – estável.

Da Tabela 9, podemos notar que os casos considerados muito instáveis são facilmente visualizados, para todos os cinco índices PI1 a PI5 e para o índice composto, enquanto alguns dos casos menos sérios tem valores muito parecidos, dificultando uma análise precisa. Os índices PI1, PI3 e PI5 tiveram bons resultados, capturando todos os casos instáveis, e dando uma boa margem de diferença entre os valores dos índices estáveis e instáveis. O índice PI5 foi o que apresentou melhores resultados, proporcionando um claro entendimento sobre a estabilidade do sistema. Os índices PI2 e PI4 não obtiveram resultados confiáveis, apesar de capturar os casos mais instáveis. Esses índices não distinguiram entre casos pouco instáveis ou marginalmente estáveis (instáveis) e os casos propriamente estáveis. Alguns dos valores tomados estão muito próximos do tempo de extinção da falta, ou seja, o tempo de simulação é muito curto para aparecerem diferenças maiores entre os casos estáveis e instáveis. O índice composto reuniu as vantagens e desvantagens de todos os índices o que resultou em um único índice com ótimos resultados. A Figura 4.23.(a) mostra a energia cinética, potencial e total do sistema de 16 geradores para um defeito ocorrido na barra 7, eliminado sem o desligamento da linha 7-6. O sistema em questão é instável. Podemos notar através da ampliação da área marcada, Figura 4.23.(b), que usando o critério de parada no primeiro balanço de energia potencial, não houve tempo das energias cinética e potencial demonstrarem que o caso é instável, seria



necessário um maior tempo de simulação para que o índice baseado na energia transitória (PI2) tivesse um valor maior, o que caracterizaria a instabilidade. Por isso o índice PI2 não obteve melhores resultados. Também na Figura 4.24.(a) e (b), podemos notar que o tempo de simulação não foi suficiente para que o índice PI4, baseado em um produto escalar (DOT 2), obtivesse um valor que caracterizaria a instabilidade.

Os tempos de simulação foram baixos, o que é esperado para uma análise em tempo real, entretanto essa rapidez também foi responsável por uma perda de precisão.

TABELA 9: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada no 1º Pico de Energia Potencial.

F	t _{el} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
29	0,3660	29-28	Sim	-21,1306	8,619	95,815	283,431	63,507	188,754	0,0208	0,59	I
19	0,4160	19-20	Não	-16,7302	94,482	3577,337	2281,311	2395,760	22403,080	1,0000	2,50	I
25	0,3010	25-26	Sim	-7,0972	3,086	5,996	56,668	13,710	39,937	0,0039	0,34	I
6	0,3160	6-54	Não	-3,5365	2,819	13,037	51,686	10,642	45,810	0,0040	0,40	I
7	0,3010	7-6	Sim	-0,0238	2,745	8,052	39,165	9,261	30,997	0,0029	0,55	I
45	0,5000	45-39	Sim	0,0263	1,950	9,921	26,738	13,752	2,519	0,0018	0,75	E
51	0,3510	51-45	Não	0,0676	1,994	6,800	17,551	11,305	2,311	0,0013	0,87	E
45	0,4510	45-39	Sim	0,3257	1,805	9,078	24,559	13,455	2,322	0,0017	0,71	E
51	0,3010	51-45	Não	0,5436	1,697	4,987	14,995	9,122	1,479	0,0010	0,63	E

*I – instável; E – estável.

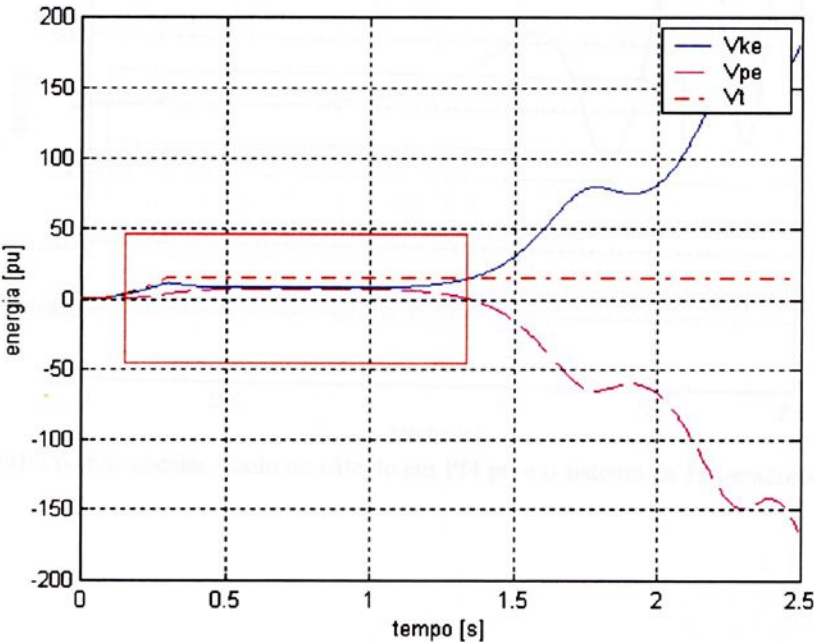


FIGURA 4.23.(a): Energia cinética e potencial para o sistema de 16 geradores, simulação completa. Caso instável.

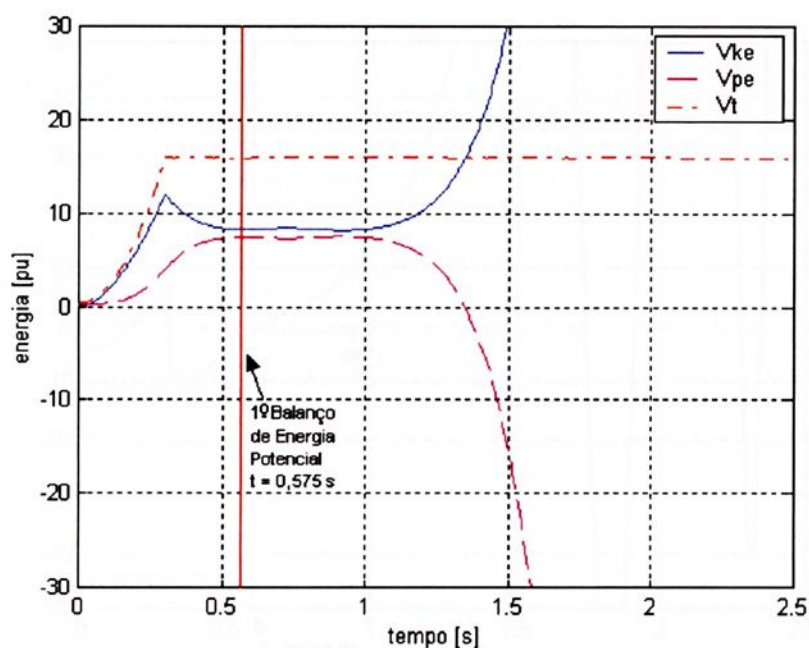


FIGURA 4.23.(b): Ampliação da área marcada no caso (a).

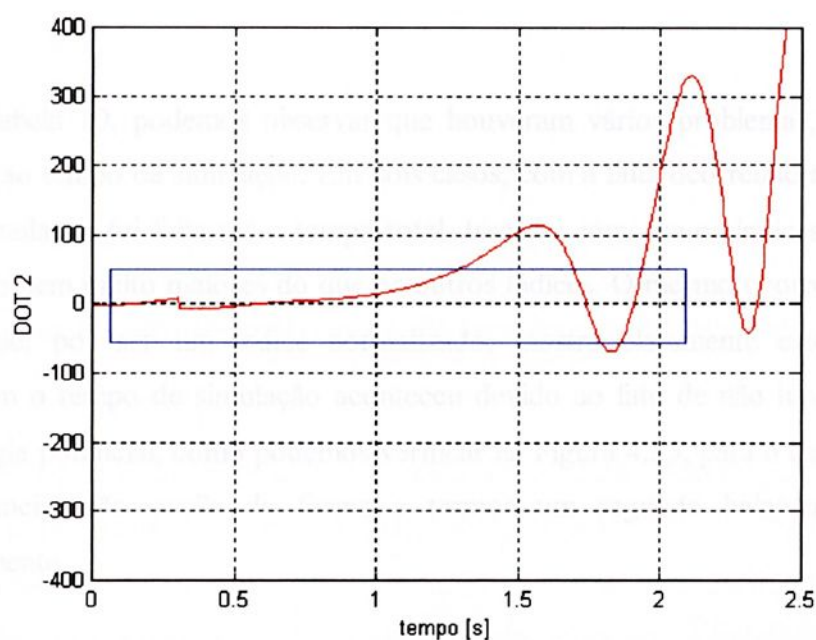


FIGURA 4.24.(a): Produto escalar usado no cálculo em PI4 para o sistema de 16 geradores. Caso instável.

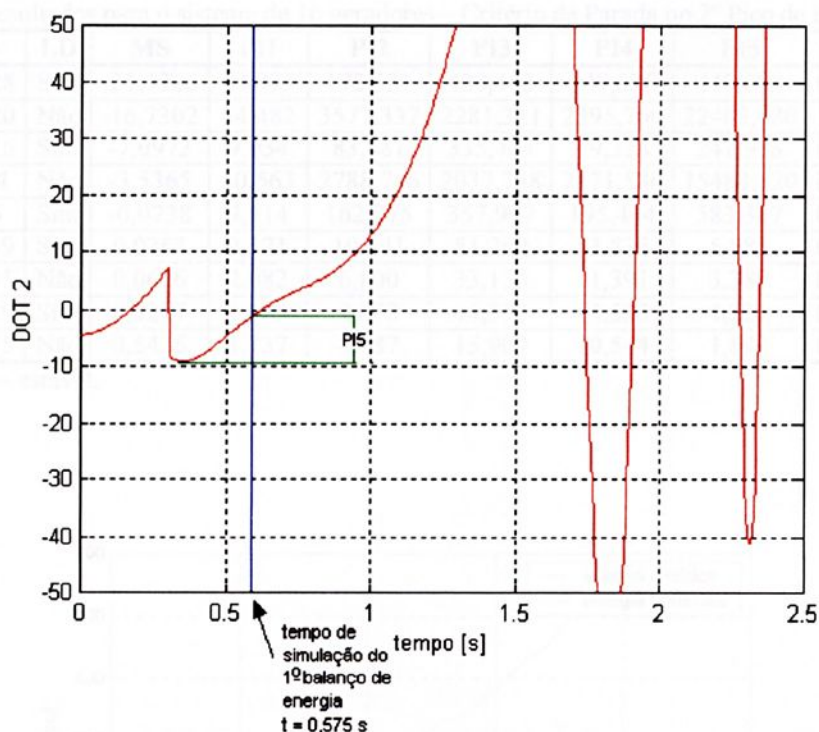


FIGURA 4.24.(b): Ampliação da área marcada no caso (a).

Da Tabela 10, podemos observar que houveram vários problemas, principalmente relacionados ao tempo de simulação. Em dois casos, com a falta ocorrendo na barra 19 e na barra 6, a simulação foi feita até o tempo total. Isso fez com que os índices relacionados a essas faltas fossem muito maiores do que os outros índices. O mesmo ocorreu com o índice composto que, por ser um índice normalizado, mostra claramente este problema. O problema com o tempo de simulação aconteceu devido ao fato de não haver um segundo pico de energia potencial, como podemos verificar na Figura 4.25, para o caso da barra 6, a energia potencial não oscila de forma a termos um segundo balanço, ela decresce exponencialmente.

TABELA 10: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Energia Potencial.

F	t _{cl} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
29	0,3660	29-28	Sim	-21,1306	14,993	172,531	400,463	149,605	447,098	0,0385	0,81	I
19	0,4160	19-20	Não	-16,7302	94,482	3577,337	2281,311	2395,760	22403,080	1,0000	2,50	I
25	0,3010	25-26	Sim	-7,0972	9,034	83,881	335,744	79,228	247,908	0,0246	0,65	I
6	0,3160	6-54	Não	-3,5365	80,563	2788,746	2037,748	2171,586	15488,420	0,7338	2,50	I
7	0,3010	7-6	Sim	-0,0238	9,614	162,075	357,907	195,404	583,367	0,0425	1,73	I
45	0,5000	45-39	Sim	0,0263	2,171	10,141	51,299	13,835	5,888	0,0027	1,67	E
51	0,3510	51-45	Não	0,0676	2,082	6,800	33,136	11,391	3,389	0,0018	1,98	E
45	0,4510	45-39	Sim	0,3257	1,985	9,078	44,390	14,535	4,221	0,0024	1,82	E
51	0,3010	51-45	Não	0,5436	1,737	4,987	15,909	10,544	1,892	0,0011	0,79	E

*I – instável; E – estável.

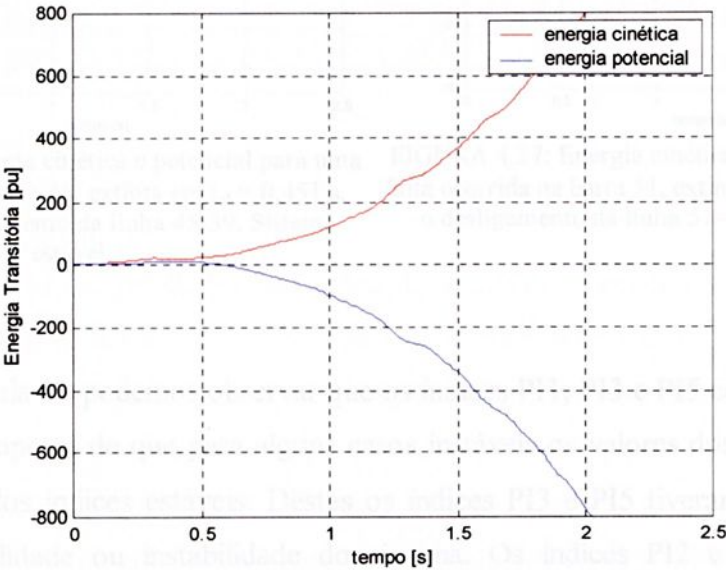


FIGURA 4.25: Energia cinética e potencial para uma falta ocorrida na barra 6, eliminada sem o desligamento da linha 6-54. Sistema instável.

Para os casos estáveis tivemos um tempo de simulação grande, para faltas ocorridas na barra 45 e 51, extintas, respectivamente, em $t_{cl} = 0,451$ s e $t_{cl} = 0,351$ s. Podemos observar este problema nas Figuras 4.26 e 4.27, que tratam, respectivamente, dos casos descritos acima. O segundo pico de energia potencial aconteceu somente em 1,98 s para a falta na barra 51, e 1,82 s para a falta na barra 45. Esses tempos podem ser considerados altos se queremos uma análise rápida, logo, devemos procurar critérios de parada que proporcionem tempos de simulação menores. Apesar destes problemas relacionados aos

tempos de simulação o critério, baseado no segundo pico de energia potencial, foi capaz de diferenciar os casos estáveis dos instáveis.

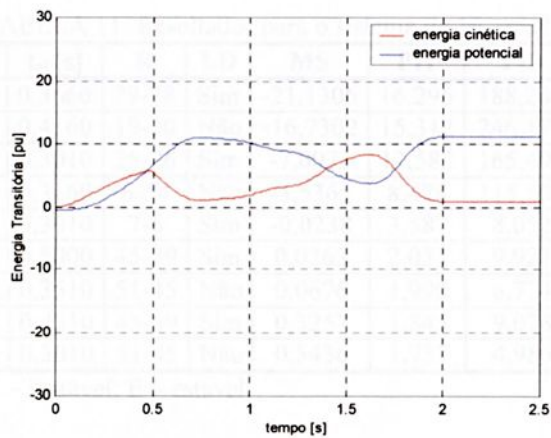


FIGURA 4.26: Energia cinética e potencial para uma falta ocorrida na barra 45, extinta em $t_{cl} = 0,451$ s, através do desligamento da linha 45-39. Sistema estável.

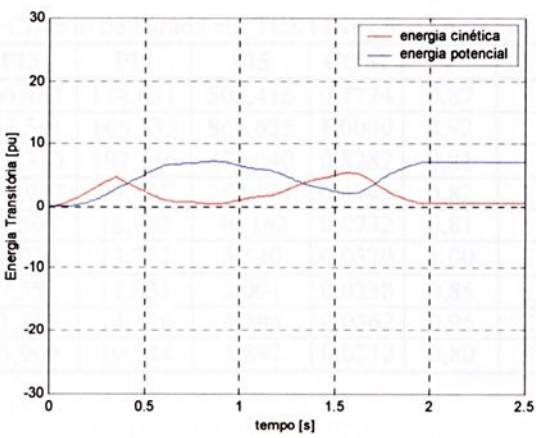


FIGURA 4.27: Energia cinética e potencial para uma falta ocorrida na barra 51, extinta em $t_{cl} = 0,351$ s, sem o desligamento da linha 51-45. Sistema estável.

Pela Tabela 11 podemos observar que os índices PI1, PI3 e PI5 capturaram todos os casos instáveis, apesar de que para alguns casos instáveis os valores dos índices PI1 foram bem próximos dos índices estáveis. Destes os índices PI3 e PI5 tiveram resultados claros quanto à estabilidade ou instabilidade do sistema. Os índices PI2 e PI4 tiveram bons resultados para alguns casos instáveis, enquanto para um defeito ocorrido na barra 7, os resultados não foram os desejáveis. Isto se deve ao tempo de simulação que não foi suficiente para caracterizar a instabilidade através destes índices. Podemos observar da Figura 4.23(a) que para um tempo de simulação de 0,800 segundos a diferença entre a energia cinética e a energia potencial ainda é muito pequena, por isso o índice baseado no transitório de energia (PI2) não obteve bons resultados. Também observando a Figura 4.24(a), para este mesmo tempo de 0,800 segundos, notamos que o índice PI4 não sofre alteração suficiente para caracterizar a instabilidade. O índice composto (COM) obteve ótimos resultados, exceto para a falta ocorrida na barra 7, na qual, ainda que tenha obtido valores maiores que os casos estáveis, não obteve valores com diferença tal que possa se observar a instabilidade a partir deste índice.

Apesar de problemas com alguns casos, este critério de parada pode ser considerado bom quanto ao tempo envolvido no processo. Os tempos de simulação foram baixos o que é desejável em análise em tempo real.

TABELA 11: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada em TEXTIN+TS (TS=0,5s).

F	t _{el} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
29	0,3660	29-28	Sim	-21,1306	16,296	188,200	400,463	174,631	508,416	0,7774	0,87	I
19	0,4160	19-20	Não	-16,7302	15,312	246,170	365,591	165,135	864,625	1,0000	0,92	I
25	0,3010	25-26	Sim	-7,0972	12,582	165,493	525,310	197,516	472,040	0,8287	0,81	I
6	0,3160	6-54	Não	-3,5365	8,478	115,504	274,977	99,157	287,701	0,4743	0,82	I
7	0,3010	7-6	Sim	-0,0238	3,587	8,052	44,509	18,962	46,162	0,0732	0,81	I
45	0,5000	45-39	Sim	0,0263	2,033	9,921	32,026	13,752	3,540	0,0370	1,00	E
51	0,3510	51-45	Não	0,0676	1,990	6,774	17,551	11,031	2,001	0,0238	0,85	E
45	0,4510	45-39	Sim	0,3257	1,845	9,078	31,213	14,526	3,396	0,0362	0,95	E
51	0,3010	51-45	Não	0,5436	1,737	4,986	15,909	10,544	1,892	0,0212	0,80	E

*I – instável; E – estável.

Na Tabela 12, os resultados da análise da estabilidade mostraram-se eficientes para todos os casos, através destes índices podemos notar claramente quais são os casos estáveis e quais são instáveis. Alguns índices para o defeito ocorrendo na barra 7, tiveram valores menores, o que poderia caracterizar um caso estável, principalmente o índice PI1. No entanto, estes índices, ainda assim, tiveram valores maiores que os valores estáveis, possibilitando a sua caracterização como instáveis. Podemos observar, os tempos de simulação em relação aos índices, para uma falta ocorrida na barra 7, nas Figuras 4.28 a 4.32. O índice composto também nos forneceu ótimos resultados, como era de se esperar, já que os outros índices deram bons resultados.



TABELA 12: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada em TEXTIN+TS (TS=1,0s).

F	t _{ei} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
29	0,3660	29-28	Sim	-21,1306	38,086	484,139	715,781	497,667	1909,542	0,6112	1,37	I
19	0,4160	19-20	Não	-16,7302	33,333	864,733	1090,737	644,607	3330,586	1,0000	1,42	I
25	0,3010	25-26	Sim	-7,0972	31,638	419,781	612,332	369,904	1847,091	0,5501	1,30	I
6	0,3160	6-54	Não	-3,5365	20,342	522,921	842,891	406,830	1536,730	0,5583	1,32	I
7	0,3010	7-6	Sim	-0,0238	5,397	46,659	206,540	108,195	180,889	0,0918	1,30	I
45	0,5000	45-39	Sim	0,0263	2,171	9,921	43,037	13,836	5,048	0,0124	1,50	E
51	0,3510	51-45	Não	0,0676	2,081	6,800	30,576	11,391	3,389	0,0091	1,35	E
45	0,4510	45-39	Sim	0,3257	1,986	9,078	41,696	14,536	4,221	0,0120	1,45	E
51	0,3010	51-45	Não	0,5436	1,780	4,987	28,133	10,895	3,072	0,0082	1,30	E

*I – instável; E – estável.

FIGURA 4.28: Ângulos dos rotores para os 16 geradores do sistema. Usado no cálculo de PI1. Caso instável.

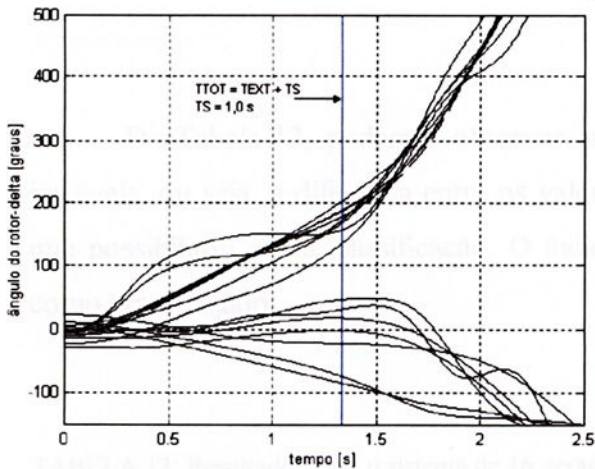


FIGURA 4.28: Ângulos dos rotores para os 16 geradores do sistema. Usado no cálculo de PI1. Caso instável.

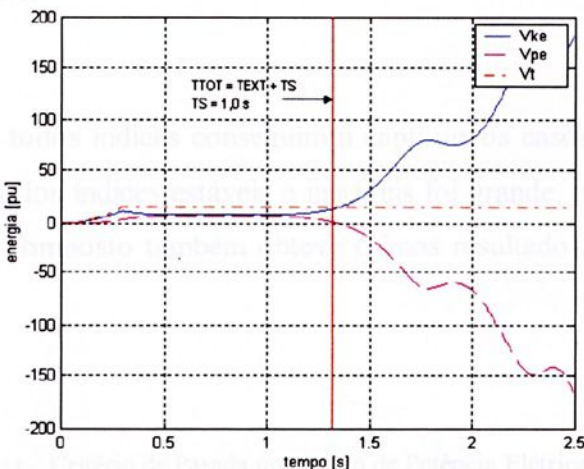


FIGURA 4.29: Energia cinética e potencial para o sistema de 16 geradores. Usado no cálculo de PI2. Caso instável.

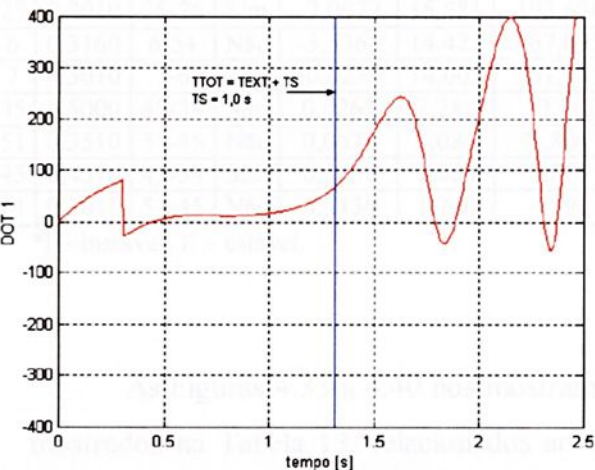


FIGURA 4.30: Produto escalar (DOT1) usado no cálculo de PI3 para o sistema de 16 geradores. Caso instável.

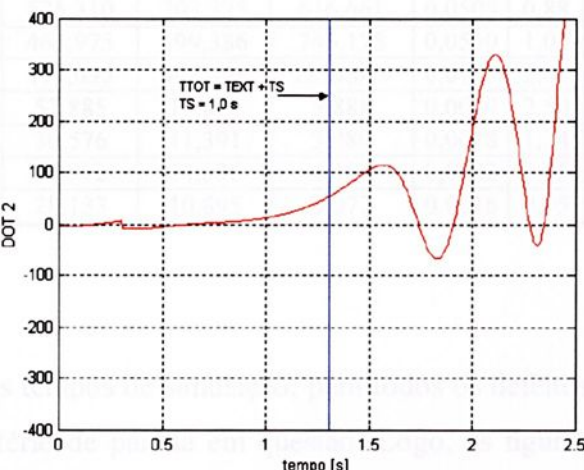


FIGURA 4.31: Produto escalar (DOT2) usado no cálculo de PI4 para o sistema de 16 geradores. Caso instável.

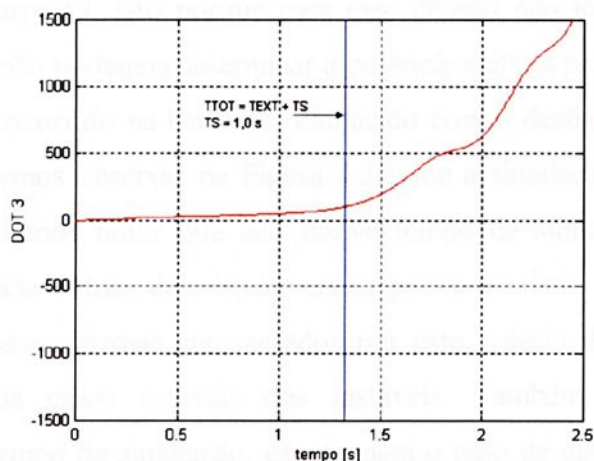


FIGURA 4.32: Produto escalar (DOT3) usado no cálculo em PI5 para o sistema de 16 geradores. Caso instável.

Da Tabela 13, podemos observar que todos índices conseguiram capturar os casos instáveis, ou seja, a diferença entre os valores dos índices estáveis e instáveis foi grande, o que possibilitou a sua classificação. O índice composto também obteve ótimos resultados, como era desejado.

TABELA 13: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica para a Máquina Crítica.

F	t_{cl} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
29	0,3660	29-28	Sim	-21,1306	14,353	172,531	400,463	149,605	426,211	0,0378	0,79	I
19	0,4160	19-20	Não	-16,7302	94,482	3577,337	2281,311	2395,760	22403,080	1,0000	2,50	I
25	0,3010	25-26	Sim	-7,0972	15,581	192,634	525,310	203,325	616,661	0,0505	0,88	I
6	0,3160	6-54	Não	-3,5365	14,422	267,095	463,975	199,386	746,178	0,0550	1,07	I
7	0,3010	7-6	Sim	-0,0238	14,002	301,461	479,095	407,758	1254,679	0,0799	2,07	I
45	0,5000	45-39	Sim	0,0263	2,288	10,141	57,885	13,873	5,888	0,0029	2,50	E
51	0,3510	51-45	Não	0,0676	2,081	6,800	30,576	11,391	3,389	0,0018	1,34	E
45	0,4510	45-39	Sim	0,3257	1,883	9,078	38,912	14,536	4,108	0,0022	1,15	E
51	0,3010	51-45	Não	0,5436	1,740	4,990	28,133	10,895	3,072	0,0016	0,95	E

*I – instável; E – estável.

As Figuras 4.33 a 4.40 nos mostram os tempos de simulação, para todos os defeitos mostrados na Tabela 13, relacionados ao critério de parada em questão. Logo, as figuras nos mostram a potência elétrica para a máquina crítica para todos os defeitos, menos para o

defeito ocorrido na barra 19. Isto porque para esse defeito não foi possível determinar a máquina crítica, logo, não podemos determinar a potência elétrica para a máquina crítica.

Para o defeito ocorrido na barra 45, eliminado com o desligamento da linha 45-39, em $t_{cl} = 0,500$ s, podemos observar na Figura 4.37 que a simulação foi feita até o tempo total. Pela figura, podemos notar que não houve tempo de simulação suficiente para o segundo pico de potência elétrica da máquina crítica passar a existir.

Mesmo com os problemas apresentados por este critério de parada ele foi o que melhor diferenciou os casos estáveis dos instáveis. Também apresentou resultados razoáveis quanto ao tempo de simulação, exceto para o caso de defeito na barra 7, onde o tempo chegou a 2,07 s, e os casos onde a simulação foi completa devido as dificuldades já apresentadas.

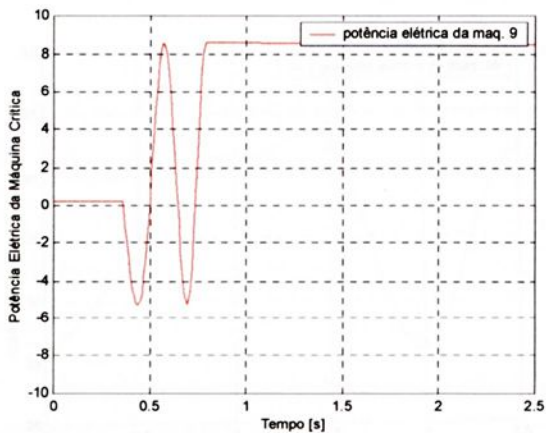


FIGURA 4.33: Potência elétrica para a máquina crítica 9, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 29, eliminado com o desligamento da linha 29-28, em $t_{cl} = 0,366$ s. O sistema é instável.

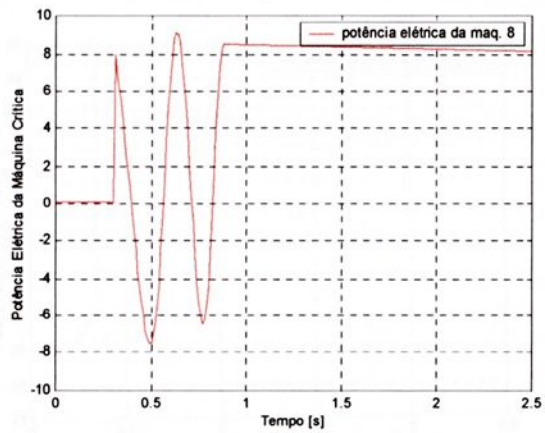


FIGURA 4.34: Potência elétrica para a máquina crítica 8, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 25, eliminado com o desligamento da linha 25-26, em $t_{cl} = 0,301$ s. O sistema é instável.

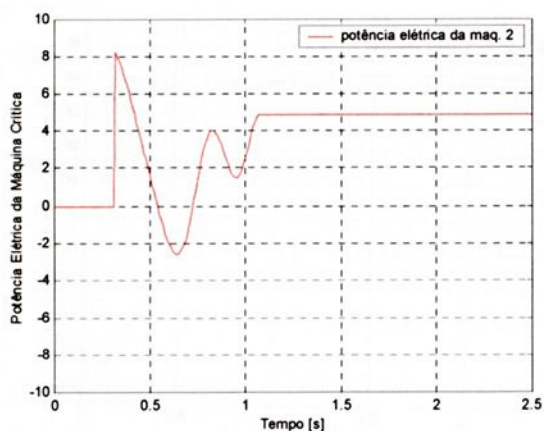


FIGURA 4.35: Potência elétrica para a máquina crítica 2, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 6, eliminado sem o desligamento da linha 6-54, em $t_{cl}=0,316$ s. O sistema é instável.

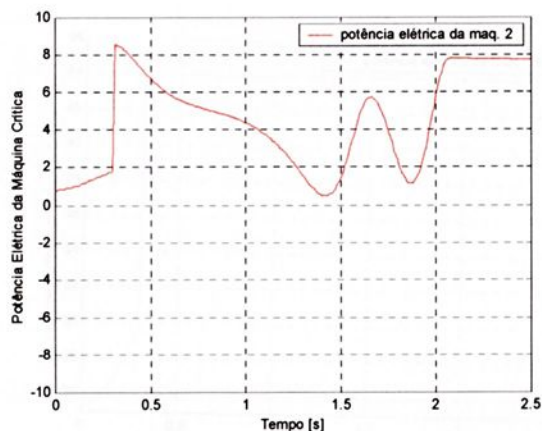


FIGURA 4.36: Potência elétrica para a máquina crítica 2, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 7, eliminado com o desligamento da linha 7-6, em $t_{cl}=0,301$ s. O sistema é instável.

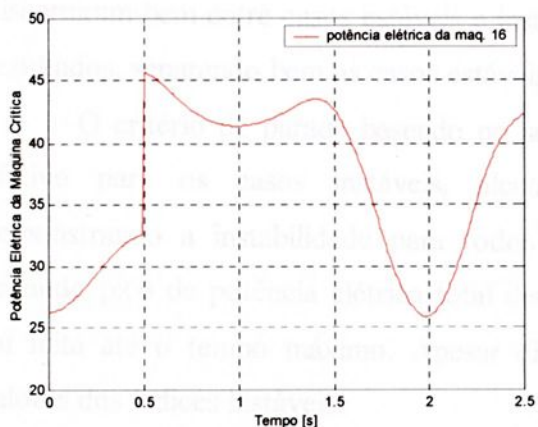


FIGURA 4.37: Potência elétrica para a máquina crítica 16, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 45, eliminado com o desligamento da linha 45-39, em $t_{cl}=0,500$ s. O sistema é estável.

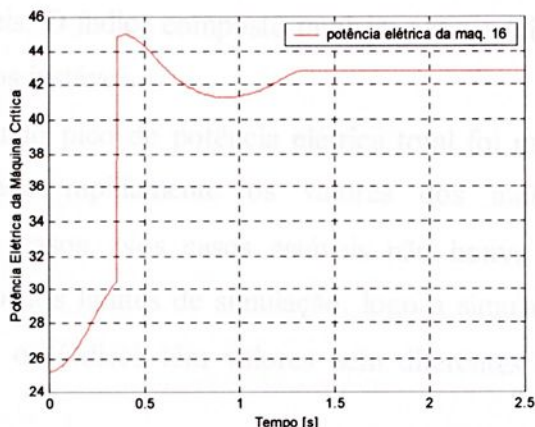


FIGURA 4.38: Potência elétrica para a máquina crítica 16, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 51, eliminado sem o desligamento da linha 51-45, em $t_{cl}=0,351$ s. O sistema é estável.

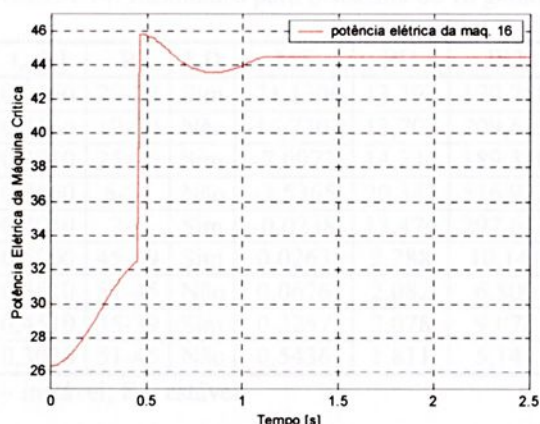


FIGURA 4.39: Potência elétrica para a máquina crítica 16, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 45, eliminado com o desligamento da linha 45-39, em $t_{cl} = 0,451$ s. O sistema é estável.

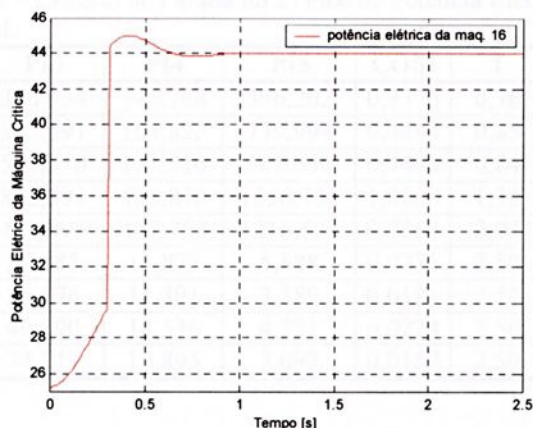


FIGURA 4.40: Potência elétrica para a máquina crítica 16, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 51, eliminado sem o desligamento da linha 51-45, em $t_{cl}=0,301$ s. O sistema é estável.

Da tabela 14 podemos observar que todos os índices (PI1 a PI5) apresentaram ótimos resultados quanto à classificação da estabilidade. Para todos os casos os índices discerniram bem entre casos estáveis e instáveis. O índice composto também obteve ótimos resultados, separando bem os casos estáveis dos instáveis.

O critério de parada baseado no segundo pico de potência elétrica total foi muito efetivo para os casos instáveis, alcançando rapidamente os valores dos índices, demonstrando a instabilidade para todos os casos. Nos casos estáveis não houve um segundo pico de potência elétrica total dentro dos limites de simulação, logo a simulação foi feita até o tempo máximo. Apesar disto os índices têm valores bem diferentes dos valores dos índices instáveis.

Apresentamos nas Figuras 4.41 a 4.45 a potência elétrica total das máquinas para todos os casos instáveis descritos na tabela 14. As Figuras 4.46 a 4.49 nos mostram a potência elétrica total para os casos estáveis, pois nestes casos podemos observar que não houve tempo de simulação suficiente para aparecer o segundo pico de potencia, por isso a simulação foi completa.

Apesar de alguns defeitos este critério mostrou-se muito efetivo na diferenciação dos casos estáveis dos casos instáveis o que o torna um critério bastante interessante.

TABELA 14: Resultados para o sistema de 16 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total.

F	t _{cl} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	COM	T	S
29	0,3660	29-28	Sim	-21,1306	13,392	170,788	396,034	145,768	396,202	0,3376	0,76	I
19	0,4160	19-20	Não	-16,7302	13,707	209,633	365,591	164,822	739,994	0,4494	0,85	I
25	0,3010	25-26	Sim	-7,0972	14,244	189,330	525,310	197,516	568,556	0,4498	0,84	I
6	0,3160	6-54	Não	-3,5365	20,342	516,922	842,891	406,830	1536,730	1,0000	1,30	I
7	0,3010	7-6	Sim	-0,0238	13,476	297,613	479,095	407,758	1216,534	0,7264	2,04	I
45	0,5000	45-39	Sim	0,0263	2,288	10,141	57,885	13,873	5,888	0,0271	2,50	E
51	0,3510	51-45	Não	0,0676	2,082	6,800	36,576	11,391	3,389	0,0181	2,50	E
45	0,4510	45-39	Sim	0,3257	2,078	9,078	49,390	14,536	4,221	0,0224	2,50	E
51	0,3010	51-45	Não	0,5436	1,811	5,141	34,719	10,895	3,093	0,0167	2,50	E

*I – instável; E – estável.

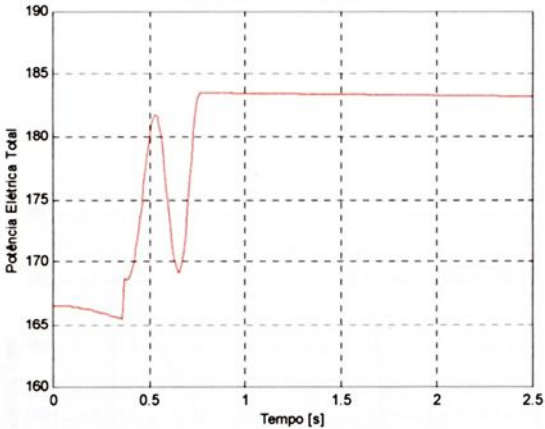


FIGURA 4.41: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3φ ocorrido na barra 29, eliminado com o desligamento da linha 29-28, em $t_{cl} = 0,366$ s. O sistema é instável.

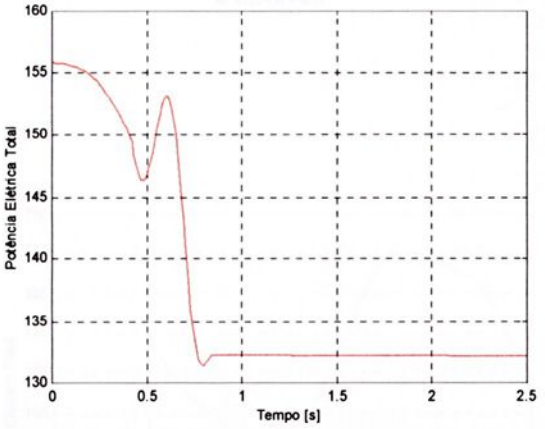


FIGURA 4.42: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3φ ocorrido na barra 19, eliminado sem o desligamento da linha 19-20, em $t_{cl} = 0,416$ s. O sistema é instável.

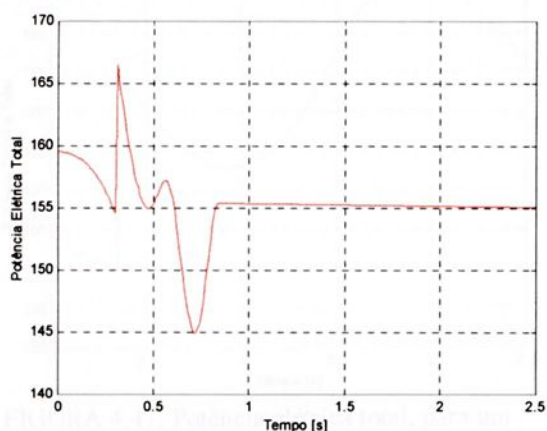


FIGURA 4.43: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 25, eliminado com o desligamento da linha 25-26, em $t_{cl} = 0,301$ s. O sistema é instável.

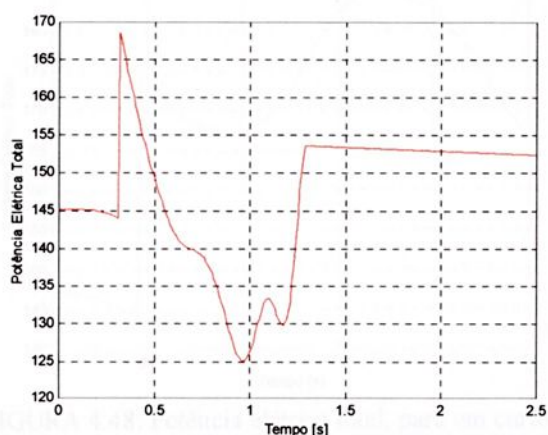


FIGURA 4.44: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 6, eliminado sem o desligamento da linha 6-54, em $t_{cl} = 0,316$ s. O sistema é instável.

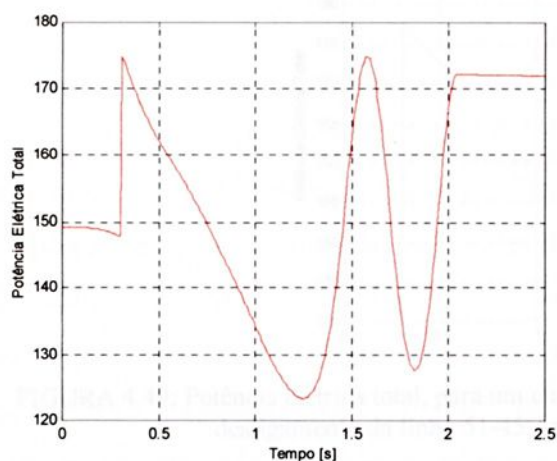


FIGURA 4.45: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 7, eliminado com o desligamento da linha 7-6, em $t_{cl} = 0,301$ s. O sistema é instável.

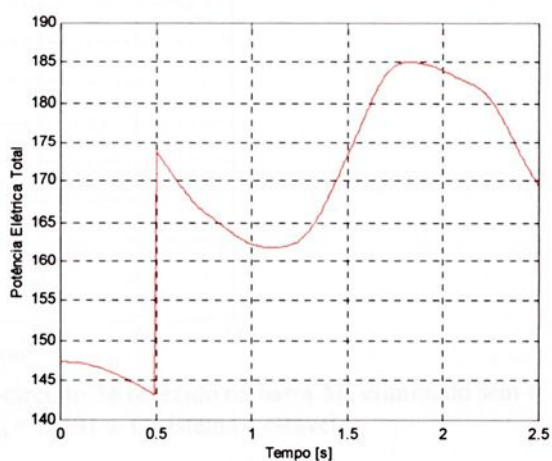


FIGURA 4.46: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 45, eliminado com o desligamento da linha 45-39, em $t_{cl} = 0,500$ s. O sistema é estável.

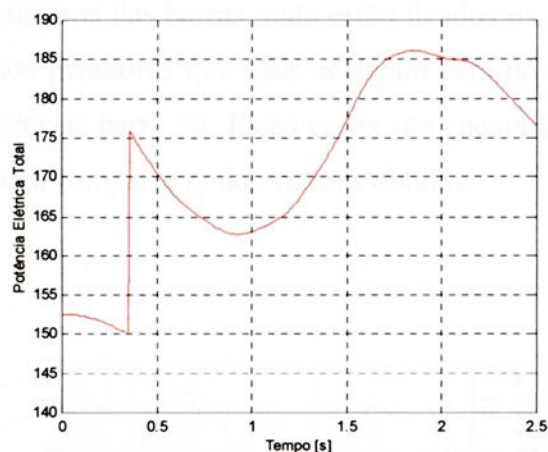


FIGURA 4.47: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 51, eliminado sem o desligamento da linha 51-45, em $t_{cl} = 0,351$ s. O sistema é estável.

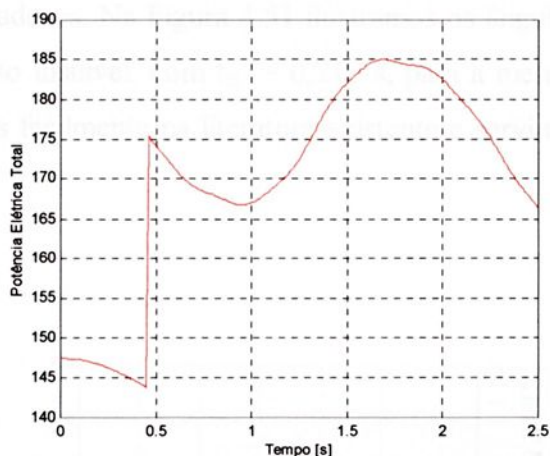


FIGURA 4.48: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 45, eliminado com o desligamento da linha 45-39, em $t_{cl} = 0,451$ s. O sistema é estável.

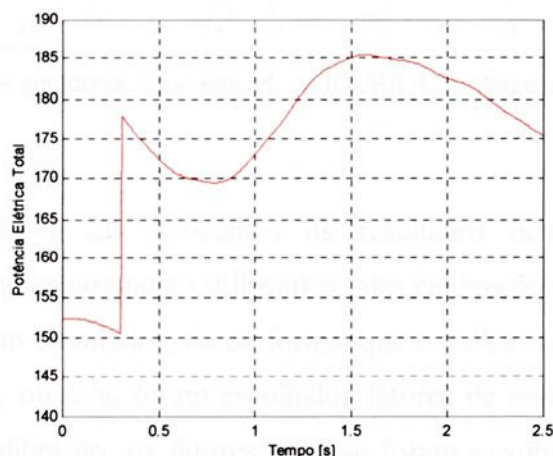


FIGURA 4.49: Potência elétrica total, para um curto-circuito 3 ϕ ocorrido na barra 51, eliminado sem o desligamento da linha 51-45, em $t_{cl} = 0,301$ s. O sistema é estável.

Apresentaremos agora os resultados relacionados ao sistema de potência real, extraído de [15], composto por 17 geradores, 162 barras e 284 ligações, da rede do estado de Iowa.

Inicialmente apresentamos na Figura 4.50 os ângulos dos geradores que mais aceleram, ou seja, possíveis geradores críticos, para uma falta ocorrida na barra 26, extinta em $t_{cl} = 0,190$ s com o desligamento da linha 26-25. O caso é estável. A legenda nos dá os

números das barras onde estão ligados os geradores. Na Figura 4.51 ilustramos os ângulos dos geradores que mais aceleram para um caso instável, com $t_{cl} = 0,210$ s, para a mesma falta na barra 26. Esses casos são encontrados facilmente na literatura existente e serviram para comparação dos valores obtidos.

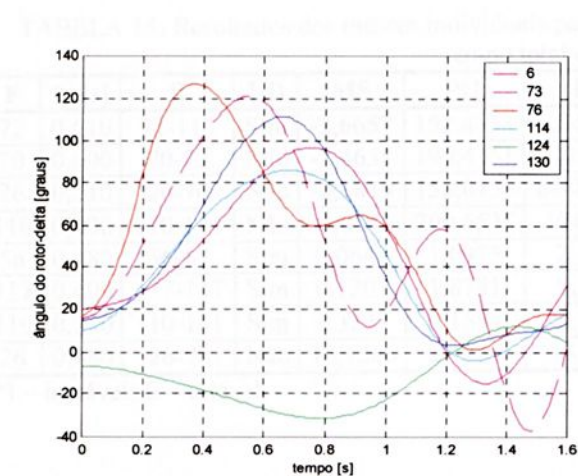


FIGURA 4.50: Ângulos dos geradores. Caso estável.

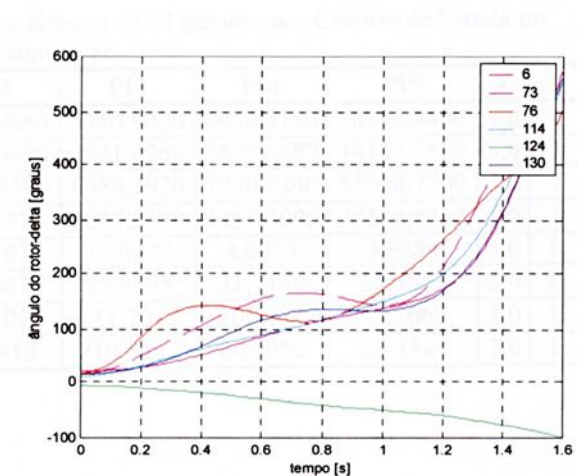


FIGURA 4.51: Ângulos dos geradores. Caso instável.

Nas Tabelas 15 a 28 colocamos os resultados dos índices para os casos apresentados. Para o índice composto utilizamos duas calibrações diferentes. Em uma delas os fatores de peso foram escolhidos, de tal forma, que o índice composto (COM) é a média dos índices individuais, ou seja, foram escolhidos fatores de peso de 0,2 para cada índice individual. Na outra calibração, os fatores de peso foram escolhidos, de tal forma, que os índices que obtiveram melhores resultados tivessem pesos maiores. Assim definimos o índice composto (COM1) da seguinte forma:

$$COM1 = 0,10.PI1 + 0,20.PI2 + 0,15.PI3 + 0,10.PI4 + 0,45.PI5$$

As observações a respeito de quais índices eram melhores ou piores foram feitas levando-se em conta todos os critérios de parada.

Como podemos observar na Tabela 15 todos os índices individuais foram capazes de capturar os casos instáveis, obtendo valores bem diferentes para os casos estáveis e os

casos instáveis. Isto já era esperado pois foi feita uma simulação completa, ou seja, com um tempo de simulação alto (3,0 s). Como o objetivo principal deste trabalho é a redução do tempo de simulação para obtenção de resultados em tempo real sentimos a necessidade de utilizar outros critérios de parada par diminuir este tempo de simulação.

TABELA 15: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no tempo total de simulação.

F	t _{el} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	T	S
72	0,610	72-113	Sim	-2,6657	152,4333	5258,9050	5740,9600	6940,5180	58940,8400	3,0	I
70	0,600	70-73	Não	-2,4635	190,4151	4405,0990	4991,0260	5877,5680	44142,7500	3,0	I
26	0,210	26-76	Não	-0,2819	155,0156	6488,5390	6980,3920	7740,5240	55968,7700	3,0	I
110	0,400	110-141	Não	-0,0643	209,6535	494,6776	1087,5150	1465,4090	28134,4200	3,0	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0645	1,0973	2,1107	13,0977	4,8953	3,9258	3,0	E
117	0,400	117-147	Sim	0,1201	1,8741	9,6683	75,3505	21,7144	22,9554	3,0	E
110	0,250	110-141	Sim	1,3237	3,1554	8,8205	111,7012	20,5122	43,2663	3,0	E
26	0,180	26-76	Não	16,1206	2,7739	15,8810	210,5407	26,0052	25,4444	3,0	E

*I – instável; E – estável.

A seguir apresentamos os ângulos dos 17 geradores para os casos colocados na Tabela 15, nas Figuras 4.52 a 4.59, identificando o gerador crítico, em cor vermelha. Assim, podemos observar se o sistema é estável ou instável através da abertura angular desses geradores, para comparação com os resultados obtidos.

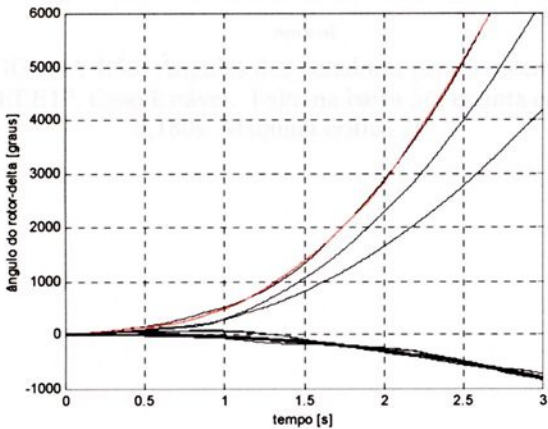


FIGURA 4.52: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Instável. Falta na barra 72, extinta em 0,610s. Máquina crítica 12.

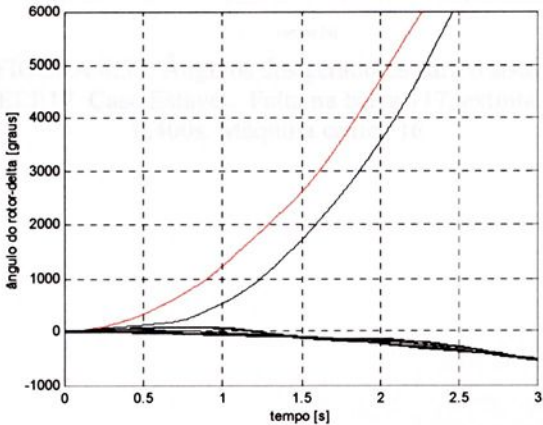


FIGURA 4.53: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Instável. Falta na barra 70, extinta em 0,600s. Máquina crítica 5.

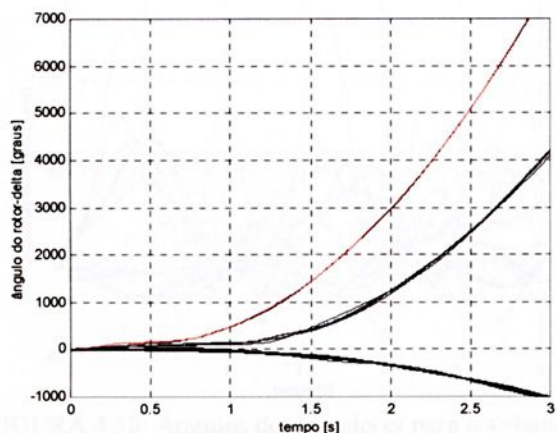


FIGURA 4.54: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Instável. Falta na barra 26, extinta em 0,210s. Máquina crítica 6.

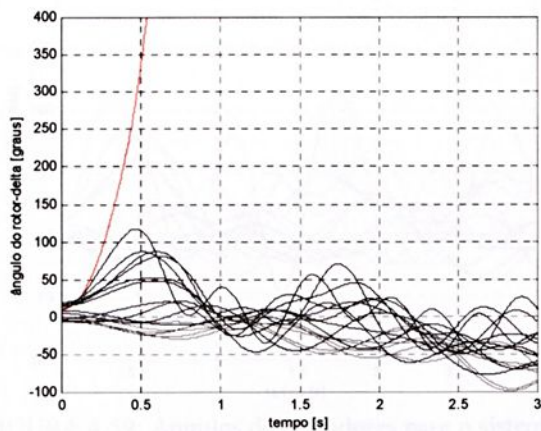


FIGURA 4.55: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Instável. Falta na barra 110, extinta em 0,400s. Máquina crítica 10.

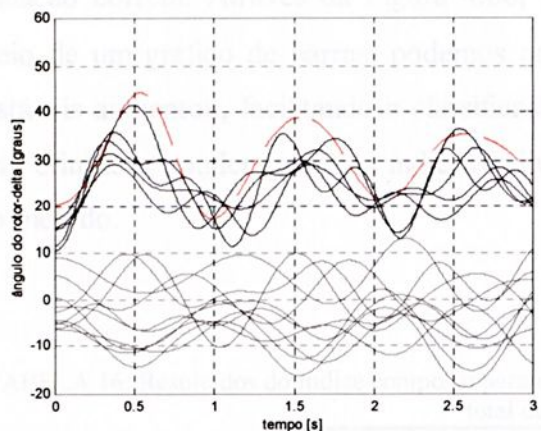


FIGURA 4.56: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Estável. Falta na barra 56, extinta em 0,180s. Máquina crítica 2.

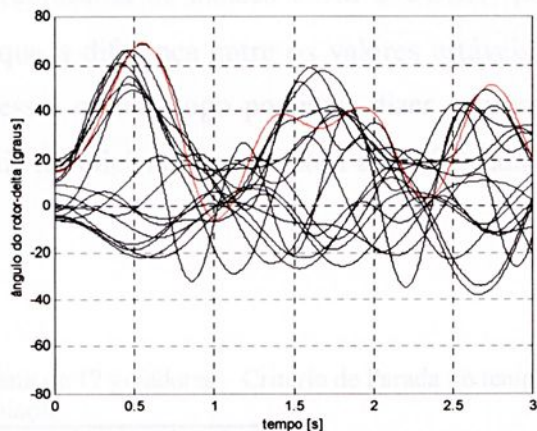


FIGURA 4.57: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Estável. Falta na barra 117, extinta em 0,400s. Máquina crítica 16.

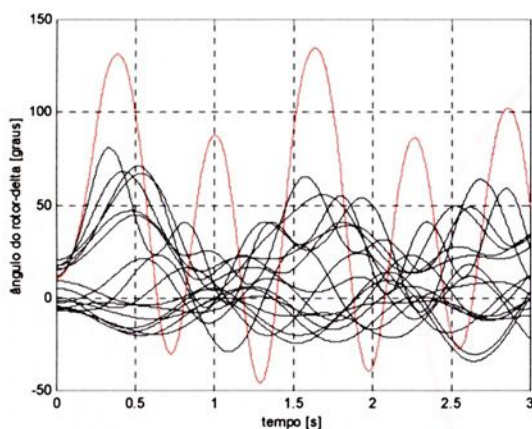


FIGURA 4.58: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Estável. Falta na barra 110, extinta em 0,250s. Máquina crítica 10.

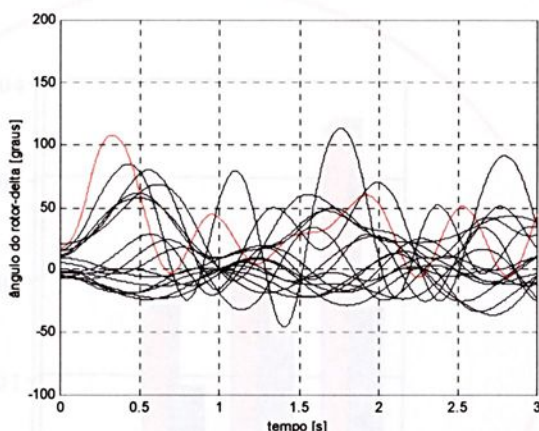


FIGURA 4.59: Ângulos dos geradores para o sistema IEEE17. Caso Estável. Falta na barra 26, extinta em 0,180s. Máquina crítica 6.

Através da Tabela 16, podemos observar que os resultados para o índice composto com uma calibragem adequada foram melhores do que com uma calibragem sem uma afinação correta. Através da Figura 4.60, que representa os índices COM e COM1, por meio de um gráfico de barras, podemos notar que a diferença entre os valores estáveis e instáveis aumentou, facilitando a classificação desses casos. Logo podemos dizer que para este critério a ponderagem dos índices individuais foi eficiente e aumentou a confiabilidade do método.

TABELA 16: Resultados do índice composto para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no tempo total de simulação.

F	t_{el} [s]	R	LD	COM	COM1	T	S
72	0,610	72-113	Sim	0,9961	1,0000	3,0	I
70	0,600	70-73	Não	0,7708	0,7583	3,0	I
26	0,210	26-76	Não	1,0000	0,9717	3,0	I
110	0,400	110-141	Não	0,4059	0,4491	3,0	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0003	0,0002	3,0	E
117	0,400	117-147	Sim	0,0017	0,0009	3,0	E
110	0,250	110-141	Sim	0,0024	0,0014	3,0	E
26	0,180	26-76	Não	0,0036	0,0017	3,0	E

*I – instável; E – estável.

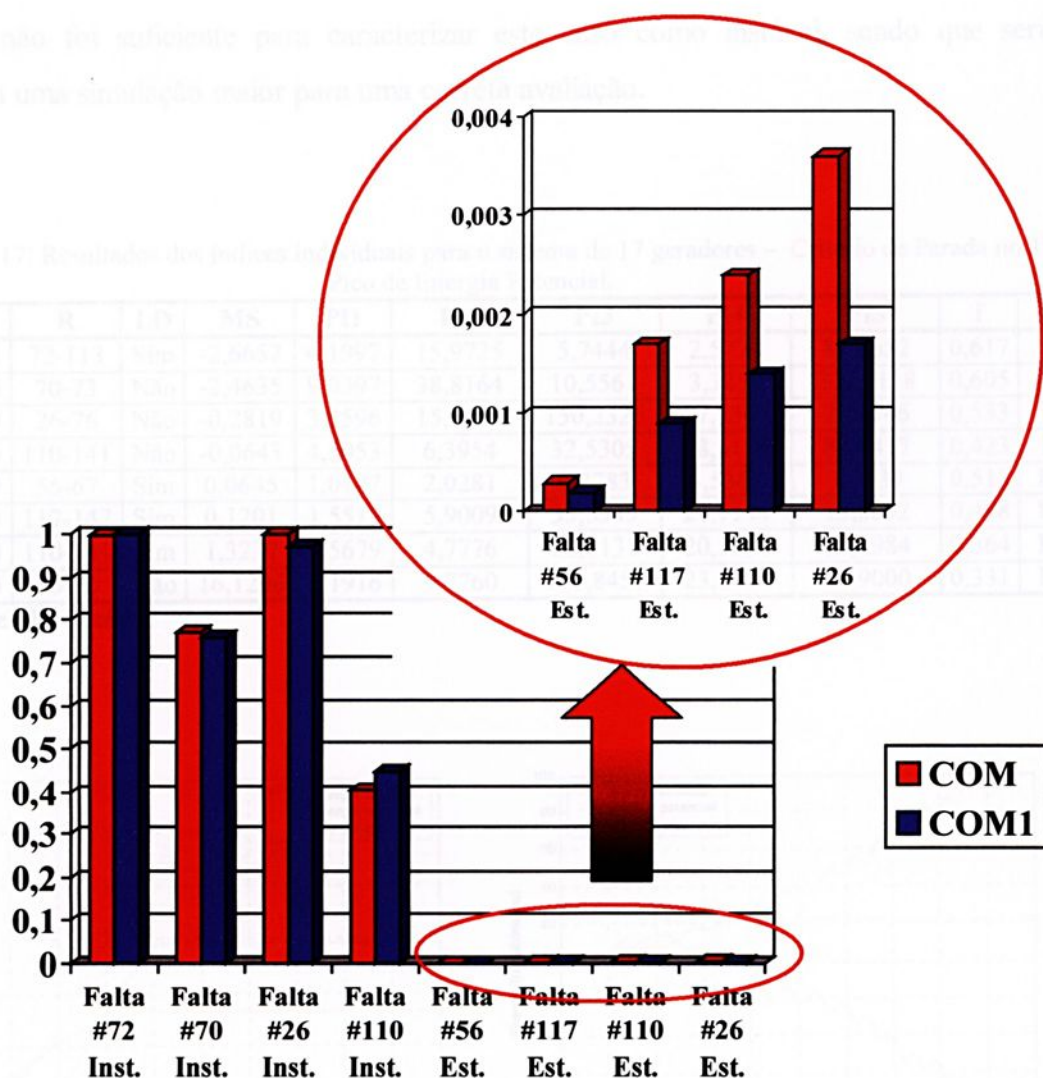


FIGURA 4.60: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada no tempo total de simulação. Casos estáveis e instáveis.

Utilizando o critério de parada no 1º pico de energia potencial podemos observar, na Tabela 17, que o índice PI1 obteve bons resultados conseguindo diferenciar os casos estáveis dos instáveis.

Já o índice PI2 obteve bons resultados, exceto para a falta ocorrendo na barra 110, com um $t_{cl} = 0,400s$, no qual o valor do índice o caracteriza como um caso estável. Logicamente, este é um caso que sempre merece maior atenção já que estamos tratando com um caso marginalmente estável. Podemos observar, através de comparação entre as Figuras 4.61(a) e 4.61(b), que o tempo de simulação para o 1º pico de energia potencial

(0,423s) não foi suficiente para caracterizar este caso como instável, sendo que seria necessária uma simulação maior para uma correta avaliação.

TABELA 17: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 1º Pico de Energia Potencial.

F	t _{cl} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	T	S
72	0,610	72-113	Sim	-2,6657	4,1997	15,9725	5,7444	2,5778	81,6652	0,617	I
70	0,600	70-73	Não	-2,4635	9,0397	38,8164	10,5561	3,3257	232,6118	0,605	I
26	0,210	26-76	Não	-0,2819	3,4596	15,8085	150,2326	27,7569	25,8746	0,533	I
110	0,400	110-141	Não	-0,0643	4,5053	6,3954	32,5305	18,5156	89,0417	0,423	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0645	1,0187	2,0281	5,2783	4,5367	3,2439	0,513	E
117	0,400	117-147	Sim	0,1201	1,5519	5,9009	33,5549	21,7144	13,8092	0,498	E
110	0,250	110-141	Sim	1,3237	2,5679	4,7776	68,1131	20,3954	25,2984	0,364	E
26	0,180	26-76	Não	16,1206	2,1916	9,7760	111,8457	23,8408	15,9000	0,331	E

*I – instável; E – estável.

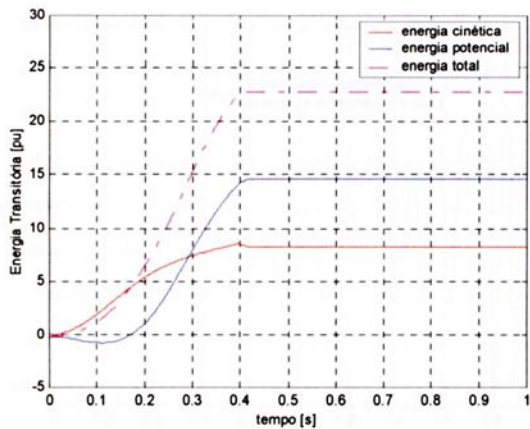


FIGURA 4.61.(a): Energia cinética, potencial e total para uma falta ocorrida na barra 110, para um t_{cl}=0,400s. Critério de parada no 1º Pico de Energia Potencial. Caso instável.

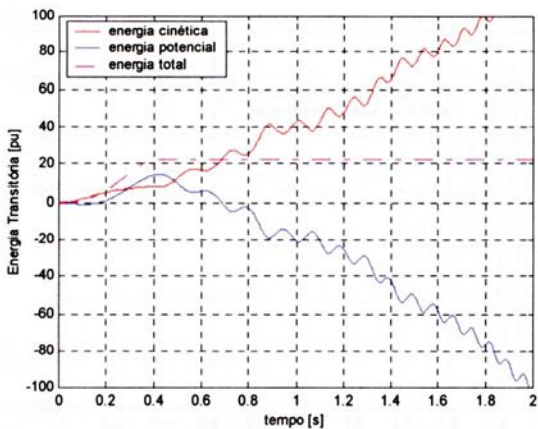


FIGURA 4.61.(b): Energia cinética, potencial e total para uma falta ocorrida na barra 110, para um t_{cl}=0,400s. Critério de parada no tempo total de simulação. Caso instável.

Os índices PI3 e PI4 obtiveram resultados ruins, principalmente na classificação de certos casos instáveis. Para a falta ocorrendo na barra 72, na barra 70 e na barra 110 esses resultados deram a estes casos a aparência de casos estáveis. Esse problema é devido ao baixo tempo de simulação, que influenciou na precisão dos índices. Podemos observar isto nas Figuras 4.62 a 4.67. Os produtos escalares Dot1, Dot2 e Dot3 são utilizados, respectivamente, no cálculo dos índices PI3, PI4 e PI5.

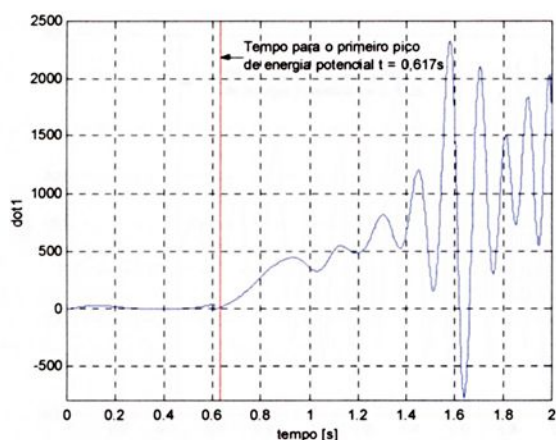


FIGURA 4.62: Produto escalar 1 (Dot1) para uma falta ocorrida na barra 72. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.

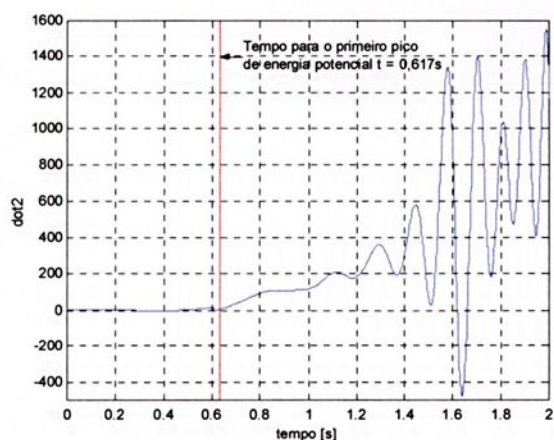


FIGURA 4.63: Produto escalar 2 (Dot2) para uma falta ocorrida na barra 72. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.

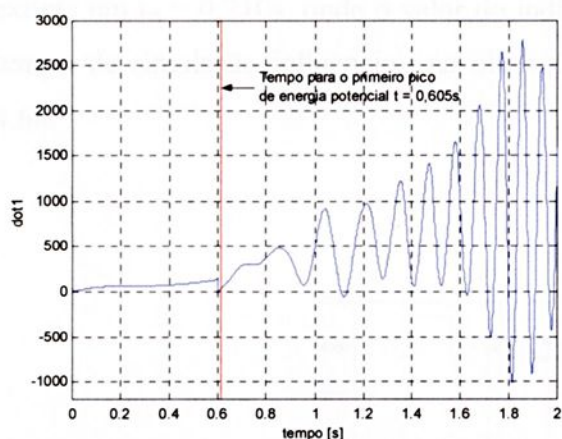


FIGURA 4.64: Produto escalar 1 (Dot1) para uma falta ocorrida na barra 70. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.

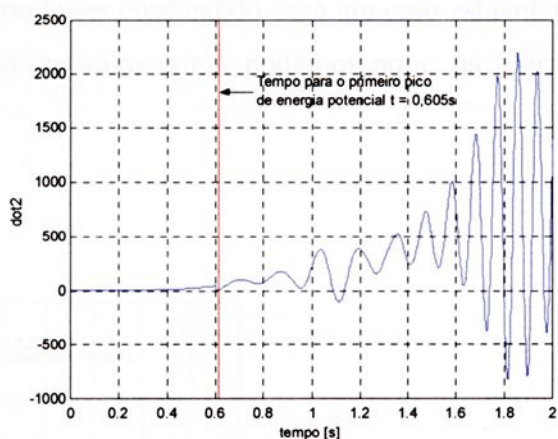


FIGURA 4.65: Produto escalar 2 (Dot2) para uma falta ocorrida na barra 70. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.

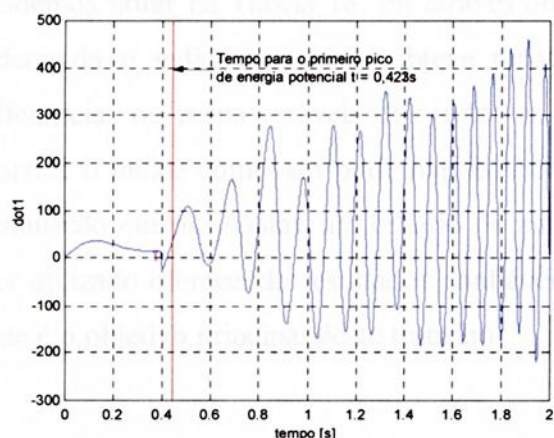


FIGURA 4.66: Produto escalar 1 (Dot1) para uma falta ocorrida na barra 110. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.

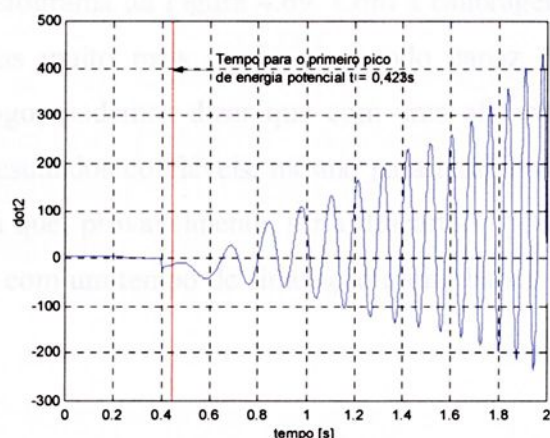


FIGURA 4.67: Produto escalar 2 (Dot2) para uma falta ocorrida na barra 110. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.

O índice PI5 obteve bons resultados, exceto para a falta ocorrendo na barra 26, extinta em $t_{cl} = 0,210s$, onde o valor do índice pode ser confundido com um caso estável. O tempo de simulação influenciou na obtenção deste valor como podemos notar na Figura 4.68.

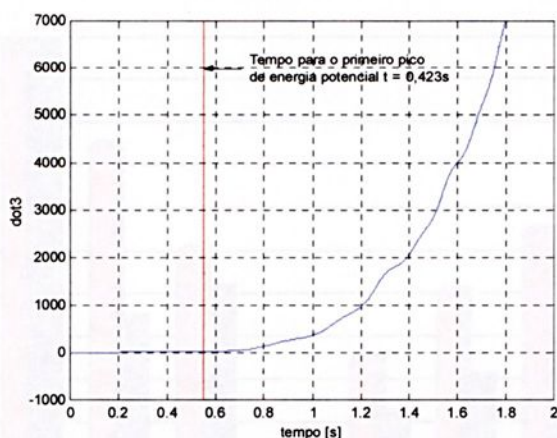


FIGURA 4.68: Produto escalar 3 (Dot3) para uma falta ocorrida na barra 26. Critério de parada no 1º pico de energia potencial em vermelho. Caso instável.

O índice composto (COM) calculado como a média direta dos índices individuais trouxe com ele os mesmos problemas, classificando erroneamente vários casos, como

podemos notar na Tabela 18, ou através do histograma da Figura 4.69. Com a calibragem adequada o índice composto obteve resultados muito mais confiáveis, sendo capaz de diferenciar os casos estáveis dos instáveis. Logo, podemos dizer que com uma afinação correta o índice composto pode nos fornecer resultados confiáveis, mesmo para tempos de simulação curtos. Assim, um critério de parada que, provavelmente, seria descartado pôde ser utilizado oferecendo resultados confiáveis e com um tempo de simulação muito baixo, o que é o objetivo principal deste trabalho.

TABELA 18: Resultados do índice composto para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 1º Pico de Energia Potencial.

F	t _{el} [s]	R	LD	COM	COM1	T	S
72	0,610	72-113	Sim	0,3742	0,3599	0,617	I
70	0,600	70-73	Não	1,0000	1,0000	0,605	I
26	0,210	26-76	Não	0,7580	0,3510	0,533	I
110	0,400	110-141	Não	0,5130	0,4210	0,423	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0547	0,0279	0,513	E
117	0,400	117-147	Sim	0,2600	0,1280	0,498	E
110	0,250	110-141	Sim	0,4116	0,2156	0,364	E
26	0,180	26-76	Não	0,5556	0,2472	0,331	E

*I – instável; E – estável.

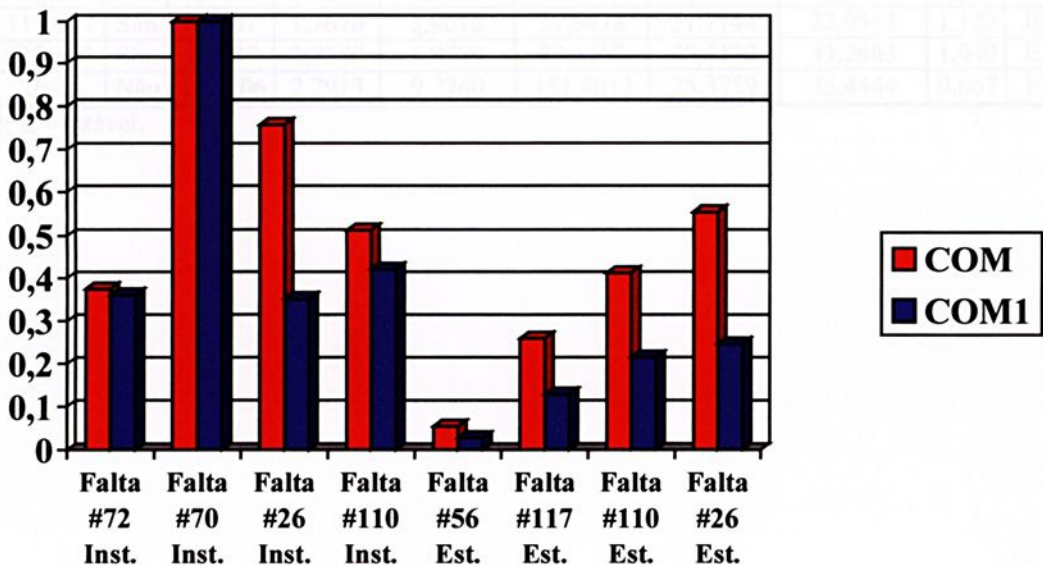


FIGURA 4.69: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada no 1º pico de energia potencial. Casos estáveis e instáveis.

Da Tabela 19 podemos notar que todos os índices capturaram os casos mais instáveis. Enquanto para o caso marginalmente estável, ou seja, com a falta ocorrendo na barra 110, alguns índices não diferenciaram bem os casos estáveis dos instáveis. Podemos observar que os índices PI2 e PI4 obtiveram valores muito próximo dos valores estáveis, e que o valor do índice PI3 poderia classificar erroneamente o caso citado. Isto se deve ao fato do tempo de simulação para este caso ser muito baixo, o que ocasionou uma perda de precisão dos índices, como podemos observar nas Figuras 4.70 a 4.72. Os produtos escalares Dot1 e Dot2 são utilizados, respectivamente, no cálculo dos índices PI3 e PI4. Apesar disto os índices PI1 e PI5 foram capazes de classificar este caso como instável.

Os tempos de simulação obtidos neste critério de parada foram baixos o que o capacita para uma análise em tempo real. Tivemos somente um tempo de simulação um pouco maior (1,660s) para a falta ocorrendo na barra 72, como mostra a Figura 4.73, sendo que este tempo ainda pode ser considerado satisfatório.

TABELA 19: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Energia Potencial.

F	t _{cl} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	T	S
72	0.610	72-113	Sim	-2,6657	35,0249	1109,2430	3097,7420	1813,8780	6239,6070	1,660	I
70	0.600	70-73	Não	-2,4635	28,9518	376,5948	986,7913	474,4965	1668,4720	1,133	I
26	0.210	26-76	Não	-0,2819	22,1634	602,4019	2252,3230	959,4451	1888,3130	1,366	I
110	0.400	110-141	Não	-0,0643	9,8918	11,8564	137,3414	40,6815	252,1047	0,615	I
56	0.180	56-67	Sim	0,0645	1,0215	2,0281	10,5183	4,8953	3,9258	1,018	E
117	0.400	117-147	Sim	0,1201	1,7670	5,9010	57,6438	21,7144	22,9553	1,122	E
110	0.250	110-141	Sim	1,3237	2,8270	6,9779	88,6462	20,5122	43,2663	1,040	E
26	0.180	26-76	Não	16,1206	2,2913	9,7760	151,8012	25,3759	25,4444	0,667	E

*I – instável; E – estável.



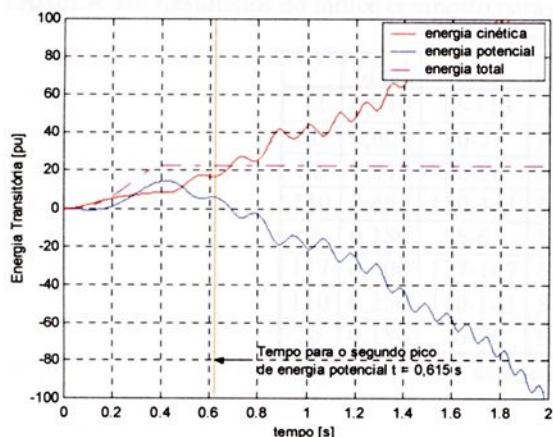


FIGURA 4.70: Energia cinética, potencial e total para uma falta ocorrida na barra 110, para um $t_{cl} = 0,400s$. Critério de parada no 2º Pico de Energia Potencial, em laranja. Caso instável.

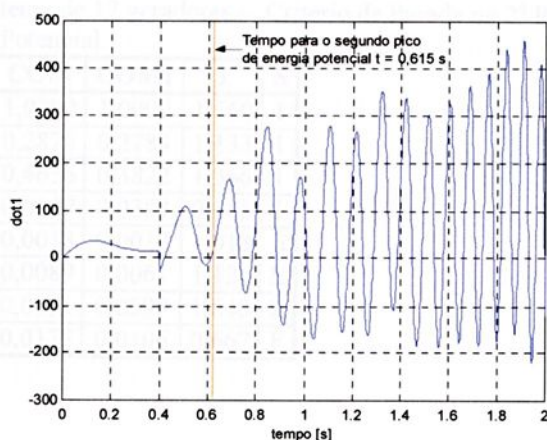


FIGURA 4.71: Produto escalar 1 (Dot1) para uma falta ocorrida na barra 110. Critério de parada no 2º pico de energia potencial, em laranja. Caso instável.

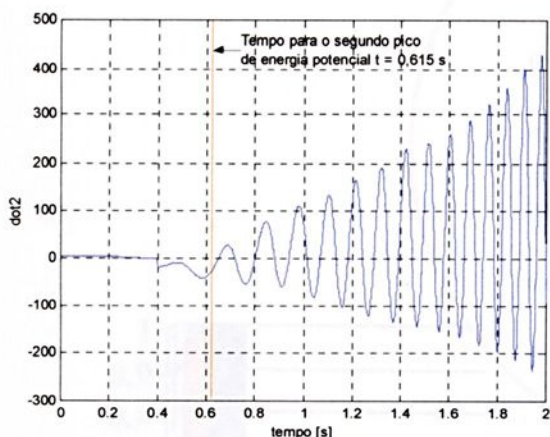


FIGURA 4.72: Produto escalar 2 (Dot2) para uma falta ocorrida na barra 110. Critério de parada no 2º pico de energia potencial em laranja. Caso instável.

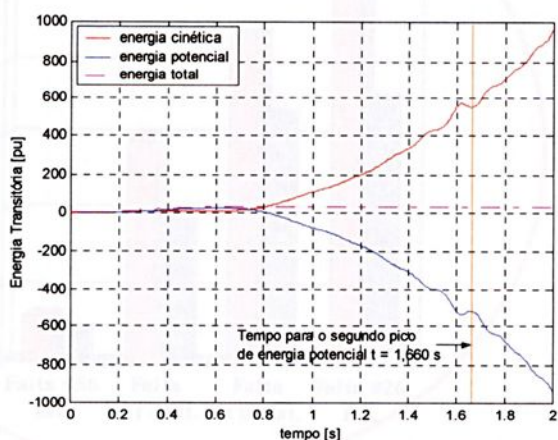


FIGURA 4.73: Energia cinética, potencial e total para uma falta ocorrida na barra 72, para um $t_{cl} = 0,610s$. Critério de parada no 2º Pico de Energia Potencial, em laranja. Caso instável.

Através da calibragem adequada os resultados para o índice composto foram ainda melhores, como podemos observar na Tabela 20, ou através do histograma da Figura 4.74. Os valores dos casos instáveis aumentaram, enquanto, os valores dos casos estáveis diminuíram, o que aumentou a diferença entre estes casos facilitando a classificação.

TABELA 20: Resultados do índice composto para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Energia Potencial.

F	t _{cl} [s]	R	LD	COM	COM1	T	S
72	0,610	72-113	Sim	1,0000	1,0000	1,660	I
70	0,600	70-73	Não	0,2875	0,2784	1,133	I
26	0,210	26-76	Não	0,4656	0,3822	1,366	I
110	0,400	110-141	Não	0,0367	0,0384	0,615	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0018	0,0012	1,018	E
117	0,400	117-147	Sim	0,0089	0,0061	1,122	E
110	0,250	110-141	Sim	0,0131	0,0099	1,040	E
26	0,180	26-76	Não	0,0175	0,0106	0,667	E

*I – instável; E – estável.

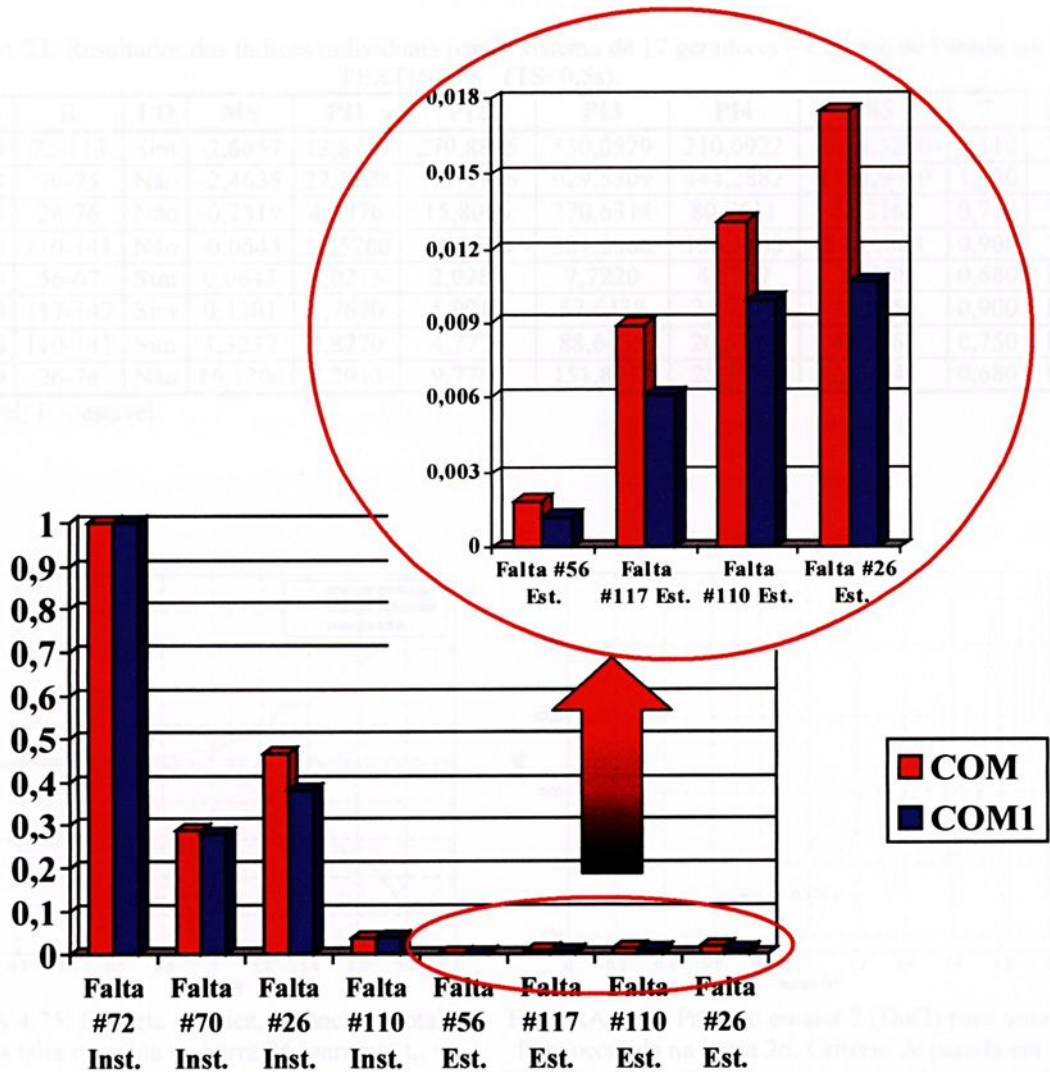


FIGURA 4.74: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada no 2º pico de energia potencial. Casos estáveis e instáveis.

Para o critério apresentado na Tabela 21 os índices capturaram todos os casos instáveis. Entretanto, para uma falta ocorrida na barra 26, os valores dos índices PI2, PI4 e PI5 foram muito próximos dos valores para os casos estáveis, isto ocorreu pois o tempo de simulação foi muito curto, como podemos observar nas Figuras 4.75 a 4.77. Os produtos escalares Dot2 e Dot3 são utilizados, respectivamente, no cálculo dos índices PI4 e PI5.

Os tempos de simulação envolvidos no processo são baixos o que possibilita uma análise em tempo real, e o que em alguns casos influi na precisão dos índices.

TABELA 21: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada em TEXTIN+TS (TS=0,5s).

F	t _{cl} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	T	S
72	0,610	72-113	Sim	-2,6657	12,8734	279,8895	530,0529	210,0922	1016,5250	1,110	I
70	0,600	70-73	Não	-2,4635	27,3722	376,1976	929,5309	444,2882	1584,9970	1,100	I
26	0,210	26-76	Não	-0,2819	4,2976	15,8085	270,6314	80,7611	68,3161	0,710	I
110	0,400	110-141	Não	-0,0643	20,5280	61,2590	381,3066	130,5100	894,1863	0,900	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0645	1,0215	2,0281	7,7220	4,5367	3,9258	0,680	E
117	0,400	117-147	Sim	0,1201	1,7670	5,9010	57,6438	21,7144	22,9554	0,900	E
110	0,250	110-141	Sim	1,3237	2,8270	4,7776	88,6435	20,5122	43,2663	0,750	E
26	0,180	26-76	Não	16,1206	2,2913	9,7760	151,8012	25,3759	25,4444	0,680	E

*I – instável; E – estável.

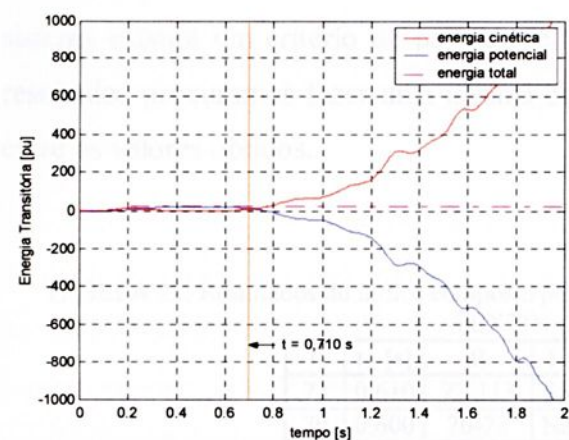


FIGURA 4.75: Energia cinética, potencial e total para uma falta ocorrida na barra 26, para um t_{cl} = 0,210s. Critério de parada em TEXTIN+TS (TS=0,5s), em laranja. Caso instável.

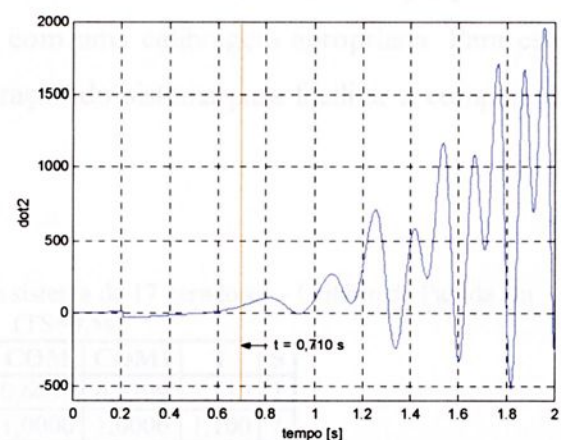


FIGURA 4.76: Produto escalar 2 (Dot2) para uma falta ocorrida na barra 26. Critério de parada em TEXTIN+TS (TS=0,5s), em laranja. Caso instável.

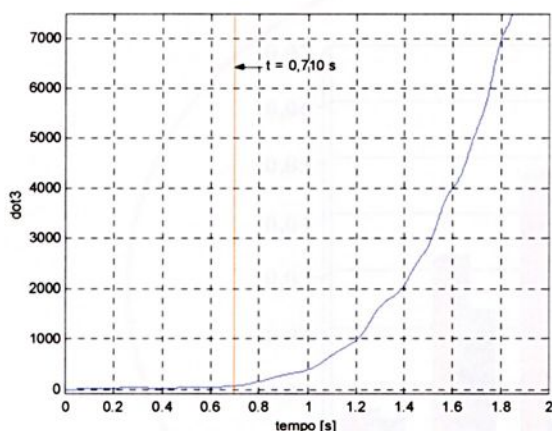


FIGURA 4.77: Produto escalar 3 (Dot3) para uma falta ocorrida na barra 26. Critério de parada em TEXTIN+TS (TS=0,5s), em laranja. Caso instável.

Através dos valores obtidos, na Tabela 22, ou no histograma da Figura 4.78, para o índice composto com a calibragem afinada, podemos notar que para, pelo menos um caso, o índice não se comportou da melhor maneira, apesar de ter discernido entre os casos estáveis e instáveis. Isto ocorreu porque utilizamos a mesma calibragem dos outros critérios de parada, o que não seria necessariamente exigido. Na calibragem utilizada demos um maior peso ao índice PI5, que para este caso não era o índice com melhores resultados. Neste caso o maior peso deveria ser dado ao índice PI3. Isto não deve causar problemas na vida real, pois os usuários o utilizaram em um ambiente conhecido, ou seja, para cada sistema existirá um critério de parada melhor com uma calibragem apropriada. Para estes resultados procuramos fazer uma mesma calibração do sistema para facilitar a comparação entre os valores obtidos.

TABELA 22: Resultados do índice composto para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada em TEXTIN+TS (TS=0,5s).

F	t _{el} [s]	R	LD	COM	COM1	T	S
72	0,610	72-113	Sim	0,6095	0,6309	1,110	I
70	0,600	70-73	Não	1,0000	1,0000	1,100	I
26	0,210	26-76	Não	0,1308	0,0851	0,710	I
110	0,400	110-141	Não	0,4425	0,4994	0,900	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0057	0,0040	0,680	E
117	0,400	117-147	Sim	0,0327	0,0232	0,900	E
110	0,250	110-141	Sim	0,0476	0,0370	0,750	E
26	0,180	26-76	Não	0,0638	0,0399	0,680	E

*I – instável; E – estável.

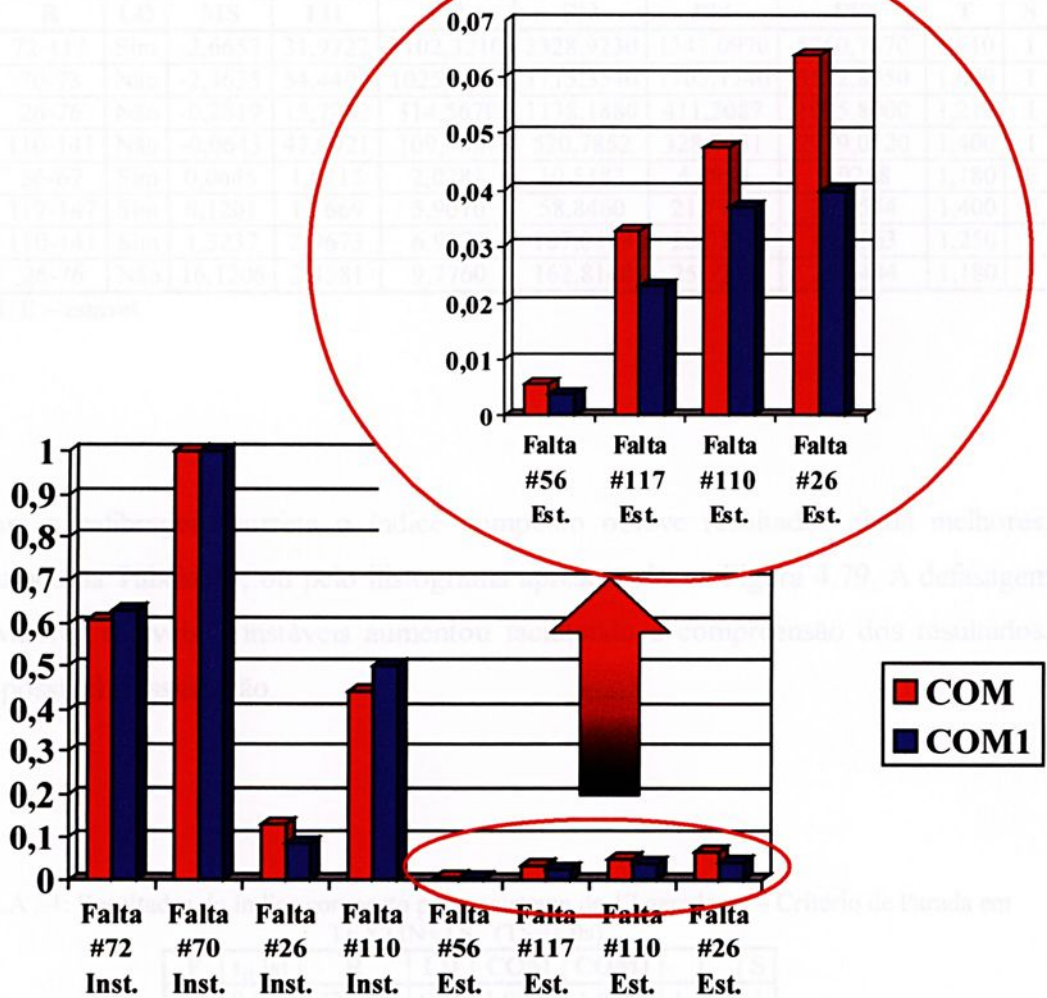


FIGURA 4.78: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada com tempo fixo de simulação de 0,5s após a extinção da falta. Casos estáveis e instáveis.

Como podemos observar na Tabela 23 todos os índices individuais foram capazes de capturar todos os casos instáveis, com valores bem diferentes para os casos estáveis e instáveis. Isso já era esperado já que os tempos de simulação para este critério de parada são os maiores depois da simulação completa. Assim, como já dissemos quanto maior o tempo de simulação maior a precisão e confiabilidade dos índices. No entanto, esses índices ainda têm tempos de simulação reduzidos.

TABELA 23: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada em TEXTIN+TS (TS=1,0s).

F	t _{ci} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	T	S
72	0,610	72-113	Sim	-2,6657	31,9722	1102,3210	2328,9230	1341,0970	5760,7870	1,610	I
70	0,600	70-73	Não	-2,4635	54,4491	1025,5450	1715,3540	1105,1740	5522,8950	1,600	I
26	0,210	26-76	Não	-0,2819	15,7982	314,5670	1138,1880	411,2087	1005,8000	1,210	I
110	0,400	110-141	Não	-0,0643	47,9921	109,9887	520,7852	328,0051	2979,0120	1,400	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0645	1,0215	2,0281	10,5183	4,8953	3,9258	1,180	E
117	0,400	117-147	Sim	0,1201	1,7669	5,9010	58,8460	21,7144	22,9554	1,400	E
110	0,250	110-141	Sim	1,3237	2,9673	6,9779	107,0419	20,5122	43,2663	1,250	E
26	0,180	26-76	Não	16,1206	2,4381	9,7760	162,8148	25,3759	25,4444	1,180	E

*I – instável; E – estável.

Com a calibragem correta o índice composto obteve resultados ainda melhores, como notamos na Tabela 24, ou pelo histograma apresentado na Figura 4.79. A defasagem entre os valores estáveis e instáveis aumentou facilitando a compreensão dos resultados, para uma possível classificação.

TABELA 24: Resultados do índice composto para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada em TEXTIN+TS (TS=1,0s).

F	t _{ci} [s]	R	LD	COM	COMI	T	S
72	0,610	72-113	Sim	1,0000	1,0000	1,610	I
70	0,600	70-73	Não	0,8919	0,9285	1,600	I
26	0,210	26-76	Não	0,2731	0,2209	1,210	I
110	0,400	110-141	Não	0,3773	0,4480	1,400	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0021	0,0013	1,180	E
117	0,400	117-147	Sim	0,0105	0,0069	1,400	E
110	0,250	110-141	Sim	0,0171	0,0119	1,250	E
26	0,180	26-76	Não	0,0214	0,0123	1,180	E

*I – instável; E – estável.



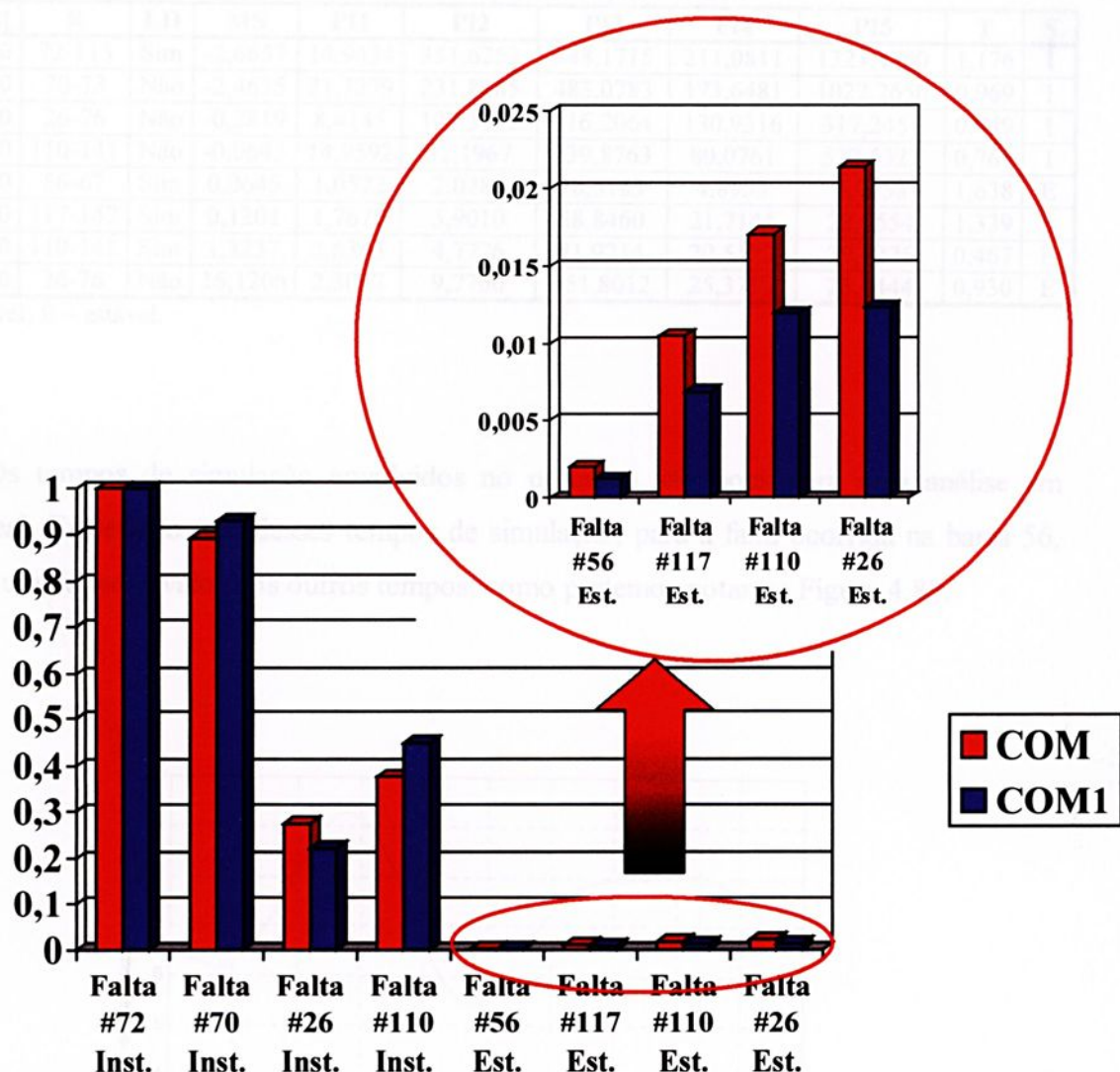


FIGURA 4.79: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada com tempo fixo de 1,0s após a extinção da falta.

Na Tabela 25 podemos observar que os índices individuais foram capazes de capturar todos os casos instáveis, com uma boa margem para diferenciá-los.

TABELA 25: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica para a Máquina Crítica.

F	t _{cl} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	T	S
72	0,610	72-113	Sim	-2,6657	14,9434	351,6252	548,1715	211,0811	1323,4760	1,176	I
70	0,600	70-73	Não	-2,4635	21,3279	231,8285	483,0783	173,6481	1022,2650	0,969	I
26	0,210	26-76	Não	-0,2819	8,4145	107,3102	516,2064	130,9316	317,2451	0,949	I
110	0,400	110-141	Não	-0,0643	14,9592	32,1967	239,8763	80,0761	522,5323	0,761	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0645	1,0522	2,0281	10,5183	4,8953	3,9258	1,638	E
117	0,400	117-147	Sim	0,1201	1,7670	5,9010	58,8460	21,7144	22,9554	1,339	E
110	0,250	110-141	Sim	1,3237	2,6363	4,7776	81,9214	20,5122	39,2276	0,467	E
26	0,180	26-76	Não	16,1206	2,3037	9,7760	151,8012	25,3759	25,4444	0,930	E

*I – instável; E – estável.

Os tempos de simulação envolvidos no processo são bons para uma análise em tempo real. Entretanto, um desses tempos de simulação, para a falta ocorrida na barra 56, excedeu um pouco o valor dos outros tempos, como podemos notar na Figura 4.80.

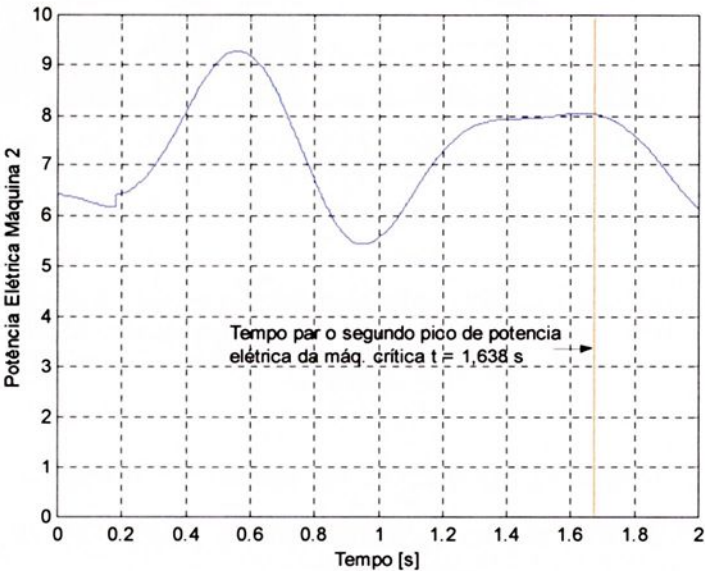


FIGURA 4.80: Potência Elétrica para a máquina crítica (2), para uma falta ocorrida na barra 56. Caso estável.

Como podemos observar na Tabela 26 o índice composto melhorou significativamente após a afinação adequada dos índices individuais. Através do histograma da Figura 4.81, que representa a Tabela 26, podemos notar que os dois índices compostos

foram capazes de discernir bem os casos estáveis dos instáveis, obtendo, até o momento, a melhor avaliação dos casos em estáveis ou instáveis.

TABELA 26: Resultados para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica para a Máquina Crítica.

F	t _{cl} [s]	R	LD	COM	COM1	T	S
72	0,610	72-113	Sim	1,0000	1,0000	1,176	I
70	0,600	70-73	Não	0,7889	0,7763	0,969	I
26	0,210	26-76	Não	0,4410	0,3316	0,949	I
110	0,400	110-141	Não	0,3632	0,3725	0,761	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0091	0,0056	1,638	E
117	0,400	117-147	Sim	0,0454	0,0294	1,339	E
110	0,250	110-141	Sim	0,0609	0,0430	0,467	E
26	0,180	26-76	Não	0,0877	0,0505	0,930	E

*I – instável; E – estável.

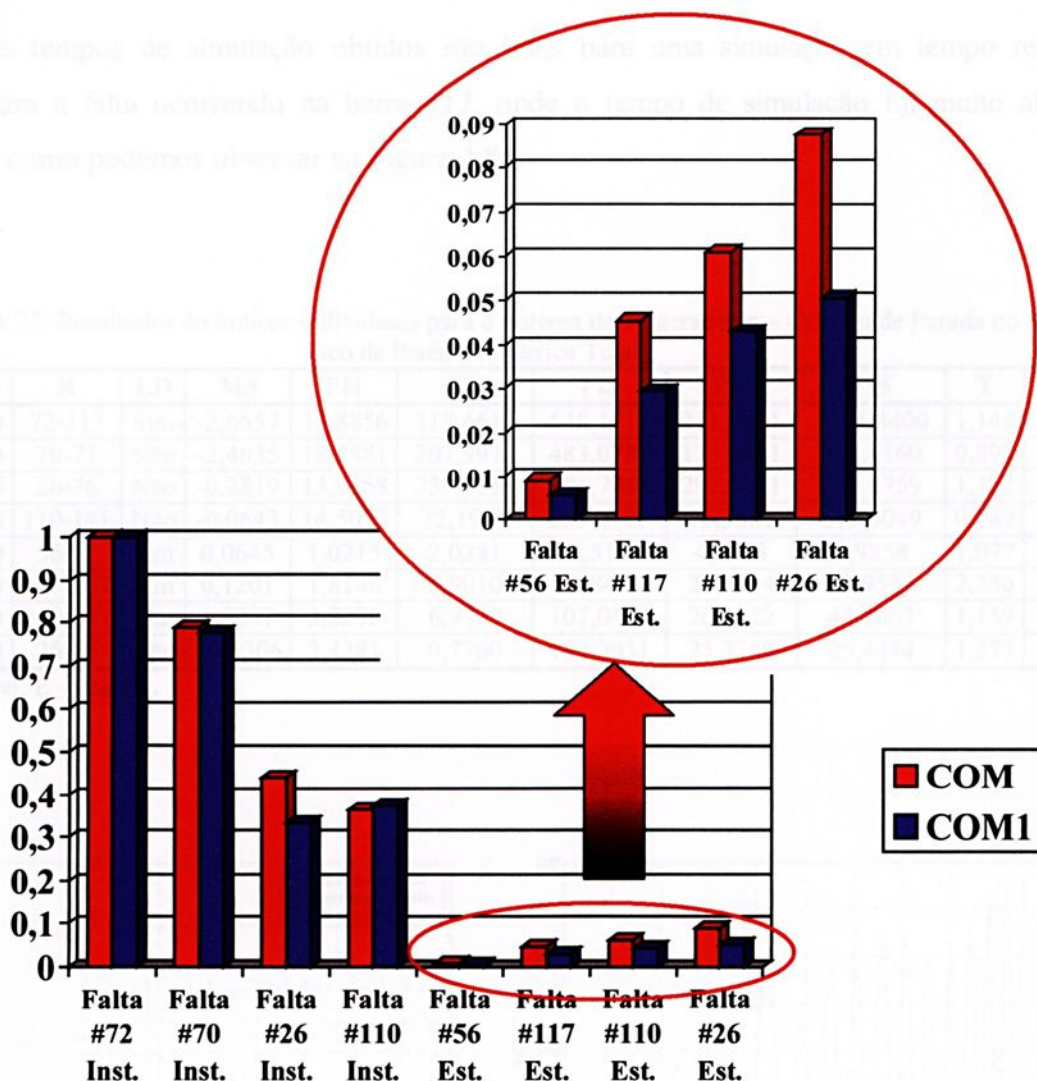


FIGURA 4.81: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada no 2º pico de potência elétrica para a máquina crítica. Casos estáveis e instáveis.

Utilizando o critério de parada no 2º pico de potência elétrica total podemos observar, através da Tabela 27, que os índices individuais obtiveram ótimos resultados. Alguns índices obtiveram valores baixos para um caso marginalmente estável, falta ocorrendo na barra 110, onde ainda assim foi possível caracterizar este caso como instável. Isso ocorreu nos índices PI2, PI3 e PI4 devido ao baixo tempo de simulação, como podemos notar nas Figuras 4.82 a 4.84. Os produtos escalares Dot1 e Dot2 são utilizados, respectivamente, no cálculo dos índices PI3 e PI4.

Os tempos de simulação obtidos são bons para uma simulação em tempo real, exceto para a falta ocorrendo na barra 117, onde o tempo de simulação foi muito alto (2,336s), como podemos observar na Figura 4.85.

TABELA 27: Resultados dos índices individuais para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total.

F	t _{cl} [s]	R	LD	MS	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	T	S
72	0,610	72-113	Sim	-2,6657	13,8856	317,6611	548,1715	211,0811	1181,3400	1,144	I
70	0,600	70-73	Não	-2,4635	18,3881	207,9975	483,0783	173,6481	794,4160	0,898	I
26	0,210	26-76	Não	-0,2819	13,0358	239,8610	786,7983	292,9211	730,6759	1,122	I
110	0,400	110-141	Não	-0,0643	14,5023	32,1967	233,4999	75,3680	519,5049	0,749	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0645	1,0215	2,0281	10,5183	4,8953	3,9258	1,077	E
117	0,400	117-147	Sim	0,1201	1,8146	5,9010	58,8460	21,7144	22,9554	2,336	E
110	0,250	110-141	Sim	1,3237	2,8270	6,9779	107,0419	20,5122	43,2663	1,159	E
26	0,180	26-76	Não	16,1206	2,4381	9,7760	180,9031	25,3760	25,4444	1,275	E

*I – instável; E – estável.

Do fato de o produto escalar 1 (Dot1) ser negativo para o caso instável, podemos concluir que a falta ocorreu na barra 110, para um t_{cl} = 0,400s. Critério de parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total, em laranja. Caso instável.

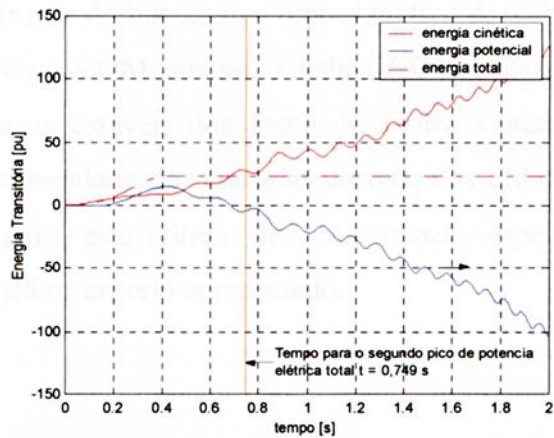


FIGURA 4.82: Energia cinética, potencial e total para uma falta ocorrida na barra 110, para um t_{cl} = 0,400s. Critério de parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total, em laranja. Caso instável.

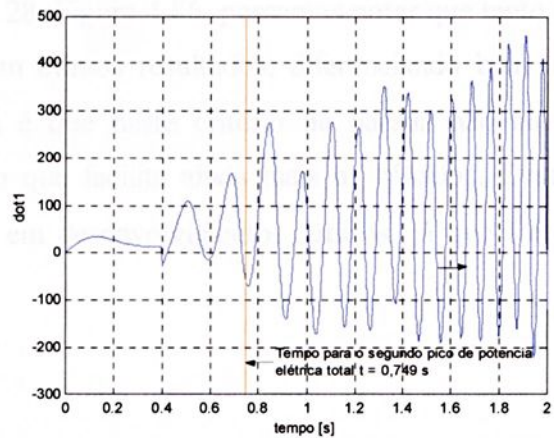


FIGURA 4.83: Produto escalar 1 (Dot1) para uma falta ocorrida na barra 110. Critério de parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total, em laranja. Caso instável.

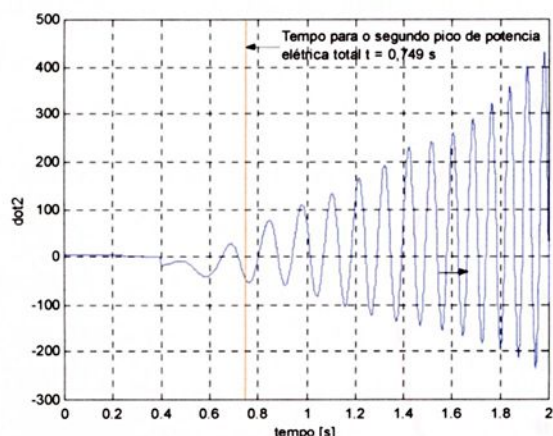


FIGURA 4.84: Produto escalar 2 (Dot2) para uma falta ocorrida na barra 110. Critério de parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total, em laranja. Caso instável.

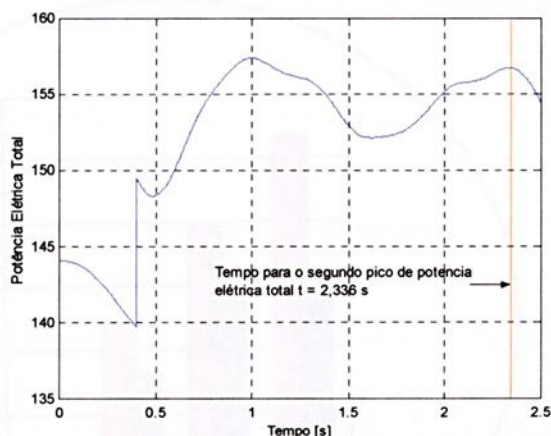


FIGURA 4.85: Critério de parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total, em laranja, para uma falta ocorrida na barra 110. Caso instável.

Da Tabela 28, podemos notar, que os resultados para o índice com calibragem adequada (COM1) foram melhores do que o índice sem esta afinação (COM). Embora, através do histograma representativo da Tabela 28, Figura 4.86, possamos notar que tanto o índice COM quanto o índice COM1 obtiveram ótimos resultados, diferenciando bem os casos estáveis dos instáveis. Outra vantagem é que neste critério de parada não há a necessidade da obtenção da máquina crítica, o que facilita ainda mais os cálculos. Deste modo, este critério deve ter atenção especial em desenvolvimentos futuros, já que foi o melhor critério apresentado.

TABELA 28: Resultados do índice composto para o sistema de 17 geradores – Critério de Parada no 2º Pico de Potência Elétrica Total.

F	t_{cl} [s]	R	LD	COM	COM1	T	S
72	0,610	72-113	Sim	1,0000	1,0000	1,144	I
70	0,600	70-73	Não	0,7383	0,7012	0,898	I
26	0,210	26-76	Não	0,9081	0,7507	1,122	I
110	0,400	110-141	Não	0,3851	0,4061	0,749	I
56	0,180	56-67	Sim	0,0098	0,0062	1,077	E
117	0,400	117-147	Sim	0,0489	0,0324	2,336	E
110	0,250	110-141	Sim	0,0795	0,0560	1,159	E
26	0,180	26-76	Não	0,1073	0,0619	1,275	E

*I – instável; E – estável.

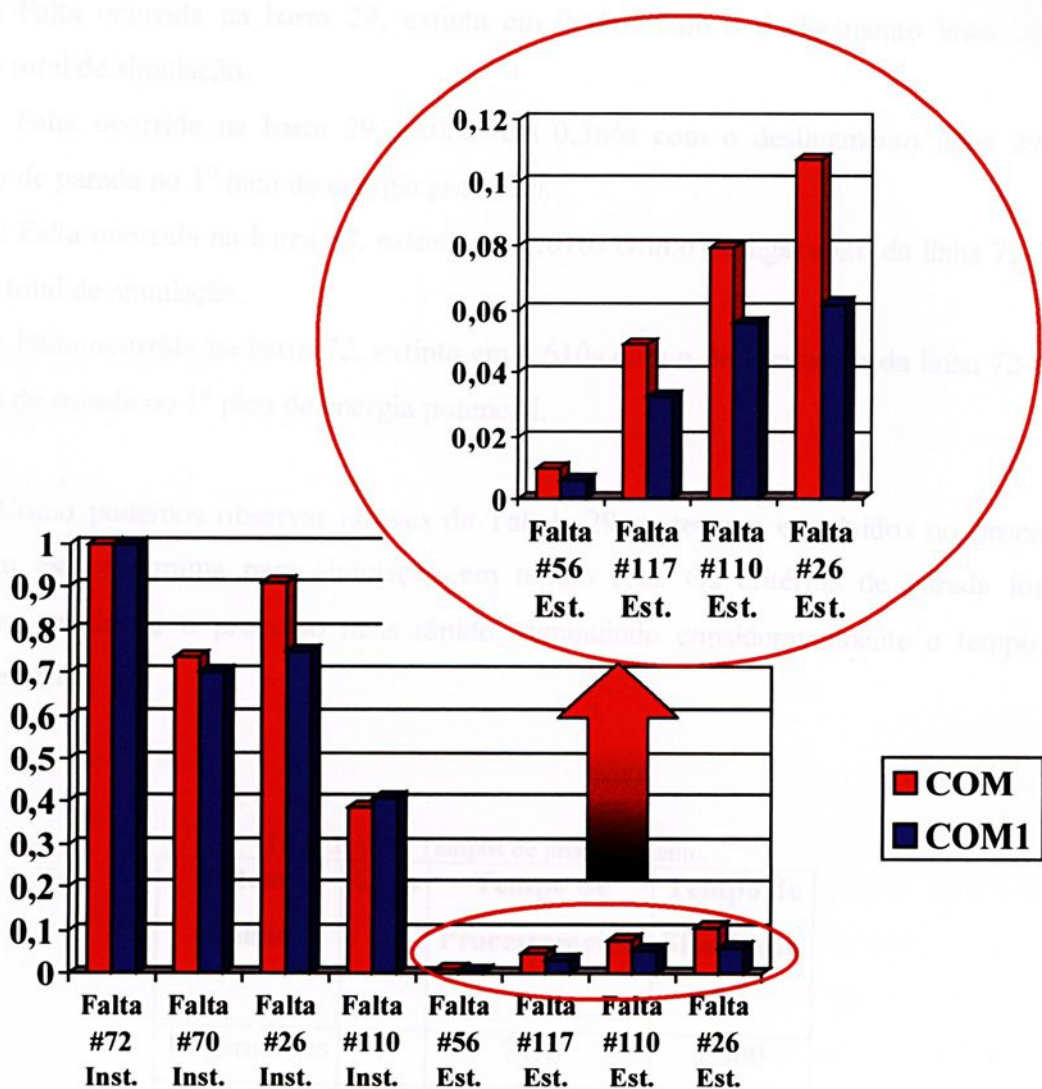


FIGURA 4. 86: Histograma dos índices compostos, COM e COM1, para o critério de parada no 2º pico de potência elétrica total. Casos estáveis e instáveis.

Apresentaremos a seguir uma tabela contendo os tempos de processamento para cada um dos sistemas simulados até agora. Estes tempos foram obtidos em um computador Pentium III de 733MHz. Nos casos colocados na Tabela 35 procuramos obter os resultados para a simulação completa e para simulações mais rápidas, como no 1º pico de energia potencial.

Caso 4: Falta ocorrida na barra 72, extinta em 0,610s com o desligamento da linha 72-113.
Critério de parada no 1º pico de energia potencial.

Como podemos observar através da Tabela 29 os tempos envolvidos no processo habilitam este programa para simulação em tempo real. Os critérios de parada foram eficientes em deixar o processo mais rápido, diminuindo consideravelmente o tempo de processamento.

Sistema Avaliado	Caso	Tempo de Processamento	Tempo de Simulação (s)
16 geradores	1	2s76'	2,500
16 geradores	2	0s69'	0,590
IEEE17	3	74s	3,000
IEEE17	4	17s	0,617

V - CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisados alguns índices para classificação de contingências em análise de segurança dinâmica. Estes índices são baseados nos conceitos de coerência, conversão transitória de energia cinética e potencial, e três produtos escalares, após a falta extinta. Além desses temos também o índice composto, calculado como a média dos cinco índices apresentados. Estes índices são calculados rapidamente, pois não necessitam de uma longa simulação no tempo para determinar se as contingências são estáveis ou instáveis. Eles também são importantes, pois não necessitam do cálculo do controle do ponto de equilíbrio estável para obter a margem de energia normalizada. Eles são precisos porque têm grande potencial para capturar todos os casos instáveis.

Os critérios de parada apresentados conseguiram diminuir o tempo de simulação consideravelmente, dando rapidez ao processo de análise da estabilidade, o que é esperado para uma análise em tempo real.

A calibragem adequada dos índices mostrou-se eficiente dando confiabilidade e precisão ao índice composto para casos em que isto não ocorria, possibilitando a utilização de critérios de parada com baixíssimos tempos de simulação. Logicamente diferentes sistemas exigirão diferentes calibrações do índice composto, porém, isto não deve causar dificuldades na vida real, pois os usuários o utilizam em um ambiente conhecido.

Logo, as contribuições desta dissertação foram: (a) a busca de critérios para encerrar a simulação dos sistemas, com obtenção de resultados confiáveis; (b) a apresentação de um índice composto calculado através de atribuição de pesos a outros cinco índices.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. C. Rose, A., "Longrange Hunting Based on Security Indices in Dynamic Security Analysis", IEEE Trans. On Power Systems, 14, 11:980-936, Aug. 1999.
- [2] Anderson, P. M., Fouad, A. A., "Power Systems Control and Stability", IEEE Press, 1994.
- [3] Deem, E. S., "Análise de Instabilidade Transiente através de um Método Híbrido", Dissertação de Mestrado, FEIS - Unesp, 1994, São Carlos, Outubro 1999.
- [4] Fouad, A. A. and Vittal, V., "Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method", Plenum Press, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1986.
- [5] Figueira, G. L., "Introdução a Sistemas de Energia Elétrica", McGraw-Hill do Brasil, São Paulo-SP, 1976.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fu, C., Bose, A., "Contingency Ranking Based on Severity Indices in Dynamic Security Analysis", IEEE Trans. On Power Systems, 14(3):980-986. Aug. 1999.
- [2] Anderson, P. M., Fouad, A. A., "Power Systems Control and Stability", IEEE Press, 1994.
- [3] Denis, E. F., "Análise da Estabilidade Transitória Através de um Método Híbrido", Dissertação de Mestrado. FEIS – Unesp. Ilha Solteira, Outubro 1999.
- [4] Fouad, A.A. and Vittal, V., "Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1986.
- [5] Elgerd, O. I., "Introdução a Sistemas de Energia Elétrica", McGraw-Hill do Brasil, São Paulo-SP, 1976.



- [6] Fouad, A. A., et al., "Transient Stability Margin as a Tool for Dynamic Security Assessment", EPRI Report NoEL-1755, March, 1981.
- [7] Haque, M. H., "Hybrid Method of Determining the Transient Stability Analysis", IEE Proc. -Gener. Transm. Distr., Vol. 143(1):27-32. January 1996.
- [8] Maria, G. A., Tang, C., and Kim, J., "Hybrid Transient Stability Analysis", IEEE Trans. On PAS.5(2),pp.384-391. May 1990.
- [9] Chow, J. H., Editor, "Time-Scale Modelling of Dynamic Networks With Applications to Power Systems", Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer-Verlag, 1982. Series editors Balakrishnan, A. V. and Thomas, M.
- [10] El - Abiad, A. H. and Nagappan, K., "Transient Stability Regions for Multi-Machine Power Systems", IEEE Trans. On PAS, Vol. PAS - 85, pp.169-179, Feb. 1996.
- [11] Kundur, P., "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1993.
- [12] Scott, B., "Power System Dynamics Response Calculations", Proceedings of the IEEE, 67(2):219-241, Feb. 1979.
- [13] Pai, M. A., "Power System Stability Analysis by the Direct Method of Lyapunov", North Holland Publishing, 1981.
- [14] Working Group on a Common Format for Exchange of Solved Load Flow Data, Common Format for Exchange of Solved Load Flow Data. IEEE Power System, April 1972.
- [15] Vittal, V., "Transient Stability Test Systems for Direct Stability Methods. IEEE Transactions on Power System", Vol. 7 (1):37-42, Feb. 1992.



- [16] Pavella, M. and Ernst, D. and Ruiz, D., A General Framework for Pwer System Transient Stability Control. IEEE Power Engineering Review, pp 45-46, Oct. 1999.
- [17] Bettiol, A.L. and Wehenkel, L. and Pavella, M., Transient Stability-Constrained Maximum Allowable Transfer. IEEE Transactions on Power Systems, vol 14(2):654-659, May 1999.
- [18] Lee, S. T. Y. and Schweppe, F. C., Distance Measures and Coherency Recognition for Transient Stability Equivalents. IEEE PES Winter Meeting, New York, 1973, paper T73092-4 (8p).
- [19] Bretas, N. G. and Alberto, L. F. C., Estabilidade Transitória em Sistemas Eletroenergéticos. São Carlos : EESC/USP, 2000.
- [20] Sauer, P., Pai, M. A., "Power System Dynamics and Stability", Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [21] Betiol, A.L., "Maximum Power Transfer in transient Stability-Constrained Power Systems: Application to a Brazilian Power Network", PhD thesis, University of Liège, Belgique. Jan. 2000.
- [22] Fernandes, O.C , Feltrin, A.P., "Índices de Estabilidade Transitória em Sistemas de Energia Elétrica", XVISNPTEE. Out. 2001.
- [23] Casas, V.L.P, "Métodos Computacionais Baseados na Função de Energia para Análise Direta da Estabilidade Transitória de Sistemas de Energia Elétrica", Tese de Doutorado, UNICAMP, 1998.



APÊNDICE A - MÉTODO HÍBRIDO PARA OBTENÇÃO DA MARGEM DE ESTABILIDADE

A.2. DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE ESTABILIDADE

A.1. MÉTODO DE OBTENÇÃO DA MÁQUINA CRÍTICA

Para obtenção da máquina crítica, pode-se simular e verificar qual máquina sofre maior variação de velocidade. Porém, isto exige uma simulação completa. Aqui, busca-se formas de identificar a máquina crítica levando em conta a aceleração das máquinas durante o período de falta do sistema. O cálculo da aceleração tem sido utilizado para identificar geradores coerentes. A aceleração é dada por [18]:

$$acel_i = \frac{\Delta Pe_i}{M_i} \quad (A.1)$$

em que:

$acel_i$ = aceleração da máquina i ;

$\Delta Pe_i = Pe_i(t-\Delta t) - Pe_i(t)$.

Estas máquinas que mais aceleram são certamente fortes candidatas a serem o gerador crítico do sistema, mas para termos certeza, mais uma condição deve ser inserida.

Uma segunda condição é a análise da energia potencial do sistema, e é feita da seguinte maneira: observa-se o primeiro pico da energia potencial do sistema, após a ocorrência da perturbação e, nesse instante, observa-se qual os ângulos dos geradores. O gerador crítico do sistema é classificado como sendo aquele que apresenta maior abertura angular no instante de pico de energia potencial, e daí por diante trabalha-se somente com as energias desse gerador.

A.2. DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE ESTABILIDADE

Um sistema é dito estável no primeiro balanço se o ângulo pós-falta de todas as máquinas no sistema alcança um valor de pico (máximo ou mínimo) onde inicia o retorno para o ponto de equilíbrio estável [7]. Havendo um ângulo de pico (e, portanto velocidade zero) está garantida a estabilidade do sistema no primeiro balanço. Por outro lado, se o ângulo de pelo menos uma máquina cresce (ou decresce) monotonicamente, e eventualmente excede 180° , o sistema é considerado instável. Os ângulos de pico (ou velocidade zero) de todas as máquinas não ocorrem ao mesmo tempo. Assim, a energia cinética total do sistema, durante o período transitório, pode vir a não ser zero para uma situação estável. Este é o porquê da energia cinética corrigida, e não a energia cinética total ser requerida no método TEF quando é usada a função energia completa do sistema. Entretanto, para a situação estável, a energia cinética com valor igual a zero (e, portanto, um ângulo de pico) existe para cada máquina, mas ocorre em diferentes tempos para as diferentes máquinas. Se a função energia para a máquina individual é usada, torna-se desnecessária a utilização da energia cinética corrigida para avaliar a estabilidade da máquina.

Quando um sistema de potência é sujeito a uma falta, a potência elétrica de saída do sistema (P_e) é reduzida drasticamente, enquanto a potência de entrada (P_m) permanece mais ou menos constante por um curto período de tempo [7]. O excesso de potência ($P_m - P_e$) é



chamado de potência de aceleração, e impulsiona as máquinas para fora do ponto de equilíbrio estável. Durante o período de falta, as máquinas ganham energia cinética e potencial. No período pós-falta, a energia cinética é convertida em energia potencial para manter a estabilidade. Se uma máquina específica é ou não capaz de converter toda a energia cinética em energia potencial, vai depender da capacidade de absorção de energia potencial do sistema pós-falta. Para uma situação instável, a máquina alcança um ponto máximo de energia potencial antes de converter toda sua energia cinética em energia potencial. Esta parte não absorvida ou não convertida de energia cinética garante a inexistência de velocidade zero ou ângulo de pico, e esta é a medida do grau de instabilidade da máquina. Por outro lado, para a situação estável, todas as máquinas são capazes de converter toda a energia cinética (tendo velocidade zero e ângulo de pico) em energia potencial no período pós-falta. Neste caso, o sistema é capaz de absorver mais energia potencial. Esta energia potencial adicional que o sistema pode absorver, sem perda da estabilidade, é a medida do grau de estabilidade do sistema.

Sendo i a máquina crítica, o nosso objetivo é achar a margem de estabilidade (MS) somente da máquina crítica. Quando a falta é extinta, a máquina crítica esforça-se para manter a estabilidade convertendo toda energia cinética em energia potencial (se possível). Durante o processo de conversão, considera-se que a soma das energias cinética e potencial das máquinas críticas é constante, pois a injeção de energia transitória já foi cessada na extinção da falta [7]. Para um dado valor do tempo de extinção da falta, o método proposto pode fornecer a margem de estabilidade da máquina crítica com cálculos triviais se o sistema encontra-se instável, pois requer somente a velocidade da máquina e as constantes de inércia. Para a situação estável, o método requer uma simulação extra das equações dinâmicas do sistema em falta para determinar a margem de estabilidade. O procedimento para achar a margem de estabilidade da máquina crítica, analisando a saída dos resultados do método de simulação no domínio do tempo, para ambas as situações estável e instável, é descrita a seguir.



A.2.1. SITUAÇÃO INSTÁVEL

Quando $t_{cl} > t_{cr}$ (tempo crítico de eliminação da falta) ao menos uma das máquinas (máquina crítica) no sistema sairá do sincronismo no período pós-falta [7]. Neste caso, o ângulo pós-falta da máquina crítica cresce monotonicamente, não tendo um valor de pico.

Tanto a energia cinética quanto potencial da máquina crescem durante o período de falta. Quando a falta é extinta em t_{cl} , a energia cinética da máquina é convertida em energia potencial, próximo do período pós-falta (isto é, a energia cinética decresce enquanto a energia potencial cresce).

A energia cinética pós-falta da máquina inicialmente decresce e alcança um valor mínimo V_{KEi}^{min} em um tempo t_m . Neste mesmo período de tempo, t_m a energia potencial é máxima. A energia total da máquina V_{si} , no período pós-falta, é quase constante. A energia cinética mínima V_{KEi}^{min} é o excesso de energia cinética que não pode ser absorvido ou convertido em energia potencial [7]. Neste caso, a MS (margem de estabilidade) da máquina pode ser considerada como excesso negativo ou energia cinética não absorvida:

$$MS = -V_{KEi}^{min} \quad (A.2)$$

O valor negativo da margem de estabilidade indica que o sistema é instável.

Quando $t_{cl} \gg t_{cr}$, o ponto máximo de energia potencial da máquina crítica pode ocorrer antes do tempo de extinção da falta. Neste caso, a máquina é incapaz de converter a energia cinética em energia potencial no período pós-falta. A energia cinética da máquina decresce monotonicamente no período pós-falta.

Neste caso, o sistema também é instável ou distante do limite de estabilidade. A margem de estabilidade da máquina pode novamente ser considerada como o mínimo negativo da energia cinética no período pós-falta. Neste caso, o mínimo da energia cinética é igual à energia cinética na extinção da falta [7]:

$$MS = -V_{KEi}(t_{cl}) \quad (A.3)$$



A.2.2. SITUAÇÃO ESTÁVEL

Quando $t_{cl} < t_{cr}$, o ângulo da máquina crítica (bem como de outras máquinas no sistema) tem um valor de pico no período pós-falta. Quando o ângulo alcança o valor de pico, a velocidade ou energia cinética da máquina cai a zero. Neste caso, a máquina e o sistema são capazes de converter toda a energia cinética ganha durante o período de falta em energia potencial no período pós-falta. Para determinar a margem de estabilidade é necessário saber a energia transitória adicional que o sistema e a máquina podem absorver sem perder o sincronismo ou a estabilidade. Para saber a energia adicional, é necessário injetar mais energia transitória no sistema reinserindo a falta. A falta é reinserida quando a energia cinética do sistema alcança o valor mínimo no período pós-falta [7].

Note que uma energia cinética mínima indica uma energia potencial máxima e, portanto, perto do limite de estabilidade. A falta é reinserida quando a energia potencial do sistema alcança o primeiro valor de pico de forma que o sistema pode escapar facilmente da região de estabilidade.

A energia cinética no pós-falta alcança o valor mínimo em t_{ins} . Assim, a falta é reinserida em t_{ins} para determinar o máximo global da energia potencial da máquina crítica. A energia total V_{si} da máquina permanece mais ou menos constante no período pós-falta (de t_{cl} a t_{ins}) porque a injeção de energia transitória cessou em t_{cl} . Quando a falta é reinserida em t_{ins} , a energia potencial da máquina muda e alcança um valor máximo global em t_m , denominado V_{PEi}^{max} . Em t_m a máquina alcança o limite de estabilidade. A diferença entre V_{PEi}^{max} e a energia transitória total para o tempo de extinção da falta é a energia transitória adicional que pode ser absorvida. Então, a margem de estabilidade da máquina é considerada como [7]:

$$MS = (V_{PEi}^{max} - V_{PEi}(t_{cl})) - V_{KEi}(t_{cl}) \quad (A.4)$$

A diferença de energia potencial $(V_{PEi}^{max} - V_{PEi}(t_{cl}))$ na equação (A.4) pode ser avaliada com respeito a qualquer ponto de referência arbitrária, sem introduzir qualquer



erro significativo. Neste caso, os erros envolvidos no cálculo de $V_{PEi}^{\max}$ e $V_{PEi}(t_{cl})$, devido a mudança no ponto de referência, cancelam uma a outra na expressão da margem de estabilidade [7].





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br

