



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

AVALIAÇÃO DE ÍNDICES DE ESTABILIDADE BASEADOS
EM SIMULAÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO

Ricardo Cardoso de Lima e Silva

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Rio de Janeiro

Março de 2014

AVALIAÇÃO DE ÍNDICES DE ESTABILIDADE BASEADOS
EM SIMULAÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO

Ricardo Cardoso de Lima e Silva

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Examinado por:

Prof^a. Tatiana Mariano Lessa de Assis, D.Sc.

Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2014

de Lima e Silva, Ricardo Cardoso

Avaliação de Índices de Estabilidade Baseados em Simulações no Domínio do Tempo / Ricardo Cardoso de Lima e Silva – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2014.

XIX, 98 pp.: il., 29,7 cm.

Orientadora: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Elétrica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 63.

Dedico esse trabalho às três mulheres da minha vida.
Para minha esposa, Di, que me acompanha com tanta paciência e carinho.
Para minha avó, Laïse, por batalhar bravamente para estar aqui.
Para minha mãe, Zaïse, de quem sinto muita falta.

Agradecimentos

A minha graduação foi, eufemisticamente, turbulenta. Não posso deixar de agradecer a todos que me fizeram, de uma forma ou outra, lutar até o fim. Agradeço:

À minha orientadora Professora Tatiana Mariano Lessa de Assis pela paciência e pelo comprometimento, mesmo em meus momentos de hesitação.

Ao meu precedente orientador Alessandro Manzoni que por entre nossas poucas conversas me persuadiu a continuar na Engenharia Elétrica em um período de dúvidas.

A todos os meus professores que me trataram com justiça, carinho e compreensão durante todo o curso.

Às minhas amigas e colegas de trabalho, Carol, Fê, Liv, Mari e Pat, pelos incentivos, carinho e oportunidade profissional sem os quais não chegaria onde estou.

Aos amigos, Fabio Padovani Neto, Marcell Nunes Gonçalves e Mônica Araújo, pelo apoio acadêmico, profissional e especialmente pessoal.

Ao amigo Guilherme Lanari Bo Cadaval por sempre me proporcionar perspectivas diferentes da vida e compartilhar uma amizade eterna.

Aos meus fiéis cães Apollo e Mel por permanecerem ao meu lado mesmo quando eu não consegui brincar com eles o quanto queria.

À minha esposa por me encorajar constantemente e dar sentido às minhas ações.

À minha família por compreender minhas ausências, me apoiar e torcer devotamente pela minha graduação.

Resumo

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica da UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Avaliação de Índices de Estabilidade Baseados em Simulações no Domínio do
Tempo

Ricardo Cardoso de Lima e Silva

Março de 2014

Orientadora: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Curso: Engenharia Elétrica

O mundo moderno depende extremamente da energia elétrica. A necessidade de disponibilizá-la em estabelecimentos comerciais, industriais e residenciais torna indispensáveis o planejamento, a implementação e a operação de sistemas de potência.

Grande parte do tempo de planejamento é investido em simulações de contingências com foco na estabilidade transitória do sistema. Assim, a agilização desse procedimento se torna um valioso recurso tecnológico e financeiro. Um método de acelerar a avaliação da estabilidade transitória é a utilização dos índices de estabilidade.

Estes índices almejam dizer de forma automática se o sistema será estável ou instável através de análises matemáticas no domínio do tempo. Desta forma, a simulação computacional pode ser interrompida, reduzindo o tempo total de análise. Sete índices propostos na literatura são avaliados, sendo dois compostos pelos outros cinco.

Este trabalho apresenta uma análise multidimensional dos índices de estabilidade nos âmbitos conceitual e efetivo.

Os resultados mostram as vantagens e desvantagens desse artifício salientando constantemente a diferença da eficiência dos mesmos para a incontável variedade de sistemas e possíveis respostas a grandes distúrbios no sistema.

Dois novas metodologias complementares de cálculo são propostas para o aperfeiçoamento dos resultados.

Palavras-chave: índice de estabilidade, sistemas de potência, análise de contingência, simulação no domínio do tempo.

Abstract

Abstract of Undergraduate Project presented to Escola Politécnica of UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Electrical Engineer.

Evaluation of Transient Stability Indexes in Time Domain

Ricardo Cardoso de Lima e Silva

March 2014

Advisor: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Course: Electrical Engineering

The modern world is extremely dependant on electrical energy. The need to constantly provide it in commercial, industrial and residential establishments renders indispensable the planning and implementation of power systems.

Planning these systems requires investing a substantial amount of time on transient stability contingency simulations. Therefore, streamlining this procedure becomes a valuable technological and financial asset. Stability indexes are one method of hastening it.

These indexes covet to state automatically whether the system will become stable or unstable through time domain mathematical analysis. This way, the computational simulation may be interrupted, reducing the total time of analysis. This work introduces seven indexes proposed in literature, two of which are compounds by the other five.

This work presents a multidimensional analysis of stability indexes both on conceptual and effective scopes.

The results reveal advantages and disadvantages of this technique while constantly stressing the efficiency's difference between the countless variety of systems and possible responses to applied short-circuits.

Two new reasoning methodologies are proposed aiming the results' improvement.

Keywords: stability index, power system, contingency analysis, time domain simulation.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivo.....	2
1.3	Sumário	2
2	Base Teórica	5
2.1	Sistemas de Potência	5
2.2	Segurança e Estabilidade em Regime Permanente	6
2.3	Estabilidade	7
2.3.1	Estabilidade de Ângulo do Rotor.....	8
2.3.2	Estabilidade de Frequência	9
2.3.3	Estabilidade de Tensão	9
2.4	Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas de Potência.....	10
2.4.1	Potência em Função do Ângulo	10
2.4.2	Critério das Áreas Iguais.....	14
2.4.3	Simulação no Domínio do Tempo	16
2.5	Método Direto de Análise da Estabilidade Transitória	18
2.5.1	Função de Energia Transitória (<i>TEF</i>)	19
2.5.2	Pontos de Equilíbrio Instáveis de Controle (<i>Controlling UEPs</i>).....	19
2.6	Energia Instantânea na Análise Transitória.....	20
3	Índices de Estabilidade Transitória.....	23
3.1	Índice 1: Coerência	24
3.2	Índice 2: Conversão Transitória de Energia.....	24
3.3	Índice 3: Produto Escalar 1	26
3.4	Índice 4: Produto Escalar 2	26
3.5	Índice 5: Produto Escalar 3	27
3.6	Índices Compostos Estudados.....	27
3.6.1	Índice Composto 1	27
3.6.2	Índice Composto 2	28

3.7	Rotina de Cálculo.....	28
4	Resultados.....	31
4.1	Sistema #1 (9 barras)	31
4.1.1	Sistema Original	32
4.1.2	Sistema Reforçado.....	35
4.2	Sistema #2 (Equivalente Sul a 45 barras)	40
5	Propostas.....	47
5.1	Índice Composto Normalizado	47
5.2	Correção da Média Ponderada	52
6	Conclusão	59
6.1	Eficiência	59
6.2	Robustez.....	60
6.3	Desempenho.....	60
6.4	Conceito	60
6.5	Composição de Índices	61
6.6	Índices Normalizados	61
6.7	Correção da Média Ponderada.....	61
6.8	Aplicação Prática dos Índices	62
6.9	Trabalhos Futuros	62
	Bibliografia.....	63
A1.	Sistema a 9 Barras Original.....	65
A2.	Sistema a 9 Barras Reforçado.....	67
A3.	Sistema a 45 Barras	69
A4.	Arquivos do MATLAB	73

Índice de Figuras

Figura 1: Classificação de estabilidade de sistemas de potência	7
Figura 2: Sistema simplificado gerador-barra infinita	10
Figura 3: Gráfico de $P \times \delta$	12
Figura 4: Dinâmica para os dois PEs	13
Figura 5: Resposta do sistema à falha na barra 1	15
Figura 6: Sistema máquina-barra infinita com duas LTs e curto na linha B	15
Figura 7: Resposta de um sistema com três estágios de potência elétrica	15
Figura 8: Condição-limiar de estabilidade	16
Figura 9: Diagrama da rotina utilizada no trabalho	30
Figura 10: Sistema a 9 barras original	32
Figura 11: Gráfico percentual dos índices no sistema original	33
Figura 12: Gráfico percentual dos índices com 8,9s	34
Figura 13: $\delta \times t$, sistema 9 barras original, contingência #1	35
Figura 14: $\delta \times t$, sistema 9 barras original, contingência #2	35
Figura 15: Sistema de 9 barras reforçado	36
Figura 16: Gráfico percentual dos índices no sistema reforçado	37
Figura 17: $\delta \times t$, sistema 9 barras, falha 1	37
Figura 18: $\delta \times t$, todos os geradores de todos os casos estáveis	37
Figura 19: $\delta \times t$, sistema 9 barras, falha 2	38
Figura 20: $\delta \times t$, sistema 9 barras, falha 5	38
Figura 21: Gráfico percentual dos índices no sistema reforçado com 8,9s	39
Figura 22: Gráficos percentuais dos índices no sistema equivalente Sul	43
Figura 23: Casos duvidosos do sistema equivalente Sul	44
Figura 24: Médias dos índices compostos como limiar de estabilidade	44
Figura 25: Gráficos dos índices normalizados no sistema equivalente Sul	49
Figura 26: Gráficos dos índices compostos normalizados	50
Figura 27: Pesos C_i da média ponderada em função do número de casos simulados até 10s	55
Figura 28: Casos favoráveis após a aplicação dos pesos corrigidos em função do número de casos utilizado na correção	56

Figura 29: Índice composto <i>IC2</i> corrigido e normalizado.....	56
Figura 30: Índices normalizados e corrigidos com limiar de estabilidade	57

Índice de Tabelas

Tabela 1: Resultado do sistema #1 para $T = 0,5 s$	33
Tabela 2: Resultado do sistema #1 para $T = 8,9 s$	34
Tabela 3: Resultados do sistema reforçado.....	36
Tabela 4: Resultados do sistema reforçado para $T = 8,9s$	39
Tabela 5: Estabilidade em cada contingência simulada.....	41
Tabela 6: Índices das contingências do equivalente Sul	42
Tabela 7: Análise da instabilidade através dos índices compostos.....	45
Tabela 8: Índices Compostos Normalizados	48
Tabela 9: Casos favoráveis e desfavoráveis na utilização dos índices	51
Tabela 10: Casos favoráveis e desfavoráveis na utilização dos índices normalizados	51
Tabela 11: Razão entre as médias dos casos instáveis e estáveis	51
Tabela 12: Casos favoráveis e desfavoráveis com correção da média ponderada.....	52
Tabela 13: Índices normalizados e o índice composto com correção da média ponderada.....	53
Tabela 14: Índices normalizados selecionados	54
Tabela 15: Casos favoráveis em função do número de casos selecionados analisados e pesos corrigidos	54
Tabela 16: Casos favoráveis após a aplicação dos pesos corrigidos a todos os índices	55
Tabela 17: Índice composto normalizado e corrigido das contingências do equivalente Sul	57
Tabela 18: Análise da instabilidade através dos índices compostos.....	58

Siglas

CAG	Controle Automático de Geração
COI	Centre of Inertia
CSV	Comma Separated Values
EE	Energia Elétrica
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LT	Linha de Transmissão
OLTC	On-Load Tap-Changer
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PE	Ponto de Equilíbrio
PO	Ponto de Operação
RMS	Root Mean Square
SEP	Stable Equilibrium Point
SIN	Sistema Interligado Nacional
TCAT	Transformador com Comutação Automática de Tape
TEF	Transient Energy Function
UEP	Unstable Equilibrium Point

1 Introdução

1.1 Motivação

A energia elétrica representa ao mesmo tempo uma das maiores descobertas e o maior catalisador da evolução tecnológica da humanidade. É, também, a base de toda a civilização moderna.

A energia elétrica (EE) só aparece na natureza em forma de raio ou na escala atômica. Seu transporte e armazenamento só é possível quando se encontra transformada em outras formas de energia.

Hoje em dia, é utilizada na rua, em residências e estabelecimentos comerciais, em aparelhos móveis e indústrias. Porém, nada disso seria possível sem um método que alimentasse todos esses *consumidores*. Nada disso seria possível sem os *sistemas de potência* que tornam possível a transmissão de energia elétrica sem a necessidade de transportá-la.

Esses sistemas formam as redes elétricas de todo mundo. No Brasil, essa rede é chamada de Sistema Interligado Nacional (SIN) e é operada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

O planejamento e a implementação da mesma, contudo, não são nada triviais. São necessários diversos estudos para que o país possa funcionar ininterruptamente e com segurança ou, ainda, *estável*.

Por esse motivo, estuda-se a *estabilidade* do sistema. A estabilidade pode ser estudada de diversas formas e em diversos aspectos. O foco do presente trabalho é a *estabilidade transitória*. Tradicionalmente, a estabilidade transitória é avaliada através da simulação *no domínio do tempo*. Dependendo do tamanho do sistema e do número de contingências e cenários que se deseja analisar, o custo computacional pode ser muito elevado, especialmente em aplicações de tempo real.

Surge, portanto, a necessidade de acelerar a obtenção de resultados de forma segura, *i.e.*, sem comprometer a acurácia dos estudos.

Uma das formas de diminuir o tempo de simulação é a observação de grandezas que possam indicar a estabilidade, ou não, do sistema prematuramente.

Utilizando conceitos básicos de sistemas eletromecânicos e certos artifícios matemáticos, estabelecem-se índices capazes de fornecer o limite entre a estabilidade e a instabilidade em um tempo curto de reação do sistema. Esses são os chamados *índices de estabilidade*, o principal tema abordado no presente documento.

A determinação dos mesmos é feita através da análise da evolução de diversas grandezas (ângulo do rotor, frequência, potência, etc) em função do tempo.

Ainda há muito o que estudar sobre estes índices e muitas formas de trabalhar com eles ainda estão por vir. Este trabalho busca avaliar certos índices já existentes e compreender este recurso que está apenas em sua infância.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar a eficácia de índices – simples e compostos – de estabilidade. Além da análise estatística dos índices, também é considerada a análise topológica dos sistemas utilizados buscando maior compreensão das respostas obtidas.

1.3 Sumário

Este trabalho está dividido em 6 capítulos. No capítulo 2, é apresentada toda a base teórica utilizada no trabalho. Os sistemas de potência e as análises de segurança e es-

tabilidade são introduzidos. Ainda, as possíveis classificações de estabilidade são discutidas. A estabilidade de ângulo do rotor é ostentada com mais cuidado por estar no foco principal do presente trabalho. Além disso, conceitos utilizados na formulação dos índices são explicados, entre os quais se encontram o centro de inércia e a coerência. O método direto de Lyapunov é mencionado na definição da energia instantânea das máquinas.

No capítulo 3, são introduzidos os índices de estabilidade avaliados. Cinco índices são definidos e utilizados como base para mais dois. Os conceitos e formulações do capítulo 2 são utilizados em suas definições.

Os resultados são exibidos e discorridos no capítulo 4. Os índices são avaliados em quatro aspectos relacionando os resultados com a topologia, o tipo de instabilidade e as expectativas. Com isso, busca-se ter uma compreensão geral do comportamento dos mesmos.

No capítulo 5, metodologias de utilização dos índices são sugeridas. Os resultados do capítulo 4 são rerepresentados utilizando as metodologias. Então, os novos resultados são avaliados e comparados com os anteriores.

Por fim, o capítulo 6 mostra as conclusões do documento e discute propostas para possíveis trabalhos.

2 Base Teórica

2.1 Sistemas de Potência

Os sistemas elétricos de potência são os responsáveis por fornecer energia elétrica de forma segura e constante aos consumidores. Eles podem ser divididos em 4 (quatro) etapas: geração; transmissão; subtransmissão e distribuição.

Podem, ainda, variar imensamente de tamanho e topologia, porém algumas características básicas são comuns em sua vasta maioria, como aponta Prabha Kundur em [1]:

- São compostos de sistemas trifásicos que operam essencialmente com tensão constante. Plantas de geração e transmissão utilizam equipamentos trifásicos. Cargas industriais são invariavelmente trifásicas. Cargas residenciais e comerciais são distribuídas em ligações mono e bifásicas que resultam em sistemas efetivamente trifásicos e equilibrados.
- Utilizam geradores síncronos para gerar energia elétrica (EE) independente da matéria prima utilizada para gerar energia mecânica (seja hidráulica, eólica, nuclear ou fóssil, por exemplo).
- Transmitem potência a longas distâncias para consumidores espalhados em vastas áreas, envolvendo a operação em diferentes níveis de tensão.

Sua complexidade é marcada pelo número e pela variedade de equipamentos interligados. Por isso, a visão ecumênica do sistema é desenhada a partir de modelos simplificados de seus componentes. Os principais são: geradores, linhas de transmissão, transformadores, barras (ou subestações) e cargas.

Estes modelos permitem as análises da distribuição de carga e de geração, do fluxo de potência e das tensões em cada barra. Sem isso, não seria possível planejar uma rede nem estudar a **estabilidade** de um sistema.

2.2 Segurança e Estabilidade em Regime Permanente

Antes de iniciar a análise da estabilidade transitória, é necessário calcular o ponto de equilíbrio do sistema, o que é feito através de um estudo de fluxo de potência. Em regime permanente, o sistema deve operar com fluxo de potência e tensões de barra que não superem os limites de segurança pré-estabelecidos. O padrão de limite para as tensões de barra, por exemplo, é de mais ou menos 5% (cinco por cento).

A composição de geradores e cargas de um sistema operante caracteriza o chamado ponto de operação (PO). Se o PO respeitar todos os limites, o sistema é dito **estável em regime permanente**. Isso significa que ele pode operar *ad aeternum* contanto que as características de carga e geração não mudem.

Mas mudanças e defeitos são frequentes na rede. Por isso, o PO deve ser tal que, na ocorrência de contingências¹, o sistema não fique instável. Com esse objetivo em mente, efetua-se a análise de **segurança** através do critério $N - 1$.

O propósito da utilização desse critério é averiguar o comportamento do sistema após a perda de um componente. A escolha dos componentes a serem perdidos não é arbitrária. Através das informações obtidas da análise do fluxo de potência e da própria experiência de operação do sistema, lista-se os componentes mais importantes da rede.

Se o sistema continuar estável após a perda de cada um desses, ele pode ser considerado *seguro*; caso haja um ou mais casos que levem o sistema à instabilidade, ele é considerado *em alerta*; se o ponto de operação do sistema for instável, seu estado é de *emergência* e, para voltar à segurança, é necessário que o mesmo entre no estado

¹ Entende-se contingência como a perda de qualquer componente do sistema elétrico, seja um gerador, uma linha, um transformador, etc, após uma falha.

restaurativo (quando modificações de curto prazo são realizadas, *e.g.*, diminuição ou corte de carga).

As definições detalhada destes estados se encontram em [2].

2.3 Estabilidade

A estabilidade de sistemas de potência é definida de forma ampla por Prabha Kundur em [1] como a propriedade de um sistema de potência de poder operar de forma equilibrada sob condições normais de operação e de recuperar um estado aceitável de equilíbrio após ser submetido a um distúrbio.

A estabilidade de sistemas de potência é um problema singular. Entretanto, é impossível estudar a mesma como tal. A instabilidade pode aparecer em numerosas formas e através de diversos fatores. A classificação da estabilidade depende da identificação desses fatores os quais têm base em:

- a natureza física da instabilidade resultante;
- a magnitude da perturbação considerada;
- os equipamentos, processos e intervalo de tempo que deve ser tomado para determinar a estabilidade;
- o método mais apropriado de cálculo e predição da estabilidade.

A Figura 1 exibe algumas dessas classificações e é sucedida pela descrição de cada classe disposta.

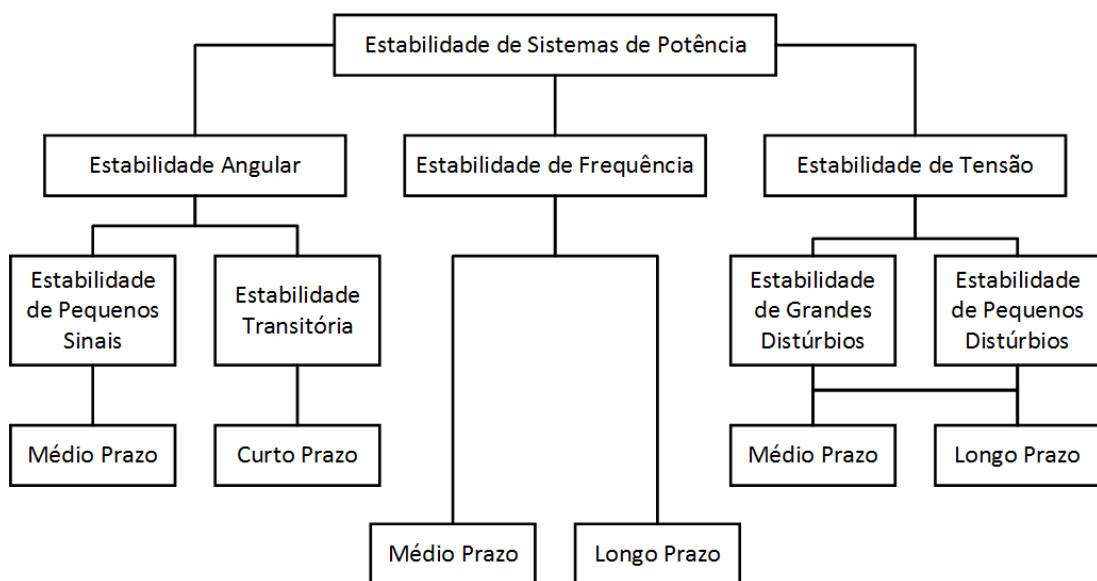


Figura 1: Classificação de estabilidade de sistemas de potência

2.3.1 Estabilidade de Ângulo do Rotor

A estabilidade de ângulo do rotor é a habilidade de máquinas síncronas conectadas ao sistema de potência permanecerem em sincronismo.

A máquina síncrona é composta por duas partes fundamentais: o estator e o rotor. Geralmente, no rotor há um campo magnético induzido por uma corrente contínua ou por um conjunto de eletroímãs, enquanto no estator (ou armadura) há um campo magnético proveniente de corrente alternada.

Devido à organização dos enrolamentos da armadura, a corrente alternada circulante faz com que surja um campo magnético resultante girante. O campo rotórico constante tenta incessantemente se alinhar com o campo girante.

Em regime permanente, a máquina síncrona tem os campos estático e rotórico girando na mesma velocidade. Contudo, seus campos ficam levemente desalinhados por um ângulo δ , o chamado *ângulo de rotor*.

A estabilidade do ângulo do rotor, por conseguinte, depende da variação de δ e de sua constância após uma contingência.

A *estabilidade transitória do ângulo do rotor* é o principal objeto de estudo deste documento. Esse estudo foca nas grandes variações de δ que são consequência de grandes perturbações no sistema. O objetivo é identificar a derivação aperiódica de primeira onda (*first-swing aperiodic drift*) na qual o ângulo de uma ou mais máquinas varia súbito e rapidamente. A instabilidade pode ser identificada pouco após o primeiro pico de δ e são necessários apenas alguns segundos para a conclusão do estado do sistema (curto prazo).

Em contrapartida, análise de *estabilidade de pequenos sinais* estuda o comportamento do sistema após pequenas perturbações às quais o sistema pode estar sensível em algum ponto de operação.

A instabilidade conseguinte pode ser *oscilatória* ou *não oscilatória*. No primeiro caso, não há torque de amortecimento suficiente em uma ou mais máquinas fazendo com que o ângulo δ oscile por minutos ou horas. No segundo, não há torque sincronizante suficiente e a máquina perde ou ganha velocidade, gradativamente saindo do sincronismo. Em ambos os casos a instabilidade também é detectada rapidamente, necessitando apenas de segundos ou minutos de simulação (médio prazo).

2.3.2 Estabilidade de Frequência

O estudo da *estabilidade de frequência* busca garantir que o sistema não apenas esteja em sincronismo, mas que sua frequência síncrona seja a frequência nominal do sistema. No Brasil, o SIN opera em 60Hz.

Enquanto a estabilidade angular garante que as máquinas estejam sincronizadas entre si, ela não garante que as mesmas estejam a 60Hz. Este estudo pode ser dividido, ainda, em dois tipos de estabilidade: a médio prazo e a longo prazo.

A *estabilidade a médio prazo* é a capacidade do sistema de retornar à frequência nominal após uma grande perturbação, *e.g.*, um curto-circuito. É necessário observar a evolução do estado do sistema por alguns minutos.

A *estabilidade a longo prazo* é a capacidade do sistema de manter a frequência nominal apesar das variações naturais² de carga. Se faz necessário observar o comportamento do sistema por dezenas de minutos.

2.3.3 Estabilidade de Tensão

A *estabilidade de tensão* é a habilidade do sistema de potência de manter tensões aceitáveis em todas as barras da rede sob condições normais de operação e após ser submetido a distúrbios.

Assim como a frequência e o ângulo rotórico estão fortemente ligados à potência ativa do sistema, a tensão está relacionada ao fluxo de potência reativa.

Uma característica usualmente utilizada para avaliar a estabilidade de tensão é que, em dado ponto de operação, a injeção de potência reativa em uma barra deve provocar a elevação da tensão na mesma. Caso contrário, o sistema pode ser considerado instável.

É claro que a estabilidade do ângulo do rotor também tem consequências nas tensões das barras do sistema. Com isso, a queda progressiva de tensões pode ser diretamente associada à perda de sincronismo de uma ou mais máquinas.

A estabilidade de tensão pode ser dividida em *pequenas e grandes perturbações*:

² As variações naturais de carga são as mudanças na carga ao longo de um dia em determinado local. Por exemplo: máquinas industriais, aparelhos de ar-condicionado e equipamentos de escritório são inteira ou parcialmente desligados após 18h devido ao fim da jornada de trabalho.

- o estudo de *estabilidade de tensão de pequenas perturbações* analisa as relações entre as potências ativa e reativa e a tensão em regime permanente. Uma margem de estabilidade relativa aos pontos de operação do sistema pode ser determinada e o controle da potência reativa é utilizada para agir diretamente nas tensões de barra do sistema;
- o estudo de *estabilidade de tensão de grandes perturbações* analisa a coordenação dos equipamentos de controle e proteção quando submetidos à dinâmica de carga do sistema.

2.4 Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas de Potência

2.4.1 Potência em Função do Ângulo

Considerando-se um sistema máquina-barra infinita (como mostra a Figura 2), pode-se facilmente definir matematicamente o fluxo de potência ativa.

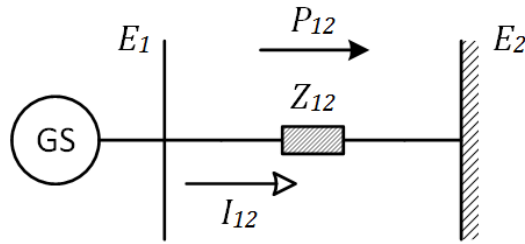


Figura 2: Sistema simplificado gerador-barra infinita

Na Figura 2:

- \dot{E}_i é a tensão na barra i ;
- \dot{I}_{ij} é a corrente da barra i à barra j ;
- P_{ij} é o fluxo de potência ativa da barra i à barra j ;
- \bar{Z}_{ij} é a impedância entre as barras i e j .

Sabe-se que a potência complexa que flui do gerador à barra infinita é dada por

$$S = \dot{V}I^* = \dot{E}_1 \dot{I}_{12}^* .$$

Ainda, pela *Lei de Ohm*,

$$S = \dot{E}_1 \left(\frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{\bar{Z}_{12}} \right)^* = \frac{\dot{E}_1 \dot{E}_1^*}{\bar{Z}_{12}^*} - \frac{\dot{E}_1 \dot{E}_2^*}{\bar{Z}_{12}^*} = \frac{E_1^2}{\bar{Z}_{12}^*} - \frac{\dot{E}_1 \dot{E}_2^*}{\bar{Z}_{12}^*} .$$

Estabelecendo $\bar{Z}_{12} = R + jX$, onde R é a parcela resistiva e X é a reatância da impedância,

$$S = \frac{E_1^2}{R - jX} - \frac{\dot{E}_1 \dot{E}_2^*}{R - jX} = \frac{E_1^2}{R - jX} - \frac{E_1 E_2 (\cos(\delta_1 - \delta_2) + j \sin(\delta_1 - \delta_2))}{R - jX}.$$

Separando os termos real e imaginário, obtém-se

$$P_{12} = \frac{1}{R^2 + X^2} [R E_1^2 - R E_1 E_2 \cos(\delta_1 - \delta_2) + X E_1 E_2 \sin(\delta_1 - \delta_2)], \quad (1)$$

$$Q_{12} = \frac{1}{R^2 + X^2} [X E_1^2 - X E_1 E_2 \cos(\delta_1 - \delta_2) - R E_1 E_2 \sin(\delta_1 - \delta_2)]. \quad (2)$$

Considerando que a resistência pode ser desprezada, a impedância se reduz a

$$\bar{Z}_{12} = \bar{Z} \approx jX.$$

Além disso, tomando a tensão da barra infinita como referência angular, *i.e.*,

$$\dot{E}_2 = \dot{V} = V \angle 0^\circ,$$

e considerando $\dot{E}_1 = \dot{E}$, a equação (1) se reduz a

$$P = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad (3)$$

na qual o ângulo δ é o ângulo do rotor da máquina. É necessário notar que essa aproximação é válida somente para máquinas de rotor liso, não para máquinas de rotor saliente. Mas sua utilização é extensa devido à simplificação da análise de sistemas de potência.

Além disso, a equação (3), para o estudo da estabilidade em um sistema de apenas um gerador, pode ser considerada uma função $P : P(\delta)$ na qual as tensões e a reatância são constantes.

Em um sistema real, não obstante, nenhum desses parâmetros é constante, mas essas considerações fazem com que a análise de estabilidade transitória possa ser feita graficamente.

A Figura 3 mostra didaticamente a função da potência elétrica (P_e) junto à potência mecânica (P_m) em função do ângulo do rotor (δ). Os pontos onde P_m e P_e se encontram são os *pontos de equilíbrio* (PE).

Considerando-se um sistema cujo PE seja:

❖ δ_0 :

- se o gerador acelera devido a uma perturbação, o ângulo do rotor aumenta, a potência elétrica fica maior do que a potência mecânica, e, conseqüentemente, a máquina desacelera;

- se o gerador desacelera devido a uma perturbação, o ângulo do rotor diminui, a P_e fica menor do que P_m e a máquina torna a acelerar.
A máquina tende a se aproximar de δ_0 .
- ❖ $\delta_m = 180 - \delta_0$:
 - se o gerador acelera devido a uma perturbação, o ângulo do rotor aumenta, a potência elétrica fica menor do que a potência mecânica, e, conseqüentemente, a máquina continua a acelerar;
 - se o gerador desacelera devido a uma perturbação, o ângulo do rotor diminui, a P_e fica maior do que P_m e a máquina continua a desacelerar.
A máquina tende a se afastar de δ_m .

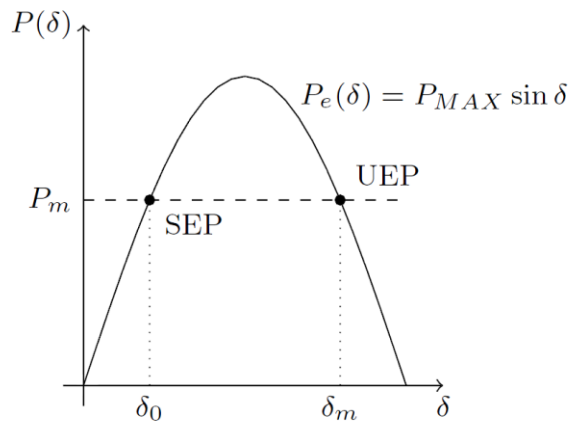


Figura 3: Gráfico de $P \times \delta$

A dinâmica de um motor é similar, porém a consequência da variação do ângulo δ é inversa à do gerador, *i.e.*, quando a potência mecânica é maior do que a elétrica, a máquina desacelera (e vice-versa).

A Figura 4, ilustra essa dinâmica de variações no ângulo δ para os dois PEs. Em azul estão os dois primeiros casos descritos; em vermelho, os dois últimos casos. Esses pontos são definidos, respectivamente, como o *SEP (Stable Equilibrium Point)* e o *UEP (Unstable Equilibrium Point)* do sistema.

Matematicamente, a mesma dinâmica pode ser descrita pela equação de oscilação da máquina síncrona, definida por [1] como

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e . \quad (4)$$

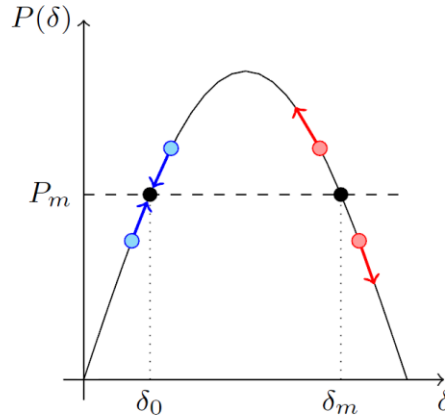


Figura 4: Dinâmica para os dois PEs

na qual

- \bar{T}_m é o conjugado mecânico da máquina;
- \bar{T}_e é o conjugado elétrico da máquina;
- H é a constante de inércia da máquina;
- ω_0 é a velocidade angular síncrona da máquina, *i.e.*, a velocidade na qual todas as máquinas devem operar para que haja sincronismo;
- δ é o ângulo do rotor da máquina;
- t é o tempo.

Em *pu*, a equação (4) pode, também, ser escrita na forma

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (5)$$

na qual

- P_m é a potência mecânica da máquina em *pu*;
- P_e é a potência elétrica da máquina em *pu*.

Sabe-se, ainda, que, segundo a equação (3) da potência elétrica,

$$P_e = \frac{EV}{X} \sin \delta = P_{MAX} \sin \delta . \quad (6)$$

Juntando as equações (5) e (6), tem-se a equação diferencial apenas em função de δ dada por

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_{MAX} \sin \delta \quad (7)$$

2.4.2 Critério das Áreas Iguais

O *critério das áreas iguais* é a formalização da análise gráfica da estabilidade de um sistema máquina-barra infinita. É explicado por Kundur em [1] com detalhe, na p. 831.

Supondo um curto-circuito na barra 1 da Figura 2, instantaneamente P_{12} é reduzida a zero. Nesse momento o ângulo do rotor ainda é o ângulo inicial δ_0 , mas como a potência mecânica é maior do que a elétrica, a máquina acelera. Se em determinado tempo t_c a falha é eliminada e os disjuntores fecham (o sistema é recomposto), P_{12} aumenta novamente, mas agora o ângulo do rotor é $\delta_c > \delta_0$. A potência elétrica fica maior do que P_m , mas a velocidade do rotor não muda instantaneamente, então a máquina começa a frear até o ângulo do rotor chegar a um ângulo máximo δ_m . Desacelerando, a máquina novamente passa por δ_0 e torna a acelerar, passa por δ_0 e desacelera, formando um padrão de oscilação subamortecido.

Basicamente, o critério das áreas iguais diz que o sistema é estável se

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_{ef}) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_{epos} - P_m) d\delta = A_2, \quad (8)$$

isto é, o sistema é estável se a área entre a potência mecânica e a potência elétrica durante a falha é igual à área entre a potência elétrica e a potência mecânica após a falha.

O índice f é utilizado para denotar momentos durante à falha, enquanto os índices pre e pos denotam momentos ante e posteriores à falha.

A equação (8) para o sistema gerador-barra infinita pode ser ilustrada pela Figura 5, na qual tem-se:

- δ_0 é o ângulo de rotor da máquina no PO inicial;
- δ_c é o ângulo de rotor da máquina no momento que a falha é retirada;
- δ_m é o máximo ângulo que pode ser atingido por δ para que o limite estabelecido pelo critério das áreas iguais seja respeitado.

Em um sistema mais parecido com sistemas reais, a potência não é necessariamente zero durante o curto e a potência pós-falha pode ser diferente da potência pré-falha. A Figura 6 mostra um sistema com duas linhas de transmissão (LT). Quando um curto ocorre na linha B e a linha é aberta, o ponto de operação do sistema muda.

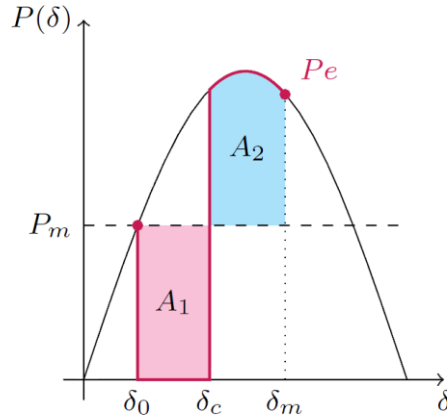


Figura 5: Resposta do sistema à falha na barra 1

A Figura 7 mostra as potências antes (preto), durante (magenta) e após a falha (azul). O novo ponto de operação está indicado pelo ponto também azul, no qual o novo ângulo rotórico é δ_1 .

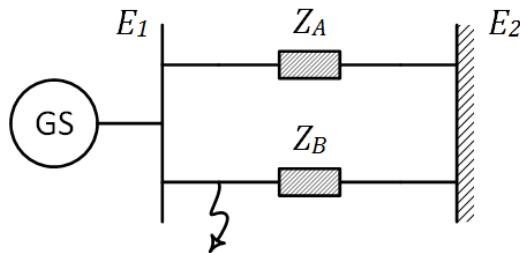


Figura 6: Sistema máquina-barras infinita com duas LTs e curto na linha B

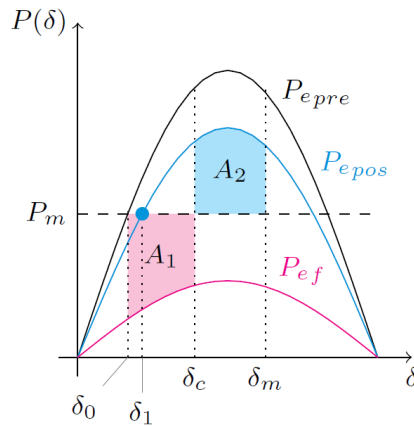


Figura 7: Resposta de um sistema com três estágios de potência elétrica

Pode-se utilizar a equação de oscilação para obter o *ângulo crítico* δ_{cr} de eliminação da falha da máquina. Este é o ângulo máximo que a máquina pode chegar enquanto o defeito ainda é aplicado sem levar o sistema à instabilidade (como mostra o gráfico da Figura 8).

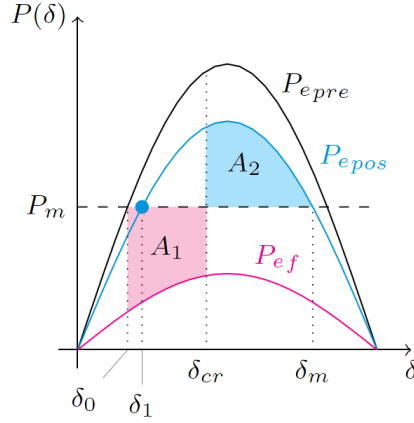


Figura 8: Condição-limiar de estabilidade

Nesse caso, o ângulo δ_m é o ângulo máximo que o rotor pode chegar e é dado por

$$\delta_m = \pi - \delta_1 .$$

2.4.3 Simulação no Domínio do Tempo

O critério das áreas iguais é útil para o estudo de sistemas máquina-barras infinita. Além disso, devido a sua simplicidade, tem um grande apelo didático no entendimento da dinâmica eletromecânica do gerador.

Porém, em um sistema multimáquinas, não é possível adotar o mesmo método. A presença de várias máquinas e a influência mútua entre elas inviabiliza o estabelecimento de um critério simplesmente baseado nas áreas de aceleração e desaceleração.

Por isso, atualmente, o método mais prático e utilizado para análise de estabilidade transitória de sistemas de potência é a simulação no *domínio do tempo* na qual **equações diferenciais não-lineares** são resolvidas utilizando técnicas iterativas de integração numérica.

Um sistema dinâmico, como um sistema de potência, pode ser descrito matematicamente por uma série de equações diferenciais de primeira ordem da forma

$$x'_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_r, t)$$

na qual n é a ordem do sistema, r é o número de entradas do sistema, t é o tempo, x_1, \dots, x_n são as variáveis de estado e u_1, \dots, u_r são as variáveis de entradas do sistema. Essa equação genérica pode ser escrita em forma vetorial para todas as n equações do sistema por

$$\mathbf{x}' = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) . \quad (9)$$

A obtenção dos valores dos ângulos de rotor de todas as máquinas não significa, contudo, o fim da análise de estabilidade transitória. A estabilidade angular é um conceito relativo, ou seja, o valor absoluto do ângulo de uma máquina não tem valor algum se não for comparado a todos os outros δ s. Se o sistema for estável, os ângulos de todas as máquinas devem variar igualmente no tempo sendo mutuamente constantes.

Usualmente, pode-se adotar um dos geradores do sistema como referência e analisar o comportamento dos demais em relação ao primeiro. Outra alternativa é a utilização do **centro de inércia do sistema** (*centre of inertia, COI*).

O ângulo do rotor do *COI* é definido pela média ponderada dos ângulos dos rotores de cada gerador cujos pesos são as constantes de inércia dos mesmos, como mostra Kundur na p. 946 de [1]. Ou seja,

$$\delta_{COI} \triangleq \frac{1}{H_t} \sum_{i=1}^{NG} \delta_i H_i, \quad (10)$$

na qual

- δ_i é o ângulo do rotor da máquina i ;
- H_i é a constante de inércia da máquina i ;
- H_t é a soma das constantes de inércia de todas as máquinas do sistema.

A velocidade angular do *COI* pode ser obtida analogamente

$$\omega_{COI} = \frac{1}{H_t} \sum_{i=1}^{NG} \omega_i H_i, \quad (11)$$

na qual ω_i é a velocidade angular do rotor da máquina i .

Os ângulos e as velocidades de cada máquina em relação ao *COI*, portanto, são dados por

$$\delta_i^{COI} = \delta_i - \delta_{COI}, \quad (12)$$

$$\omega_i^{COI} = \omega_i - \omega_{COI}. \quad (13)$$

O conceito de *coerência* está atado a essas definições. Como definido por Fu e Bose em [3], *coerência* é a medida de proximidade do ângulo de rotor – com relação ao *COI* – de todos os geradores após a retirada da falha.

Um caso A é dito mais *coerente* do que um B se os ângulos de todos os geradores de A estão mais próximos de δ_{COI} do que os de B. Por isso, casos mais coerentes são mais estáveis.

2.5 Método Direto de Análise da Estabilidade Transitória

Os métodos diretos determinam a estabilidade do sistema sem resolver explicitamente as equações diferenciais do sistema.

Segundo [1], o *método direto de Lyapunov* (ou *segundo método de Lyapunov*) afirma que a equação (9) representa:

- um sistema estável quando existe uma função $\mathbf{E}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)$ definida positiva cuja derivada $\dot{\mathbf{E}}$ é negativa;
- um sistema assintoticamente estável quando existe uma função $\mathbf{E}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)$ definida positiva cuja derivada $\dot{\mathbf{E}}$ é definida negativa.

A Função de Energia Transitória (*TEF*) é uma das muitas funções de Lyapunov. O funcionamento da *TEF* é similar ao equilíbrio de um sistema mecânico bola-cuba. Imagina-se uma cuba irregular – cujas bordas não possuem a mesma altura – na qual se encontra uma bola.

Enquanto nada ocorre no sistema, a bola reside em um *ponto de equilíbrio estável* (*Stable Equilibrium Point, SEP*). Perturbações no sistema fazem com que a bola oscile pela cuba até perder energia cinética suficiente e retornar ao *SEP*. Essas perturbações podem ser, por exemplo, injeções de energia cinética na bola. A dispersão de energia se dá pelo atrito viscoso com o ar e o atrito com a superfície da cuba.

Quando a perturbação é grande o suficiente, a bola pode sair da cuba, não podendo mais retornar ao *SEP* inicial. É possível que haja outros pontos de equilíbrio em um sistema. Para as máquinas síncronas, há dois pontos de equilíbrio. Porém, o segundo ponto existe em uma situação que o menor distúrbio pode levar à instabilidade. Esse seria o caso, por exemplo, se a bola estivesse equilibrada exatamente em cima de uma cuba convexa. Tais pontos são conhecidos como *pontos de equilíbrio instáveis* (*Unstable Equilibrium Point, UEP*).

Enquanto é necessário saber a energia cinética injetada na bola e a altura da cuba para determinar seu desenlace, é necessário saber as variações de energia cinética e a energia potencial em uma máquina elétrica para determinar sua estabilidade.

2.5.1 Função de Energia Transitória (TEF)

O método direto de Lyapunov, como descrito por Pai em [4], resulta na equação da energia transitória dada por

$$E_i = \int_{\delta_{pre_i}}^{\delta_i} (P_{e_i} - P_{m_i}) d\delta_i \quad (14)$$

na qual:

- E_i é a energia total transitória na máquina i ;
- δ_i é o ângulo do rotor na máquina i ;
- δ_{pre_i} é o ângulo inicial de operação (pré-falha) da máquina i ;
- P_{e_i} é a potência elétrica da máquina i ;
- P_{m_i} é a potência mecânica da máquina i .

O ângulo é função do tempo ($\delta : f(t)$). Por isso a integração em δ também é uma integração no tempo. Isso faz sentido, pois é sabido que a potência pode ser descrita como a derivada da energia.

O método direto define, ainda, a *energia crítica* do sistema como a energia na qual o ângulo do rotor alcança o *ângulo máximo* permitido para a máquina. Após esse ângulo, a máquina não volta mais ao *SEP*.

A diferença entre a energia crítica e a energia do sistema pós-falha é definida como a *margem de energia transitória*. O método direto pode resolver a análise de estabilidade através dessa margem. Esse índice de estabilidade é dado por

$$I_{md} = E_{cr} - E_{pos} . \quad (15)$$

Se o índice for negativo em qualquer tempo t pós-falha, o sistema será instável.

2.5.2 Pontos de Equilíbrio Instáveis de Controle (Controlling UEPs)

A energia pós-falha do sistema é dada pela equação (14) e pode ser calculada a partir da simulação do comportamento do sistema.

Contudo, a energia crítica não é obtida trivialmente. Kundur, em [1], mostra as equações de fluxo de potência dadas por

$$f_i = P_{m_i} - P_{e_i} - \frac{H_i}{H_t} P_{COI} = 0 \quad (16)$$

$$f_i = \frac{\omega_i^{COI}}{\omega_0} \quad (17)$$

onde:

- ω_i^{COI} é a velocidade angular do rotor da máquina i com relação ao COI ;
- ω_0 é a velocidade síncrona do sistema;

Segundo ele, estas têm como solução um único SEP e inúmeros $UEPs$. Quaisquer valores de f_i diferentes de zero, são dados por

$$f_i = P_{m_i} - P_{e_i} - \frac{H_i}{H_t} P_{COI} \quad (18)$$

em situações em que a máquina não está em equilíbrio. Apesar dessa função não ser útil na determinação de E_{cr} , é um parâmetro que pode ser utilizado em outros índices de estabilidade.

2.6 Energia Instantânea na Análise Transitória

Sabe-se que a energia cinética instantânea de uma máquina síncrona é dada por

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2. \quad (19)$$

na qual:

- J é o momento de inércia da máquina;
- ω é a velocidade angular do rotor da máquina.

Nos modelos utilizados nesse trabalho, não há informações sobre as constantes de inércia J de cada gerador. Contudo, sabe-se que, por definição, a constante de inércia H é dada por

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_n^2}{S_n} \quad (20)$$

na qual:

- ω_n é a velocidade angular nominal da máquina;
- S_n é a potência aparente nominal da máquina.

Reorganizando a equação (20), pode-se definir J como

$$J = \frac{2H}{\omega_n^2} S_n \quad (21)$$

Juntando-se as equações (19) e (21), define-se a energia cinética apenas em função de variáveis e constantes conhecidos do sistema:

$$E_k = \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 H S_n . \quad (22)$$

A energia potencial, todavia, não é trivial. Sua definição matemática vem da energia transitória total, baseada no método direto de Lyapunov (equação (14)),

$$E_p = \int_{\delta_{pre}}^{\delta} (P_e - P_m) d\delta \quad (23)$$

na qual:

- E_p é a energia potencial do gerador;
- δ_{pre} é o ângulo do rotor antes da falha;
- δ é o ângulo instantâneo;
- P_e é a potência elétrica injetada na rede pelo gerador;
- P_m é a potência mecânica do gerador.

Pelo método direto de Lyapunov, ainda, aproxima-se a potência elétrica pela equação (3) de forma que a integral definida da equação (23) resulta em

$$E_p = \frac{EV}{X} (\cos \delta_{pre} - \cos \delta) + P_m (\delta_{pre} - \delta) . \quad (24)$$

3 Índices de Estabilidade Transitória

Os índices de estabilidade transitória são utilizados para a determinação da estabilidade ou instabilidade de um sistema.

Um *índice*, por definição, é um quociente de variável. A utilização de índices tem caráter puramente comparativo, seja com um valor base ou com uma diversidade de casos (ou amostras).

Buscando a agilidade das análises de estabilidade, conceitos físicos são utilizados para estabelecer esses índices. A observação do comportamento de um sistema é essencial para julgar se um índice funciona adequadamente. Para criar um novo índice, se faz necessária a observação do comportamento de numerosos sistemas.

Qualquer relação matemática que diga se um sistema é estável ou não, através de uma limitação numérica, pode ser considerado um índice. A equação (15) define um índice cujo limite entre estabilidade e instabilidade é zero.

Todavia, os índices tem um propósito mais abrangente do que explicitar um estado através de expressões matemáticas. Em oposição ao índice I_{md} , os índices que são objeto de estudo desde trabalho buscam fornecer informações sobre o estado do sistema sem necessitar da obtenção extensiva de informações.

Este estudo pode ser complicado, pois os limites numéricos de tais índices não são quantitativos, mas sim comparativos. Dessa forma, cada simulação resulta em um

índice diferente e os limites são **estimados** através da observação de todos os resultados. Assim, não apenas os limites dependem dos resultados de cada contingência simulada, como variam a cada sistema analisado.

Os cinco índices introduzidos a seguir são descritos por Fu e Bose [3]. Os dois índices compostos posteriores foram propostos por de Oliveira e Padilha [5].

3.1 Índice 1: Coerência

Com base no conceito de coerência pode-se concluir que, para julgar a distância de **todos** os geradores ao *COI* comparativamente, basta calcular a maior diferença entre os ângulos do rotor de cada gerador para cada simulação.

Tem-se, portanto, matematicamente,

$$IS_1 = \max(\max \delta_i^{COI}(t) - \min \delta_i^{COI}(t)) \quad (25)$$

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

$$t_c \leq t \leq t_c + T$$

onde:

- IS denota um *índice simples*;
- NG é o número de geradores no sistema;
- δ_i^{COI} é o ângulo com relação ao *COI* definido pela equação (12);
- t_c é o tempo de término da falha;
- T é o pequeno período de tempo após o término da falha que está sendo usado para análise.

3.2 Índice 2: Conversão Transitória de Energia

Este índice, por sua vez, tem como base a conversão transitória de energia. Pode-se assumir, como em qualquer sistema cinemático, que a energia potencial diminui quando a energia cinética aumenta. Esse conceito é apresentado até no ensino médio através da análise de corpos em queda livre. Quando mais próximo do chão, maior velocidade, maior energia cinética e menor energia potencial.

A energia potencial de uma máquina durante a operação normal do sistema é zero, segundo a equação (23), já que P_e é igual a P_m . A energia cinética, nesse mesmo momento, é alta pois E_k é proporcional ao quadrado da velocidade ω .

Todavia, quando ocorre um defeito e:

- a máquina está acelerando:
 - $\Delta E_k > 0$;
 - $P_m > P_e \rightarrow E_p < 0$.
- a máquina está desacelerando:
 - $\Delta E_k < 0$;
 - $P_m < P_e \rightarrow E_p > 0$.

Em ambos os casos a diferença entre as energias cinética e potencial tende a aumentar. Quanto mais severo for o defeito, maior será essa diferença e mais próximo da instabilidade está o sistema. Assim, matematicamente, o índice é dado por

$$IS_2 = \max(|E_k(t) - E_p(t)|) \quad (26)$$

$$t_c \leq t \leq t_c + T$$

onde:

- E_k é a energia cinética transitória (definida na seção 2.6, pela equação (22));
- E_p é a energia potencial transitória (definida na seção 2.6, pela equação (23)).

Para esse índice é interessante notar, ainda, a técnica utilizada para o cálculo das energias. A energia cinética é calculada da forma mais simples possível, já que as velocidades são obtidas da simulação e as constantes de inércia – bem como a potência aparente nominal – são provenientes dos modelos das máquinas.

Contudo, a energia potencial poderia ter diversas abordagens. A equação (24), proveniente do segundo método de Lyapunov não é válida. O método considera as tensões e reatâncias do sistema constantes de forma que a equação (24) poderia também ser aproximada por

$$E_p = \frac{P_e}{\sin \delta} (\cos \delta_{pre} - \cos \delta) + P_m (\delta_{pre} - \delta).$$

Porém, quando δ se aproxima de zero, o valor da energia tende a infinito. Isso ocorre porque o modelo não possui, de fato, tensões e reatância constantes.

Todavia, os dados necessários para de fato se calcular a integral da equação (23) são facilmente adquiridos. Pode-se, portanto, calcular a integral cumulativa da diferença das potências em função do ângulo do rotor.

Para tal, utilizou-se a função `cumtrapz(X,Y)` do *MATLAB*. Esta calcula a integral acumulada da função Y em X utilizando o método trapezoidal de integração numérica. É uma aproximação que representa a realidade de forma muito mais acurada.

3.3 Índice 3: Produto Escalar 1

O terceiro índice utiliza um produto escalar que foi definido para identificar o ponto de saída da *TEF*. Este ponto é o primeiro pico de energia potencial com respeito ao sistema pós-falha. É dado por

$$dot_1 = \langle f, \omega \rangle = \sum_{i=1}^{NG} f_i \omega_i \quad (27)$$

onde, pela equação (18),

$$f_i = P_{m_i} - P_{e_i} - \frac{M_i}{M_t} P_{COI}$$

$$M_i = \frac{2H_i}{\omega_0}$$

e

$$P_{COI} = \sum_{i=1}^{NG} (P_{m_i} - P_{e_i})$$

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

nas quais:

- M_i é uma constante de inércia de cada gerador i ;
- M_t é a constante de inércia total de todos os geradores;
- P_{m_i} é a potência mecânica de cada gerador;
- P_e é a potência elétrica de cada gerador;
- ω_i é a velocidade do rotor com relação ao *COI*.

Assim, o índice é dado por

$$IS_3 = \max(dot_1(t)) - \min(dot_1(t)) \quad (28)$$

3.4 Índice 4: Produto Escalar 2

O índice 4 utiliza o mesmo conceito de produto escalar do índice 3, porém, utilizando o ângulo do rotor no produto. Dado que o ângulo e a velocidade são medidas significativas no estudo de análise de estabilidade, o produto é definido por

$$dot_2 = \langle f, \delta \rangle = \sum_{i=1}^{NG} f_i \delta_i^{COI} \quad (29)$$

Assim, o índice é dado por

$$IS_4 = \max(\dot{dot}_2(t)) - \min(\dot{dot}_2(t)) \quad (30)$$

3.5 Índice 5: Produto Escalar 3

Por último, o terceiro produto utiliza a velocidade e o ângulo.

$$\dot{dot}_3 = \langle \omega, \delta \rangle = \sum_{i=1}^{NG} \omega_i (\delta_i - \delta_{c_i}) \quad (31)$$

Onde:

- δ_i é o ângulo instantâneo do rotor;
- δ_{c_i} é o ângulo do rotor no momento do término da falha.

Assim, o índice é dado por

$$IS_5 = \max(\dot{dot}_3(t)) - \min(\dot{dot}_3(t)) \quad (32)$$

3.6 Índices Compostos Estudados

Os índices de estabilidade nem sempre são eficientes. Como cada índice varia muito com o sistema, não há valores que indiquem se o sistema é ou não estável. Para cada análise, é necessário obter os índices e, só a partir de então, determinar, para aquele sistema, qual é o valor do índice que indica o limite da estabilidade.

Além disso, nada garante que os índices apresentem grandes diferenças em casos instáveis e estáveis. É possível que um índice apresente valor 10 para um caso estável, 100 para um instável, enquanto outro índice apresente 1,1 para o mesmo caso estável e 1,2 para mesmo instável. Isso faz com que a análise dos resultados e a determinação dos limites numéricos da instabilidade sejam muito mais complexas.

Assim, surge o conceito de índices compostos. Com esses índices formados a partir de outros índices, é possível melhorar a quantidade de acertos e ao mesmo tempo aumentar a diferença entre cada caso.

3.6.1 Índice Composto 1

Esse índice, proposto por [5], é apenas a média aritmética dos índices simples vistos anteriormente.

$$IC_1 = 0,2IS_1 + 0,2IS_2 + 0,2IS_3 + 0,2IS_4 + 0,2IS_5 \quad (33)$$

A utilização de um índice composto faz com que o julgamento precoce do estado do sistema não dependa de um índice só, tornando a análise um pouco mais robusta. A robustez da análise faz com que seja mais provável que haja, de fato, um limite numérico que separe os casos instáveis dos estáveis, mas não tem nenhum efeito sobre a facilidade de determinar esse limite.

3.6.2 Índice Composto 2

Este índice, proposto por [5], é formado pela média dos 5 índices propostos considerando que o peso de cada um é dado pela variação dos resultados.

É utilizado o conceito de *coeficiente de variação CV*, dado pela razão entre o desvio padrão s e a média de uma amostra \bar{x} . O desvio padrão é dado pelo valor *RMS* (*Root Mean Square*) das diferenças entre cada amostra e a média das amostras.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$CV = \frac{s}{\bar{x}}$$

O peso de cada índice é calculado dividindo-se o coeficiente de variação de cada um pela soma do coeficiente de variação de todos os índices. Matematicamente,

$$C_i = \frac{CV_i}{\sum_{i=1}^{NI} CV_i} \quad (34)$$

onde:

- NI é o número de índices utilizado.

Assim, o segundo índice composto é dado por

$$IC_2 = \sum_{i=1}^{NI} C_i x_i \quad (35)$$

3.7 Rotina de Cálculo

A rotina utilizada na avaliação dos índices está ilustrada na Figura 9. Após a escolha de cada sistema, o fluxo de potência é calculado no programa *Simulight*, desenvolvido

pela COPPE/UFRJ [6]. A lista de contingência é formada a partir dos valores absolutos de fluxo de potência do sistema e de sua topologia. Os casos mais propensos ao estado de instabilidade são os que há maior modificação do fluxo de potência e maior carregamento absoluto em determinadas linhas de transmissão. Assim, são simulados curtos-circuitos seguidos da abertura de tais linhas de transmissão.

Como a utilização dos índices depende exclusivamente da comparação entre os resultados obtidos, se todas as contingências levarem o sistema somente à instabilidade ou somente à estabilidade, muda-se o PO do sistema aumentando a carga. Se o fluxo de potência após o acréscimo de carga indicar subtensão em uma ou mais barras, aumenta-se as tensões de referências dos geradores até todas as tensões estarem entre 0,9 e 1,1pu.

Calcula-se novamente o fluxo de potência, faz-se a lista e as simulações. Quando houver casos variados, os dados relevantes (δ , ω , P_e e P_m) são exportados para o *MATLAB* onde os índices são calculados.

Por fim, as informações são levadas para o Excel e os resultados são avaliados.

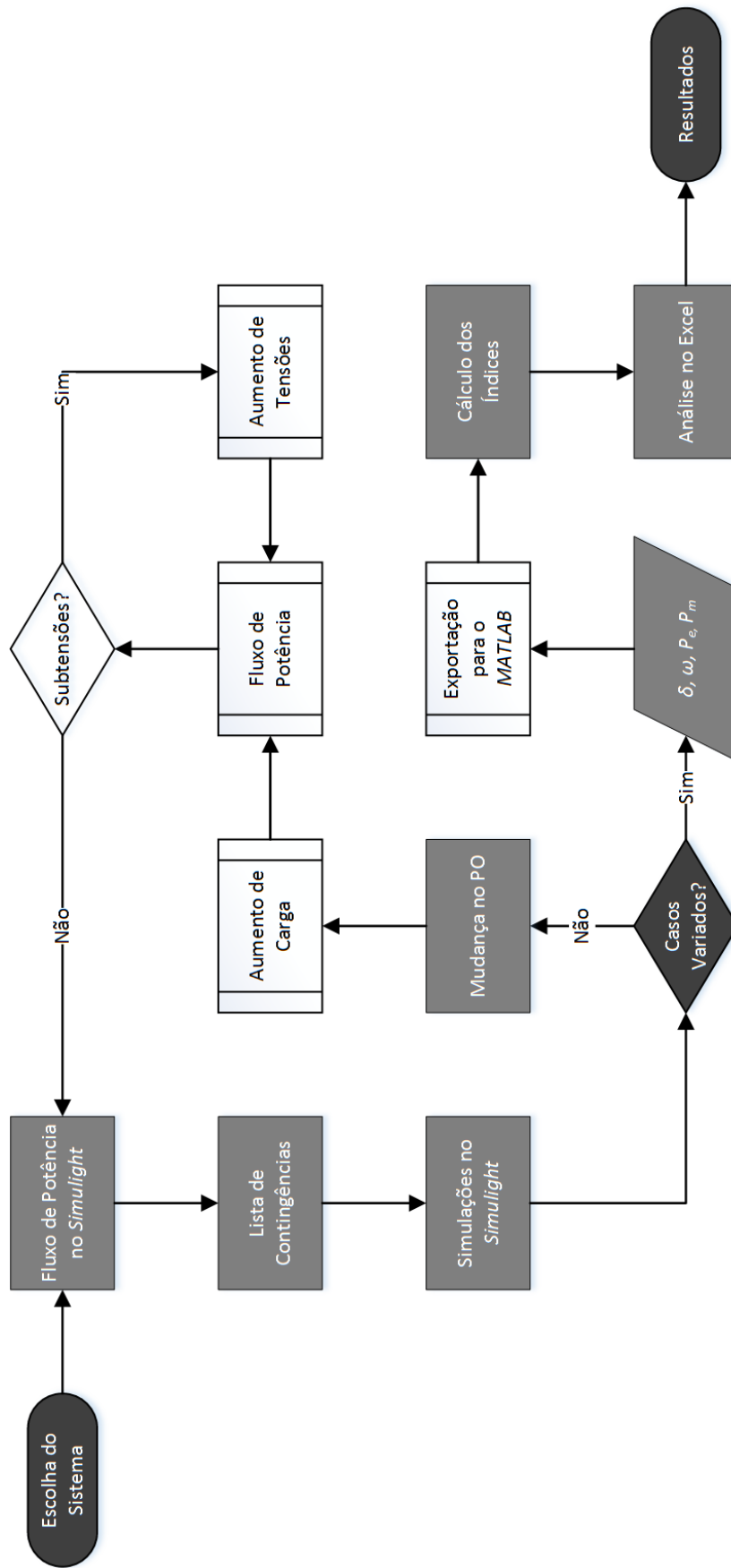


Figura 9: Diagrama da rotina utilizada no trabalho

4 Resultados

O estudo dos índices foi feito em diversos níveis:

- eficiência na identificação do estado do sistema (estável ou instável);
- robustez considerando-se a diversidade dos possíveis sistemas de potência;
- desempenho em diferentes tipos de instabilidade;
- conceito nos resultados quando a análise é feita durante um tempo T maior.

As análises foram realizadas utilizando-se dois sistemas. O primeiro é um sistema de nove barras extraído originalmente de [7]. O segundo sistema é um sistema de 45 barras que representa parte da região Sul do Brasil. Todos os dados dos sistemas simulados estão disponíveis em [8].

Observa-se, também, que a rotina da Figura 9 foi criada para a desestabilização do sistema equivalente Sul (cujo PO original não podia ser levado à instabilidade). O sistema a 9 barras (cujo PO original era sempre levado à instabilidade) necessitou de modificações mais diretas.

4.1 Sistema #1 (9 barras)

O primeiro sistema utilizado é formado por nove barras, três geradores, três transformadores e três cargas, separados em seis subestações.

4.1.1 Sistema Original

O sistema original consiste das seis subestações já mencionadas conectadas por seis linhas, em topologia de anel, como ilustrado na Figura 10.

A topologia de anel não é boa para um sistema de energia elétrica, pois qualquer contingência que resulte em perda de equipamento pode levar a uma alteração significativa da mesma.

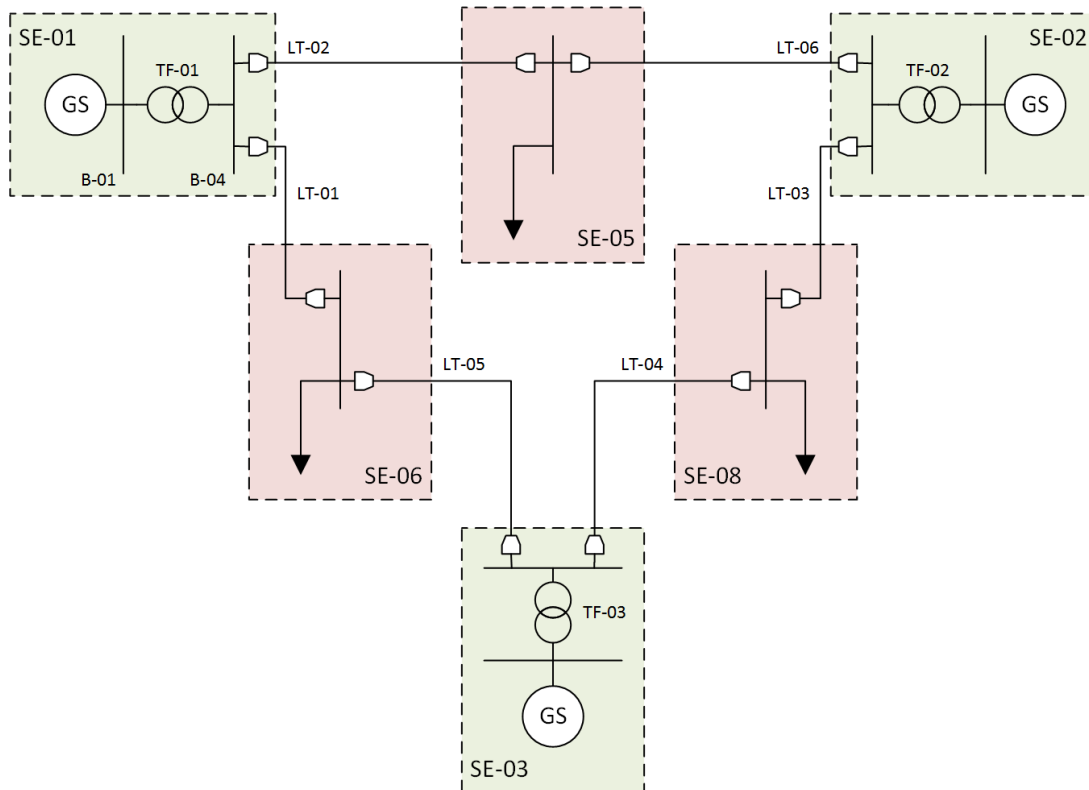


Figura 10: Sistema a 9 barras original

Seis defeitos foram simulados, um em cada linha do sistema. Foram aplicados curtos-circuitos trifásicos, em um segundo de simulação, durante 100ms. Ao final dos 100ms, os dois disjuntores da linha em curto são abertos e a simulação continua por mais 8,9s.

Todas as contingências testadas resultaram em instabilidade, ficando inviável a utilização dos índices, que têm caráter comparativo, como explicado anteriormente.

Os dados obtidos, todavia, ainda podem fornecer informações valiosas sobre o comportamento dos índices em diferentes tipos de instabilidade. A Tabela 1 e a Tabela 2 mostram os resultados com tempos de análise de 0,5s e 8,9s, respectivamente. Nessas, o número de cada falha também é o número da linha aberta na simulação.

Tabela 1: Resultado do sistema #1 para $T = 0,5 s$

Falha #	Estado	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄	IS ₅	IC ₁	IC ₂
1	I	0,0086	0,2728	0,8028	3,2216	0,0001	0,8612	0,7314
2	I	0,0065	0,1533	0,4370	1,9394	0,0001	0,5073	0,4296
3	I	0,0120	0,2176	0,8609	3,3675	0,0001	0,8916	0,7531
4	I	0,0094	0,2234	0,7014	3,4295	0,0002	0,8728	0,7350
5	I	0,0065	0,2778	0,6767	2,7982	0,0001	0,7519	0,6410
6	I	0,0060	0,3621	0,8169	2,7488	0,0001	0,7868	0,6783

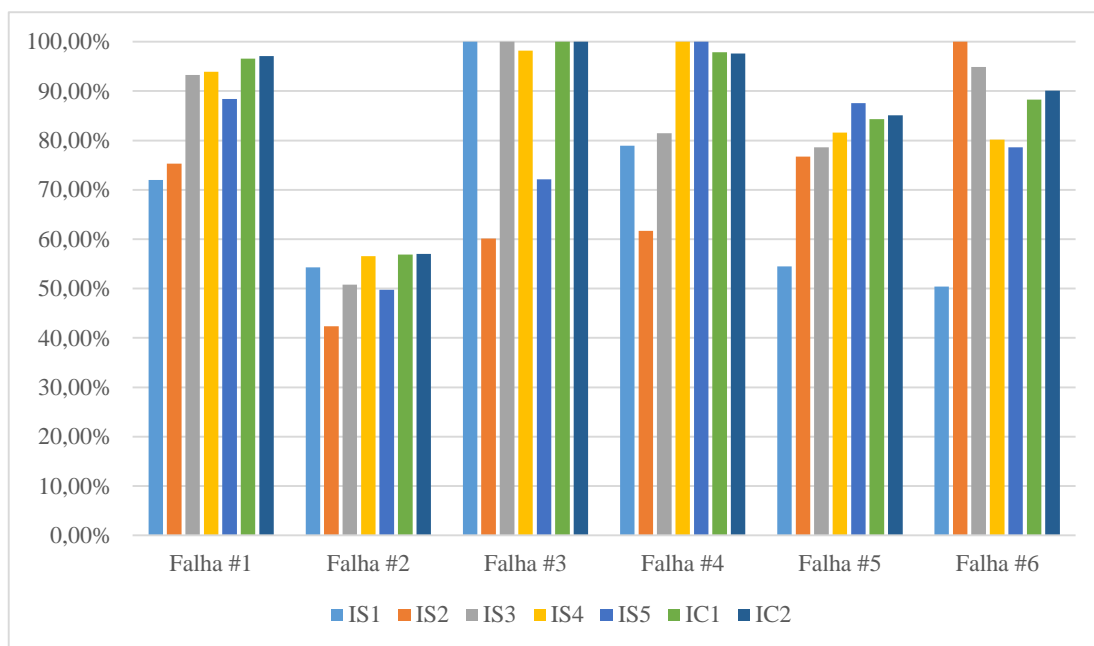


Figura 11: Gráfico percentual dos índices no sistema original

O gráfico da Figura 11 mostra sete barras representando, cada uma, um índice calculado para as seis contingências. Como os índices possuem ordens de grandeza completamente diferentes, os valores do gráfico estão em percentual onde 100% equivale ao máximo valor obtido por cada índice. Por esse motivo, cada barra toca a linha do 100% uma vez.

Lembrando-se que quanto maior o índice, mais próximo da instabilidade deverá estar o sistema, as falhas 2 e 5 parecem indicar uma maior proximidade da condição estável. Reforça-se, novamente, que os índices têm caráter exclusivamente comparativo. Observar os índices de um sistema que só apresenta instabilidades tem o mesmo efeito ao de um sistema que só apresenta estabilidades: não é possível concluir nada sobre o estado do sistema. Esse exemplo é interessante, contudo, quando a análise é feita por 8,9s (o tempo restante simulado). Na prática, essa análise é inútil, visto que o propósito dos índices é diminuir o tempo de simulação. Para a **avaliação completa** dos índices, os resultados estão apresentados a seguir.

Tabela 2: Resultado do sistema #1 para $T = 8,9 s$

Falha #	Estado	IS1	IS2	IS3	IS4	IS5	IC1	IC2
1	I	0,0186	6	4	6	0,00	3	3
2	I	5,8559	575	273	5733	4,62	1318	1272
3	I	10,6989	1392	395	7427	7,12	1846	1799
4	I	0,0134	2	1	4	0,00	1	1
5	I	7,3653	896	363	7709	7,16	1796	1737
6	I	6,3619	650	292	6329	5,29	1457	1406

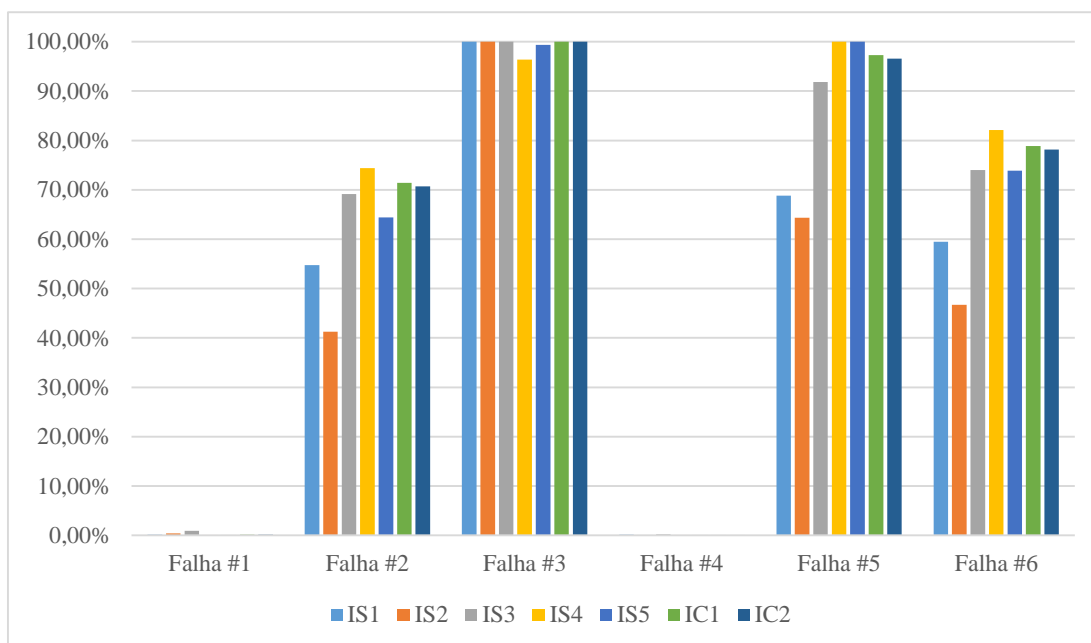


Figura 12: Gráfico percentual dos índices com 8,9s

Com o tempo maior de simulação, dois índices apresentam valores extremamente baixos. Isso poderia indicar a estabilidade nas falhas 1 e 4 de forma errônea. Isso ocorreu devido ao tipo de instabilidade obtida. Todos os casos foram de *instabilidade oscilatória*, na qual os ângulos lentamente divergem do valor de referência (δ_{COI}). Porém, nos casos 1 e 4, essa divergência ocorre de forma muito mais lenta. Os gráficos da Figura 13 e da Figura 14 mostram, respectivamente, os 8,9s simulados nas contingências 1 (índices baixos) e 2 (índices altos).

Três observações podem ser feitas a respeito dos resultados encontrados:

1. A utilização de índices de estabilidade pode levar a falsas conclusões sobre o estado do sistema se todos os casos forem instáveis ou se todos forem estáveis.
2. O tempo de resposta do sistema influencia drasticamente no cálculo dos índices, significando que casos de instabilidade oscilatória são mais difíceis de se detectar.
3. Os índices compostos têm desempenho muito parecido entre si.

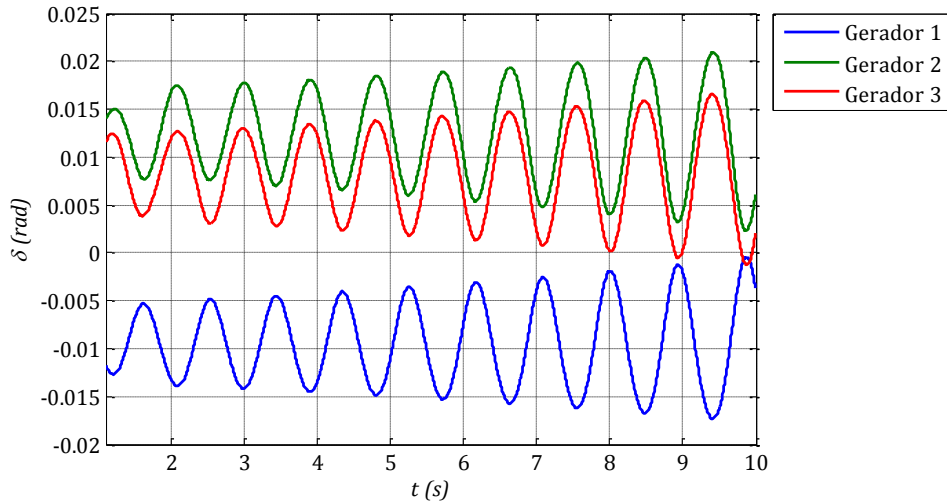


Figura 13: $\delta \times t$, sistema 9 barras original, contingência #1

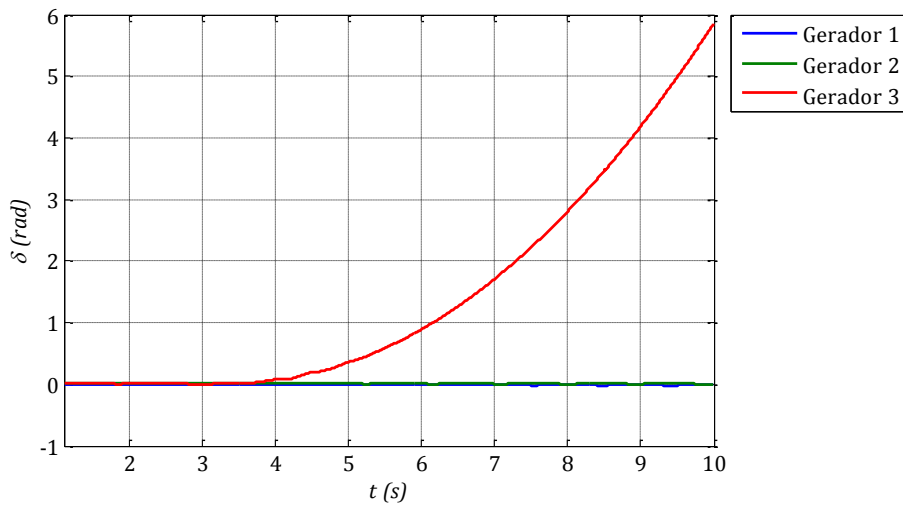


Figura 14: $\delta \times t$, sistema 9 barras original, contingência #2

4.1.2 Sistema Reforçado

Em busca de um sistema que apresente ao menos algumas respostas estáveis, adicionou-se duas linhas ao sistema, fazendo com que haja um reforço na distribuição do fluxo de potência.

A Figura 15 mostra essas linhas em azul. Ambas foram modeladas como cópias exatas das linhas originais. Por esse motivo, não foram adicionadas duas contingências na análise, já que o comportamento do sistema pode ser considerado praticamente idêntico na abertura de uma delas ou de sua paralela.

Nesse sistema, dois dos seis casos simulados levaram o sistema à instabilidade.

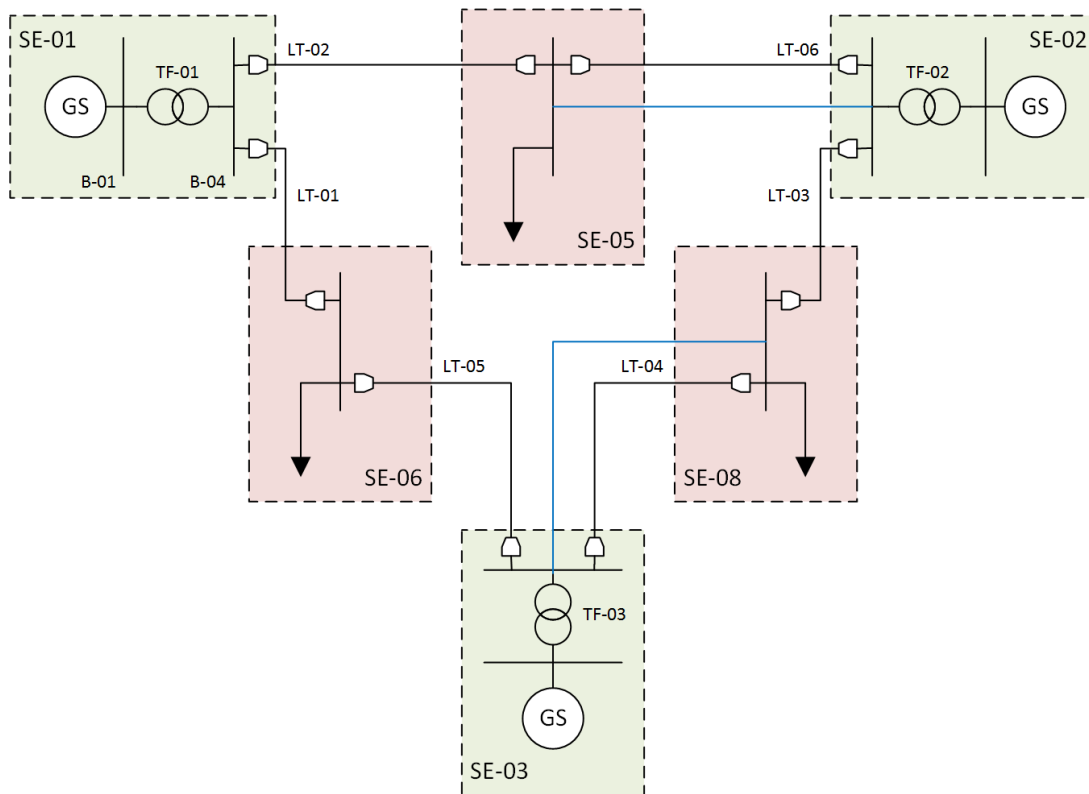


Figura 15: Sistema de 9 barras reforçado

Os índices obtidos estão na Tabela 3. O gráfico referente à tabela está na Figura 16. Os casos instáveis (2 e 5) são os que apresentam menor valor dos índices, mostrando novamente um desempenho contrário ao seu propósito.

Além disso, os índices das falhas 4 e 5 apresentam valores similares dificultando a determinação do limiar de estabilidade dos índices.

Novamente, isso se dá devido ao tipo de instabilidade à qual o sistema foi levado. A Figura 17 mostra a reação subamortecida do ângulo de rotor dos geradores 1, 2 e 3. E os casos 1, 3, 4 e 6 apresentam comportamento muito similares, como mostra a Figura 18.

Tabela 3: Resultados do sistema reforçado

Falha #	Estado	IS1	IS2	IS3	IS4	IS5	IC1	IC2
1	E	0,0174	1,1218	5,7870	7,9631	0,0005	2,9780	2,8857
2	I	0,0108	0,7940	2,1063	5,5902	0,0002	1,7003	1,4106
3	E	0,0194	1,0802	5,5948	7,9152	0,0006	2,9220	2,8144
4	E	0,0158	0,8491	3,6643	7,4297	0,0004	2,3919	2,1189
5	I	0,0154	0,8652	3,9728	6,9034	0,0003	2,3514	2,1583
6	E	0,0196	1,1777	7,0938	8,4254	0,0006	3,3434	3,3578

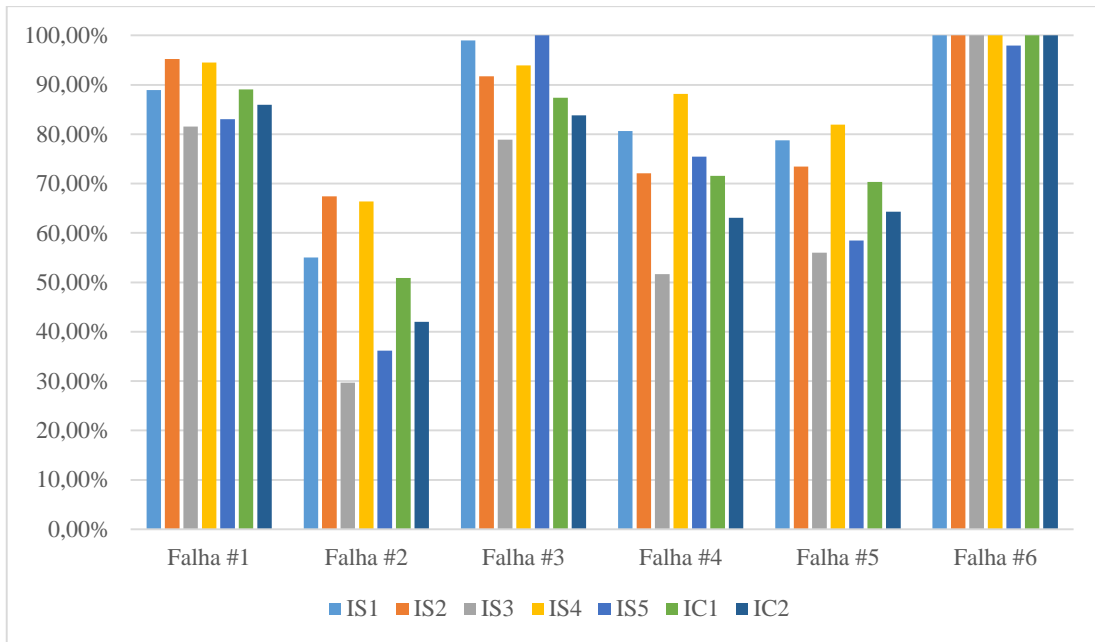


Figura 16: Gráfico percentual dos índices no sistema reforçado

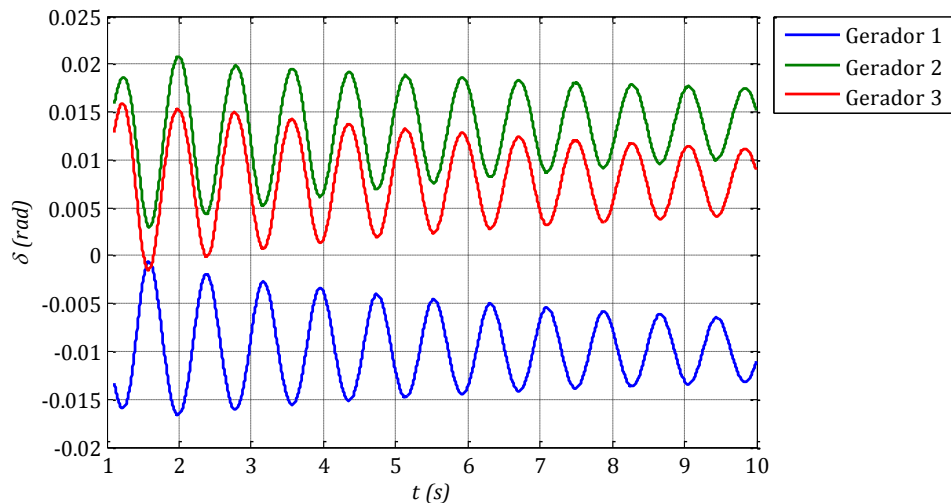


Figura 17: $\delta \times t$, sistema 9 barras, falha 1

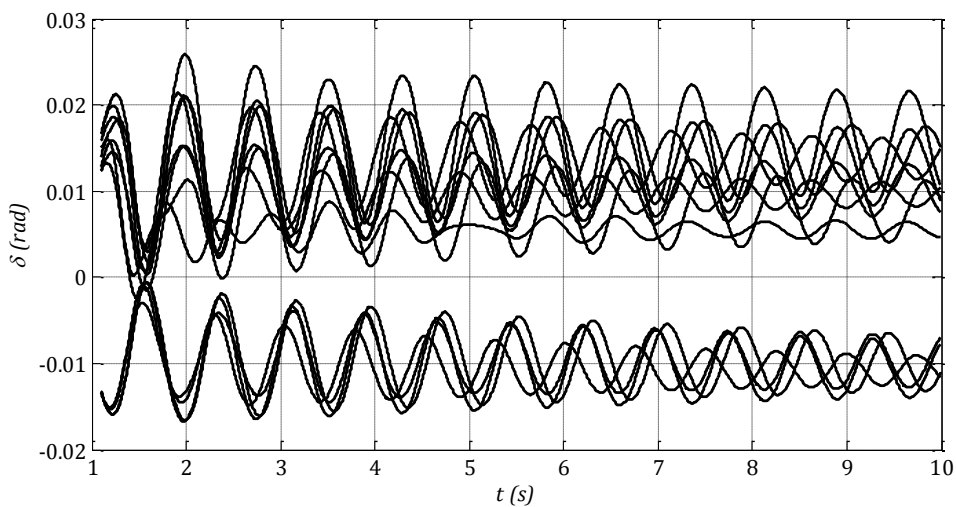


Figura 18: $\delta \times t$, todos os geradores de todos os casos estáveis

Os casos 2 e 5, todavia, mostram casos de instabilidade oscilatória novamente, como mostram a Figura 19 e a Figura 20. No caso 2, δ só começa a divergir notavelmente em 2,5s. No caso 5, só começa a divergir em 7,2s. Uma análise do caso 5 feita por um humano verificaria que o caso é instável rapidamente, devido ao crescimento da oscilação, mas os índices só exibem resultados numéricos e não analisam as grandezas criticamente.

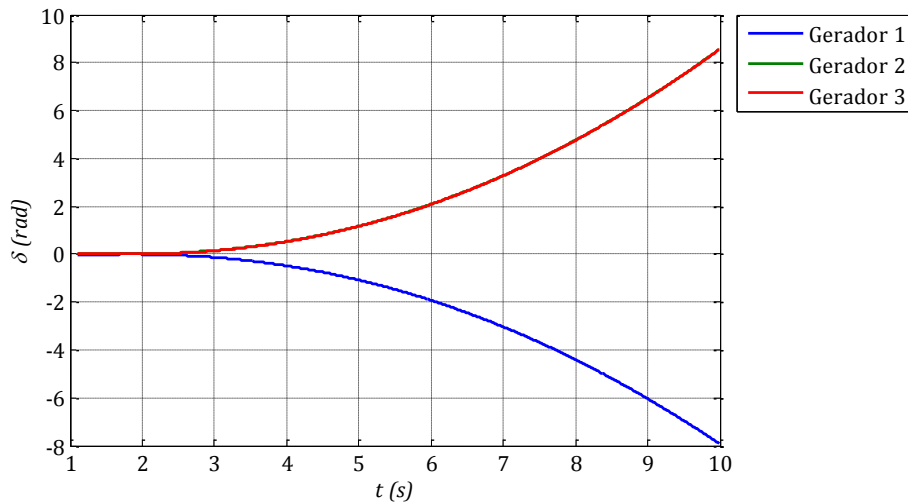


Figura 19: $\delta \times t$, sistema 9 barras, falha 2

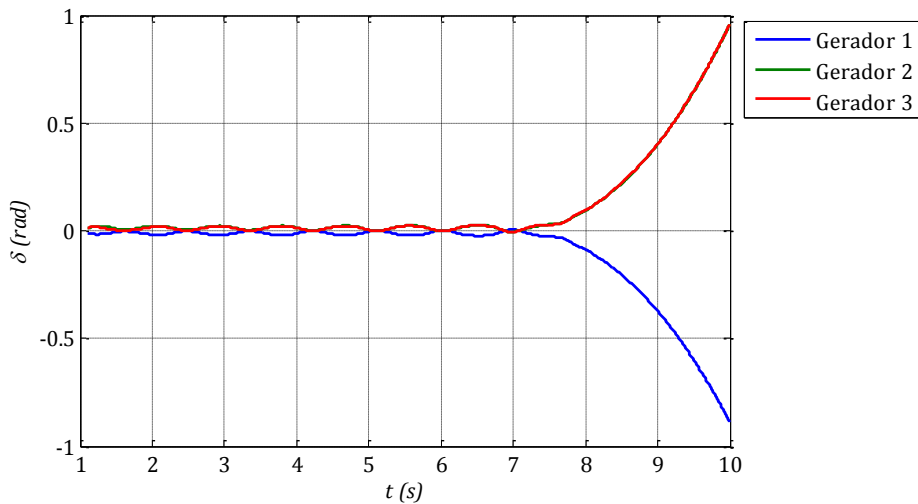


Figura 20: $\delta \times t$, sistema 9 barras, falha 5

No entanto, ainda se pode avaliar a formação conceitual dos índices. Ao final dos 10s simulados, todos os casos ficaram claramente instáveis ou estáveis (como mostra a Tabela 4).

Essa conclusão é enfatizada pelo gráfico da Figura 21. A determinação do limiar de estabilidade fica visível e os casos instáveis se destacam no gráfico.

Enfatiza-se, novamente, que essa análise não é uma boa representação do propósito dos índices, já que é necessário o tempo completo de simulação. Uma nova conclusão, todavia, é formada: **os índices apresentam formação conceitual correta**, isto é, a elevação de seus valores indica a instabilidade do sistema.

Tabela 4: Resultados do sistema reforçado para $T = 8,9s$

Falha #	Estado	IS1	IS2	IS3	IS4	IS5	IC1	IC2
1	E	0,0178	3	6	8	0,00	3	27
2	I	8,5468	815	331	8443	8,13	1921	16166
3	E	0,0240	1	6	9	0,00	3	24
4	E	0,0181	1	4	8	0,00	2	20
5	I	0,9627	75	161	1457	0,28	339	2804
6	E	0,0207	1	7	9	0,00	3	26

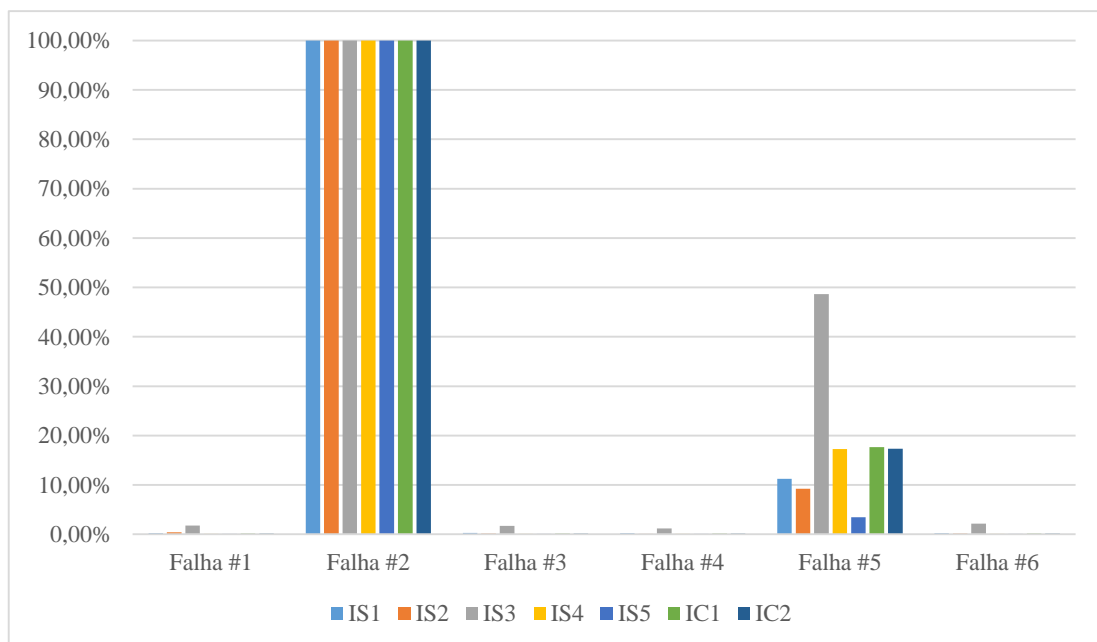


Figura 21: Gráfico percentual dos índices no sistema reforçado com 8,9s

Porém, percebe-se, também, que os índices podem não ser muito bons na detecção de instabilidade oscilatória. Se a instabilidade for de *divergência aperiódica*, quando os ângulos divergem rapidamente, os índices de fato funcionam.

E isso pode ser afirmado mesmo que o sistema não tenha produzido tais casos, porque a forma de onda resultante de uma divergência aperiódica é semelhante à de uma instabilidade oscilatória, porém muito mais compacta no tempo.

Além disso, os índices se comportaram de forma similar. Nota-se, em especial, que os índices compostos continuaram a exibir valores bem parecidos.

4.2 Sistema #2 (Equivalente Sul a 45 barras)

O segundo sistema utilizado na análise dos índices de estabilidade é um equivalente do Sul do SIN, cujos dados também estão disponíveis em [8].

É composto por dez geradores, quarenta e cinco barras, cinquenta e cinco linhas de transmissão, onze transformadores e seis transformadores com comutação automática de tape (TCAT, ou ainda, *OLTC, on-load tap-changer*).

Esse sistema é bem mais robusto do que o anterior. A quantidade de máquinas e a sua topologia fazem com que seja mais difícil desestabilizá-lo. Algumas mudanças foram feitas para que o sistema operasse à beira da zona de estabilidade.

A rotina da Figura 9 foi executada com modificação das cargas e elevação das tensões até obter um sistema – descrito a seguir – que pudesse ser desestabilizado.

Primeiramente, a carga reativa em Joinville foi abaixada de 140 *Mvar* para 50 *Mvar* pois a mesma apresentava tensão de barra muito menor do que as outras, limitando o aumento de carga.

Depois, as cargas ativa e reativa globais foram aumentadas em 10% quatro vezes resultando em um sistema com 146,41% da carga original.

Finalmente, as tensões de referência em todos os geradores foram aumentadas para 1,1 *pu*. O anexo 1 mostra as tabelas com o fluxo de potência, as tensões pré-falha e o diagrama unifilar do sistema. Cabe ressaltar que as mudanças realizadas nas cargas e nas tensões tiveram como objetivo obter um sistema adequado à avaliação dos índices de estabilidade.

Ao contrário do sistema anterior, há muitas possibilidades de contingências no sistema equivalente Sul. Por isso, fez-se necessário fazer uma lista de contingências com os curtos-circuitos mais severos.

A severidade de cada falha foi determinada a partir da potência ativa na linha perdida. Foram considerados, também, alguns curto-circuitos trifásicos em barras resultando na abertura de duas linhas. A Tabela 5 mostra essa lista e o estado final do sistema em cada caso.

Em cada um dos casos listados, foi aplicado um curto-circuito trifásico por 300ms. Nos casos de perda simples de linha, o defeito foi aplicado em uma linha de transmissão seguido da abertura dos seus disjuntores terminais. Nos casos de perda dupla, o curto-circuito foi aplicado na barra coincidente. Depois de 300ms, o defeito é

removido e duas linhas são desligadas através da abertura dos seus disjuntores terminais.

Tabela 5: Estabilidade em cada contingência simulada

Falha #	Linha(s)	Estado	Falha #	Linha(s)	Estado
1	AREBAR	I	19	IVALON1, IVALON2	E
2	AREBAR, ARECUR	I	20	IVALON1, SSAIVA	E
3	AREBAR, AREIVA	I	21	IVALON2	E
4	ARECUR	E	22	JLASID	I
5	ARECUR, ARECUR2	E	23	JLASID, JLAFOR	I
6	ARECUR, CUR2CUR	E	24	PINVAI	E
7	ARECUR2	E	25	SEGARE	I
8	AREIVA	E	26	SEGARE, ARECUR2	I
9	AREIVA, SSAIVA	E	27	SEGARE, AREIVA	I
10	AREOLTC, ARECUR	E	28	SEGSSA, SSAIVA	I
11	ARESMA	E	29	SIDJLA, SIDFOR	I
12	BARGRA	E	30	SOSPBR	E
13	CUR2CUR	E	31	SOSXAN	I
14	CURBLU	E	32	SSAIVA	E
15	GRACEC1	E	33	SSAIVA, SSAPIN	I
16	GRACEC2	E	34	SSAPIN	E
17	GRACEC3	E	35	VAICEC2	E
18	IVALON1	E	36	VAIOLTC	E

* A lista foi inicialmente formada por defeitos simples nas linhas de transmissão mais carregadas. Depois foram adicionados os casos de perda dupla de linha e outros casos que pudessem desestabilizar o sistema com base na topologia.

É perceptível o aumento nos valores dos índices para os casos instáveis. Para avaliar a eficiência de cada índice é necessário tentar estabelecer o limiar da estabilidade em cada caso e ver quais indicam corretamente a instabilidade.

A Figura 22 mostra os índices percentuais (com relação a seus valores máximos em cada curto) para cada caso. As falhas 23, 27 e 28 podem ser classificadas rapidamente como falhas que levaram o sistema à instabilidade, pois seus valores são muito maiores que os demais para todos os índices. Os casos 7, 9, 11, 13 a 21, 24, 30 a 32, 34 a 36 podem ser analogamente classificados como estáveis, já que são muito menores que os demais.

O problema, todavia, está nos casos 1 a 6, 8, 10, 12, 23, 25, 26 e 33. São treze casos cujos valores são muito parecidos (Figura 23).

Tabela 6: Índices das contingências do equivalente Sul

Falha #	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄	IS ₅	IC ₁	IC ₂
1	0,040515	103,5968	26,3818	74,5649	0,002296	40,9173	35,6778
2	0,046499	119,4739	47,1280	75,7176	0,002490	48,4737	41,4896
3	0,043209	101,6612	33,7182	81,7171	0,002305	43,4284	38,0338
4	0,032083	126,0247	33,7245	29,6125	0,002203	37,8792	30,5665
5	0,031301	128,6945	33,7715	29,9339	0,002174	38,4867	31,0467
6	0,022196	158,0553	50,7300	33,2131	0,001719	48,4045	38,7766
7	0,011919	41,8038	6,7791	8,3562	0,000298	11,3903	9,1540
8	0,034808	110,3157	36,3535	26,2844	0,002303	34,5981	27,8759
9	0,011153	24,1480	3,4273	5,8771	0,000310	6,6928	5,4388
10	0,025284	151,6697	26,6536	30,6721	0,001748	41,8045	33,5989
11	0,006860	7,2494	2,3418	2,6970	0,000197	2,4591	2,0330
12	0,023403	41,2340	15,2949	17,5936	0,000680	14,8293	12,3442
13	0,012328	16,1539	8,3818	6,2321	0,000387	6,1561	5,0591
14	0,013976	18,6020	9,0265	6,2971	0,000415	6,7880	5,5422
15	0,011545	6,5614	3,5037	4,9398	0,000075	3,0033	2,5865
16	0,011534	6,7396	3,6747	5,1973	0,000075	3,1247	2,6947
17	0,011546	6,5630	3,5034	4,9401	0,000075	3,0036	2,5868
18	0,018752	27,0579	9,1010	8,1527	0,000646	8,8662	7,2321
19	0,012042	21,7736	3,9984	5,0824	0,000336	6,1734	4,9962
20	0,011029	18,8092	3,7186	4,3683	0,000329	5,3815	4,3517
21	0,018752	26,5650	9,1010	7,4111	0,000653	8,6193	6,9986
22	0,089390	30,5964	41,0594	108,2277	0,025521	35,9997	34,0808
23	0,136533	38,5796	61,6252	187,6895	0,047906	57,6158	55,4498
24	0,022374	15,5504	4,9261	3,3623	0,000173	4,7723	3,8282
25	0,037540	106,5345	37,3197	90,3258	0,001329	46,8438	41,1624
26	0,031062	127,1797	30,2293	23,7128	0,001199	36,2308	28,9454
27	0,060958	227,2444	81,3461	149,7507	0,006173	91,6817	78,8760
28	0,137573	295,2036	119,9870	308,1630	0,009236	144,7001	128,9820
29	0,083839	23,2836	35,8009	90,9750	0,020637	30,0328	28,4760
30	0,012760	8,5781	3,9005	6,3452	0,000046	3,7673	3,2534
31	0,020673	10,6437	8,9633	13,2836	0,000135	6,5823	5,8240
32	0,017395	28,2268	7,2497	7,4749	0,000593	8,5939	6,9818
33	0,031778	210,0425	36,0899	34,1345	0,001290	56,0600	44,6179
34	0,014816	23,7328	5,6979	5,2635	0,000256	6,9418	5,5909
35	0,011047	6,2996	3,4456	4,8669	0,000074	2,9246	2,5224
36	0,012375	15,6880	2,9217	3,2404	0,000026	4,3725	3,5162

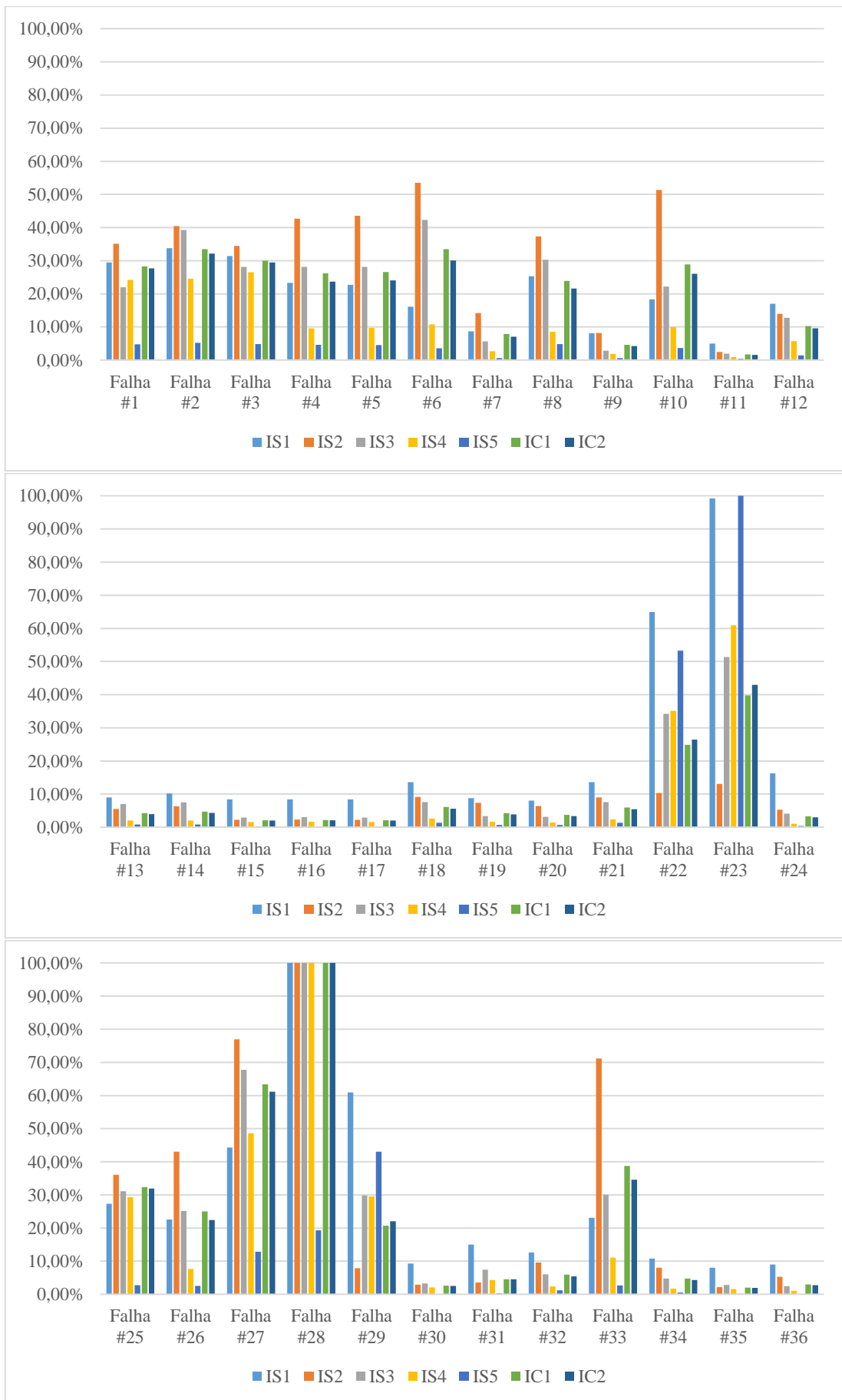


Figura 22: Gráficos percentuais dos índices no sistema equivalente Sul

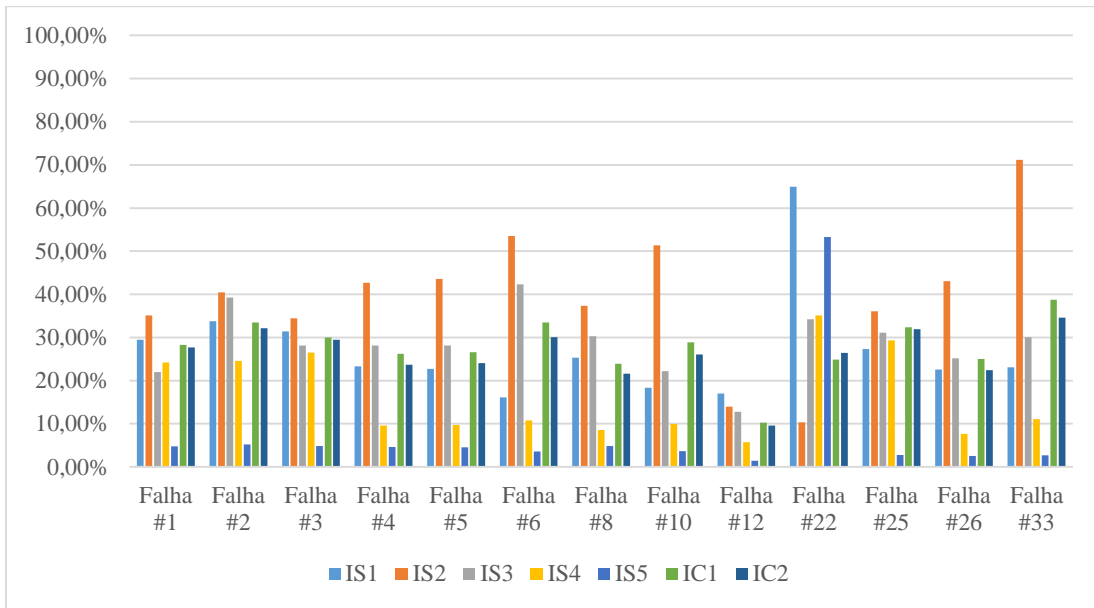


Figura 23: Casos duvidosos do sistema equivalente Sul

É praticamente impossível determinar desse gráfico qual é o limiar da estabilidade. Supondo que a média dos índices compostos (nesses casos) seja utilizada como limiar em cada um deles, obtém-se o gráfico da Figura 24. A média de IC_1 é 27,85% e de IC_2 é 26,13%.

Com isso, IC_1 classifica 1, 2, 3, 6, 10, 25 e 33 como instáveis. Já IC_2 classifica 1, 2, 3, 6, 25 e 33 como instáveis. Nota-se novamente o desempenho similar dos dois índices.

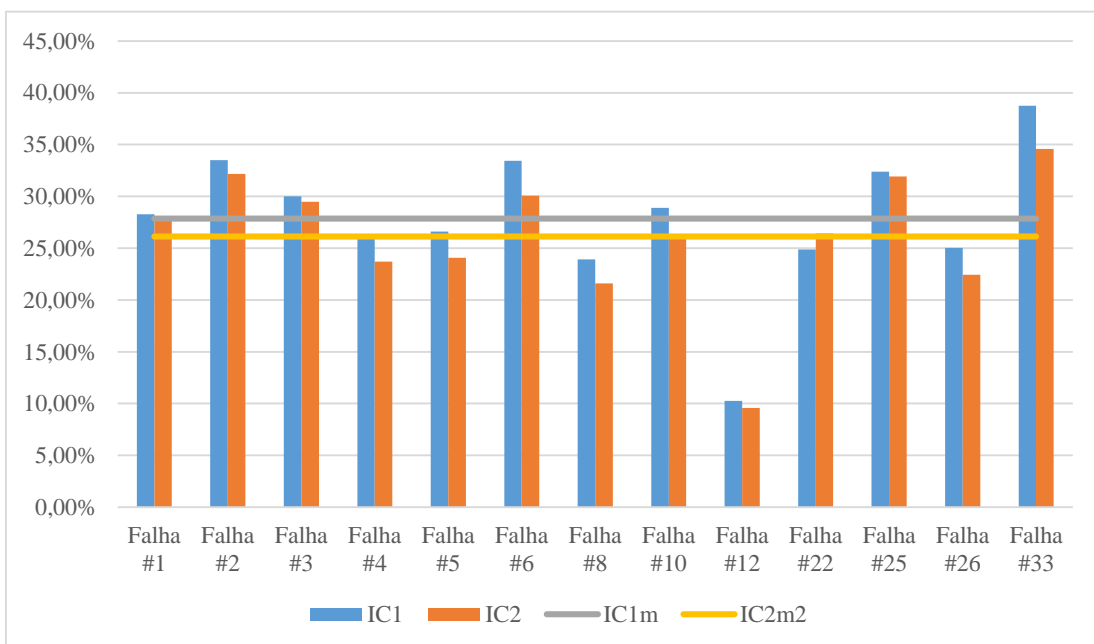


Figura 24: Médias dos índices compostos como limiar de estabilidade

A Tabela 7 mostra em verde os acertos dos índices compostos e em vermelho os erros dos mesmos.

Uma tabela poderia ser montada com todos os índices apresentados, mas a variação entre eles é tão grande que é preferível pensar apenas nos dois índices mais robustos.

Tem-se então que o índice IC_1 teve o percentual de acertos de 83,33% enquanto o índice composto IC_2 obteve 86,11% de acerto.

Tabela 7: Análise da instabilidade através dos índices compostos

Falha #	Estado	IC_1	IC_2
1	I	I	I
2	I	I	I
3	I	I	I
4	E	E	E
5	E	E	E
6	E	I	I
7	E	E	E
8	E	E	E
9	E	E	E
10	E	I	E
11	E	E	E
12	E	E	E
13	E	E	E
14	E	E	E
15	E	E	E
16	E	E	E
17	E	E	E
18	E	E	E
19	E	E	E
20	E	E	E
21	E	E	E
22	I	E	E
23	I	I	I
24	E	E	E
25	I	I	I
26	I	E	E
27	I	I	I
28	I	I	I
29	I	E	E
30	E	E	E
31	I	E	E
32	E	E	E
33	I	I	I
34	E	E	E
35	E	E	E
36	E	E	E

O índice composto proposto por [5] parece possibilitar uma pequena melhora na análise, mas ainda há dúvidas se a complexidade estatística de seu cálculo de fato vale a pena.

É interessante notar que para as falhas 6 e 10, os erros observados são conservadores, uma vez que o sistema é, de fato, estável. Por outro lado, para as falhas 22, 26, 29 e 31, a classificação incorreta é perigosa, pois indica estabilidade em situações, de fato, instáveis.

5 Propostas

5.1 Índice Composto Normalizado

O índice proposto por de Oliveira e Padilha [5] utiliza o coeficiente de variação de cada índice em sua formulação. Porém há uma outra ideia que facilita a visualização geral dos resultados: a *normalização* dos índices.

Utilizando a mesma média \bar{x} , pode-se obter os valores de índices normalizados. Só essa operação já pode ter um resultado surpreendentemente satisfatório para cada índice.

Essa metodologia faz com que todos os desvios padrão de cada índice tenham o mesmo peso. Apesar do coeficiente de variação não mudar, fica simplesmente mais agradável comparar índices com valores similares. A visualização gráfica também fica mais simples já que não é necessário utilizar os percentuais de cada índice (como feito anteriormente).

A Tabela 8 mostra os mesmo resultados para o sistema de 45 barras, porém, com os índices normalizados. Os mesmos também estão expostos no gráfico da Figura 25. Para reduzir o tamanho do gráfico e facilitar a análise, a Figura 26 mostra o gráfico apenas com os índices compostos normalizados.

Tabela 8: Índices Compostos Normalizados

Falha #	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄	IS ₅	IC ₁	IC ₂
1	1,245703	1,534681	1,116196	1,782812	0,606457	1,2572	1,1649
2	1,429690	1,769884	1,993957	1,810371	0,657680	1,5323	1,3832
3	1,328550	1,506008	1,426597	1,953817	0,608853	1,3648	1,2568
4	0,986465	1,866928	1,426862	0,708020	0,581952	1,1140	0,9882
5	0,962405	1,906478	1,428852	0,715706	0,574260	1,1175	0,9901
6	0,682470	2,341429	2,146355	0,794110	0,453956	1,2837	1,1020
7	0,366479	0,619281	0,286821	0,199793	0,078686	0,3102	0,2580
8	1,070252	1,634215	1,538092	0,628447	0,608215	1,0958	0,9734
9	0,342909	0,357728	0,145005	0,140518	0,081742	0,2136	0,1819
10	0,777414	2,246833	1,127699	0,733355	0,461643	1,0694	0,9353
11	0,210922	0,107393	0,099080	0,064485	0,052101	0,1068	0,0922
12	0,719555	0,610840	0,647118	0,420654	0,179622	0,5156	0,4424
13	0,379039	0,239304	0,354628	0,149007	0,102256	0,2448	0,2097
14	0,429719	0,275570	0,381905	0,150561	0,109678	0,2695	0,2293
15	0,354972	0,097201	0,148238	0,118108	0,019822	0,1477	0,1185
16	0,354643	0,099841	0,155473	0,124266	0,019816	0,1508	0,1213
17	0,354994	0,097224	0,148227	0,118115	0,019841	0,1477	0,1185
18	0,576571	0,400836	0,385058	0,194928	0,170499	0,3456	0,2994
19	0,370250	0,322554	0,169169	0,121517	0,088783	0,2145	0,1824
20	0,339119	0,278639	0,157331	0,104444	0,086767	0,1933	0,1653
21	0,576571	0,393533	0,385058	0,177196	0,172524	0,3410	0,2952
22	2,748453	0,453255	1,737197	2,587672	6,740124	2,8533	3,5850
23	4,197963	0,571518	2,607323	4,487567	12,652113	4,9033	6,3755
24	0,687918	0,230364	0,208418	0,080392	0,045591	0,2505	0,1947
25	1,154253	1,578200	1,578972	2,159647	0,351036	1,3644	1,2222
26	0,955051	1,884038	1,278984	0,566961	0,316781	1,0004	0,8425
27	1,874285	3,366394	3,441700	3,580469	1,630402	2,7787	2,6204
28	4,229956	4,373142	5,076574	7,368032	2,439339	4,6974	4,4368
29	2,577801	0,344923	1,514713	2,175168	5,450193	2,4126	2,9792
30	0,392342	0,127075	0,165027	0,151711	0,012183	0,1697	0,1353
31	0,635641	0,157675	0,379231	0,317604	0,035594	0,3051	0,2498
32	0,534852	0,418152	0,306728	0,178722	0,156615	0,3190	0,2761
33	0,977063	3,111565	1,526939	0,816139	0,340680	1,3545	1,1308
34	0,455548	0,351577	0,241075	0,125847	0,067542	0,2483	0,2031
35	0,339673	0,093322	0,145780	0,116365	0,019663	0,1430	0,1150
36	0,380508	0,232402	0,123616	0,077476	0,006988	0,1642	0,1256

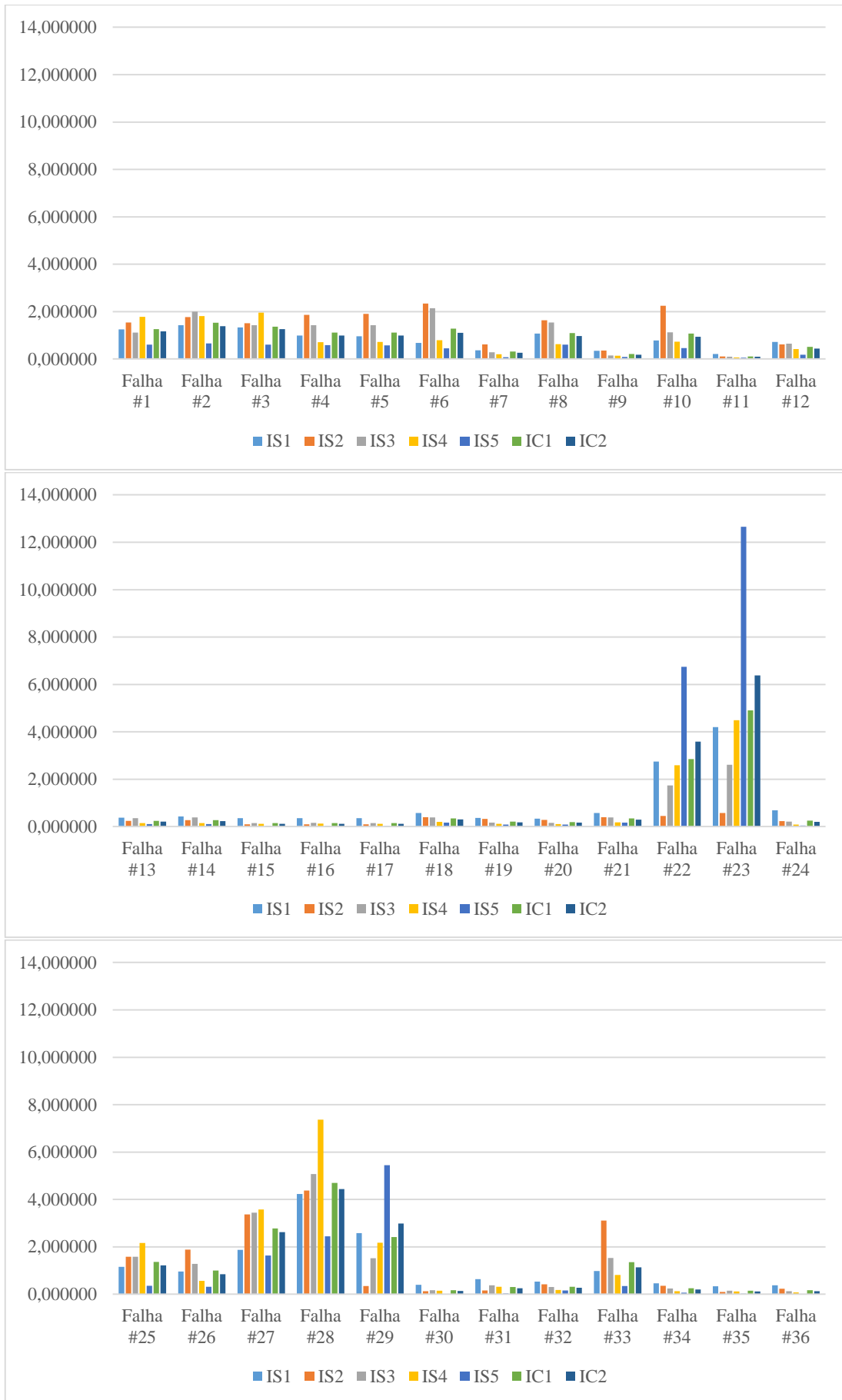


Figura 25: Gráficos dos índices normalizados no sistema equivalente Sul

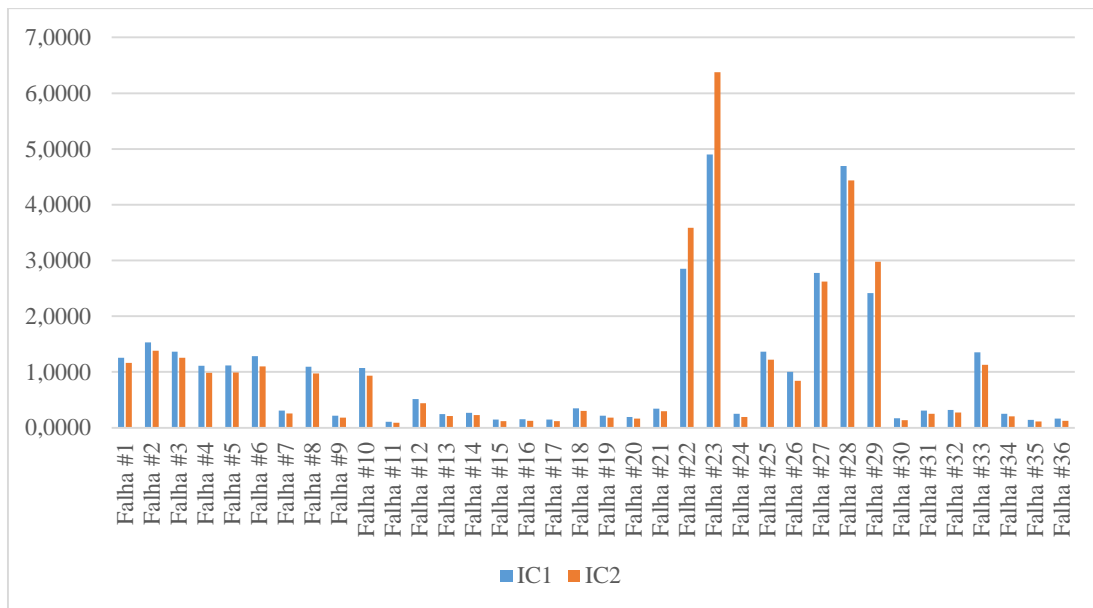


Figura 26: Gráficos dos índices compostos normalizados

Embora seja difícil encontrar métodos para determinar o limiar de estabilidade dos índices, há uma forma de apreciação dos resultados que facilita o estudo dos mesmos.

A Tabela 9 mostra:

1. a quantidade de valores de índices para casos instáveis que são superiores ao mais alto índice de um caso estável;
2. a quantidade de valores de índices em casos estáveis que são inferiores ao mais baixo índice dos casos instáveis;
3. a quantidade de valores em casos instáveis inferiores ou iguais ao maior dos casos estáveis;
4. a quantidade de valores em casos estáveis superiores ou iguais ao menor dos casos instáveis.

Os casos 1 e 2 são definidos como casos favoráveis para a identificação do limiar de estabilidade do índice enquanto os casos 3 e 4 são ditos desfavoráveis. Como todos os itens são mutuamente exclusivos, a soma dos 4 é sempre 36 (número de contingências avaliadas).

Essa tabela mostra que se todos os índices cujos valores não facilitam a classificação do estado do sistema certo número de casos ainda podem ser classificados corretamente como instáveis (primeira linha) e outros como estáveis (segunda linha).

Nota-se, então, a real vantagem do índice composto proposto por [5]: enquanto os índices simples têm alta variação nos números de casos favoráveis e desfavoráveis,

o índice composto consegue consolidar 20 casos favoráveis. O índice composto pela média aritmética dos cinco índices de base consegue apenas 16 casos favoráveis.

Tabela 9: Casos favoráveis e desfavoráveis na utilização dos índices

	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄	IS ₅	IC ₁	IC ₂
$i > \max e$	9	3	3	10	7	5	6
$e < \min i$	17	6	15	18	6	11	14
$i < \max e$	3	9	9	2	5	7	6
$e > \min i$	7	18	9	6	18	13	10
Favoráveis	26	9	18	28	13	16	20
Desfavoráveis	10	27	18	8	23	20	16

Isso é melhorado em 20% com a utilização dos índices normalizados propostos nesse trabalho, como mostra a Tabela 10. É interessante notar, também, que a normalização dos índices não altera o número de casos favoráveis e desfavoráveis dos índices simples, uma vez que os índices normalizados são apenas os índices não-normalizados divididos por uma constante.

Tabela 10: Casos favoráveis e desfavoráveis na utilização dos índices normalizados

	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄	IS ₅	IC ₁	IC ₂
$i > \max e$	9	3	3	10	7	9	10
$e < \min i$	17	6	15	18	6	14	14
$i < \max e$	3	9	9	2	5	3	2
$e > \min i$	7	18	9	6	18	10	10
favoráveis	26	9	18	28	13	23	24
desfavoráveis	10	27	18	8	23	13	12

Com os índices normalizados, é possível obter 23 casos favoráveis em IC_1 e 24 casos favoráveis em IC_2 . Observa-se que os índices 1 e 4 obtiveram maior número de casos favoráveis, mas o estudo deste trabalho foca nos índices compostos cuja robustez representa um fator importante na motivação do uso de índices de estabilidade.

Além disso, com essa técnica (de normalização), a razão entre a média dos casos instáveis e a média dos casos estáveis é maior do que nos índices propostos anteriormente, como mostra a Tabela 11. Esta realidade exprime que, em geral, há maior diferença entre os casos instáveis e estáveis.

Tabela 11: Razão entre as médias dos casos instáveis e estáveis

Índice	IC_1	IC_2	IC_1^N	IC_2^N
Razão	4,003137	4,343921	5,075414	6,225844

Formula-se, portanto:

$$IC_1^N = \frac{1}{NI} \sum_{i=1}^{NI} \frac{x_i}{\bar{x}_i} \quad (36)$$

e

$$IC_2^N = \sum_{i=1}^{NI} C_i \frac{x_i}{\bar{x}_i}. \quad (37)$$

5.2 Correção da Média Ponderada

Uma metodologia de ponderação da média dos índices-base é muito mais eficiente quando utiliza o conceito de resultados favoráveis e desfavoráveis.

Supondo o conhecimento dos estados reais do sistema após os defeitos simulados, é possível formar uma tabela com os casos favoráveis como mostram a Tabela 9 e a Tabela 10.

Utilizando os casos favoráveis e desfavoráveis no cálculo dos pesos de cada índice, surge um novo índice com melhoria de 16,67% em casos favoráveis.

A Tabela 13 mostra os índices normalizados acompanhados de um terceiro índice composto IC_3 . Enquanto isso, a Tabela 12 mostra o número de casos favoráveis dos índices simples e compostos normalizados e o novo terceiro índice também normalizado com correção da média ponderada.

Tabela 12: Casos favoráveis e desfavoráveis com correção da média ponderada

	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄	IS ₅	IC ₁	IC ₂	IC₃
$i > \max e$	9	3	3	10	7	9	10	10
$e < \min i$	17	6	15	18	6	14	14	18
$i < \max e$	3	9	9	2	5	3	2	2
$e > \min i$	7	18	9	6	18	10	10	6
favoráveis	26	9	18	28	13	23	24	28
desfavoráveis	10	27	18	8	23	13	12	8

É muito importante ressaltar que essa correção não é prática. A forma que ela foi calculada implica o conhecimento do real estado do sistema em cada caso.

Nem por isso ela não pode ser utilizada no aprimoramento dos índices de estabilidade. A ideia da correção dos pesos dos índices parte da noção de que os índices podem apresentar casos com resultados inesperados.

Tabela 13: Índices normalizados e o índice composto com correção da média ponderada

Falha #	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄	IS ₅	IC ₂
1	1,245703	1,534681	1,116196	1,782812	0,606457	1,3202
2	1,429690	1,769884	1,993957	1,810371	0,657680	1,5769
3	1,328550	1,506008	1,426597	1,953817	0,608853	1,4510
4	0,986465	1,866928	1,426862	0,708020	0,581952	1,0162
5	0,962405	1,906478	1,428852	0,715706	0,574260	1,0150
6	0,682470	2,341429	2,146355	0,794110	0,453956	1,1233
7	0,366479	0,619281	0,286821	0,199793	0,078686	0,2860
8	1,070252	1,634215	1,538092	0,628447	0,608215	1,0183
9	0,342909	0,357728	0,145005	0,140518	0,081742	0,2100
10	0,777414	2,246833	1,127699	0,733355	0,461643	0,9284
11	0,210922	0,107393	0,099080	0,064485	0,052101	0,1140
12	0,719555	0,610840	0,647118	0,420654	0,179622	0,5316
13	0,379039	0,239304	0,354628	0,149007	0,102256	0,2542
14	0,429719	0,275570	0,381905	0,150561	0,109678	0,2784
15	0,354972	0,097201	0,148238	0,118108	0,019822	0,1738
16	0,354643	0,099841	0,155473	0,124266	0,019816	0,1772
17	0,354994	0,097224	0,148227	0,118115	0,019841	0,1738
18	0,576571	0,400836	0,385058	0,194928	0,170499	0,3532
19	0,370250	0,322554	0,169169	0,121517	0,088783	0,2142
20	0,339119	0,278639	0,157331	0,104444	0,086767	0,1937
21	0,576571	0,393533	0,385058	0,177196	0,172524	0,3475
22	2,748453	0,453255	1,737197	2,587672	6,740124	2,8392
23	4,197963	0,571518	2,607323	4,487567	12,652113	4,8016
24	0,687918	0,230364	0,208418	0,080392	0,045591	0,2825
25	1,154253	1,578200	1,578972	2,159647	0,351036	1,4646
26	0,955051	1,884038	1,278984	0,566961	0,316781	0,9022
27	1,874285	3,366394	3,441700	3,580469	1,630402	2,7918
28	4,229956	4,373142	5,076574	7,368032	2,439339	5,0929
29	2,577801	0,344923	1,514713	2,175168	5,450193	2,4378
30	0,392342	0,127075	0,165027	0,151711	0,012183	0,1992
31	0,635641	0,157675	0,379231	0,317604	0,035594	0,3631
32	0,534852	0,418152	0,306728	0,178722	0,156615	0,3216
33	0,977063	3,111565	1,526939	0,816139	0,340680	1,1508
34	0,455548	0,351577	0,241075	0,125847	0,067542	0,2527
35	0,339673	0,093322	0,145780	0,116365	0,019663	0,1682
36	0,380508	0,232402	0,123616	0,077476	0,006988	0,1752

A percepção de casos favoráveis e desfavoráveis pode ser criada com base em apenas algumas contingências e aplicada ao restante. É necessário, então, que os limitadores de favorabilidade dos índices sejam constituídos de casos que apresentam índices variados (que tornam a conclusão duvidosa).

Para fazer essa escolha, não é necessário conhecer os resultados do sistema, mas apenas notar a diferença dos resultados entre os índices.

Tabela 14: Índices normalizados selecionados

Falha #	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄	IS ₅
7	0,366479	0,6193	0,2868	0,1998	0,078686
10	0,777414	2,2468	1,1277	0,7334	0,461643
11	0,210922	0,1074	0,0991	0,0645	0,052101
15	0,354972	0,0972	0,1482	0,1181	0,019822
16	0,354643	0,0998	0,1555	0,1243	0,019816
17	0,354994	0,0972	0,1482	0,1181	0,019841
22	2,748453	0,4533	1,7372	2,5877	6,740124
23	4,197963	0,5715	2,6073	4,4876	12,652113
24	0,687918	0,2304	0,2084	0,0804	0,045591
26	0,955051	1,8840	1,2790	0,5670	0,316781
29	2,577801	0,3449	1,5147	2,1752	5,450193
30	0,392342	0,1271	0,1650	0,1517	0,012183
31	0,635641	0,1577	0,3792	0,3176	0,035594
33	0,977063	3,1116	1,5269	0,8161	0,340680
35	0,339673	0,0933	0,1458	0,1164	0,019663
36	0,380508	0,2324	0,1236	0,0775	0,006988

A Tabela 14 é formada pelos casos nos quais pelo menos um índice se destacou dos outros. A Tabela 15 mostra o número de casos ditos favoráveis de acordo com o número de casos com simulação de 10s. E à direita os pesos corrigidos para cada índice.

Tabela 15: Casos favoráveis em função do número de casos selecionados analisados e pesos corrigidos

Casos	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄	IS ₅	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
1 a 2	1	0	1	1	0	0,3333	0,0000	0,3333	0,3333	0,0000
1 a 3	2	1	2	2	0	0,2857	0,1429	0,2857	0,2857	0,0000
1 a 4	3	2	3	3	1	0,2500	0,1667	0,2500	0,2500	0,0833
1 a 5	4	3	4	4	2	0,2353	0,1765	0,2353	0,2353	0,1176
1 a 6	5	4	5	5	3	0,2273	0,1818	0,2273	0,2273	0,1364
1 a 7	6	4	6	6	4	0,2308	0,1538	0,2308	0,2308	0,1538
1 a 8	7	4	7	7	5	0,2333	0,1333	0,2333	0,2333	0,1667
1 a 9	7	4	8	8	5	0,2188	0,1250	0,2500	0,2500	0,1563
1 a 10	8	4	9	8	5	0,2353	0,1176	0,2647	0,2353	0,1471
1 a 11	9	4	10	9	6	0,2368	0,1053	0,2632	0,2368	0,1579
1 a 12	10	5	11	10	7	0,2326	0,1163	0,2558	0,2326	0,1628
1 a 13	10	5	11	10	7	0,2326	0,1163	0,2558	0,2326	0,1628
1 a 14	11	6	12	11	7	0,2340	0,1277	0,2553	0,2340	0,1489
1 a 15	12	7	13	12	8	0,2308	0,1346	0,2500	0,2308	0,1538
1 a 16	13	7	14	13	9	0,2321	0,1250	0,2500	0,2321	0,1607

O Figura 27 mostra a evolução dos pesos C_i da média ponderada em função do número de casos simulados por 10s.

A eficiência desse método pode ser comprovada, também, pelo número de casos favoráveis encontrados após o cálculo dos pesos corrigidos.

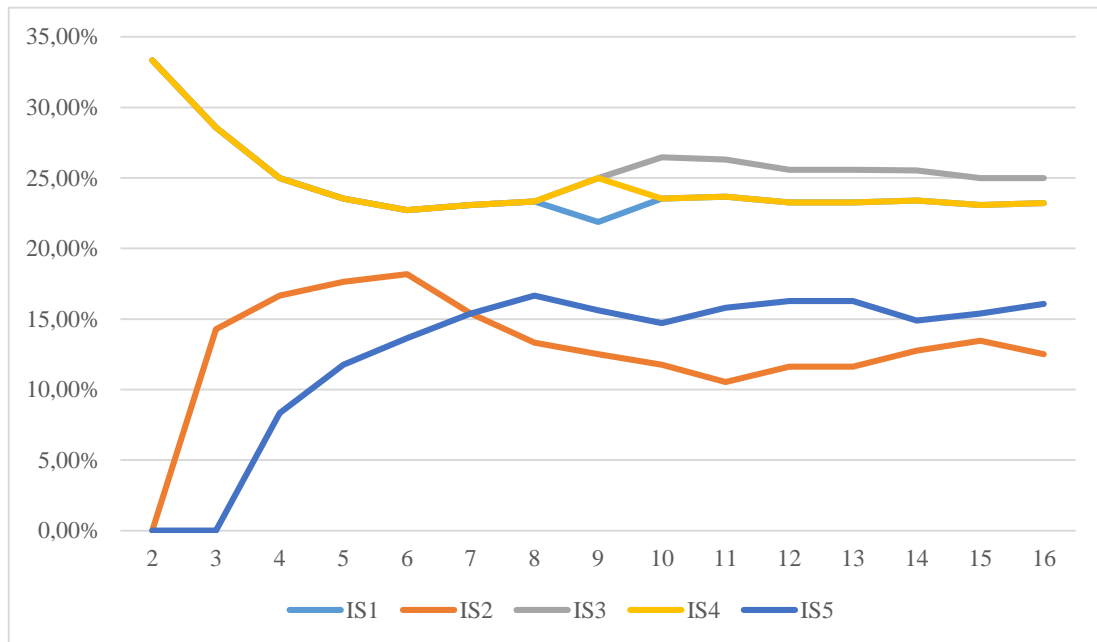


Figura 27: Pesos C_i da média ponderada em função do número de casos simulados até 10s

A Tabela 16 mostra o número de casos favoráveis na determinação do estado do sistema e o gráfico da Figura 28 mostra a evolução de casos favoráveis e desfavoráveis em função do número de casos simulados até 10s.

Tabela 16: Casos favoráveis após a aplicação dos pesos corrigidos a todos os índices

Casos	Favoráveis	Desfavoráveis
1 a 2	36	0
1 a 3	36	0
1 a 4	34	2
1 a 5	33	3
1 a 6	32	4
1 a 7	34	2
1 a 8	34	2
1 a 9	33	3
1 a 10	33	3
1 a 11	33	3
1 a 12	33	3
1 a 13	33	3
1 a 14	33	3
1 a 15	34	2
1 a 16	33	3

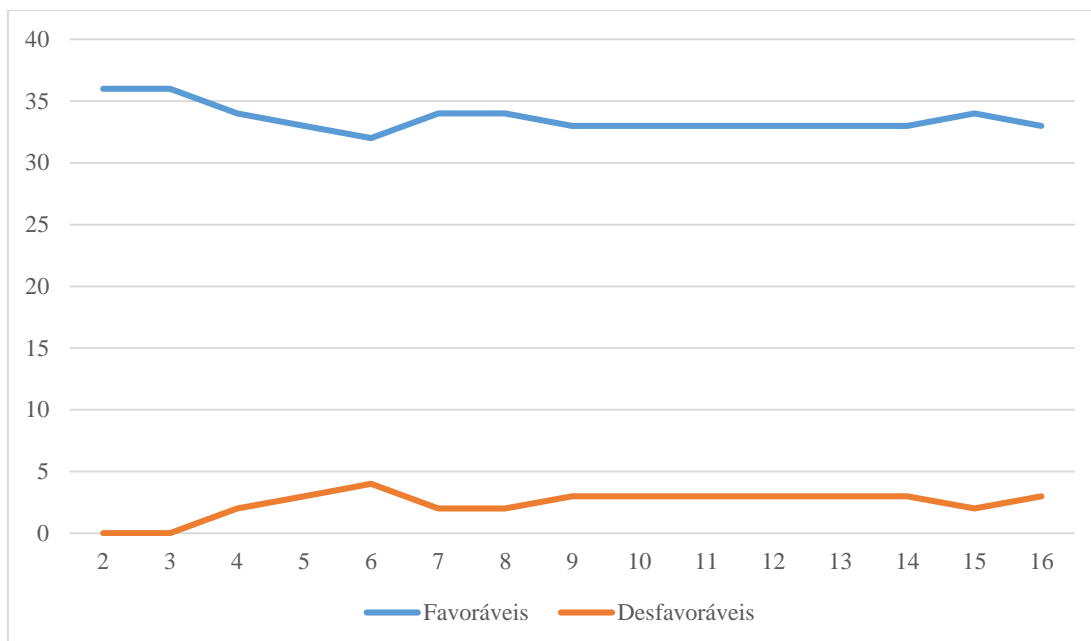


Figura 28: Casos favoráveis após a aplicação dos pesos corrigidos em função do número de casos utilizado na correção

A Tabela 17 apresenta os índices normalizados corrigidos após a utilização de 3 casos na correção do peso da média ponderada. O gráfico da Figura 29 mostra a mesma informação em barras.

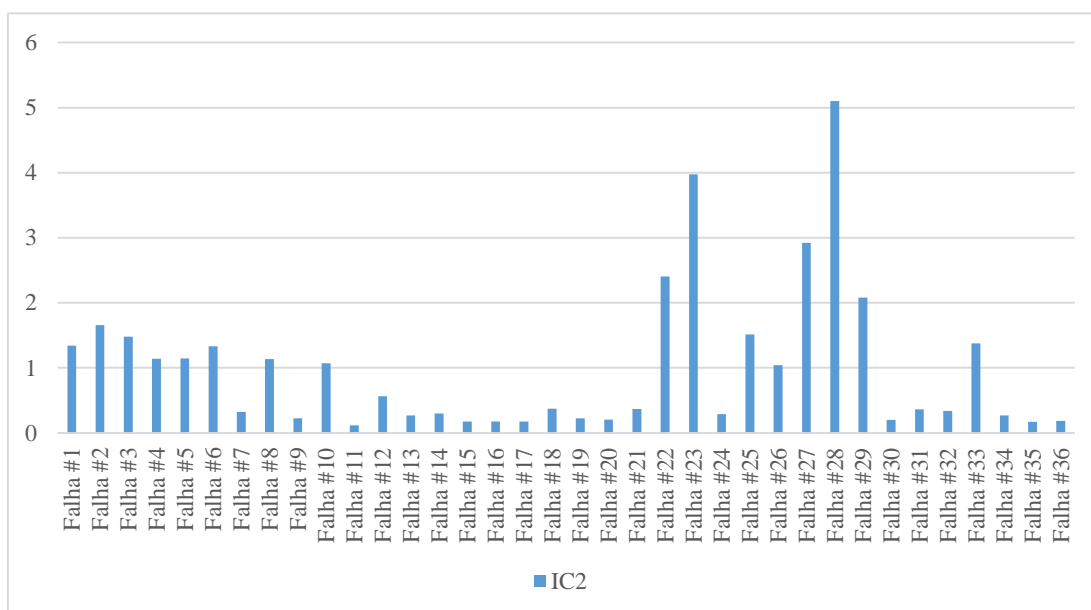


Figura 29: Índice composto IC_2 corrigido e normalizado

Utilizando-se a mesma metodologia anterior (a média dos casos duvidosos como limiar de estabilidade), o gráfico da Figura 30 mostra os casos acima do limiar. A Tabela 18 apresenta os estados finais do sistema estabelecido através do índice composto normalizado corrigido.

Tabela 17: Índice composto normalizado e corrigido das contingências do equivalente Sul

Falha #	IC ₂	Falha #	IC ₂
1	1,285878	19	0,215806
2	1,581322	20	0,194884
3	1,412047	21	0,349892
4	1,097062	22	2,738979
5	1,098644	23	4,640448
6	1,266121	24	0,267853
7	0,304247	25	1,42593
8	1,091941	26	0,984971
9	0,212633	27	2,821766
10	1,025566	28	4,89605
11	0,110958	29	2,337944
12	0,534069	30	0,185058
13	0,256242	31	0,337228
14	0,281312	32	0,32388
15	0,161384	33	1,297301
16	0,164805	34	0,254281
17	0,161396	35	0,156263
18	0,354796	36	0,171045

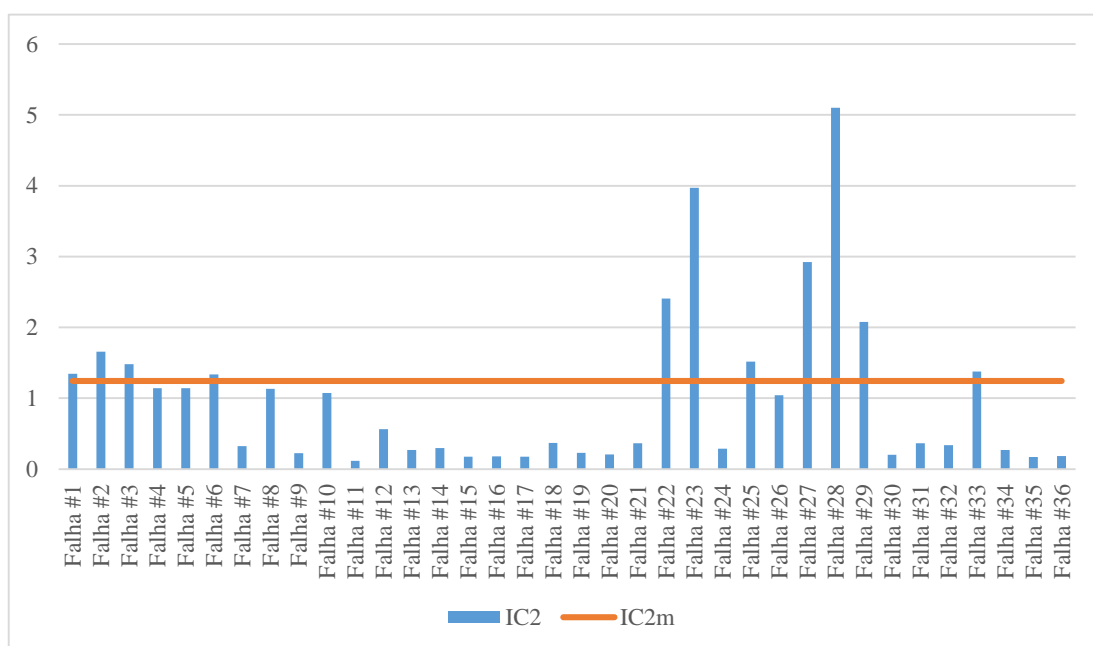


Figura 30: Índices normalizados e corrigidos com limiar de estabilidade

Como se pode ver, apenas 3 casos são classificados erroneamente significando 91,67% de acerto e a melhora de 6,45% sobre a eficiência do índice composto proposto por [5].

É necessário, contudo, julgar se vale a pena investir tempo em algumas simulações completas para a obtenção da correção.

Tabela 18: Análise da instabilidade através dos índices compostos

Falha #	Estado	IC ₂
1	I	I
2	I	I
3	I	I
4	E	E
5	E	E
6	E	I
7	E	E
8	E	E
9	E	E
10	E	E
11	E	E
12	E	E
13	E	E
14	E	E
15	E	E
16	E	E
17	E	E
18	E	E

Falha #	Estado	IC ₂
19	E	E
20	E	E
21	E	E
22	I	I
23	I	I
24	E	E
25	I	I
26	I	E
27	I	I
28	I	I
29	I	I
30	E	E
31	I	E
32	E	E
33	I	I
34	E	E
35	E	E
36	E	E

6 Conclusão

A partir da análise nas quatro perspectivas listadas no início da seção 4, é possível aprender bastante sobre os índices de estabilidade. O parecer a seguir contempla também com os aspectos individuais e gerais dos mesmos.

6.1 Eficiência

Os índices de estabilidade se mostraram eficientes na identificação da instabilidade até certo ponto. Nos dois sistemas avaliados, os índices conseguiram identificar contingências que resultaram em sistemas estáveis e instáveis.

Como visto no sistema de 9 (nove) barras, o tempo T de 0,5s não foi suficiente para a identificação correta. Não obstante, de forma geral, os índices simples e compostos obtiveram resultados muito semelhantes para alguns casos e completamente diferentes para outros.

Por isso, os casos com comportamento semelhante foram facilmente classificados como instáveis ou estáveis enquanto os outros trouxeram dúvidas.

6.2 Robustez

Nenhum dos índices mostrou comportamentos diferentes quando submetidos aos dois sistemas. Apesar de ambos terem topologias muito diferentes, os índices analisam apenas os resultados numéricos.

Isso significa que independente da formação da rede, o índice só enxerga os dados das máquinas. Por esse motivo, a topologia não é um problema. Contudo, o tipo de instabilidade resultante pode ser.

6.3 Desempenho

A variedade de tipos de estabilidade se mostrou claramente como a fraqueza dos índices de estabilidade.

Primeiro, no sistema a 9 barras, não apenas os índices não indicaram os casos instáveis com valores superiores, como mostraram valores muito inferiores aos dos casos estáveis.

Em um sistema grande que apresenta vários tipos de instabilidade, isso faz com que casos de instabilidade oscilatória possam passar despercebidos e apenas os casos de divergência aperiódica ou instabilidade de primeira oscilação sejam detectados. Observou-se que a instabilidade oscilatória pode resultar em índices de valor mais baixos que os casos estáveis.

Esse fato é severamente agravado se o sistema apresentar somente instabilidade oscilatória, pois pode haver a completa inversão dos estados do sistema.

6.4 Conceito

Sem embargo, os índices demonstraram excelente conceito. No sistema a nove barras, todos os índices identificaram corretamente os casos instáveis quando utilizaram um tempo estendido de cálculo. No sistema equivalente Sul, os índices identificaram alguns casos rapidamente mesmo com o tempo de 0,5s. Os outros casos, todavia, tornaram muito difícil avaliar o limiar da estabilidade dos índices.

Isso significa que os conceitos estudados e as formulações matemáticas efetivamente podem apontar o estado final do sistema.

Constata-se ainda que a utilização dos índices apresentados neste documento em simulações de tempo estendido não tem utilidade prática, uma vez que a observação de certas grandezas já indica (sem erro) o estado final do sistema após a simulação. Os índices foram utilizados dessa maneira apenas para a avaliação completa dos mesmos.

6.5 Composição de Índices

Independentemente dos índices compostos não terem sido significativos no discernimento dos casos instáveis e estáveis no sistema a 9 barras, os mesmos se mostraram um bom aperfeiçoamento no sistema a 45 barras.

Como não há respostas e valores certos para os índices de estabilidade, pode-se apenas tentar melhorar a variação dos valores calculados.

Ainda assim, nota-se pouco benefício na utilização do índice composto IC_2 , pois os resultados do mesmo foram muito similares ao do índice IC_1 . Apesar de seus cálculos estatísticos não representarem muito esforço computacional, ainda é necessário estudar outros métodos de aprimoramento que diferenciem os dois índices e destaquem a análise estatística na utilização de índices de estabilidade.

6.6 Índices Normalizados

Os índices normalizados apresentaram ótimo desempenho no sistema a 45 barras e, apesar de simples, exibem consistência para serem utilizados no **aperfeiçoamento de índices de estabilidade transitória**.

A análise dos casos favoráveis à identificação do limiar de estabilidade indicou a melhora de 20% nos resultados.

6.7 Correção da Média Ponderada

Ainda, como uma segunda alternativa para a melhora dos índices de estabilidade, a correção da média ponderada se mostrou muito útil, aumentando significativamente o número de casos favoráveis.

Mostrou-se que a utilização de apenas 3 contingências na correção dos pesos da média resultou em aumento de 70% no número de casos favoráveis, facilitando, em muito, a determinação do limiar de estabilidade.

A classificação dos casos instáveis, por sua vez, foi aumentada para 91,67% de acerto, representando a melhoria de 6,45% sobre a eficiência do índice composto proposto por [5].

6.8 Aplicação Prática dos Índices

O trabalho desenvolvido nesse projeto de graduação permitiu uma avaliação preliminar dos índices através das investigações realizadas. Ficou evidente que pode haver falhas na avaliação da estabilidade, muito embora o percentual de acerto seja elevado. Atualmente, a avaliação da segurança dinâmica nos centros de operação ainda é limitada pelo esforço computacional necessário, especialmente na análise de múltiplas contingências. Em muitos casos, a limitação no tempo de processamento impede simplesmente a realização dos estudos. Neste sentido, os índices pesquisados se mostram ferramentas valiosas, pois apesar das possíveis falhas, podem viabilizar estudos atualmente não realizados. Sua aplicação prática, entretanto, requer a continuação da pesquisa e realização de testes adicionais.

6.9 Trabalhos Futuros

Ainda é preciso estudar muito sobre os índices de estabilidade e métodos de agilização das simulações. Embora os índices tenham mostrado bom desempenho conceitual, é necessário sua utilização no maior número de sistemas possível.

As metodologias de aperfeiçoamento também têm de ser avaliadas em variados sistemas. Ambos os métodos podem possuir ramificações quanto à forma de normalizar os índices ou à escolha dos casos na correção dos pesos da média ponderada.

Bibliografia

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- [2] C. L. T. Borges e J. M. T. Alves, “Análise de Segurança Estática,” Outubro 2010. [Online]. Available: http://www.dee.ufrj.br/lasp/disciplinas/Analise_Seguranca_2010.pdf. [Acesso em Março 2014].
- [3] C. Fu e A. Bose, “Contingency Ranking Based on Severly Indices in Dynamic Security Analysis,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, n° 3, pp. 980-986, August 1999.
- [4] M. A. Pai, *Power System Stability: Analysis by the Direct Method of Lyapunov*, Amsterdam, 1981.
- [5] E. N. de Oliveira e A. Padilha, “Utilização de Índices de Estabilidade Transitória para a Avaliação de Segurança Dinâmica,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 1, n° 1, pp. 27-33, Outubro 2003.
- [6] PEE - COPPE/UFRJ, *Simulight - Manual do Usuário*, Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC, 2012.
- [7] P. M. Anderson e A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, New Dehli: Wiley India, 2008.
- [8] “Simulight – Simulador para Redes Elétricas com Geração Distribuída,” COPPE/UFRJ, 26 Novembro 2013. [Online]. Available: <http://www.coep.ufrj.br/~tarang/Simulight/xExemplos.htm>. [Acesso em Março 2014].

A1. Sistema a 9 Barras Original

Este anexo apresenta:

- o fluxo de potência no sistema a 9 barras original utilizado;
- as tensões de barra pré-falha;
- diagrama unifilar do sistema.

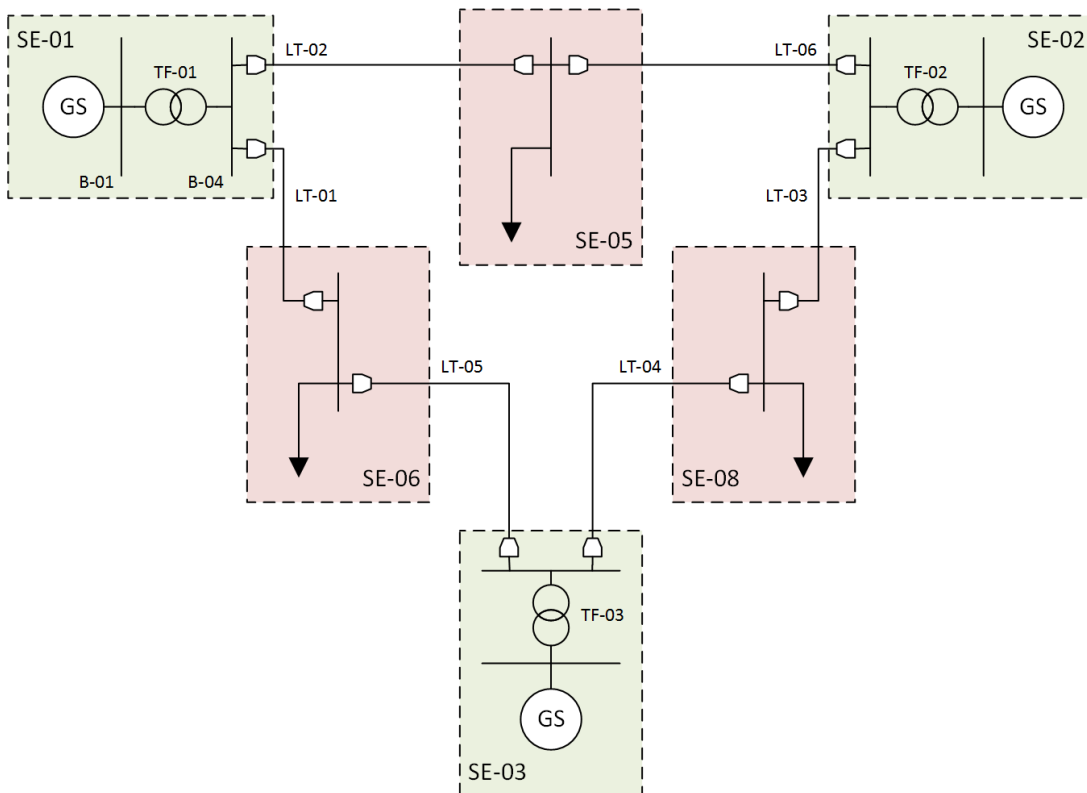
A1.1. Fluxo de Potência

Barra de	Barra para	Linha	<i>MW</i>	<i>Mvar</i>
B-02	B-07	TF-02	163,00000	-13,61440
B-07	B-08	LT-03	91,46730	2,78977
B-03	B-09	TF-03	85,00000	-18,90480
B-09	B-06	LT-05	75,77470	-23,14040
B-07	B-05	LT-06	71,53270	-32,31990
B-05	B-04	LT-02	69,93870	-7,08028
B-04	B-01	TF-01	53,09360	0,34702
B-04	B-06	LT-01	16,39830	7,93545
B-09	B-08	LT-04	9,22527	0,00641

A1.2. Tensões Pré-Falha

Nome	Subestação	Tensão (pu)	Tensão (graus)	Geração (MW)	Geração (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
B-05	SE-05	1,047000	4,737380	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
B-01	SE-01	1,040000	0,000000	-53,0936	1,1549	0,0000	0,0000
B-04	SE-01	1,039780	1,620590	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
B-07	SE-02	1,038070	11,088700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
B-09	SE-03	1,036950	8,018940	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
B-03	SE-03	1,025000	10,705000	85,0000	-18,9048	0,0000	0,0000
B-02	SE-02	1,025000	16,582900	163,0000	-13,6144	0,0000	0,0000
B-08	SE-08	1,024990	7,589770	0,0000	0,0000	100,0000	35,0000
B-06	SE-06	1,022590	0,958546	0,0000	0,0000	90,0000	30,0000
Barra Virtual	SE-05	1,000000	0,000000	0,0000	0,0000	126,0990	50,4398

A1.3. Diagrama Unifilar



A2. Sistema a 9 Barras Reforçado

Este anexo apresenta:

- o fluxo de potência no sistema a 9 barras reforçado utilizado;
- as tensões de barra pré-falha;
- diagrama unifilar do sistema.

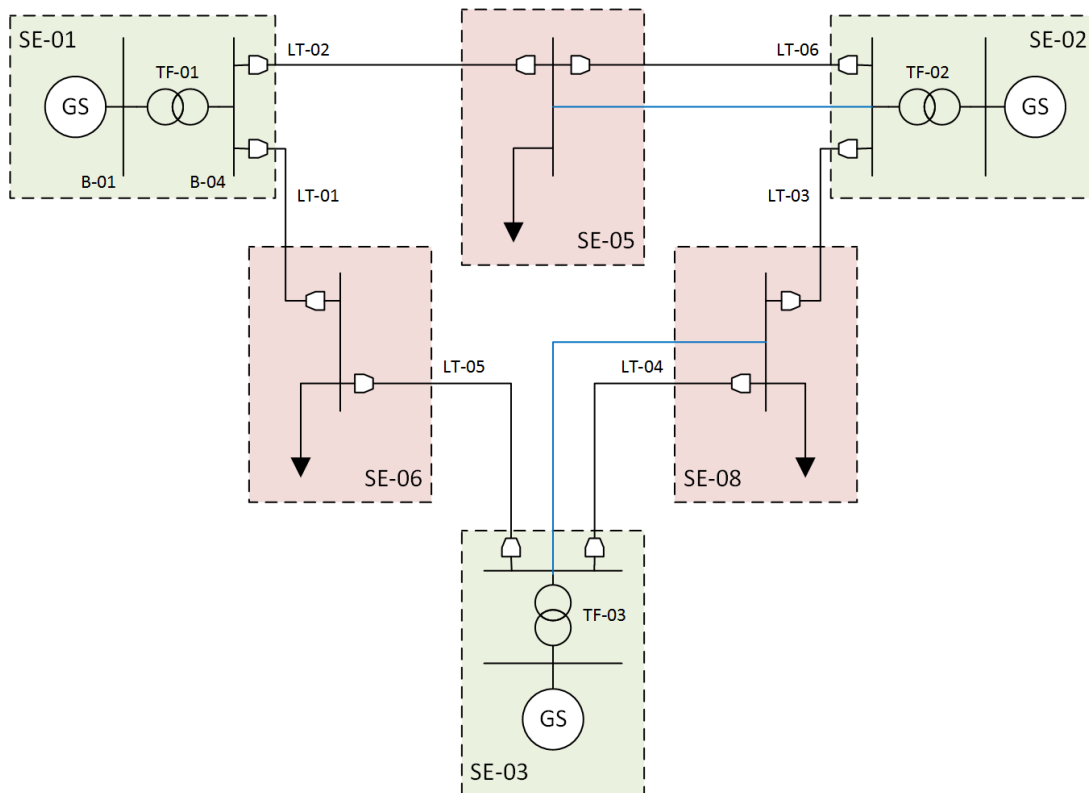
A2.1. Fluxo de Potência

Barra de	Barra para	Linha	<i>MW</i>	<i>Mvar</i>
B-02	B-07	TF-02	99,65700	-20,74740
B-05	B-04	LT-02	89,21010	-8,31456
B-07	B-08	LT-03	72,14500	-0,27101
B-02	B-05	LT-06r	63,34310	-39,58650
B-09	B-06	LT-05	56,61820	-21,73310
B-03	B-09	TF-03	55,71140	-21,92600
B-04	B-01	TF-01	53,73000	1,71507
B-04	B-06	LT-01	34,75490	2,99097
B-03	B-08	LT-04r	29,28870	-18,39930
B-07	B-05	LT-06	27,51200	-26,64060
B-08	B-09	LT-04	0,91601	-20,06180

A2.2. Tensões Pré-Falha

Nome	Subestação	Tensão (pu)	Tensão (graus)	Geração (MW)	Geração (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
B-05	SE-05	1,047620	5,620640	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
B-04	SE-01	1,040520	1,638830	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
B-01	SE-01	1,040000	-0,000004	-53,7300	-0,1776	0,0000	0,0000
B-07	SE-02	1,039430	8,122290	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
B-09	SE-03	1,038020	5,268040	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
B-08	SE-08	1,029320	5,374920	0,0000	0,0000	100,0000	35,0000
B-06	SE-06	1,025040	0,026408	0,0000	0,0000	90,0000	30,0000
B-02	SE-02	1,025000	11,473800	163,0000	-60,3339	0,0000	0,0000
B-03	SE-03	1,025000	7,026370	85,0000	-40,3253	0,0000	0,0000
Barra Virtual	SE-05	1,000000	0,000000	0,0000	0,0000	126,0990	50,4398

A2.3. Diagrama Unifilar



A3. Sistema a 45 Barras

Este anexo apresenta:

- o fluxo de potência no sistema a 45 barras utilizado;
- as tensões de barra pré-falha;
- o diagrama unifilar do sistema.

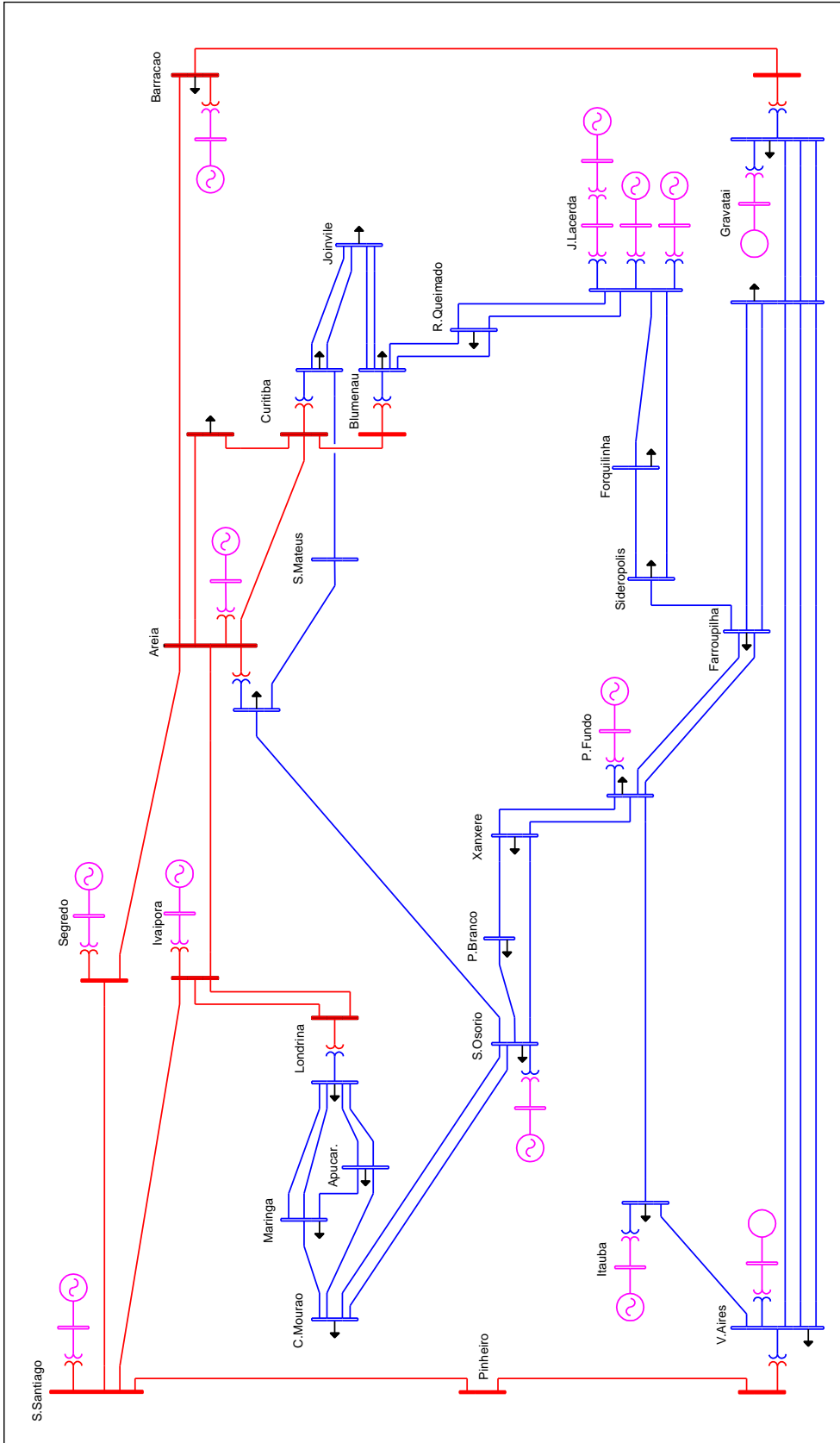
A3.1. Fluxo de Potência

Barra de	Barra para	Linha	MW	Mvar
BARRACAO.525	GRAVATAI.525	BAR-GRA(1)	1606,40000	337,55500
SEGREDO.525	AREIA.525	ARE-SEG(1)	1584,74000	214,74100
AREIA.525	CURITIBA.525	ARE-CUR(1)	1261,63000	329,60300
AREIA.525	CUR.NORTE525	ARE-CUR2(1)	1141,83000	280,19500
S.SANTIAG525	PINHEIRO.525	PIN-SSA(1)	1106,55000	115,30600
PINHEIRO.525	V.AIRES.525	VAI-PIN(1)	1091,10000	7,68767
CURITIBA.525	BLUMENAU.525	CUR-BLU(1)	822,18100	57,24380
S.SANTIAG525	IVAIPORA.525	IVAI-SSA(1)	712,75900	-3,82191
CUR.NORTE525	CURITIBA.525	CURITIBA - CURITIBA II (1)	577,49500	18,31550
IVAIPORA.525	LONDRINA.525	IVA-LON(1)	455,65800	55,15960
IVAIPORA.525	LONDRINA.525	IVA-LON(2)	455,65800	55,15960
AREIA.525	BARRACAO.525	ARE-BAR(1)	325,27200	-68,27230
S.OSORIO.230	P.BRANCO.230	PBR-SOS(1)	252,65400	31,20850
GRAVATAI.230	CECI.230	CECI-GRA(3)	232,27700	77,12920
J.LACERDA230	SIDEROPOL230	SID-JLA(1)	229,45500	87,40660
S.OSORIO.230	XANXERE.230	XAN-SOS(1)	229,28100	12,43650
AREIA.230	S.MATEUS.230	ARE-SMA(1)	211,81500	31,74840
GRAVATAI.230	CECI.230	CECI-GRA(2)	211,63500	67,76550
GRAVATAI.230	CECI.230	CECI-GRA(1)	211,63500	67,76550
AREIA.525	IVAIPORA.525	IVAI-ARE(1)	205,56200	-96,64230
LONDRINA.230	APUCARANA230	APU-LON(2)	205,51700	31,32890
V.AIRES.230	CECI.230	CECI-VAI(2)	203,11900	6,22958
V.AIRES.230	CECI.230	CECI-VAI(1)	201,29000	-1,89310
V.AIRES.230	CECI.230	CECI-VAI(3)	192,00700	5,34253
CURITIBA.230	JOINVILE.230	CUR-JOI(1)	184,55300	28,97000
CURITIBA.230	JOINVILE.230	CUR-JOI(2)	184,55300	28,97000
P.BRANCO.230	XANXERE.230	XAN-PBR(1)	176,14500	-25,91700
SEGREDO.525	S.SANTIAG525	SSA-SEG(1)	172,37300	-32,51740
J.LACERDA230	FORQUILHI230	JLA-FOR(1)	163,82300	63,29690
S.OSORIO.230	C.MOURAO.230	SOS-CMO(2)	155,90200	22,34720
S.OSORIO.230	C.MOURAO.230	SOS-CMO(1)	155,90200	22,34720
LONDRINA.230	APUCARANA230	APU-LON(1)	147,79900	19,51340
S.OSORIO.230	AREIA.230	SOS-ARE(1)	141,78900	-10,57570
P.FUNDO.230	FARROUPIL230	FAR-PFU(1)	132,92200	1,51303
P.FUNDO.230	FARROUPIL230	FAR-PFU(2)	132,92200	1,51303
LONDRINA.230	MARINGA.230	LON-MAR(1)	109,91900	29,45680
LONDRINA.230	MARINGA.230	LON-MAR(2)	109,91900	29,45680
ITAUBA-230A	V.AIRES.230	ITA-VAI(1)	108,02600	9,82076
XANXERE.230	P.FUNDO.230	PFUN-XAN(1)	100,17900	-69,22670
XANXERE.230	P.FUNDO.230	PFU-XAN(2)	100,17900	-69,22670
C.MOURAO.230	MARINGA.230	MAR-CMO(1)	52,75320	-18,01060
BLUMENAU.230	JOINVILE.230	JOI-BLU(2)	49,93700	14,96000
BLUMENAU.230	JOINVILE.230	JOI-BLU(1)	49,93700	14,96000
BLUMENAU.230	R.QUEIMAD230	BLU-RQU(1)	46,21660	-43,00200
BLUMENAU.230	R.QUEIMAD230	BLU-RQU(2)	46,21660	-43,00200
J.LACERDA230	R.QUEIMAD230	RQU-JLA(2)	41,26770	55,79130
J.LACERDA230	R.QUEIMAD230	RQU-JLA(1)	41,26770	55,79130
C.MOURAO.230	APUCARANA230	APU-CMO(1)	39,25710	-30,89390
FORQUILHI230	SIDEROPOL230	SID-FOR(1)	28,02700	-18,91240
CECI.230	FARROUPIL230	FAR-CECI(2)	18,49320	3,34610
CECI.230	FARROUPIL230	FAR-CECI(1)	18,49320	3,34610
S.MATEUS.230	CURITIBA.230	SMA-CUR(1)	10,44980	-44,20830
FARROUPIL230	SIDEROPOL230	SID-FAR(1)	7,28984	-15,87710
ITAUBA-230A	P.FUNDO.230	PFU-ITA(1)	5,65280	-17,40510
APUCARANA230	MARINGA.230	APU-MAR(1)	1,92746	3,87011

A3.2. Tensões Pré-Falha

Nome	Subestação	Tensão (pu)	Tensão (graus)	Geração (MW)	Geração (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
S.OSORIO13.8	S.OSORIO	1,100000	0,412256	1346,94	627,146	0	0
J.LAC.A.13.8	J.LACERDA	1,100000	-41,442600	131,765	89,0995	0	0
P.FUNDO.13.8	P.FUNDO	1,100000	-25,633600	314,773	175,969	0	0
ITAUBA-GER	ITAUBA	1,100000	-24,149000	717,39	292,924	0	0
SEGREDO.13.8	SEGREDO	1,100000	0,008594	1757,11	363,144	0	0
S.SANTIA13.8	S.SANTIAGO	1,100000	2,749750	1647,06	312,303	0	0
F.AREIA.13.8	AREIA	1,100000	-5,143900	1844,7	697,601	0	0
J.LAC.C.13.8	J.LACERDA	1,100000	-37,453600	352,837	208,427	0	0
J.LAC.B.13.8	J.LACERDA	1,100000	-39,278200	175,687	127,393	0	0
BARRACAO13.8	BARRACAO	1,100000	-3,977640	1537,24	557,079	0	0
SEGREDO.525	SEGREDO	1,083010	-5,747610	0	0	0	0
S.SANTIAG525	S.SANTIAGO	1,081190	-6,333940	0	0	0	0
AREIA.525	AREIA	1,063460	-11,208800	0	0	0	0
IVAIPORA.525	IVAIPORA	1,054080	-13,565200	0	0	0	0
ITAUBA-230A	ITAUBA	1,048510	-32,590100	0	0	603,711	183,395
BARRACAO.525	BARRACAO	1,048490	-14,421300	0	0	254,747	-10,9139
S.OSORIO.230	S.OSORIO	1,044380	-7,268900	0	0	411,409	341,399
PINHEIRO.525	PINHEIRO	1,039500	-17,217200	0	0	0	0
P.FUNDO.230	P.FUNDO	1,034820	-32,941600	0	0	250,34	24,6215
J.LACERDA138	J.LACERDA	1,034720	-47,229800	0	0	184,475	52,9734
LONDRINA.525	LONDRINA	1,032620	-16,990800	0	0	0	0
J.LACERDA230	J.LACERDA	1,024950	-45,549400	0	0	0	0
AREIA.230	AREIA	1,017740	-18,920900	0	0	408,477	80,7904
V.AIRES.230	V.AIRES	1,011170	-38,963200	0	0	575,312	-147,721
LONDRINA.230	LONDRINA	1,009000	-20,139600	0	0	335,272	243,568
V.AIRES.525	V.AIRES	1,003660	-35,229500	0	0	0	0
Barra Virtual	FARROUPILHA	1,000000	0,000000	0	0	0	0
Barra Virtual	ITAUBA	1,000000	0,000000	0	0	0	0
ITAUBA-230B	ITAUBA	1,000000	-20,552000	0	0	0	0
Barra Virtual	ITAUBA	1,000000	0,000000	0	0	0	0
P.BRANCO.230	P.BRANCO	0,996415	-19,003300	0	0	67,3462	19,565
XANXERE.230	XANXERE	0,994806	-27,715300	0	0	184,465	62,5531
GRAVATAI.230	GRAVATAI	0,993216	-48,499600	0	0	895,948	-605,55
CECI.230	CECI	0,981076	-49,791900	0	0	1190,2	146,396
APUCARANA230	APUCARANA	0,978921	-25,460400	0	0	383,587	17,5689
GRAVATAI.525	GRAVATAI	0,973520	-42,790200	0	0	0	0
FARROUPIL230	FARROUPILHA	0,967680	-50,690400	0	0	279,619	55,8972
CUR.NORTE525	CURITIBA II	0,966239	-28,417400	0	0	538,778	92,6358
SIDEROPOL230	SIDEROPOLIS	0,964802	-51,577400	0	0	259,139	90,5057
FORQUILHI230	FORQUILHINHA	0,964777	-51,277900	0	0	131,912	73,6026
MARINGA.230	MARINGA	0,962277	-25,508300	0	0	269,389	80,1247
R.QUEIMAD230	R.QUEIMADO	0,960648	-47,089100	0	0	171,297	70,6749
C.MOURAO.230	C.MOURAO	0,960506	-22,349800	0	0	203,507	71,4737
CURITIBA.525	CURITIBA	0,960078	-30,861700	0	0	0	0
CURITIBA.230	CURITIBA	0,956541	-34,670300	0	0	625,158	-33,2743
S.MATEUS.230	S.MATEUS	0,948399	-34,280900	0	0	190,329	39,1306
BLUMENAU.525	BLUMENAU	0,933548	-39,979900	0	0	0	0
BLUMENAU.230	BLUMENAU	0,927654	-43,317000	0	0	620,765	120,586
JOINVILE.230	JOINVILE	0,902804	-45,750000	0	0	453,861	60,5

A3.3. Diagrama Unifilar



A4. Arquivos do MATLAB

Este anexo apresenta os arquivos desenvolvidos no MATLAB para importação e análise dos dados assim como os procedimentos precedentes utilizados para seu uso correto.

A4.1. Exportação *Simulight*

O *Simulight* tem recursos de exportação direto para o *MATLAB* que cria uma variável cujas colunas são os dados dos medidores. Porém, a ordem das colunas da variável dependem do ilhamento dos componentes.

Portanto, desenvolveu-se um pequeno procedimento que importa os dados dos medidores independentemente de sua ordem a partir de um arquivo *CSV* (*Comma Separated Values*), outra opção de exportação do *Simulight*.

A única exigência do procedimento é que os medidores sejam nomeados como “\delta\xx\”, “\omega\xx\”, “\pe\xx\” e “\pm\xx\”, onde “xx” são os números dos geradores em hexadecimal.

A4.2. Classe ESystem

```
classdef ESystem < handle
    properties
        Sbase;           % Potência aparente de base
        fn;              % Frequência nominal
        omegan;         % Velocidade angular nominal
        Ht;             % Constante de inércia H do sistema
        Mt;             % Constante de inércia M do sistema
        NI;             % Número de índices utilizado
        dt;             % Intervalo de tempo do Simulight
        tflt;           % Tempo da contingência
        tcl;            % Tempo de eliminação da contingência
        T;              % Tempo de análise
        p;              % Número de pontos utilizado na análise
        NG = 0;         % Número de Geradores
        Gen = Generator(); % Geradores (classe)
        Flt = Fault();  % Contingências (classe)
        CV;             % Coeficientes de variação
        C;              % Pesos dos índices
    end
    methods

        % Inicialização da classe
        function S = ESystem(sb, f, i, dt, tf, tc, t)
            S.Sbase = sb;
            S.fn = f;
            S.omegan = f * 2 * pi;
            S.NI = i;
            S.dt = dt;
            S.tflt = tf;
            S.tcl = tc;
            S.T = t;
            S.p = int64(S.T / S.dt);
        end

        % Adição de geradores
        function AddGenerators(S, gen)
            for i = 1:size(gen, 1)
                % Potência nominal do gerador
                S.Gen(S.NG + i).Sn = gen(i, 1);

                % Constante de inércia H da máquina
                S.Gen(S.NG + i).H = gen(i, 2);

                % Constante de inércia M da máquina
                S.Gen(S.NG + i).M = 2 * S.Gen(S.NG + i).H * ...
                    S.Gen(S.NG + i).Sn / S.omegan;

                % Constante H na base do sistema
                S.Gen(S.NG + i).Hs = S.Gen(S.NG + i).H * S.Sbase ...
                    / S.Gen(S.NG + i).Sn;
            end

            S.Ht = sum([S.Gen(:).Hs]); % Define Ht
            S.Mt = sum([S.Gen(:).M]); % Define Mt
            S.NG = size(S.Gen, 2); % Define NG
        end

        % Importação dos dados das contingências
        function ImportFaults(S, path)
            allf = dir(path); % Define a pasta com os arquivos .csv

            for i = (3:size(allf, 1))
```

```

% Importa os dados a partir da linha dois (cabeçalho)
data = importdata(allf(i).name, ',', 2);

% Retira o último ponto, pois o Simulight zera todas as
% variáveis
data.data = data.data(1:end-1, :);

% Calcula o ponto da contingência e o da eliminação da
% mesma, respectivamente
pflt = int64(S.tflt/S.dt);
pcl = int64(S.tcl /S.dt + 1);

delta = zeros(size(data.data, 1), S.NG);
omega = zeros(size(data.data, 1), S.NG);
pele = zeros(size(data.data, 1), S.NG);
pm = zeros(size(data.data, 1), S.NG);

for j = (1:size(data.data, 2))
    if j == 1
        % Pega apenas o tempo a analisar
        S.Flt(i-2).t = data.data(pcl:pcl + S.p, j);
    else
        % Converte o conteúdo de cada parte do cabeçalho em
        % texto e procura as marcações "\"
        txt = char(data.colheaders(1, j));
        dels = strfind(txt, '\');

        % Se o medidor for marcado...
        if ~isempty(dels)

            % Pega o número do gerador
            c = hex2dec(txt(dels(2)+1:dels(3)-1)) + 1;

            % Se for ângulo...
            if regexpi(txt(dels(1)+1:dels(2)-1), 'delta') > 0
                delta(:, c) = data.data(:, j);
            end

            % Se for velocidade angular...
            if regexpi(txt(dels(1)+1:dels(2)-1), 'omega') > 0
                omega(:, c) = data.data(:, j);
            end

            % Se for potência elétrica...
            if regexpi(txt(dels(1)+1:dels(2)-1), 'Pe') > 0
                pele(:, c) = data.data(:, j);
            end

            % Se for potência mecânica...
            if regexpi(txt(dels(1)+1:dels(2)-1), 'Pm') > 0
                pm(:, c) = data.data(:, j);
            end
        end
    end
end

% Pega os ângulos pré-falha de cada gerador
S.Flt(i-2).DeltaS = delta(pflt, :) * pi / 180;

% Pega os ângulos de cada gerador no momento da eliminação
% da contingência
S.Flt(i-2).DeltaCl = delta(pcl, :) * pi / 180;

% Pega apenas delta e omega do período de análise

```

```

S.Flt(i-2).Delta = delta(pcl:pcl + S.p, :) * pi / 180;
S.Flt(i-2).Omega = omega(pcl:pcl + S.p, :);

% Calcula o ângulo e a velocidade angular do COI
S.Flt(i-2).DeltaCOI = S.Flt(i-2).Delta * [S.Gen(:).Hs]' / S.Ht;
S.Flt(i-2).OmegaCOI = S.Flt(i-2).Omega * [S.Gen(:).Hs]' / S.Ht;

% Calcula o ângulo e a velocidade angular de cada máquina
% referentes ao COI
S.Flt(i-2).DeltaC = S.Flt(i-2).Delta - ...
    S.Flt(i-2).DeltaCOI * ones(1, S.NG);
S.Flt(i-2).OmegaC = S.Flt(i-2).Omega - ...
    S.Flt(i-2).OmegaCOI * ones(1, S.NG);

% Calcula o ângulo e a velocidade angular pré-falha de cada
% máquina referentes ao COI
S.Flt(i-2).DeltaSC = ones(S.p+1, 1) * S.Flt(i-2).DeltaS - ...
    S.Flt(i-2).DeltaCOI * ones(1, S.NG);

% Pega apenas as potências elétrica e mecânica do período
% de análise
S.Flt(i-2).Pe = pele(pcl:pcl + S.p, :);
S.Flt(i-2).Pm = pm(pcl:pcl + S.p, :);

% Calcula a energia cinética instantânea
S.Flt(i-2).Ek = (S.Flt(i-2).Omega / S.omegan).^2 .* (ones( ...
    S.p+1, 1) * ([S.Gen(:).H] .* [S.Gen(:).Sn]));

% Calcula a energia potencial instantânea
S.Flt(i-2).Ep = zeros(size(S.Flt(i-2).Delta));
for po = 1:1:S.NG
    S.Flt(i-2).Ep(:,po) = cumtrapz(S.Flt(i-2).Delta(:,po), ...
        (S.Flt(i-2).Pe(:,po) - ...
        S.Flt(i-2).Pm(:,po)));
end

% Calcula PCOI e fi (referentes ao método direto)
S.Flt(i-2).PCOI = sum(S.Flt(i-2).Pm - S.Flt(i-2).Pe, 2);
S.Flt(i-2).fi = S.Flt(i-2).Pm - S.Flt(i-2).Pe - ...
    (S.Flt(i-2).PCOI * [S.Gen(:).Hs] / S.Ht);

% Calcula os produtos utilizados nos índices 3, 4 e 5,
% respectivamente
S.Flt(i-2).dot1 = sum(S.Flt(i-2).fi .* S.Flt(i-2).OmegaC, 2);
S.Flt(i-2).dot2 = sum(S.Flt(i-2).fi .* S.Flt(i-2).DeltaC, 2);
S.Flt(i-2).dot3 = sum(S.Flt(i-2).OmegaC .* ...
    (S.Flt(i-2).DeltaC - ones(S.p+1, 1) ...
    * S.Flt(i-2).DeltaC1), 2);

end
end

% Calcula os índices
function GetIndexes(S)

for i = 1:size(S.Flt, 2)

% Índices simples (base)
S.Flt(i).Id(1) = max(max(S.Flt(i).DeltaC) - min(S.Flt(i).DeltaC));
S.Flt(i).Id(2) = max(max(abs(S.Flt(i).Ek - S.Flt(i).Ep)));
S.Flt(i).Id(3) = max(S.Flt(i).dot1) - min(S.Flt(i).dot1);
S.Flt(i).Id(4) = max(S.Flt(i).dot2) - min(S.Flt(i).dot2);
S.Flt(i).Id(5) = max(S.Flt(i).dot3) - min(S.Flt(i).dot3);

% Índice composto 1
S.Flt(i).IC(1) = mean(S.Flt(i).Id);

```



```

end

% Cálculo do coeficiente de variação de cada índice
for j = 1:S.NI

    % aux agrupa um índice de todas as contingências de cada
    % vez
    aux = zeros(size(S.Flt, 2), S.NI);
    for i = 1:size(S.Flt, 2)
        aux(i, j) = S.Flt(i).Id(j);
    end

    % Define CV
    S.CV(j) = std(aux)/mean(aux);
end

% Peso de cada índice
S.C = S.CV / sum(S.CV);

% Calcula índice composto 2
for i = 1:size(S.Flt, 2)
    S.Flt(i).IC(2) = sum(S.Flt(i).Id .* S.C);
end
end
end
end
end

```

A4.3. Classe Generator

```

classdef Generator
    properties
        Sn; % Potência nominal da máquina
        H; % Constante de inércia H da máquina
        Hs; % Constante de inércia H da máquina na base do sistema
        M; % Constante de inércia M da máquina
    end
    methods
        % Inicialização da classe
        function G = Generator()
        end
    end
end
end

```

A4.4. Classe Fault

```

classdef Fault
    properties
        t; % Tempo da simulação da contingência
        DeltaS; % Ângulos dos geradores pré-falha
        DeltaCl; % Ângulos dos geradores no momento da contingência
        Delta; % Ângulos dos geradores durante a contingência
        Omega; % Velocidade dos geradores durante a contingência
        Pe; % Potência Elétrica dos geradores durante a contingência
        Pm; % Potência Mecânica dos geradores durante a contingência
        OmegaCOI; % Ângulo do COI durante a contingência
        DeltaCOI; % Velocidade do COI durante a contingência
        DeltaC; % Ângulos dos geradores com relação ao COI
        OmegaC; % Velocidade dos geradores com relação ao COI
        DeltaSC; % Ângulos pré-falha dos geradores com relação ao COI
        Ek; % Energia cinética dos geradores durante a contingência
    end
end

```

```

        Ep;          % Energia potencial dos geradores durante a contingência
        PCOI;
        fi;
        dot1;       % Produto 1 do índice 3
        dot2;       % Produto 2 do índice 4
        dot3;       % Produto 3 do índice 5
        Id;         % Índices simples
        IC;         % Índices compostos
    end
    methods
        % Inicialização da classe
        function F = Fault()
        end
    end
end
end

```

A4.5. Procedimento

```

path = 'C:\Users\';

%% System
Sys = ESystem(100, 60, 5, 0.005, 1.000, 1.100, 0.500);

%% Generators
Sys.AddGenerators([[247.5 9.552];
                  [192.0 3.333];
                  [128.0 2.353]]);

%% Faults
Sys.ImportFaults(path);

%% Indexes
Sys.GetIndexes();

%% Table Format
for i = 1:size(Sys.Flt, 2)
    x1Id(i, :) = Sys.Flt(i).Id;
    x1IC(i, :) = Sys.Flt(i).IC;
end

clearvars -except Sys x1Id x1IC;

```

O código acima mostra o procedimento executado cujos arquivos CSV estão na pasta “C:\Users\”, com:

- $S_n = 100 \text{ MVA}$;
- $f_n = 60 \text{ Hz}$;
- $NI = 5$;
- $\Delta t = 0,005$;
- $t_f = 1,000$;
- $t_c = 1,100$;
- $T = 0,500 \text{ s}$.