

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**WESLEI ARAÚJO RUFINO**

**ALGORITMO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE  
TRANSITÓRIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA  
CONSIDERANDO FALTAS ASSIMÉTRICAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2017**

**WESLEI ARAÚJO RUFINO**

**ALGORITMO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE  
TRANSITÓRIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA  
CONSIDERANDO FALTAS ASSIMÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Augusto de Souza Benedito

**CURITIBA**

**2017**

Weslei Araújo Rufino

## Algoritmo computacional para análise de estabilidade transitória em sistemas elétricos de potência considerando faltas assimétricas

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 13 de junho de 2017.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarien Gehrke Castagna, Ma.  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

Raphael Augusto de Souza Benedito, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

### BANCA EXAMINADORA

---

Andrea Lucia Costa, Dra.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Raphael Augusto de Souza Benedito, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Roman Kuiava, Dr.  
Universidade Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos, por todo o apoio e incentivo que me deram durante todos esses anos que estive longe de casa em busca deste título de Engenheiro Eletricista.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado saúde, força e sabedoria para superar as dificuldades.

À minha família, pois sem o apoio dela seria muito difícil vencer este desafio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Raphael Augusto de Souza Benedito, por ter aceitado o convite para me orientar e por sua paciência e sempre pronta disposição para ajudar-me durante todo esse trabalho.

Gostaria de agradecer também à Profa. Dra. Andrea Lucia costa, ao Prof. Dr. Diego Issicaba e ao Prof. Dr. Roman Kuiva por terem aceito o convite para fazerem parte das bancas avaliadoras no decorrer deste trabalho e por seus comentários sobre o mesmo.

A todos os professores que tive durante este curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus colegas e amigos que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.

À UTFPR por ter me dado a oportunidade de obter o título de Engenheiro Eletricista.

*“É melhor conseguir sabedoria do que ouro; é melhor ter conhecimento do que a prata”.*

(Provérbios 16:16)

## RESUMO

RUFINO, Wesley Araújo. **Algoritmo computacional para análise de estabilidade transitória em sistemas elétricos de potência considerando faltas assimétricas.**

2017. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

De modo geral, o estudo de estabilidade transitória preocupa-se com a habilidade do sistema de potência permanecer em sincronismo quando submetido à grandes perturbações, ou distúrbios, tais como um curto-circuito em uma linha de transmissão. O foco deste trabalho foi a análise de estabilidade transitória considerando faltas assimétricas, mais precisamente os seguintes tipos de curtos-circuitos: fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra. O objetivo foi apresentar um algoritmo computacional para análise de estabilidade transitória considerando faltas assimétricas e que também pode ser utilizado para análise de faltas simétricas. Tal algoritmo foi de simples implementação e aproveitou muitas das rotinas tradicionais utilizadas em programas de estabilidade que consideram apenas curtos-circuitos trifásicos. Para implementação computacional, utilizou-se o *software* MATLAB®, onde o comportamento dinâmico dos geradores síncronos foi modelado através de equações diferenciais, e a rede elétrica (sistema de transmissão) foi modelada através de equações algébricas. A representação da rede durante a falta foi feita por meio de componentes simétricas, para contemplar tanto as faltas assimétricas quanto as simétricas. A partir do algoritmo desenvolvido, que foi apresentado por meio de fluxogramas, foram apresentados resultados de simulações de faltas assimétricas para verificar o efeito das mesmas sobre o sincronismo das máquinas síncronas. Além disso, o algoritmo calculou o tempo máximo para a atuação da proteção do sistema para evitar-se que a falta cause a perda de sincronismo das máquinas síncronas. Este tempo de eliminação foi utilizado para medir o grau de severidade das perturbações e, com isso, classificar e compará-las. Os resultados mostraram que os diferentes tipos de faltas estudados seguem a seguinte ordem de severidade para os sistemas elétricos estudados neste trabalho: curto-circuito trifásico; curto-circuito fase-fase-terra; curto-circuito fase-fase; e curto-circuito fase-terra. Além disso, também mostraram que o ponto de ocorrência da falta e, conseqüentemente, a configuração do sistema após a eliminação da mesma (sistema pós-falta) foi determinante para haver ou não um ponto de equilíbrio estável para o sistema pós-falta e assim ter-se tempo crítico de abertura.

**Palavras-chave:** Sistemas elétricos de potência. Estabilidade transitória. Sincronismo. Tempo crítico de abertura. Faltas assimétricas.

## ABSTRACT

RUFINO, Wesley Araújo. **Computational algorithm for transient stability analysis of electric power systems considering unsymmetrical faults.** 2017. 81 s. Completion of course work (Bachelor of Electrical Engineering) - Federal University of Technology - Paraná. Curitiba, 2017.

In general, the transient stability problem is concerned with the ability of the power system to remain in synchronism when subjected to a severe disturbance, such as a short circuit on a transmission line. The focus of this work was the transient stability analysis considering unbalanced faults, more precisely the following types of short-circuits: single line-to-ground, line-to-line and double line-to-ground. The goal is to present a computational algorithm for analysis of transient stability considering unbalanced faults and that can also be used to analyze balanced faults. Such algorithm is simple to implement and take advantage of many of the traditional routines used in stability programs that consider only three-phase short-circuits. For the computational implementation, the MATLAB® software was used, where the dynamic behavior of the synchronous generators was modeled by differential equations, and the electric network (transmission system) was modeled by algebraic equations. The network representation during the fault was made through symmetrical components, to contemplate both unsymmetrical and symmetric faults. From the algorithm developed, which was presented through flowcharts, results of unsymmetrical fault simulations were presented to verify the effect of the same on the synchronism of the synchronous machines. Besides that, the algorithm calculated the maximum time for the protection of the system to avoid that the fault causes the loss of synchronism between synchronous machines. This time of elimination was used to measure the severity degree of the disturbances and, with that, classify and compare them. The results showed that the different types of faults studied follow the severity order for the electrical systems studied in this work: three-phase short circuit; double line-to-ground short circuit; line-to-line short circuit; And single line-to-ground short circuit. Furthermore, they also showed that the point of occurrence of the fault and, consequently, the configuration of the system after its elimination (post-fault system) was determinant to have or not a stable equilibrium point for the post-fault system and thus have critical opening time.

**Keywords:** Electrical power systems. Transient stability. Synchronism. Critical opening time. Unsymmetrical faults.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de faltas.....	24
Figura 2.2: Composição de fasores assimétricos a partir de componentes simétricas. (a) Fasores de sequência positiva. (b) Fasores de sequência negativa. (c) Adição de fasores de sequência negativa aos fasores de sequência positiva. (d) Fasores de sequência zero. (e) Adição da soma dos fasores de sequência positiva e negativa aos fasores de sequência zero. ....	27
Figura 2.3: Circuitos equivalentes de sequência zero de bancos de transformadores de dois enrolamentos. ....	30
Figura 2.4: Tipos de curtos-circuitos em uma rede trifásica. ....	31
Figura 2.5: (a) Representação esquemática de uma rede trifásica com terminais no ponto de falta. (b) Representação esquemática das redes de sequência correspondentes.....	32
Figura 2.6: Conexões entre as redes de sequência correspondentes para o tipo de curto-circuito fase-terra em uma rede trifásica. ....	34
Figura 2.7: Conexões entre as redes de sequência correspondentes para o tipo de curto-circuito fase-fase em uma rede trifásica.....	35
Figura 2.8: Conexões entre as redes de sequência correspondentes para o tipo de curto-circuito fase-fase-terra em uma rede trifásica. ....	36
Figura 2.9: Conexões entre as redes de sequência correspondentes para o tipo de curto-circuito trifásico não envolvendo terra. ....	37
Figura 2.10: Conexões entre as redes de sequência correspondentes para o tipo de curto-circuito trifásico envolvendo terra.....	38
Figura 2.11: Representação de faltas em estudos de estabilidade de sistemas.....	40
Figura 3.1: Representação da máquina síncrona dada pelo modelo clássico. ....	41
Figura 3.2: Sistema de uma máquina contra um barramento infinito. ....	42
Figura 3.3: Representação do sistema com o gerador representado por um modelo clássico.....	43
Figura 3.4: Relação entre potência e ângulo.....	44
Figura 3.5: Sistema de potência de uma máquina contra um barramento infinito, ou equivalente a um sistema de duas máquinas. (Exemplo 3.1.) Reatâncias são dadas em pu sobre uma base comum. ....	46

Figura 3.6: Circuito equivalente da rede em regime permanente (sequência positiva). (Exemplo 3.1.).....	47
Figura 3.7: Redução da rede de sequência positiva da para a condição de pré-falta. (Exemplo 3.1.).....	48
Figura 3.8: Rede de sequência positiva com uma falta no meio da linha de transmissão “2”. (Exemplo 3.1.).....	49
Figura 3.9: Redução da rede de sequência positiva da para a condição em falta com um curto-circuito trifásico ( $X_{ef} = 0$ ) no meio da linha de transmissão “2”. (Exemplo 3.1.).....	50
Figura 3.10: Redução da rede de sequência negativa. (Exemplo 3.1.).....	50
Figura 3.11: Redução da rede de sequência zero. (Exemplo 3.1.) .....	51
Figura 3.12: Redução da rede de sequência positiva com uma reatância efetiva de falta ( $X_{ef}$ ) inserida entre o ponto F e o terra, e equação da potência transmitida. (Exemplo 3.1.).....	52
Figura 3.13: Redução da rede de sequência positiva para condição de pós-falta (sem a linha de transmissão 2). (Exemplo 3.1.) .....	54
Figura 3.14: Comportamento dinâmico do gerador síncrono considerando uma falta do tipo curto-circuito fase-fase-terra no meio da linha de transmissão “2” e um $t_{ab} = 0,226 s$ . (Exemplo 3.1.).....	56
Figura 3.15: Comportamento dinâmico do gerador síncrono considerando uma falta do tipo curto-circuito fase-fase-terra no meio da linha de transmissão “2” e um $t_{ab} = 0,227 s$ . (Exemplo 3.1.).....	57
Figura 3.16: Curvas de relação ângulo-potência para as diversas situações apresentadas no Exemplo 3.1.....	58
Figura 4.1: Fluxograma do algoritmo final para análise de estabilidade transitória ...	61
Figura 4.2: Representação da rede de sequência positiva do sistema de potência composto por três máquinas e três barramentos. ....	65
Figura 4.3: Comportamento dinâmico das máquinas síncronas considerando uma falta do tipo curto-circuito fase-fase-terra ocorrido na linha “1-2” próximo à barra “2” e um $t_{ab} = 0,267 s$ . (Exemplo 4.1.) .....	68
Figura 4.4: Comportamento dinâmico das máquinas síncronas considerando uma falta do tipo curto-circuito fase-fase-terra ocorrido na linha “1-2” próximo à barra “2” e um $t_{ab} = 0,268 s$ . (Exemplo 4.1.) .....	69

Figura 4.5: Comportamento dinâmico das máquinas síncronas considerando uma falta do tipo curto-circuito fase-fase-terra ocorrido na linha “1-3” próximo à barra “3” e um $t_{ab} = 2,990$ s. (Exemplo 4.1.) .....	70
Figura 4.6: Comportamento dinâmico das máquinas síncronas considerando uma falta do tipo curto-circuito fase-terra ocorrido na linha “2-3” próximo à barra “2” e um $t_{ab} = 0,001$ s. (Exemplo 4.1.).....	71
Figura A.1: Representação do método de Euler .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Dados de barra para o sistema do Exemplo 3.1 .....	46
Tabela 3.2: Tempo crítico de abertura da proteção para diferentes tipos de faltas...	56
Tabela 4.1: Dados de linha de sequência negativa para o Exemplo 4.1.....	65
Tabela 4.2: Dados de linha de sequência nula para o Exemplo 4.1.....	66
Tabela 4.3: Dados de sequências positiva, negativa e nula das máquinas e dos transformadores para o Exemplo 4.1. ....	66
Tabela 4.4: Tempo crítico de abertura da proteção para diferentes tipos de faltas...	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MATLAB®	<i>Matrix Laboratory</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
pu	por unidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	TEMA .....	17
1.1.1	Delimitação do Tema .....	17
1.2	PROBLEMA E PREMISSAS .....	18
1.3	OBJETIVOS .....	19
1.3.1	Objetivo Geral .....	19
1.3.2	Objetivos Específicos.....	20
1.4	JUSTIFICATIVA .....	20
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	21
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO SOBRE COMPONENTES SIMÉTRICAS E ANÁLISE DE FALTAS ASSIMÉTRICAS .....</b>	<b>23</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	23
2.2	COMPONENTES SIMÉTRICAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS.....	25
2.3	IMPEDÂNCIAS DE SEQUÊNCIAS .....	27
2.4	AS REDES DE SEQUÊNCIA.....	28
2.5	REPRESENTAÇÃO DE TRANSFORMADORES EM REDES DE SEQUÊNCIA .....	29
2.6	REPRESENTAÇÃO DE CURTOS-CIRCUITOS CONSIDERANDO REDES DE SEQUÊNCIA .....	30
2.6.1	Curto-Circuito Fase-Terra Na Fase “a” .....	33
2.6.2	Curto-Circuito Fase-Fase Nas Fases “b” e “c” .....	34
2.6.3	Curto-Circuito Fase-Fase-Terra Nas Fases “b” e “c” .....	35
2.6.4	Curto-Circuito Trifásico Não Envolvendo Terra.....	37
2.6.5	Curto-Circuito Trifásico Simétrico Envolvendo Terra. ....	38
2.7	REPRESENTAÇÃO DAS IMPEDÂNCIAS EQUIVALENTES DE COMPONENTES SIMÉTRICAS NO PONTO DE FALTA .....	39

<b>3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE CONSIDERANDO FALTAS SIMÉTRICAS E ASSIMÉTRICAS.....</b>	<b>41</b>
3.1 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA.....	41
3.2 EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA.....	45
<b>4 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO FINAL PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA CONSIDERANDO FALTAS SIMÉTRICAS E ASSIMÉTRICAS.....</b>	<b>60</b>
4.1 FLUXOGRAMA DO ALGORITMO .....	61
4.2 APLICAÇÃO DO ALGORITMO FINAL PARA UM SISTEMA DE TRÊS BARRAS .....	64
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>73</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	74
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A – CÓDIGO DO ALGORITMO PARCIAL IMPLEMENTADO NO MATLAB PARA RESOLUÇÃO DO EXEMPLO 3.1.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO A – MÉTODO DE INTEGRAÇÃO NUMÉRICA.....</b>	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os vários objetivos da gestão de energia e operação de sistemas elétricos, pode-se dizer que o principal é o suprimento do seu mercado de energia elétrica, levando-se em consideração três aspectos: continuidade, qualidade e economia. Considerando que o principal desses três aspectos é o da continuidade, o estudo de estabilidade em sistemas de potência é de fundamental importância para prevenção e análise de distúrbios que possam afetar os mesmos (KUNDUR *et al.*, 2004).

Nesse contexto, o estudo de estabilidade contempla o ajuste dos equipamentos de proteção, para que os mesmos atuem de forma satisfatória, na ocorrência de distúrbios (por exemplo: faltas), evitando que o problema afete todo o sistema elétrico interligado. Além disso, os sistemas elétricos exigem um alto grau de confiabilidade, robustez e segurança, para que o fornecimento de energia elétrica seja o mais contínuo possível, ou seja, com o mínimo de interrupções.

Dentre os desafios apresentados pelos sistemas elétricos de potência, o problema de estabilidade é um dos mais complexos da engenharia elétrica. O mesmo exige métodos automáticos e ferramentas sofisticadas de análise, além da qualificação dos engenheiros de sistemas de potência (KUNDUR, 1994).

O termo "estabilidade" já constava nos trabalhos de Euler em 1749. No final do século XIX, surgem definições matemáticas exatas de estabilidade para sistemas dinâmicos e teoremas de estabilidade para sistemas não lineares. Em 1920, surgem os primeiros problemas relacionados à estabilidade em sistemas elétricos de potência (STEINMETZ, 1920). Em 1924, os resultados dos primeiros testes de laboratórios sobre sistemas em miniaturas são reportados (EVANS, BERGVALL, 1924). Em 1925, são realizados os primeiros testes de campo com relação ao tema de estabilidade em sistemas elétricos de potência (WILKINS, 1926) (EVANS, WAGNER, 1926).

Segundo Kundur (1994), tradicionalmente, pode-se dividir o problema de estabilidade de acordo com os seguintes fatores:

- ❖ Dependendo do tempo de análise:
  - Curto prazo ou transiente: 0 até 10 segundos;
  - Médio prazo: 10 segundos até poucos minutos;
  - Longo prazo: poucos minutos até dezenas de minutos.

- ❖ Dependendo do tipo de perturbação:
  - Perturbações imprevisíveis:
    - Grandes perturbações (curtos-circuitos) ou pequenas perturbações (variações de carga).
  - Perturbações previsíveis:
    - Variações lentas e previsíveis de carga.
- ❖ Dependendo da variável de interesse:
  - Ângulo do rotor;
  - Tensão;
  - Frequência.

Pode-se definir estabilidade do sistema elétrico de potência como a sua capacidade de voltar ao seu estado inicial de equilíbrio após ser submetido a um distúrbio físico; ou seja, de voltar às suas condições normais de operação pré-falta (KUNDUR, 1994). Estes distúrbios podem ser manifestados de diferentes formas e localidades em um sistema de potência, dependendo de como é a sua configuração física e o seu ponto de operação.

Uma condição necessária para que um sistema de potência opere adequadamente é que todas as suas máquinas síncronas operem em sincronismo, ou seja, que suas velocidades mecânicas estejam em sincronismo com a frequência elétrica do sistema onde elas estão conectadas. Entretanto, dependendo da magnitude e tipo de perturbação a que o sistema seja submetido, os geradores síncronos podem perder o sincronismo. Por exemplo, quando um curto-circuito trifásico (falta simétrica) ocorre próximo a uma unidade geradora, a mesma poderá acelerar a tal ponto que leve à perda do sincronismo com o resto do sistema.

Na literatura da área há uma vasta quantidade de trabalhos que versam sobre o problema de estabilidade transitória considerando faltas simétricas, como, por exemplo, curtos-circuitos trifásicos e aberturas tripolares de circuitos. Entretanto, o foco deste trabalho será a análise de estabilidade considerando faltas assimétricas, mais precisamente os seguintes tipos de curtos-circuitos: fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra.

## 1.1 TEMA

Analisar a estabilidade de ângulo do rotor do gerador síncrono. Este tipo de estabilidade se refere à habilidade das máquinas síncronas permanecerem em sincronismo após a ocorrência de uma perturbação. Depende, fundamentalmente, da capacidade de manter ou restaurar o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque mecânico do gerador síncrono do sistema.

O fenômeno de instabilidade ocorre na forma de oscilações ou “balanços” crescentes de ângulo de potência do rotor de alguns geradores, de modo a causar a perda de sincronismo entre as máquinas, ou em apenas uma delas. Isto porque, os desvios de posição angular dos rotores alteram o torque eletromagnético, aumentando o desequilíbrio entre torque mecânico e torque eletromagnético (KUNDUR *et al.*, 2004).

A mudança no torque eletromagnético de uma máquina síncrona devido a uma perturbação pode ser decomposta em duas componentes: torque sincronizante - está em fase com o desvio do ângulo do rotor; e torque de amortecimento - está em fase com o desvio de velocidade do ângulo do rotor. Ambos componentes do torque (de cada máquina) influenciam na estabilidade: carência de torque sincronizante (suficiente) resulta em instabilidade não-periódica ou não-oscilatória; carência em torque de amortecimento resulta em instabilidade oscilatória.

A estabilidade de ângulo ainda pode ser subdividida em duas categorias: estabilidade transitória (ou à grandes perturbações), que será o objeto de estudo deste trabalho, e estabilidade à pequenas perturbações.

### 1.1.1 Delimitação do Tema

Especificamente, neste trabalho foi abordada a análise do comportamento transitório de um sistema de potência quando este é submetido à faltas assimétricas, como curtos-circuitos fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra. Esta categoria se preocupa com a habilidade do sistema de potência permanecer em sincronismo quando submetido à grandes perturbações, ou distúrbios, tais como um curto-circuito em uma linha de transmissão (KUNDUR *et al.*, 2004).

Com a aplicação do *software* MATLAB®<sup>1</sup>, foi modelado o comportamento dinâmico dos geradores síncronos, através de equações diferenciais, e a rede elétrica (sistema de transmissão) foi modelada através de equações algébricas. A partir desta modelagem, foram feitas simulações de faltas assimétricas para verificar o efeito das mesmas sobre o sincronismo dos geradores síncronos.

Na sequência, foi estudado o tempo máximo de atuação da proteção do sistema para evitar-se que a falta cause a perda de sincronismo das máquinas síncronas. Normalmente, este tempo de eliminação da falta precisa ser menor que 1 segundo para garantir a estabilidade do sistema. Por isto, é importante calcular o tempo crítico de atuação dos disjuntores, ou seja, para que o mesmo abra seus contatos e elimine a passagem da corrente de falta pelos enrolamentos do gerador.

## 1.2 PROBLEMA E PREMISAS

O problema da estabilidade transitória dos sistemas elétricos de potência vem sendo bastante estudado, pois é muito importante garantir a integridade dos equipamentos que compõe um sistema elétrico de potência e, conseqüentemente, o seu bom funcionamento. Contudo, com sistemas cada vez maiores e complexos, cada um com suas características particulares, é difícil encontrar uma solução definitiva para este problema. Fica evidente que os estudos nesta área não podem parar e que há muito que se estudar. Ainda, pode-se concluir que o gerador é o elemento principal de uma usina e, também, seu componente mais caro; com isto, fica evidente a importância do estudo dos impactos que estas instabilidades eletromecânicas podem trazer para o mesmo.

Quando uma grande perturbação ocorre em um sistema elétrico, como um curto-circuito assimétrico, o seu ponto de equilíbrio é alterado significativamente à medida que o tempo passa. Assim, os equipamentos de proteção devem atuar o mais rápido possível para evitar que a falta persista e os geradores síncronos percam o

---

<sup>1</sup> MATLAB® é uma marca registrada da *MathWorks, Inc.* Mais informações em: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com). Neste trabalho foi utilizada a versão 2016a do MATLAB, através de uma licença individual paga pelo estudante sob o número: 40462972.

sincronismo entre eles. Deste modo, define-se que o sincronismo entre as máquinas durante um período transitório (por exemplo, até 3 segundos) após uma perturbação é sinônimo de sistema transitoriamente estável; por sua vez, sistema transitoriamente instável implica em perda de sincronismo entre as máquinas síncronas durante um período transitório.

Inicialmente supõe-se que o sistema esteja operando em sua condição normal quando ocorre uma falta trifásica, por exemplo, no tempo  $t=0$ . Como a configuração da rede muda pela ação do curto, a potência fornecida, que está relacionada à sua configuração, também muda. Durante este período, o comportamento do sistema é descrito por suas equações diferenciais; isto ocorre até o momento de abertura do dispositivo de proteção, que isolará a falta. Após a eliminação da falta, novamente a sua configuração é alterada, e o sistema operará em nova condição desde o tempo de abertura até o tempo máximo de análise (ou infinito).

Um dos maiores interesses nos estudos de estabilidade transitória está no cálculo do tempo crítico de abertura, ou tempo máximo em que o defeito pode ser eliminado de forma a garantir o sincronismo. Assim, para calcular o tempo crítico faz-se necessário a solução das equações diferenciais que traduzem a dinâmica dos geradores e da rede elétrica. Tal tarefa é realizada através de métodos numéricos, podendo ser: explícitos (por exemplo, Euler, Runge-Kutta); e implícitos (por exemplo, Trapezoidal).

Este trabalho partiu da modelagem clássica do gerador por equações diferenciais e usou o método numérico desenvolvido por Euler para a resolução das mesmas através do *software* MATLAB.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é apresentar um algoritmo computacional para análise de estabilidade transitória considerando faltas assimétricas, e que também pode ser utilizado para análise de faltas simétricas.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- ❖ Analisar as perturbações do tipo curto-circuito assimétrico.
- ❖ Aplicar o método passo-a-passo de análise de estabilidade transitória e o método de integração numérica de Euler.
- ❖ Ajustar o valor de tempo crítico de abertura dos disjuntores após a ocorrência da falta, visando a permanência do sincronismo dos geradores síncronos.
- ❖ Desenvolver e implementar um algoritmo de estabilidade transitória utilizando o *software* MATLAB.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

A estabilidade de um sistema elétrico de potência está diretamente ligada à continuidade do fornecimento de energia elétrica para grande parte ou, talvez, para todos os consumidores daquele sistema. Isto tudo depende da importância do sistema em questão. Com isto, o estudo desta estabilidade é de muita importância, pois o mesmo pode levar a solução do problema de se encontrar o tempo crítico para que a proteção deste sistema deva atuar para que um mínimo de danos e descontinuidade de fornecimento aconteça.

Grainger e Stevenson (1994) destacam que a experiência tem mostrado que entre 70 e 80% de faltas nas linhas de transmissão são do tipo fase-terra, que surge da descarga elétrica de apenas uma linha para a torre de transmissão e à terra. Aproximadamente 5% de todas as faltas envolvem todas as três fases, ou seja, faltas trifásicas simétricas. Então, pode-se verificar que a maior ocorrência de faltas sobre os sistemas elétricos de potência é do tipo faltas assimétricas, que pode ser constituída de curtos-circuitos assimétricos, faltas assimétricas através de impedâncias, ou abertura de condutores.

A partir dessas considerações, pode-se constatar a importância do estudo dos efeitos negativos que as faltas assimétricas podem trazer para a estabilidade transitória de um sistema e, conseqüentemente, também, para o sincronismo de todo o sistema elétrico.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente, foi realizada a revisão bibliográfica sobre o tema de estudo deste trabalho, a partir de livros e artigos científicos que trouxeram informação sobre o mesmo. Após esta etapa, foi iniciada a modelagem matemática do gerador síncrono através de equações diferenciais e aplicado o Método Numérico de Euler, utilizado para soluções de equações diferenciais.

Posteriormente, com o equacionamento matemático todo desenvolvido, foi dado início ao processo de programação no *software* MATLAB para resolução do problema de encontrar o tempo crítico de abertura, ou tempo máximo em que o defeito deve ser eliminado de forma a garantir o sincronismo.

Foi elaborado um algoritmo computacional parcial, a partir do qual foram feitas simulações de faltas em um sistema elétrico de potência, conforme Exemplo 3.1, consistindo de uma estação hidroelétrica enviando potência, através da geração de tensão em duas linhas de transmissão em paralelo, para um sistema metropolitano, que pode ser considerado um barramento infinito.

Posteriormente, foi elaborado o algoritmo computacional final para simulação de sistemas maiores e mais complexos que aquele de duas barras do Exemplo 3.1, a partir do qual foram feitas simulações para solução do problema de encontrar-se o tempo crítico para eliminação de faltas simétricas e assimétricas para um sistema de três barras, conforme Exemplo 4.1.

Por fim, foram apresentadas as considerações finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho é descrita a seguir:

Capítulo 1 – Introdução com apresentação e delimitação do tema, problemas e premissas, objetivo geral, objetivos específicos, justificativa e procedimentos metodológicos.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica sobre componentes simétricas e análise de faltas assimétricas.

Capítulo 3 – Análise de estabilidade considerando faltas simétricas e assimétricas, representação do sistema elétrico para estudo de estabilidade transitória e equacionamento do problema.

Capítulo 4 – Desenvolvimento e apresentação do fluxograma do algoritmo final para análise de estabilidade transitória considerando faltas simétricas e assimétricas, descrição dos testes realizados, das simulações e apresentação dos resultados obtidos sobre o tempo crítico de eliminação da falta.

Capítulo 5 – Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO SOBRE COMPONENTES SIMÉTRICAS E ANÁLISE DE FALTAS ASSIMÉTRICAS

### 2.1 INTRODUÇÃO

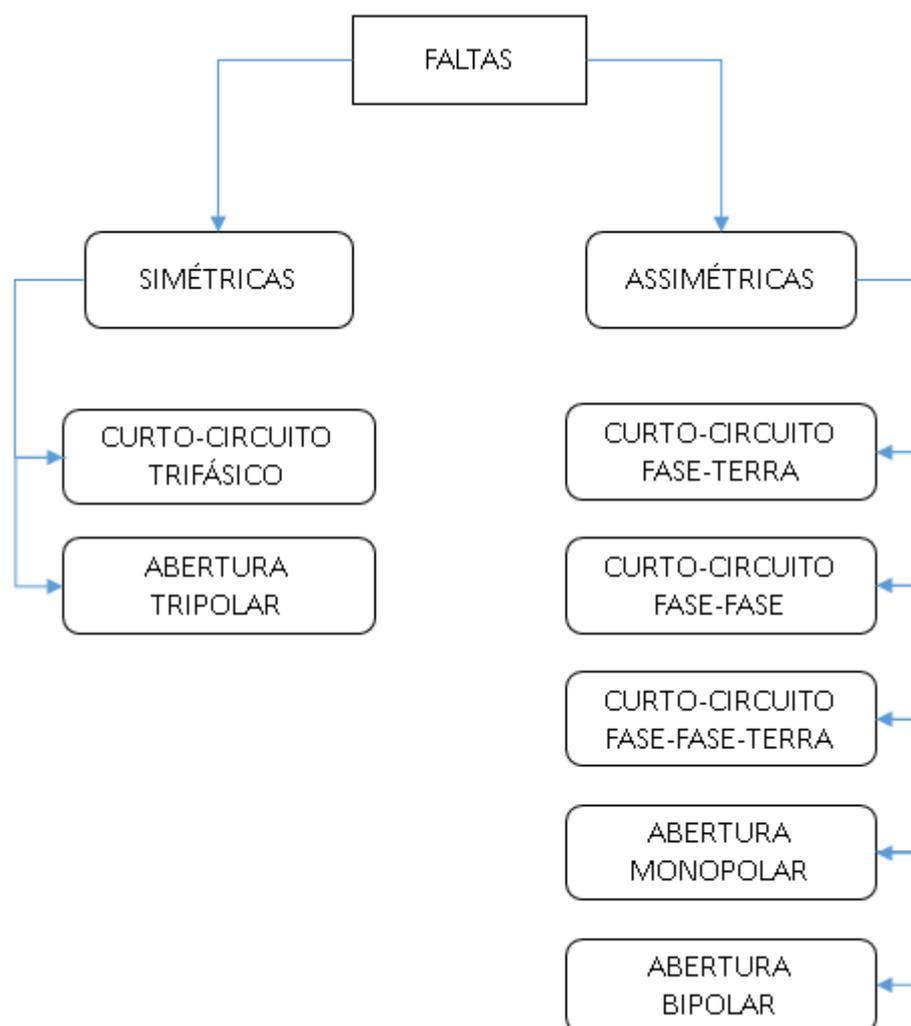
A grande maioria dos sistemas de potência são trifásicos, mas, desde que eles sejam simétricos e balanceados, eles podem ser representados em uma única fase baseado em fase-neutro ou fase-terra para o propósito de cálculos, o que se leva a uma maior simplicidade para análise dos mesmos. Sistemas trifásicos de geração e transmissão são normalmente simétricos ou muito perto disso durante condições normais e também durante faltas trifásicas. Já durante outros tipos de faltas, tais como curtos-circuitos fase-terra, fase-fase ou fase-fase-terra, os sistemas trifásicos são assimétricos, e a representação em uma única fase não é suficiente para representação e análise dos mesmos. Em tais casos, uma das ferramentas mais poderosas para se lidar com circuitos polifásicos desbalanceados é o método de componentes simétricas introduzido por C. L. Fortescue (GRAINGER; STEVENSON, 1994) (KIMBARK, 1995) (FORTEESCUE, 1918).

O trabalho de Fortescue prova que um sistema desbalanceado de “n” fasores relacionados pode ser representado através de “n” sistemas de fasores balanceados chamados de componentes simétricas dos fasores originais. Os “n” fasores de cada conjunto de componentes são iguais em comprimento, e os ângulos entre fasores adjacentes do conjunto são iguais (GRAINGER; STEVENSON, 1994). Apesar do método ser aplicado para qualquer sistema polifásico desbalanceado, este trabalho se limitará à análise dos sistemas trifásicos.

Em um sistema trifásico que é normalmente balanceado, condições de faltas desbalanceadas geralmente causam a existência de correntes e tensões desbalanceadas em cada uma das fases. Se as correntes e tensões são relacionadas através de impedâncias constantes, o sistema é chamado de linear e o princípio da superposição se aplica. A resposta de tensão do sistema linear para as correntes desbalanceadas pode ser determinada considerando as respostas separadas dos elementos individuais para as componentes simétricas das correntes. Os elementos

do sistema de interesse são as máquinas, linhas de transmissão, transformadores e cargas conectadas por configurações Y ou  $\Delta$  (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

Como citado anteriormente no Capítulo 1, a maioria das faltas (ou defeitos) que ocorrem em sistemas de potência são faltas assimétricas, que podem consistir de curtos-circuitos assimétricos (através de impedâncias, franco ou através de arco elétrico) ou abertura de condutores. Já faltas simétricas podem consistir de curtos-circuitos trifásicos ou de abertura tripolar do circuito devido a atuação inadequada da proteção. A Figura 2.1 mostra um diagrama que representa os diversos tipos de faltas.



**Figura 2.1: Tipos de faltas.**

**Fonte: Autoria Própria.**

As faltas simétricas podem ocorrer por curtos-circuitos trifásicos, que ocorrem devido ao contato entre as três fases simultaneamente, podendo, ainda, haver ou não contato com a terra; e, também, por aberturas tripolares de circuitos.

Curtos-circuitos assimétricos ocorrem devido ao contato entre uma fase e o terra (fase-terra), contato entre duas fases (fase-fase), ou contato entre duas fases e o terra (fase-fase-terra). O caminho da corrente de falta de fase para fase ou de fase para terra pode ou não conter impedância.

Além dos curtos-circuitos, outros tipos de faltas assimétricas podem ocorrer; por exemplo, a abertura de uma fase (abertura monopolar) ou a abertura de duas fases (abertura bipolar), quer seja através da quebra de um ou dois condutores ou da ação de fusíveis e outros equipamentos que podem não abrir as três fases simultaneamente.

Tendo em vista que o foco deste trabalho é a análise da estabilidade considerando curtos-circuitos assimétricos, a próxima subseção apresenta os fundamentos matemáticos sobre componentes simétricas.

## 2.2 COMPONENTES SIMÉTRICAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

No método de componentes simétricas um conjunto assimétrico de fasores<sup>2</sup> (sequência) de correntes ou tensões é representado através de conjuntos simétricos de componentes. A partir disto, dada uma sequência qualquer de fasores trifásicos, representada por:

$$\vec{\mathbf{V}}_{a,b,c} = \vec{\mathbf{V}}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

existe, e é única, uma sequência direta, uma sequência inversa e uma sequência nula que somadas reproduzem a sequência dada. De outra forma: uma sequência qualquer de fasores trifásicos pode ser decomposta em três outras sequências (direta, inversa e nula) e esta decomposição é única.

Matematicamente, a Equação 2.1 pode ser decomposta em componentes simétricas da seguinte forma:

---

<sup>2</sup> Neste trabalho, fasores são indicados em **negrito** e sequência de fasores trifásicos também em **negrito** e com uma  $\vec{\phantom{a}}$  em cima para diferenciá-los.

$$\vec{V}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} = \vec{V}_0 + \vec{V}_1 + \vec{V}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{a0} \\ \mathbf{V}_{b0} \\ \mathbf{V}_{c0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{a1} \\ \mathbf{V}_{b1} \\ \mathbf{V}_{c1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{a2} \\ \mathbf{V}_{b2} \\ \mathbf{V}_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{a0} + \mathbf{V}_{a1} + \mathbf{V}_{a2} \\ \mathbf{V}_{b0} + \mathbf{V}_{b1} + \mathbf{V}_{b2} \\ \mathbf{V}_{c0} + \mathbf{V}_{c1} + \mathbf{V}_{c2} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

sendo,  $\vec{V}_0$  a sequência nula,  $\vec{V}_1$  a sequência direta, e  $\vec{V}_2$  a sequência inversa<sup>3</sup>.

Utilizando-se o operador  $\mathbf{a} = 1\angle 120^\circ$  ( $\mathbf{a}^2 = 1\angle 240^\circ = 1\angle -120^\circ$ ), tem-se:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_0 &= \mathbf{V}_{a0} = \mathbf{V}_{b0} = \mathbf{V}_{c0} \\ \mathbf{V}_1 &= \mathbf{V}_{a1}; \mathbf{V}_{b1} = \mathbf{a}^2\mathbf{V}_1; \mathbf{V}_{c1} = \mathbf{a}\mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 &= \mathbf{V}_{a2}; \mathbf{V}_{b2} = \mathbf{a}\mathbf{V}_2; \mathbf{V}_{c2} = \mathbf{a}^2\mathbf{V}_2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

e substituindo na equação 2.2, resulta:

$$\vec{V}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} = \mathbf{V}_0 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \mathbf{V}_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}^2 \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} + \mathbf{V}_2 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a} \\ \mathbf{a}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 + \mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 \\ \mathbf{V}_0 + \mathbf{a}^2\mathbf{V}_1 + \mathbf{a}\mathbf{V}_2 \\ \mathbf{V}_0 + \mathbf{a}\mathbf{V}_1 + \mathbf{a}^2\mathbf{V}_2 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Outra expressão para a equação 2.4 é a seguinte:

$$\vec{V}_a = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = T \cdot \vec{V}_{0,1,2}. \quad (2.5)$$

Sendo:

- ❖  $T$  a matriz de transformação de componentes simétricas;
- ❖  $\vec{V}_{0,1,2}$  sequência de fasores de componentes simétricas.

A matriz  $T$  não é singular, isto é, existe a matriz  $T^{-1}$ . Desta forma, a seguinte expressão é válida:

$$\vec{V}_{0,1,2} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = T^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a + \mathbf{V}_b + \mathbf{V}_c \\ \mathbf{V}_a + \mathbf{a}\mathbf{V}_b + \mathbf{a}^2\mathbf{V}_c \\ \mathbf{V}_a + \mathbf{a}^2\mathbf{V}_b + \mathbf{a}\mathbf{V}_c \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

A interpretação gráfica dos fasores das componentes simétricas pode ser feita a partir da Figura 2.2.

---

<sup>3</sup> Sequência direta pode, também, ser chamada de sequência positiva; sequência inversa pode, também, ser denominada por sequência negativa; e sequência nula pode, também, ser chamada por sequência zero.

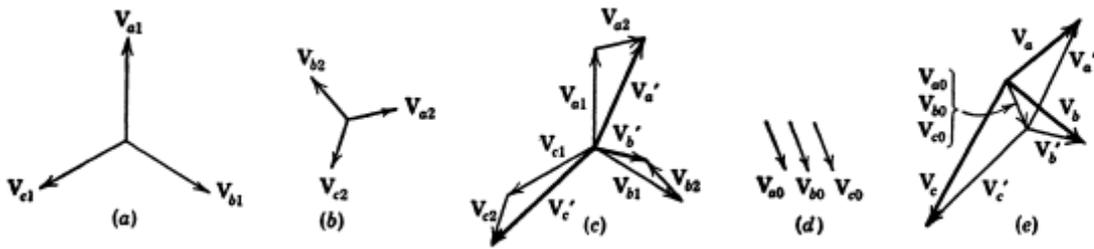


Figura 2.2: Composição de fasores assimétricos a partir de componentes simétricas.

(a) Fasores de sequência positiva. (b) Fasores de sequência negativa. (c) Adição de fasores de sequência negativa aos fasores de sequência positiva. (d) Fasores de sequência zero. (e) Adição da soma dos fasores de sequência positiva e negativa aos fasores de sequência zero.

Fonte: Kimbark, 1995.

Com base na decomposição de uma sequência  $\vec{V}_a$  de fasores em suas componentes simétricas, define-se (ROBBA, 1972):

- ❖ Sequência trifásica simétrica:  $\rightarrow V_1 \neq 0; V_2 = V_0 = 0;$
- ❖ Sequência trifásica pura:  $\rightarrow V_1 \neq 0; V_2 \neq 0, V_0 = 0;$
- ❖ Sequência trifásica impura:  $\rightarrow V_1 \neq 0; V_2 \neq 0, V_0 \neq 0$

Até aqui foram adotados apenas fasores de tensão no estudo de componentes simétrica, entretanto o Teorema de Fortescue (1918) aplica-se igualmente a quaisquer fasores associados a uma máquina ou a um circuito trifásico, tais como corrente elétrica, como segue:

$$\vec{\mathbf{I}}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

e também é válido para:

$$\vec{\mathbf{I}}_{0,1,2} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

### 2.3 IMPEDÂNCIAS DE SEQUÊNCIAS

Segundo Kimbark (1995), um circuito trifásico balanceado é um circuito que contempla as seguintes características: conexões similares em todas as três fases, impedâncias próprias iguais nas três fases, e impedâncias mútuas iguais entre cada

par de fases. A afirmação que as três sequências são independentes significa que as correntes de cada sequência de fase vão produzir quedas de tensão apenas da mesma sequência de fase.

A relação de tensão fasorial de sequência para corrente fasorial de sequência pode ser chamada de impedância complexa de sequência; assim  $Z_0$  é a impedância de sequência zero;  $Z_1$ , a impedância de sequência positiva; e  $Z_2$ , a impedância de sequência negativa. Para qualquer circuito trifásico estático, ou seja, com frequência nominal da rede, as impedâncias de sequência positiva e sequência negativa são iguais. Para máquinas rotativas, porém, a impedância de sequência positiva normalmente difere da impedância de sequência negativa, por causa das reatâncias mútuas entre o rotor e os enrolamentos do estator (KIMBARK, 1995).

## 2.4 AS REDES DE SEQUÊNCIA

Em uma rede trifásica balanceada as componentes simétricas de tensão e corrente obedecem às leis e teoremas de circuitos elétricos. Há assim boa justificativa para o conceito de redes de sequência.

A rede trifásica existente, representada pelas fases “a”, “b” e “c”, é substituída, para o propósito de facilitar a análise, por três redes monofásicas fictícias, em que as componentes simétricas ou tensões e correntes de sequência existam. Elas são a *rede de sequência positiva*, em que a tensão e corrente de sequência positiva existam; a *rede de sequência negativa*, em que a tensão e corrente de sequência negativa existam; e a *rede de sequência zero*, em que a tensão e corrente de sequência zero existam. A partir do diagrama de uma linha é preparado um diagrama em que todos os elementos elétricos significantes do sistema de potência são representados em uma base de fase única (fase-neutro ou fase-terra) por seus circuitos equivalentes de sequência positiva com valores adequados de impedância. A rede de sequência negativa é muito similar à rede de sequência positiva, mas difere pelos seguintes aspectos: (1) geralmente não há forças eletromotrizes geradas de sequência negativa; (2) a impedância de sequência negativa de máquinas rotativas é diferente da impedância de sequência positiva; e (3) o deslocamento de fase de bancos de transformadores para sequência negativa é de sinal oposto daquela para sequência positiva. A rede de sequência zero difere muito das outras duas em que (1) a

impedância de linhas de transmissão é maior que para sequência positiva; e (2) os circuitos equivalentes de transformadores são diferentes (KIMBARK, 1995).

Desde que a rede trifásica seja *balanceada*, as três redes de sequências são independentes uma da outra; isto é, elas não são conectadas ou acopladas uma à outra. Mas onde a rede trifásica é desbalanceada, há uma conexão ou acoplamento entre duas ou três das redes de sequência nos pontos correspondentes de desbalanceamento (KIMBARK, 1995). A natureza da conexão ou acoplamento entre as redes de sequência será determinada na seção 2.6 para os tipos de desbalanceamentos mais importante em estudos de estabilidade, que é para os curtos-circuitos.

## 2.5 REPRESENTAÇÃO DE TRANSFORMADORES EM REDES DE SEQUÊNCIA

Em estudos de estabilidade transitória, o circuito equivalente de sequência positiva de um banco de transformador de dois enrolamentos, com corrente de excitação desprezada, consiste apenas de uma impedância série<sup>4</sup> (KIMBARK, 1995).

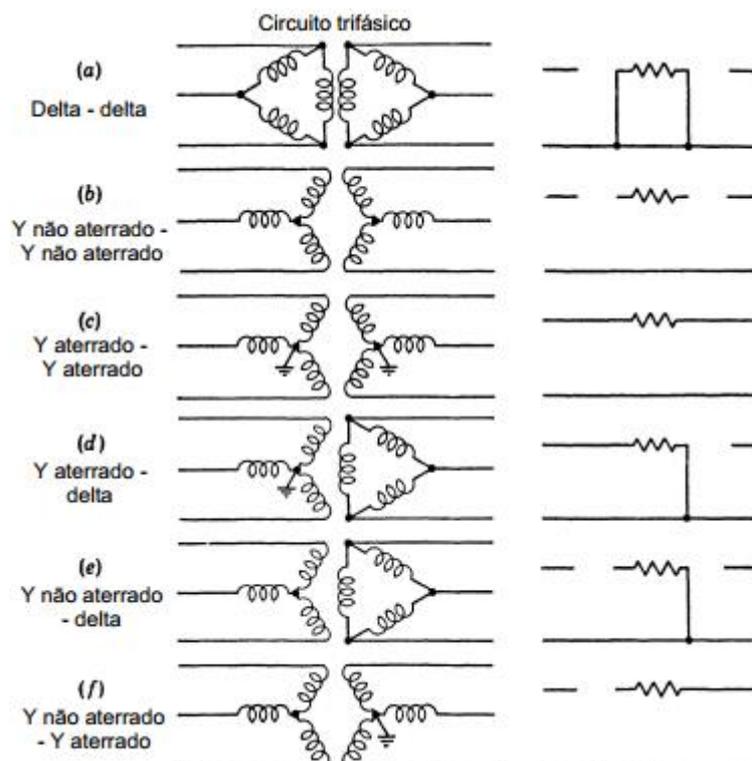
Já o circuito equivalente de sequência negativa de um banco de transformador será igual ao circuito de sequência positiva, considerando a sequência positiva representada apenas por uma impedância (KIMBARK, 1995).

O circuito equivalente de sequência zero não será igual ao de sequência positiva e negativa, principalmente devido ao tipo de conexão do lado primário e do lado secundário, que influencia a circulação da corrente de sequência zero (KIMBARK, 1995) (KUNDUR, 1994).

Os circuitos equivalentes de sequência zero de bancos de transformadores de dois enrolamentos são mostrados na Figura 2.3.

---

<sup>4</sup> Em um modelo exato, o circuito equivalente de sequência positiva do transformador é representado por uma impedância série e um transformador ideal com relação complexa.



**Figura 2.3: Circuitos equivalentes de sequência zero de bancos de transformadores de dois enrolamentos.**

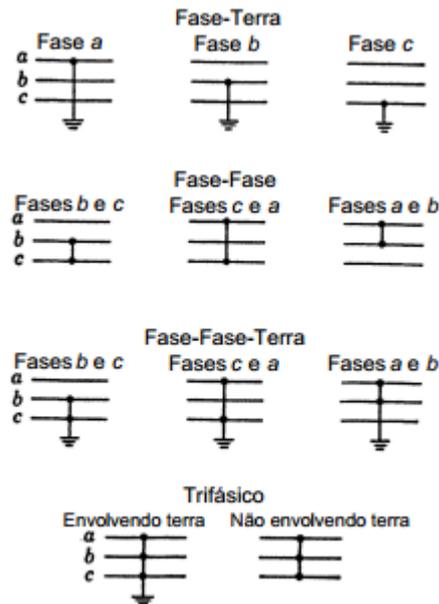
**Fonte: Kimbark, 1995.**

Tanto a Figura 2.3(c), que mostra uma conexão do tipo Y aterrado - Y aterrado, quanto a Figura 2.3(d), Y aterrado -  $\Delta$ , apresenta um caminho para a corrente de sequência zero. As outras conexões são equivalentes a um circuito aberto na rede de sequência zero (KUNDUR, 1994).

## 2.6 REPRESENTAÇÃO DE CURTOS-CIRCUITOS CONSIDERANDO REDES DE SEQUÊNCIA

Curto-circuitos em um sistema trifásico podem ser classificados através dos seguintes tipos: fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásico. Curto-circuitos trifásicos podem, ainda, ser classificados através daqueles envolvendo a terra e daqueles não envolvendo a terra. Os outros tipos podem, ainda, ser classificados por

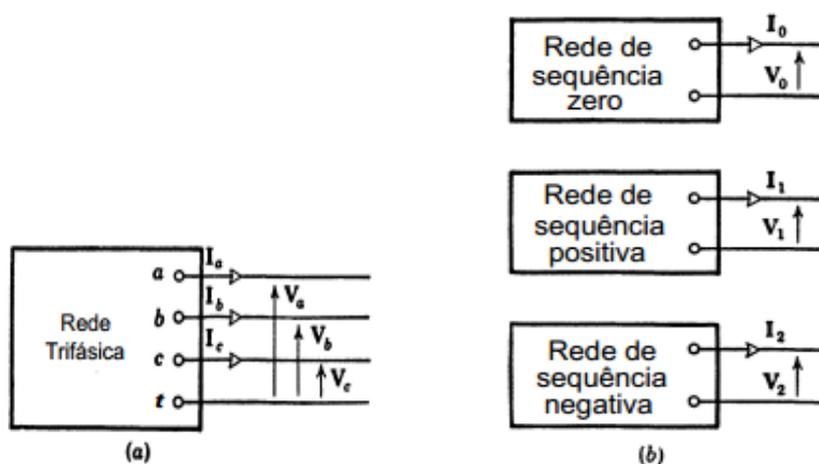
suas fases envolvidas. Os diferentes tipos de curto-circuito são mostrados esquematicamente na Figura 2.4 (KIMBARK, 1995).



**Figura 2.4: Tipos de curtos-circuitos em uma rede trifásica.**

Fonte: Kimbark, 1995.

A rede trifásica, qualquer que seja sua forma, pode ser simbolizada por quatro terminais no ponto de falta, nomeadamente, fases “a”, “b” e “c” e o terminal terra ou neutro, como mostrado na Figura 2.5(a). Diferentes tipos de curtos-circuitos podem ser aplicados para a rede fazendo as conexões apropriadas entre dois, três, ou quatro terminais. Cada uma das três redes de seqüências pode ser representada similarmente por uma caixa contendo dois terminais em seu ponto de falta (terminal de fase e terminal de neutro ou terra) como mostrado na Figura 2.5(b). As conexões entre esses terminais, correspondendo às conexões entre os terminais da rede trifásica, vão ser derivadas (KIMBARK, 1995).



**Figura 2.5: (a) Representação esquemática de uma rede trifásica com terminais no ponto de falta. (b) Representação esquemática das redes de sequência correspondentes.**

Fonte: Kimbark, 1995.

As faltas assimétricas podem ser ocasionadas por:

- ❖ Curto-circuito franco, ou seja, pelo contado direto com a terra;
- ❖ Através de impedâncias e fases;
- ❖ E ainda, por fase em aberto.

Geralmente, as faltas podem ter alguma impedância, principalmente a resistência de arco-elétrico entre condutores. Em circuitos de alta tensão essa resistência é normalmente desprezível em comparação com as outras impedâncias da rede, e não é considerada nos cálculos. Em faltas envolvendo a terra pode haver resistência adicional no caminho para a terra através das torres de transmissão ou através do objeto causador da falta. Essa resistência também é normalmente desprezada em estudos de estabilidade, assim simplificando os cálculos e dando resultados para a condição mais severa para qual o sistema pode submetido (KIMBARK, 1995). A partir disto, neste trabalho a impedância de falta também foi desprezada, ou seja, considerar-se-a apenas curtos-circuitos francos. Além disso, as seguintes considerações foram feitas:

- ❖ O estudo contempla redes de transmissão;
- ❖ As redes são todas balanceadas com transposição de linhas (fases) e são desprezadas as indutâncias e capacitâncias mútuas.

### 2.6.1 Curto-Circuito Fase-Terra Na Fase “a”.

Como dito anteriormente, este é o tipo de falta mais frequente em sistemas de potência, e ocorre quando há contato entre uma fase e a terra. Este curto-circuito, conforme mostrado na Figura 2.6(a), gera as seguintes condições de contorno: a tensão fase-terra da fase em contato direto com a terra é zero, e as correntes que fluem durante a falta nas duas fases sem defeito são zero, para isso, desprezando-se a corrente de carga pré-falta; que geram as seguintes equações de contorno:

$$\mathbf{V}_a = 0 \quad (2.9)$$

$$\mathbf{I}_b = 0 \quad (2.10)$$

$$\mathbf{I}_c = 0 \quad (2.11)$$

Das Equações 2.9 e 2.4

$$\mathbf{V}_0 + \mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 = 0 \quad (2.12)$$

Das Equações 2.10, 2.11, e 2.8

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 = \frac{1}{3} \mathbf{I}_a$$

De onde

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 \quad (2.13)$$

Uma *conexão em série* das três redes de sequência, conforme mostrado na Figura 2.6(b), satisfaz essas equações.

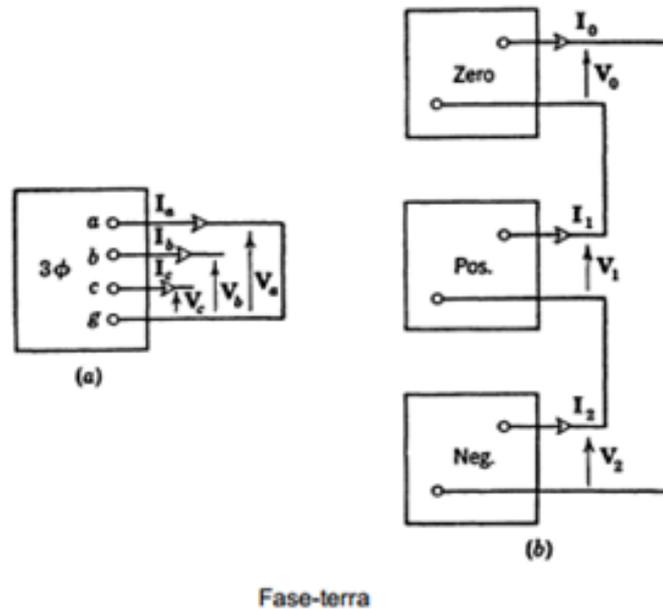


Figura 2.6: Conexões entre as redes de sequência correspondentes para o tipo de curto-circuito fase-terra em uma rede trifásica.

Fonte: Kimbark, 1995.

### 2.6.2 Curto-Circuito Fase-Fase Nas Fases “b” e “c”.

Este tipo de falta ocorre quando existe contato entre duas fases, conforme ilustrado na Figura 2.7(a). Para esta falta, as equações das condições de contorno são:

$$V_b = V_c \quad (2.14)$$

$$I_a = 0 \quad (2.15)$$

$$I_b + I_c = 0 \quad (2.16)$$

Substituindo as Equações 2.4 na Equação 2.14,

$$V_0 + a^2V_1 + aV_2 = V_0 + aV_1 + a^2V_2$$

Subtraindo  $V_0$  de ambos os lados e rearranjando, obtém-se

$$V_1(a^2 - a) = V_2(a^2 - a)$$

De onde

$$V_1 = V_2 \quad (2.17)$$

Substituindo as Equações 2.15 e 2.16 na expressão para  $I_0$  da Equação 8, obtém-se

$$I_0 = 0 \quad (2.18)$$

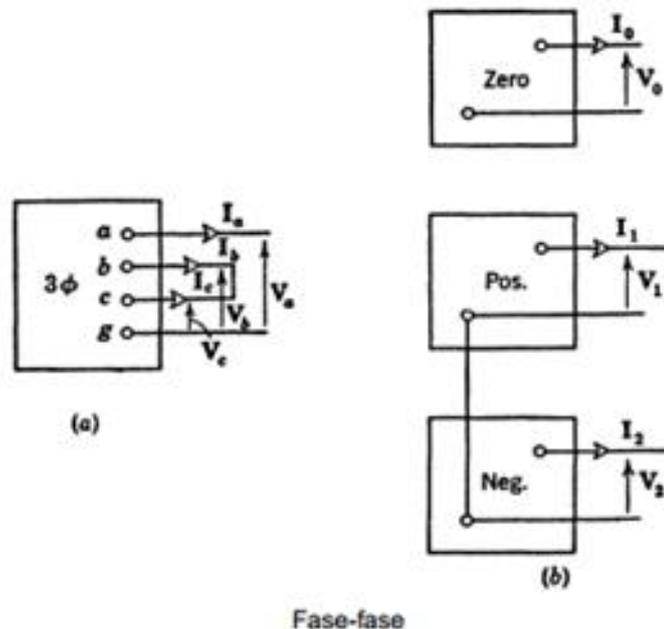
Substituindo a Equação 2.18 nas expressões para  $I_b$  e  $I_c$  da Equação 2.8 e substituindo os resultados na Equação 2.16, obtém-se

$$(a^2 + a)(I_1 + I_2) = 0$$

ou

$$(I_1 + I_2) = 0 \quad (2.19)$$

Com isto, conclui-se que em faltas fase-fase não existe a componente de sequência zero, e, além disto, as correntes de sequência direta e inversa são iguais em módulo. Estas relações são realizadas por uma conexão paralela das redes de sequência positiva e negativas, deixando a rede de sequência zero em circuito aberto, conforme pode-se verificar na Figura 2.7(b).



**Figura 2.7: Conexões entre as redes de sequência correspondentes para o tipo de curto-circuito fase-fase em uma rede trifásica.**

**Fonte: Kimbark, 1995.**

### 2.6.3 Curto-Circuito Fase-Fase-Terra Nas Fases “b” e “c”.

Neste tipo de curto-circuito, além de haver contato entre duas fases, ocorre também o contato com a terra, conforme mostrado na Figura 2.8(a). Para esta falta, as equações das condições de contorno são:

$$I_a = 0 \quad (2.20)$$

$$V_b = 0 \quad (2.21)$$

$$V_c = 0 \quad (2.22)$$

Das Equações 2.20 e 2.7

$$I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (2.23)$$

Das Equações 2.21, 2.22, e 2.6

$$V_0 = V_1 = V_2 = \frac{1}{3} V_a$$

De onde

$$V_0 = V_1 = V_2 \quad (2.24)$$

Estas equações são realizadas por uma conexão paralela das três redes de seqüência, conforme ilustrado na Figura 2.8(b).

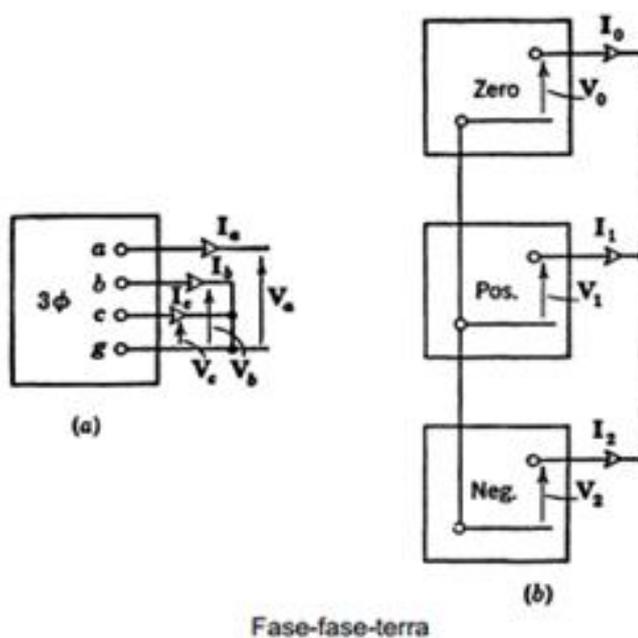


Figura 2.8: Conexões entre as redes de seqüência correspondentes para o tipo de curto-circuito fase-fase-terra em uma rede trifásica.

Fonte: Kimbark, 1995.

### 2.6.4 Curto-Circuito Trifásico Não Envolvendo Terra.

Para esta falta, conforme mostrado na Figura 2.9(a), as equações das condições de contorno são:

$$\mathbf{V}_a = \mathbf{V}_b = \mathbf{V}_c \quad (2.25)$$

$$\mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c = 0 \quad (2.26)$$

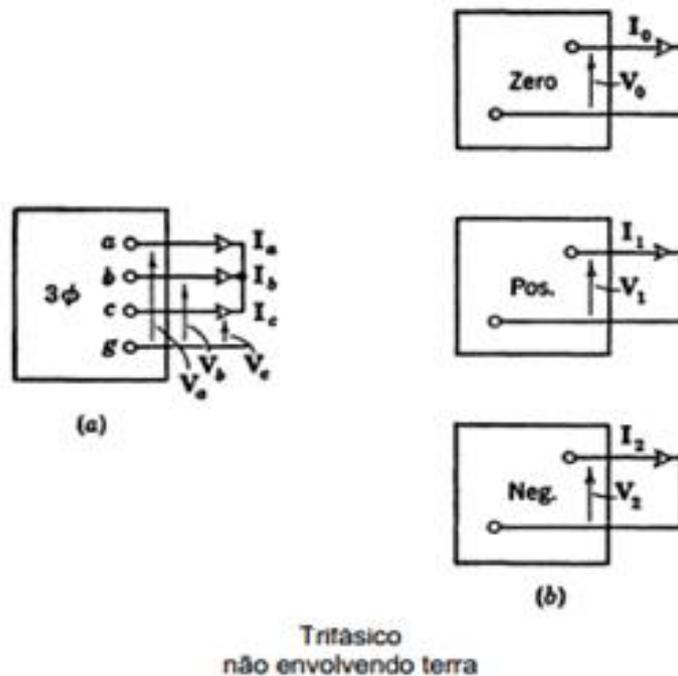
Substituindo as Equações 2.25 na equação 2.6, obtém-se

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2 = \frac{1}{3} \mathbf{V}_a (1 + \mathbf{a} + \mathbf{a}^2) = 0 \quad (2.27)$$

Substituindo a Equação 2.26 na equação 2.8 para  $\mathbf{I}_0$ :

$$\mathbf{I}_0 = 0 \quad (2.28)$$

Estas relações são satisfeitas curto-circuitando as redes de sequência positiva e negativa e deixando a rede de sequência zero em circuito aberto, como ilustrado na Figura 2.9(b).



**Figura 2.9: Conexões entre as redes de sequência correspondentes para o tipo de curto-circuito trifásico não envolvendo terra.**

Fonte: Kimbark, 1995.

### 2.6.5 Curto-Circuito Trifásico Simétrico Envolvendo Terra.

Para esta falta, conforme mostrado na Figura 2.10(a), as equações das condições de contorno são:

$$V_a = 0 \quad (2.29a)$$

$$V_b = 0 \quad (2.29b)$$

$$V_c = 0 \quad (2.29c)$$

As equações correspondentes para componentes simétricas são:

$$V_0 = 0 \quad (2.30a)$$

$$V_1 = 0 \quad (2.30b)$$

$$V_2 = 0 \quad (2.30c)$$

O circuito equivalente consiste de um curto-circuito em cada uma das três redes de sequência, como pode-se verificar na Figura 2.10(b).

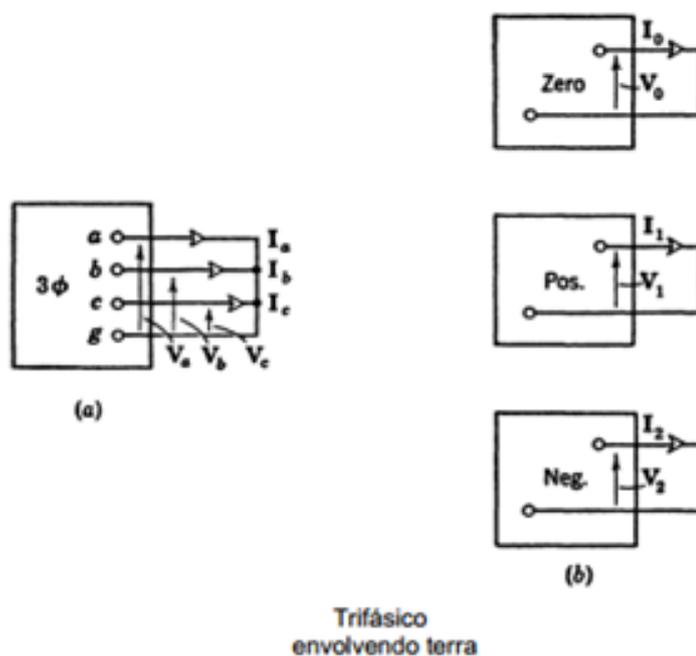


Figura 2.10: Conexões entre as redes de sequência correspondentes para o tipo de curto-circuito trifásico envolvendo terra.

Fonte: Kimbark, 1995.

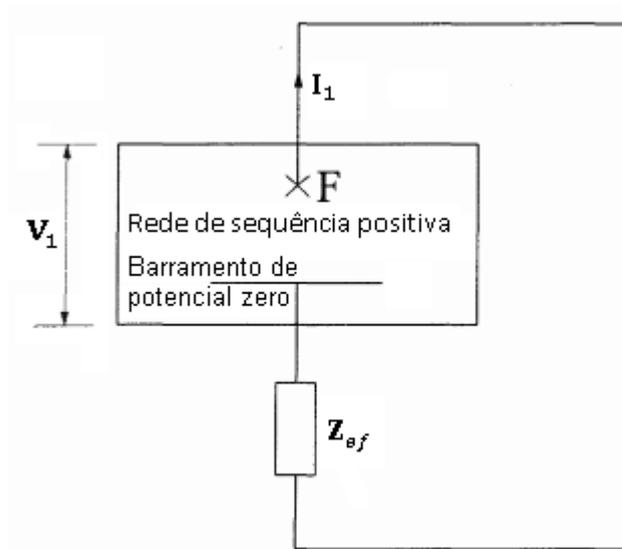
## 2.7 REPRESENTAÇÃO DAS IMPEDÂNCIAS EQUIVALENTES DE COMPONENTES SIMÉTRICAS NO PONTO DE FALTA

Desde de que as forças eletromotrizes de uma máquina síncrona trifásica são de sequência positiva, e desde que nenhuma potência resulte da combinação de tensões de sequência positiva com correntes de sequência negativa ou zero, a potência gerada de uma máquina síncrona e a potência sincronizante entre as várias máquinas de um sistema de potência são potências de sequência positiva. Portanto, a rede de sequência positiva é de interesse primário em um estudo de estabilidade, e as redes de sequência zero e negativa são apenas de interesse secundário (KIMBARK, 1995).

De fato, as tensões e correntes, de sequência negativa e zero, ao longo do sistema, normalmente não são de interesse em estudos de estabilidade. Portanto, é desnecessário simular as redes de sequência negativa e zero completas em simulações de estabilidade de sistemas. Seus efeitos podem ser representados por impedâncias equivalentes ( $Z_0$  e  $Z_2$ ) como visto no ponto de falta "F". Essas impedâncias são combinadas apropriadamente dependendo do tipo de falta e inseridas como a impedância efetiva de falta  $Z_{ef}$  na rede de sequência positiva como mostrado na Figura 2.11 (KUNDUR, 1994).

A fórmula para a impedância efetiva de falta  $Z_{ef}$  pode ser determinada a partir da inspeção das conexões entre as redes de sequência para representar os tipos de curtos-circuitos (Figura 2.6 a Figura 2.10). O curto-circuito fase-terra é representado por uma conexão com a rede de sequência positiva no ponto de falta da combinação série das redes de sequência zero e negativa; o curto-circuito fase-fase é representado ao ligar assim a rede de sequência negativa apenas; e o curto-circuito fase-fase-terra é representado pela combinação paralela das redes de sequência zero e negativa conectadas à rede de sequência positiva no ponto de falta. Com isto, as impedâncias efetivas de faltas  $Z_{ef}$  são como seguem:

Tipo de Curto-Circuito	Impedância efetiva de falta, $Z_{ef}$	
Fase-terra	$Z_0 + Z_2$	(2.31)
Fase-fase	$Z_2$	(2.32)
Fase-fase-terra	$\frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2}$	(2.33)
Trifásico	0	(2.34)



**Figura 2.11: Representação de faltas em estudos de estabilidade de sistemas.**

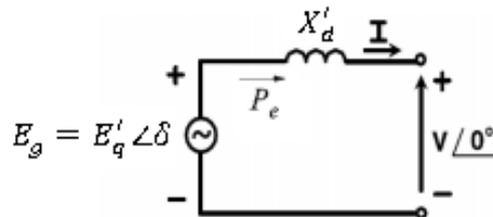
Fonte: Kundur, 1994.

Esta representação fornece as correntes e tensões corretas na rede de sequência positiva.

### 3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE CONSIDERANDO FALTAS SIMÉTRICAS E ASSIMÉTRICAS

#### 3.1 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Em estudos de estabilidade transitória, geralmente, o modelo adotado para o gerador síncrono é o modelo “clássico”. Neste modelo a representação elétrica do gerador é representada apenas por uma tensão transitória atrás da reatância transitória de eixo direto, conforme mostrado na Figura 3.1.



**Figura 3.1: Representação da máquina síncrona dada pelo modelo clássico.**

**Fonte: Adaptado de Kundur, 1994.**

Sendo,

$X'_d$  = Reatância transitória de eixo direto, dada em pu;

$E'_q$  = Tensão interna transitória do gerador em regime permanente de eixo em quadratura, tensão essa igual a tensão terminal da máquina síncrona em aberto, dada em pu;

$V$  = Tensão terminal do gerador, dada em pu;

$\delta$  = Ângulo de carga do gerador, este é igual à defasagem entre a tensão interna e a tensão terminal do gerador, dado em radianos elétricos.

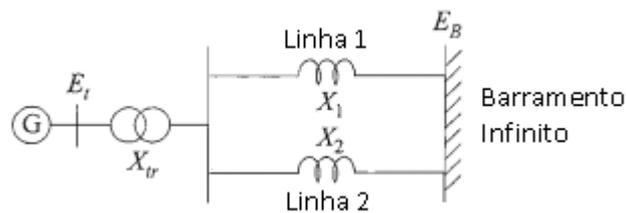
Além da representação elétrica, o modelo clássico contempla a equação dinâmica de oscilação eletromecânica do gerador. Tal equação é representada a seguir.

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = M\ddot{\delta} = P_m - P_e \quad (3.1)$$

onde

- $P_m$  = Potência mecânica de entrada, em pu;
- $P_e$  = Potência elétrica de saída, em pu;
- $H$  = Constante de inércia, em MW. s/MVA;
- $\delta$  = Ângulo do rotor, dado em radianos elétricos;
- $t$  = Tempo, em s;
- $\omega_0 = 2\pi f_0$ , onde  $f_0$  é a frequência síncrona do sistema;
- $M$  = constante de inércia do gerador síncrono.

Agora, considera-se o sistema mostrado na Figura 3.2, consistindo de um gerador entregando potência para um grande sistema, representado por um barramento infinito, através de duas linhas de transmissão. Um barramento infinito representa uma fonte de tensão de magnitude de tensão constante e frequência constante (Kundur, 1994).

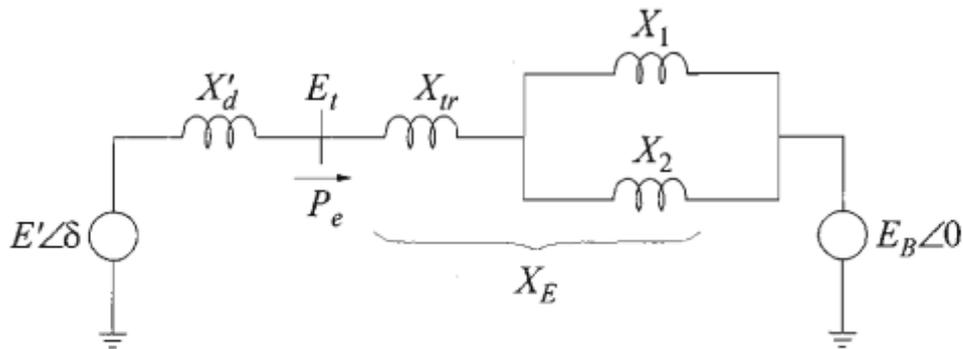


**Figura 3.2: Sistema de uma máquina contra um barramento infinito.**

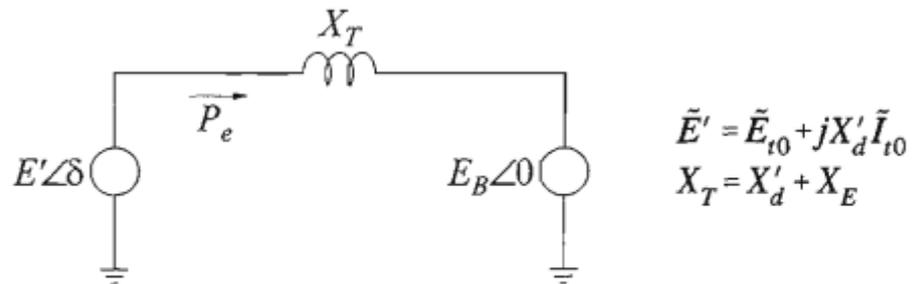
Fonte: Kundur, 1994.

Serão apresentados conceitos fundamentais e princípios de estabilidade transitória analisando a resposta do sistema à grandes perturbações, usando modelos simples. Todas as resistências são negligenciadas. O gerador é representado pelo modelo clássico e os efeitos do regulador de velocidade são negligenciados. A representação do sistema correspondente é mostrada na Figura 3.3(a). A tensão atrás da reatância transiente ( $X'_d$ ) é denotada por  $E'$ . O ângulo  $\delta$  do rotor representa a defasagem angular entre a tensão interna  $E'$  e a tensão do barramento infinito  $E_B$ . Quando o sistema é perturbado, a magnitude de  $E'$  permanece constante no seu valor

pré-distúrbio, e  $\delta$  muda conforme a velocidade do rotor do gerador desvia da velocidade síncrona  $\omega_0$  (KUNDUR, 1994).



(a) Circuito equivalente



(b) Circuito equivalente reduzido

**Figura 3.3: Representação do sistema com o gerador representado por um modelo clássico.**

**Fonte: Kundur, 1994.**

O sistema modelo pode ser reduzido para a forma mostrada na Figura 3.3(b). Ele pode ser analisado usando métodos analíticos simples e é útil para se adquirir uma compreensão básica do fenômeno de estabilidade transitória. Com a resistência do estator negligenciada, a potência de entreferro ( $P_e$ ) é igual à potência terminal ( $P$ ). Em valores por unidade (pu), o torque de entreferro é igual à potência de entreferro. Conseqüentemente,

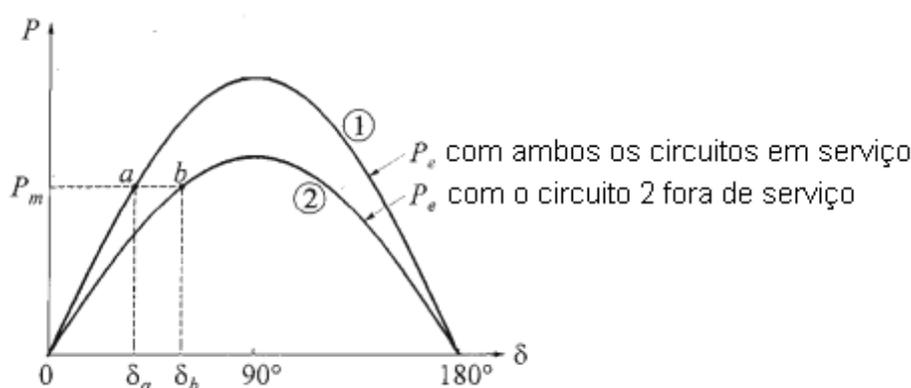
$$T_e = P_e = \frac{E' E_B}{X_T} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \quad (3.2)$$

onde

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{E' E_B}{X_T} \quad (3.3)$$

é a máxima potência elétrica de saída, dada em pu.

A relação entre potência e ângulo com ambas as linhas de transmissão em serviço (E/S) é mostrada graficamente na Figura 3.4 como a curva “1”. Com uma potência mecânica de entrada de  $P_m$ , a saída de potência elétrica em regime permanente  $P_e$  é igual à  $P_m$ , e a condição de operação é representada pelo ponto “a” sobre a curva. O ângulo correspondente do rotor é  $\delta_a$ .



**Figura 3.4: Relação entre potência e ângulo.**

**Fonte: Kundur, 1994.**

Se uma das linhas de transmissão está fora de serviço (F/S), a reatância efetiva  $X_T$  é maior que da situação anterior, ou seja, com as duas linhas operando em paralelo. A relação potência-ângulo sem a linha de transmissão “2” é mostrada na Figura 3.4 como a curva “2”. A potência máxima agora é menor. Com a potência mecânica de entrada de  $P_m$ , o ângulo do rotor agora é  $\delta_b$  correspondendo ao ponto de operação “b” sobre a curva “2”, pois no instante que a linha de transmissão “2” é retirada de serviço, o ângulo  $\delta$  acelera, buscando assim um novo ponto de equilíbrio. Também com a reatância maior, o ângulo do rotor deve ser maior para transmitir a mesma potência elétrica de regime permanente (KUNDUR, 1994).

Durante a perturbação, a oscilação de  $\delta$  é sobreposta na velocidade síncrona  $\omega_0$ , mas o desvio da velocidade ( $\Delta\omega_r = d\delta/dt$ ) é muito menor que  $\omega_0$ ; portanto, a velocidade do gerador é praticamente igual à  $\omega_0$ , e o torque de entreferro em valores por unidade (pu) pode ser considerado igual à potência de entreferro em pu.

Agora, conhecendo-se o valor de  $P_e$ , a equação de movimento ou a equação de oscilação pode ser escrita da seguinte forma

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = M\ddot{\delta} = P_m - P_e = P_m - P_{m\acute{a}x} \text{sen } \delta \quad (3.4)$$

### 3.2 EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA

A partir das ferramentas apresentadas até aqui, para à análise do problema da estabilidade transitória, a seguir será apresentado o primeiro exemplo onde foi analisado o tempo máximo da atuação da proteção para a eliminação da falta permanente aplicada ao sistema, considerando faltas simétricas e faltas assimétricas, para que os geradores síncronos não percam o sincronismo com o restante do sistema.

#### **Exemplo 3.1** (adaptado de Kimbark, 1995 e Kundur, 1994)

Determinar o tempo máximo da atuação da proteção para a eliminação da falta permanente, que ocorre no meio da linha de transmissão 2 como mostrado na Figura 3.5, para os seguintes tipos de curtos-circuitos: (a) trifásico, (b) fase-terra, (c) fase-fase e (d) fase-fase-terra. A falta é eliminada por uma abertura simultânea dos disjuntores conectados em ambos os extremos da linha. O sistema consiste de uma estação hidroelétrica enviando potência através da geração de tensão em duas linhas de transmissão em paralelo para um sistema metropolitano que pode ser considerado um barramento infinito. Os seguintes dados pertencem ao sistema.

Reatância transitória de eixo direto dos geradores hidroelétricos: 0,35 por unidade (pu)

Energia armazenada dos geradores hidroelétricos,  $H$ : 5,00 Mj. por Mva. (5 pu de potência\*s ou 5s)

Frequência: 60 Hz

Tensão atrás da reatância transitória dos geradores hidroelétricos: 1,00 pu

Tensão do barramento infinito: 1,00 pu

Reatância de cada linha de transmissão: 0,40 pu (resistência desprezada)

Reatância dos transformadores de potência: 0,10 pu

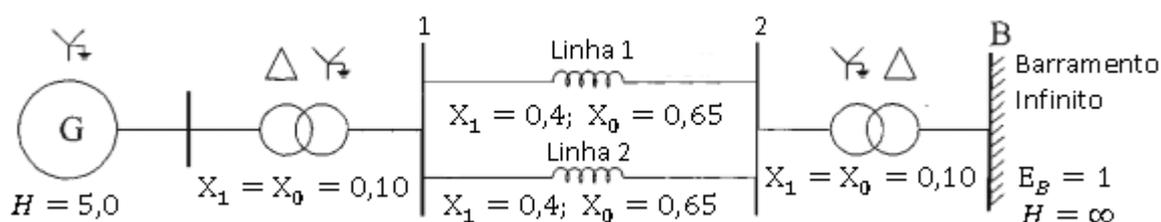
As reatâncias de sequência negativa e zero por unidade são dadas como seguem:

Geradores:  $X_2 = 0,24$ ;  $X_0 = 0,06$

Cada linha de transmissão:  $X_2 = 0,40$ ;  $X_0 = 0,65$

Transformadores:  $X_2 = X_0 = 0,10$

Os transformadores são conectados Y- $\Delta$  com neutro do enrolamento em Y solidamente aterrado, assim como o neutro do estator do gerador.



**Figura 3.5: Sistema de potência de uma máquina contra um barramento infinito, ou equivalente a um sistema de duas máquinas. (Exemplo 3.1.) Reatâncias são dadas em pu sobre uma base comum.**

Fonte: Adaptado de Kundur, 1994.

Os dados de barra do sistema seguem na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1: Dados de barra para o sistema do Exemplo 3.1**

Barra	Tipo	V (pu)	$\theta$ (rad)	Pliq (pu)
1	PV	1,00	?	1,0
2	PQ	?	?	0
B	Referência	1,00	0	-1,0

Fonte: Autoria própria.

**Solução parte 1:** regime permanente e condição Pré-falta

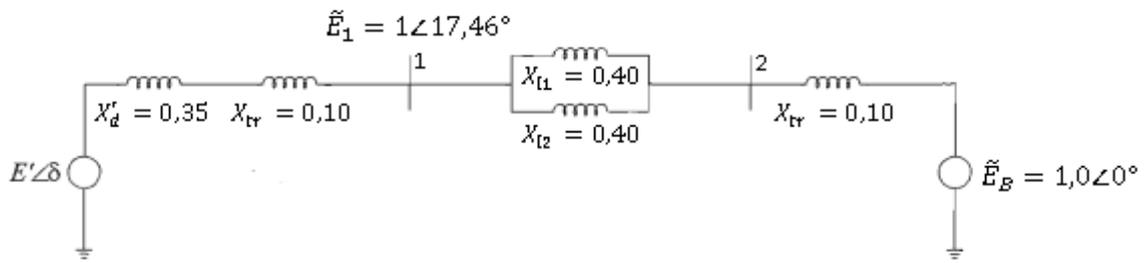
Como o barramento “2” é um barramento de transferência, ou seja, toda potência de entrada é igual a de saída (potência ativa e reativa), então, utilizou-se o equivalente entre o barramento “1” e o barramento infinito “B” para o cálculo do ângulo da tensão da barra “1”, como segue abaixo.

$$P_{1liq} = P_{1B} = \frac{E_1 * E_B}{X_{1B}} * \text{sen}(\theta_1 - \delta_B)$$

Sendo  $\delta_B = 0$ , tem-se

$$1 = \frac{1 * 1}{0,3} * \text{sen}(\theta_1 - 0) \rightarrow \theta_1 = \text{sen}^{-1}(0,3) = 17,46^\circ$$

Com o gerador representado por um modelo clássico, o circuito do sistema equivalente é como mostrado na Figura 3.6.



**Figura 3.6: Circuito equivalente da rede em regime permanente (sequência positiva). (Exemplo 3.1.)**

Fonte: Adaptado de Kundur, 1994.

Para a condição inicial de operação, a tensão atrás da reatância  $X'_d$  é:

$$E' = \tilde{E}_1 + j(X'_d + X_{tr1}) * \tilde{I}_{1B}$$

Primeiramente, encontra-se o valor da corrente  $\tilde{I}_{1B}$  entre a barra 1 e o barramento infinito B:

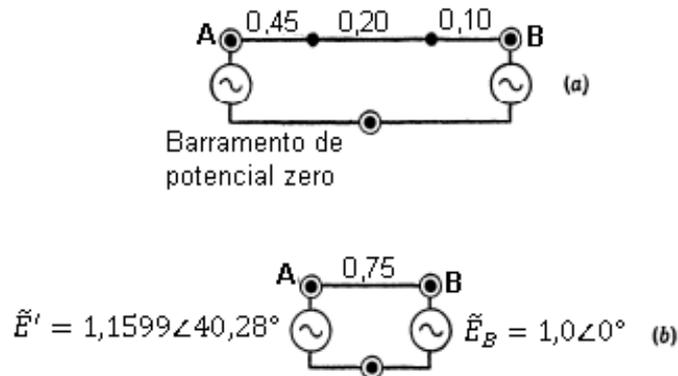
$$\tilde{I}_{1B} = \frac{E_1 - E_B}{jX_{1B}} = \frac{1\angle 17,46^\circ - 1\angle 0^\circ}{j0,3} = 1,01\angle 8,73^\circ$$

Então, agora a tensão  $E'$  pode ser calculada:

$$E' = 1\angle 17,46^\circ + j(0,35 + 10) * 1,01\angle 8,73^\circ = 1,1599\angle 40,28^\circ$$

Onde verifica-se que o ângulo delta da tensão interna gerada pelo gerador “1” é  $\delta_1 = 40,28^\circ$ , que é o mesmo valor da diferença angular  $\delta_{1B}$  ( $\delta_1 - \delta_B$ ), entre a tensão interna do gerador “1” e a tensão do barramento infinito “B”, já que este último foi tomado como o barramento de referência, ou seja,  $\delta_B = 0^\circ$ .

A rede de duas máquinas, que é considerada por consistir apenas de reatâncias, é reduzida como mostrado na Figura 3.7, para a condição de pré-falta. Esta redução é realizada por combinações em série e paralelo.



**Figura 3.7: Redução da rede de seqüência positiva da para a condição de pré-falta. (Exemplo 3.1.)**

Fonte: Adaptado de Kimbark, 1995.

Com isso, pode-se encontrar a equação de oscilação do sistema para a condição de pré-falta, como segue abaixo:

Sendo

$$P_e = P_{m\acute{a}x} \text{sen } \delta = \frac{1,1599 * 1}{0,75} * \text{sen } \delta = 1,5465 * \text{sen } \delta \quad (3.5)$$

$$M = \frac{2H}{\omega_0} = \frac{2 * H}{2 * \pi * f_0} = \frac{2 * 5}{2 * \pi * 60} = 0,0265$$

e

$$P_m = 1 \text{ pu}$$

então

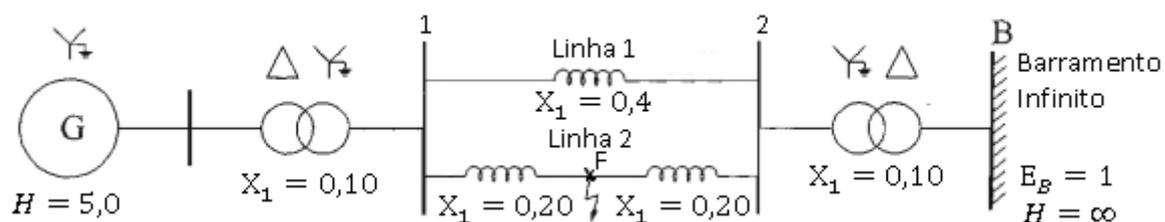
$$M * \ddot{\delta} = P_m - P_{m\acute{a}x} \text{sen } \delta$$

$$\ddot{\delta} = \frac{P_m - P_{m\acute{a}x} \text{sen } \delta}{M}$$

$$\ddot{\delta} = \frac{1 - 1,5465 * \text{sen } \delta}{0,0265} \quad (3.6)$$

**Solução parte 2:** para condição do sistema em falta.

Agora, a Figura 3.8 mostra a representação da rede de sequência positiva com uma falta no meio da linha de transmissão “2”.



**Figura 3.8:** Rede de sequência positiva com uma falta no meio da linha de transmissão “2”.  
(Exemplo 3.1.)

Fonte: Adaptado de Kundur, 1994.

Já a Figura 3.9 mostra a redução da rede da Figura 3.8 para a condição em falta, considerando um curto-circuito trifásico ( $X_{ef} = 0$ ) no ponto de falta “F”. Esta redução é realizada por duas conversões Y- $\Delta$  e combinações em série.

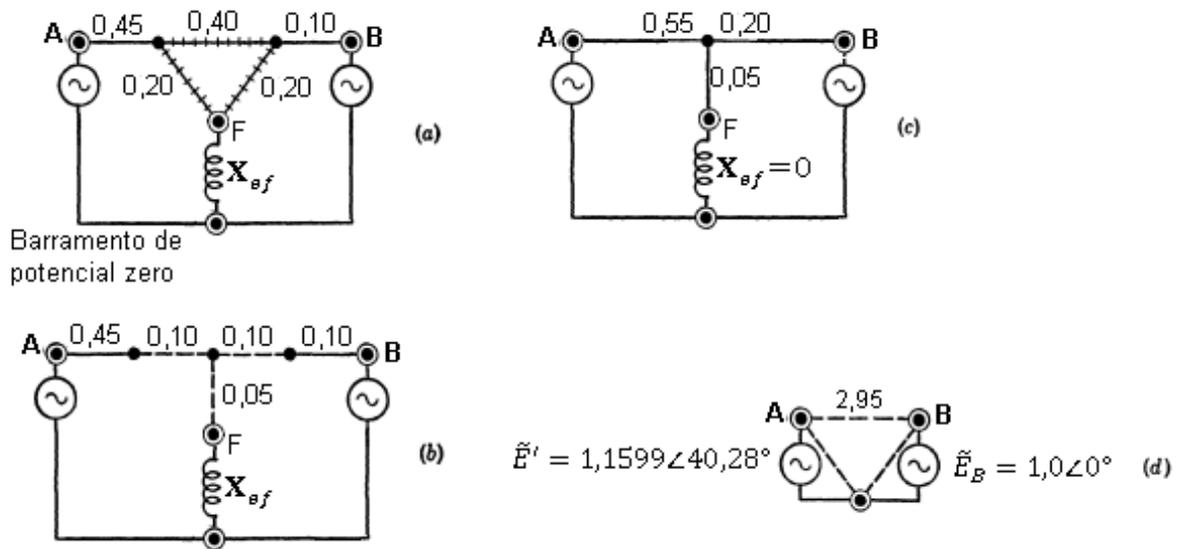


Figura 3.9: Redução da rede de seqüência positiva da para a condição em falta com um curto-circuito trifásico ( $X_{ef} = 0$ ) no meio da linha de transmissão “2”. (Exemplo 3.1.)

Fonte: Adaptado de Kimbark, 1995.

A redução da rede de seqüência negativa é mostrada na Figura 3.10.

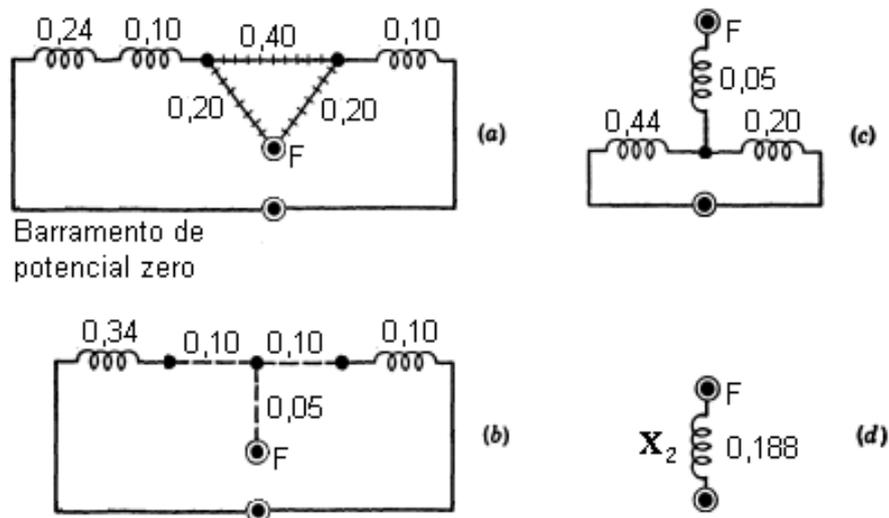


Figura 3.10: Redução da rede de seqüência negativa. (Exemplo 3.1.)

Fonte: Adaptado de Kimbark, 1995.

Já a redução da rede de seqüência zero é mostrada na Figura 3.11.

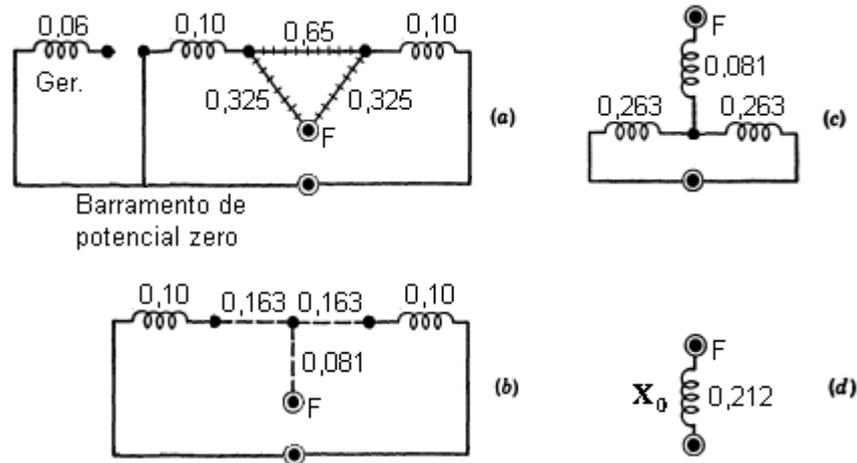


Figura 3.11: Redução da rede de sequência zero. (Exemplo 3.1.)

Fonte: Adaptado de Kimbark, 1995.

Estas duas últimas redes são reduzidas a uma única reatância nas partes *b*, *c*, e *d* destas figuras. Os valores das reatâncias são  $X_2 = 0,188$  e  $X_0 = 0,212$  por unidade (pu).

Então, as reatâncias efetivas de falta ( $X_{ef}$ ) são:

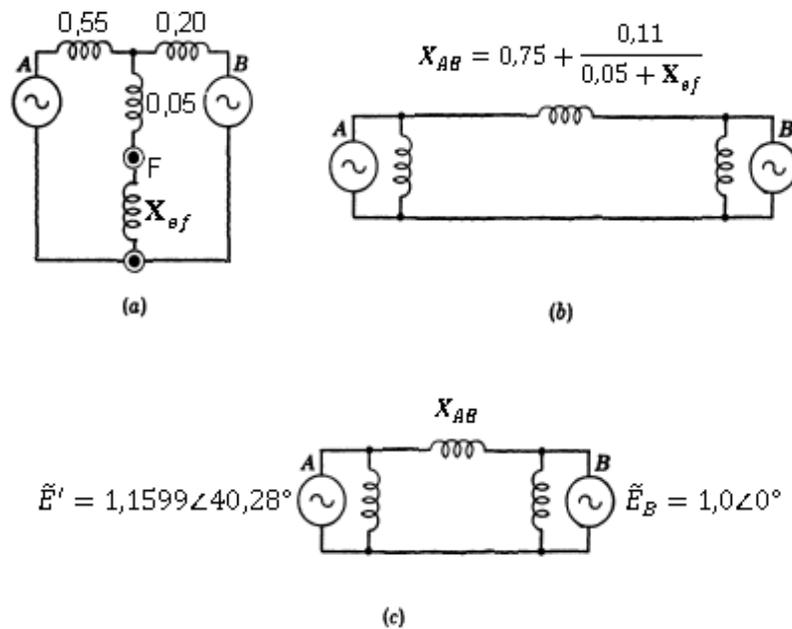
$$\text{Fase-terra:} \quad X_0 + X_2 = 0,40 \text{ pu}$$

$$\text{Fase-fase:} \quad X_2 = 0,188 \text{ pu}$$

$$\text{Fase-fase-terra:} \quad \frac{X_0 X_2}{X_0 + X_2} = 0,10 \text{ pu}$$

A rede de sequência positiva, mostrada na Figura 3.9(c), já com a representação da ligação da reatância efetiva de falta ( $X_{ef} = 0$ , para o caso do curto-circuito trifásico) entre o ponto de falta "F" e o barramento de potencial zero, agora é representada com uma reatância efetiva de falta ( $X_{ef}$ ) genérica, como mostrado na Figura 3.12(a), onde seu valor irá depender do tipo de falta que ocorre no ponto "F" de falta. Após uma conversão Y- $\Delta$ , ela é como mostrada na Figura 3.12(b). A reatância do ramo conectando as duas forças eletromotrizes (f.e.m's) dos geradores, ou seja, entre a estação hidroelétrica e o barramento infinito, em função de  $X_{ef}$  é

$$X_{AB} = 0,55 + 0,20 + \frac{0,55 * 0,20}{0,05 + X_{ef}} = 0,75 + \frac{0,11}{0,05 + X_{ef}}$$



**Figura 3.12:** Redução da rede de sequência positiva com uma reatância efetiva de falta ( $X_{ef}$ ) inserida entre o ponto F e o terra, e equação da potência transmitida. (Exemplo 3.1.)

Fonte: Adaptado de Kimbark, 1995.

Substituindo os valores de  $X_{ef}$  dados acima, obtém-se os seguintes valores de  $X_{AB}$  para os diferentes tipos de falta:

<i>Tipo de falta</i>	$X_{AB}(pu)$
<i>Fase-terra:</i>	0,99
<i>Fase-fase:</i>	1,21
<i>Fase-fase-terra:</i>	1,48
<i>Trifásico</i>	2,95

Agora, com estes valores de  $X_{AB}$ , pode-se encontrar a equação de oscilação, que representa o comportamento do gerador no período em falta, para cada tipo de falta, como segue:

- ❖ Para o tipo de *falta curto-circuito fase-terra*, tem-se:

Sendo

$$X_{AB} = 0,99$$

$$P_e = \frac{E'E_B}{X_{AB}} \text{sen } \delta = \frac{1,1599 * 1}{0,99} \text{sen } \delta = 1,1716 \text{sen } \delta \quad (3.7)$$

então

$$\ddot{\delta} = \frac{1 - 1,1716 * \text{sen } \delta}{0,0265} \quad (3.8)$$

- ❖ Para o tipo de *falta curto-circuito fase-fase*, tem-se:

Sendo

$$X_{AB} = 1,21$$

$$P_e = \frac{E'E_B}{X_{AB}} \text{sen } \delta = \frac{1,1599 * 1}{1,21} \text{sen } \delta = 0,9586 \text{sen } \delta \quad (3.9)$$

então

$$\ddot{\delta} = \frac{1 - 0,9586 * \text{sen } \delta}{0,0265} \quad (3.10)$$

- ❖ Para o tipo de *falta curto-circuito fase-fase-terra*, tem-se:

Sendo

$$X_{AB} = 1,48$$

$$P_e = \frac{E'E_B}{X_{AB}} \text{sen } \delta = \frac{1,1599 * 1}{1,48} \text{sen } \delta = 0,7837 \text{sen } \delta \quad (3.11)$$

então

$$\ddot{\delta} = \frac{1 - 0,7837 * \text{sen } \delta}{0,0265} \quad (3.12)$$

- ❖ Para o tipo de *falta curto-circuito trifásico*, tem-se:

Sendo

$$X_{AB} = 2,95$$

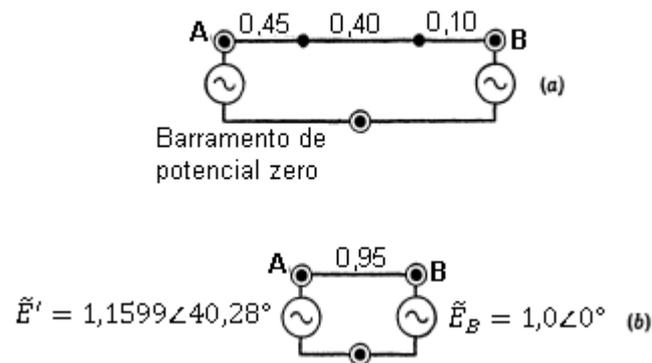
$$P_e = \frac{E'E_B}{X_{AB}} \text{sen } \delta = \frac{1,1599 * 1}{2,95} \text{sen } \delta = 0,3932 \text{sen } \delta \quad (3.13)$$

então

$$\ddot{\delta} = \frac{1 - 0,3938 * \text{sen } \delta}{0,0265} \quad (3.14)$$

**Solução parte 3:** Para condição do sistema pós-falta.

A Figura 3.13 mostra a redução da rede para a condição de pós-falta.



**Figura 3.13:** Redução da rede de sequência positiva para condição de pós-falta (sem a linha de transmissão 2). (Exemplo 3.1.)

Fonte: Adaptado de Kimbark, 1995.

Após a redução da rede, a equação de oscilação, que representa o comportamento do gerador no período pós-falta, pode ser encontrada como segue:

Sendo

$$X_{AB} = 0,95$$

$$P_e = \frac{E' E_B}{X_{AB}} \text{sen } \delta = \frac{1,1599 * 1}{0,95} \text{sen } \delta = 1,2209 \text{sen } \delta \quad (3.15)$$

então

$$\ddot{\delta} = \frac{1 - 1,2209 * \text{sen } \delta}{0,0265} \quad (3.16)$$

Para resolver numericamente uma equação diferencial ordinária (EDO) de segunda ordem, como dado nas Equações (3.6), (3.8), (3.10), (3.12), (3.14) e (3.14),

estas podem ser escritas em termos de duas equações de primeira ordem, conforme segue:

$$\dot{\delta} = \Delta\omega \quad (3.17)$$

$$\dot{\omega} = \frac{P_m - P_{m\acute{a}x} \text{sen } \delta}{M} \quad (3.18)$$

#### **Solução parte 4:** Implementação do algoritmo para simulações no MATLAB.

Agora, o método de integração numérica de primeira ordem de Euler, que foi descrito no ANEXO A.1, pode ser utilizado para resolver as Equações (3.17) e (3.18).

Considerando um passo de integração de  $h = 1 \times 10^{-4}$  e um tempo total de simulação de 3 segundos, construiu-se um algoritmo parcial simples no MATLAB (descrito no Apêndice A) para encontrar o tempo crítico para a abertura da proteção. Foram feitos vários testes para encontrar o tempo máximo para a atuação da proteção, antes de haver a perda da estabilidade por parte do sistema, ou seja, antes que o gerador síncrono do Exemplo 3.1 perdesse o sincronismo com o restante do sistema.

Os resultados obtidos para o tempo crítico de abertura<sup>5</sup> da proteção, considerando os diferentes tipos de faltas equacionados acima, podem ser visualizados na Tabela 3.2.

---

<sup>5</sup> Para esta e para as demais simulações presentes neste trabalho, a perturbação é considerada como ocorrendo no tempo  $t = 0$  s.

Tabela 3.2: Tempo crítico de abertura da proteção para diferentes tipos de faltas.

Tipo de curto-circuito	Valor aproximado para o tempo crítico de abertura $t_{crit}(s)$ :
Trifásico	0,134
Fase-fase-terra	0,226
Fase-fase	0,346
Fase-terra	Após simulação com $t_{ab}$ de 2,999, verificou-se que o sistema não perde o sincronismo.

Fonte: Autoria própria.

- ❖ Considerando o tipo de *falta curto-circuito fase-fase-terra*, tem-se os seguintes resultados de trajetórias para  $\delta$  e  $\omega$ , através de simulações no MATLAB:
  - Para um tempo de abertura simulado de  $t_{ab} = 0,226$  s, tem-se o seguinte comportamento dinâmico da máquina síncrona, como mostrado na Figura 3.14:

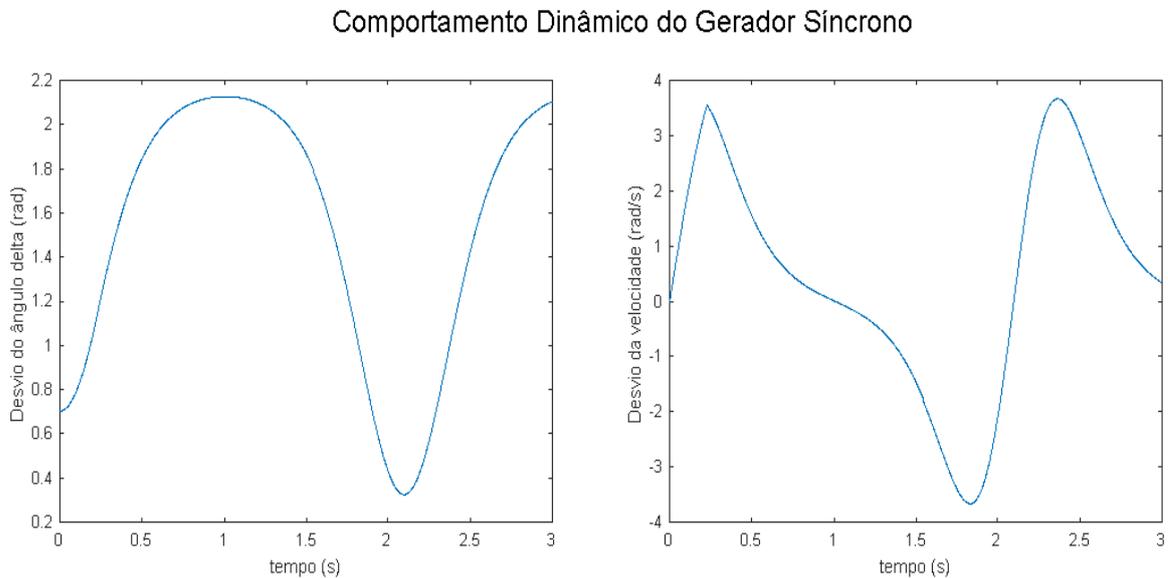
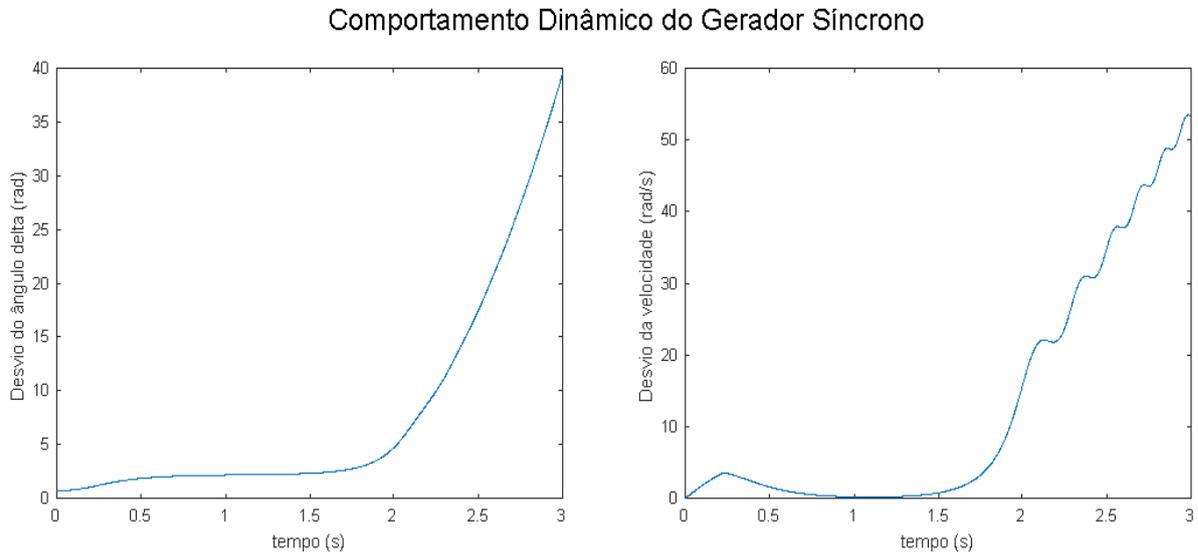


Figura 3.14: Comportamento dinâmico do gerador síncrono considerando uma falta do tipo curto-circuito fase-fase-terra no meio da linha de transmissão “2” e um  $t_{ab} = 0,226$  s. (Exemplo 3.1.)

Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 3.14, verifica-se que o gerador não perde o sincronismo para um tempo de abertura de 0,226 s.

- Agora, para um tempo de abertura simulado de  $t_{ab} = 0,227$  s, tem-se o seguinte comportamento dinâmico da máquina síncrona, como mostrado na Figura 3.15:



**Figura 3.15: Comportamento dinâmico do gerador síncrono considerando uma falta do tipo curto-circuito fase-fase-terra no meio da linha de transmissão “2” e um  $t_{ab} = 0,227$  s. (Exemplo 3.1.)**

**Fonte: Autoria própria.**

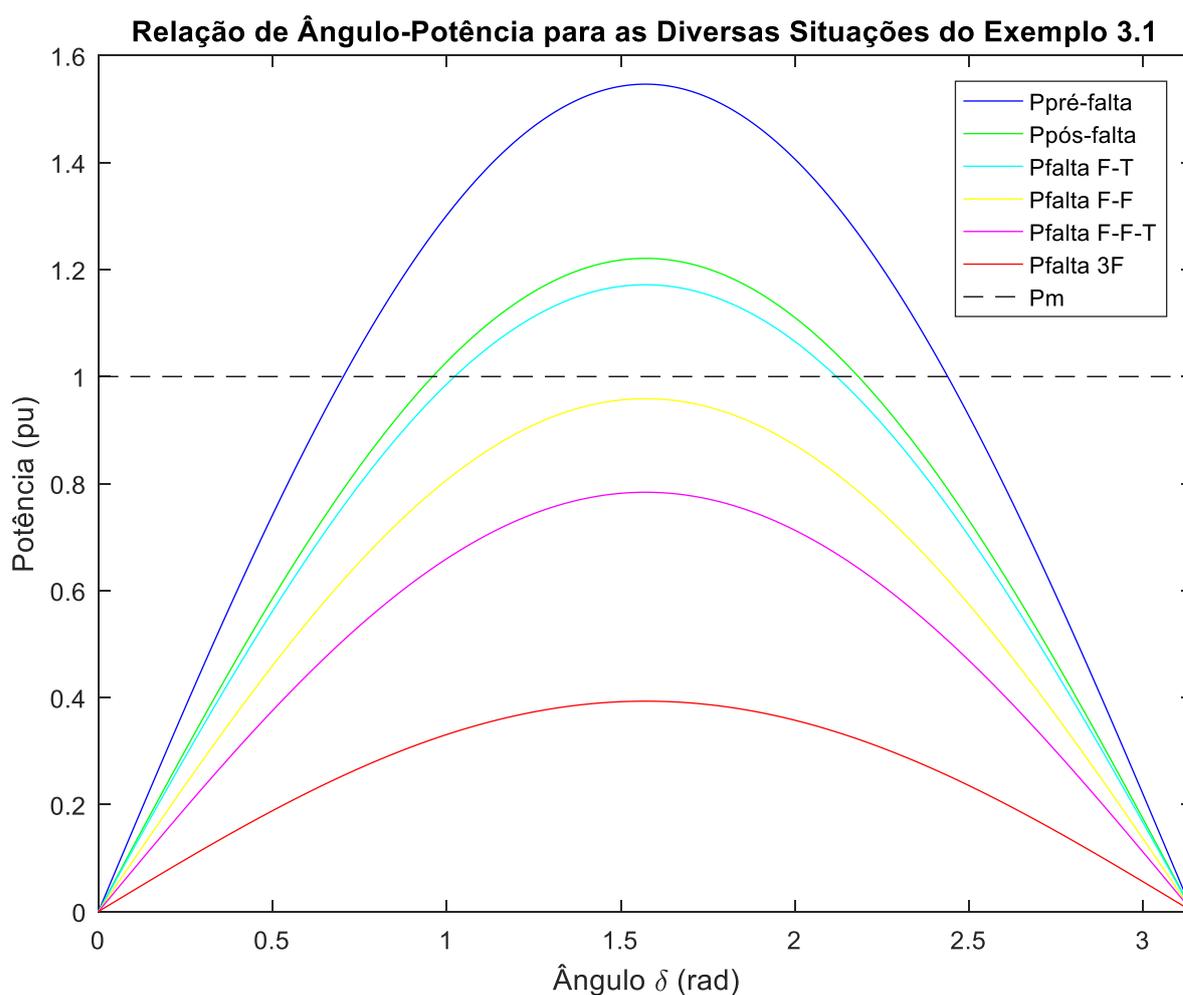
Agora, através da Figura 3.15, verifica-se que o gerador perde o sincronismo para um tempo de abertura de 0,227 s. Portanto, a partir das Figura 3.14 e Figura 3.15, verifica-se que o tempo crítico para abertura da proteção encontra-se entre 0,226 e 0,227 s.

A solução foi encontrada através do método de tentativa e erro. Entretanto, o primeiro valor escolhido como tempo de abertura da proteção ( $t_{ab}$ ) foi um valor típico de atuação da proteção para sistemas de potência, neste caso utilizou-se o tempo de 150 ms (9 ciclos).

Como o barramento infinito é equivalente a uma máquina de capacidade infinita de geração e absorção de potência, e com momento de inércia infinito, todo o desequilíbrio de potência existente será absorvida pelo mesmo. Neste caso, a máquina só permanecerá em sincronismo com o barramento infinito se a sua velocidade de rotação for igual à velocidade deste último que, por sua vez, é igual à velocidade síncrona; ou, ainda, se pelo menos permanecer oscilando em torno desta.

Assim, para este caso, a estabilidade e o sincronismo são a mesma coisa (BRETAS e ALBERTO, 2000).

Na Figura 3.16 é mostrado as diversas curvas de relação entre o ângulo  $\delta$  e a potência elétrica transmitida ( $P_e$ ), para as diversas situações apresentadas no Exemplo 3.1, variando-se o ângulo delta ( $\delta$ ) de 0 a  $\pi$  radianos (ou 180°) nas Equações (3.5), (3.7), (3.9), (3.11), (3.13) e (3.15), que foram calculadas para cada situação estudada no Exemplo 3.1.



**Figura 3.16: Curvas de relação ângulo-potência para as diversas situações apresentadas no Exemplo 3.1.**

**Fonte: Autoria própria.**

onde

Ppré-falta = Potência elétrica transmitida na condição pré-falta  
 Ppós-falta = Potência elétrica transmitida na condição pós-falta

$P_{\text{falta F-T}}$	= Potência elétrica transmitida na condição do Sistema com uma falta do tipo <i>curto-circuito fase-terra</i> no meio da linha de transmissão “2”
$P_{\text{falta F-F}}$	= Com um <i>curto-circuito fase-fase</i>
$P_{\text{falta F-F-T}}$	= Com um <i>curto-circuito fase-fase-terra</i>
$P_{\text{falta 3F}}$	= Com um <i>curto-circuito trifásico</i>
$P_m$	= Potência mecânica de entrada

A partir da Tabela 3.2 e da Figura 3.16, verifica-se que:

- ❖ O pior tipo de falta para o sistema, ou seja, o tipo mais severo de falta, é o curto-circuito trifásico, pois, para este caso, o tempo máximo para abertura da proteção, para que a máquina síncrona não perca o sincronismo com o sistema, ( $t_{crit}$ ) foi o de menor valor encontrado, conforme a Tabela 3.2;
- ❖ O tipo de falta menos severo para o sistema é o curto-circuito fase-terra, onde, para este tipo de curto-circuito, não se encontrou um tempo crítico de abertura da proteção ( $t_{crit}$ ), ou seja, o sistema não perde o sincronismo mesmo sob a condição deste tipo de falta; pode-se verificar que, para este tipo de curto circuito, o sistema ainda continua com boa capacidade de transmissão de potência elétrica durante a falta, onde vê-se que sua curva de relação entre ângulo e potência é similar à curva para a condição de pós-falta; fica visível, também, que mesmo com este curto-circuito o sistema em falta apresenta ponto de equilíbrio (um estável e outro instável), fazendo com que a máquina síncrona não acelere constantemente e, com isso, que a mesma não perca o sincronismo com o sistema para o qual está fornecendo potência elétrica.

#### 4 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO FINAL PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA CONSIDERANDO FALTAS SIMÉTRICAS E ASSIMÉTRICAS

Diferentemente do problema de estabilidade transitória de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito, estudado detalhadamente no capítulo anterior, em geral, nos sistemas reais, existem diversas máquinas de porte aproximadamente semelhante conectadas através do sistema de transmissão. Apesar do fenômeno físico ser basicamente o mesmo, a complexidade dos cálculos numéricos e a dimensão do problema aumentam com o número de máquinas consideradas no estudo (Bretas e Alberto, 2000).

As máquinas do sistema são interligadas pela rede de transmissão, implicando que a potência elétrica  $P_e$  fornecida por uma máquina é uma função que envolve as equações diferenciais da máquina síncrona e as equações algébricas da rede e das máquinas. Para facilitar a modelagem do sistema, e assim diminuir a exigência de cálculos computacionais, as seguintes suposições simplificadoras adicionais são frequentemente adotadas:

- ❖ Admite-se que a rede esteja em regime permanente senoidal, ou seja, as constantes de tempo da rede de transmissão são desprezíveis quando comparadas à frequência eletromecânica de oscilação;
- ❖ O modelo adotado para o gerador síncrono é o modelo “clássico”, conforme mostrado na Figura 3.1;
- ❖ Todas as cargas são representadas por impedâncias constantes, calculadas das condições de tensão pré-falta obtidas de um fluxo de carga. O modelo de impedância constante permite a redução da rede aos barramentos (nós internos) das unidades geradoras;
- ❖ A potência mecânica de entrada para cada máquina permanece constante e igual ao seu valor pré-falta durante todo intervalo de tempo de interesse para o estudo (1 a 2 segundos);
- ❖ Considerou-se a utilização de apenas dois tipos de ligações dos enrolamentos dos transformadores: Delta – delta e Y aterrado – delta, conforme ilustrado na Figura 2.3;

- ❖ Considerou-se a ocorrência da falta sempre no sistema de transmissão e em linhas na proximidade de umas das barras do sistema.

#### 4.1 FLUXOGRAMA DO ALGORITMO

Na Figura 4.1 abaixo é apresentado o fluxograma do algoritmo final para análise de estabilidade do ângulo do rotor para um sistema multimáquinas.

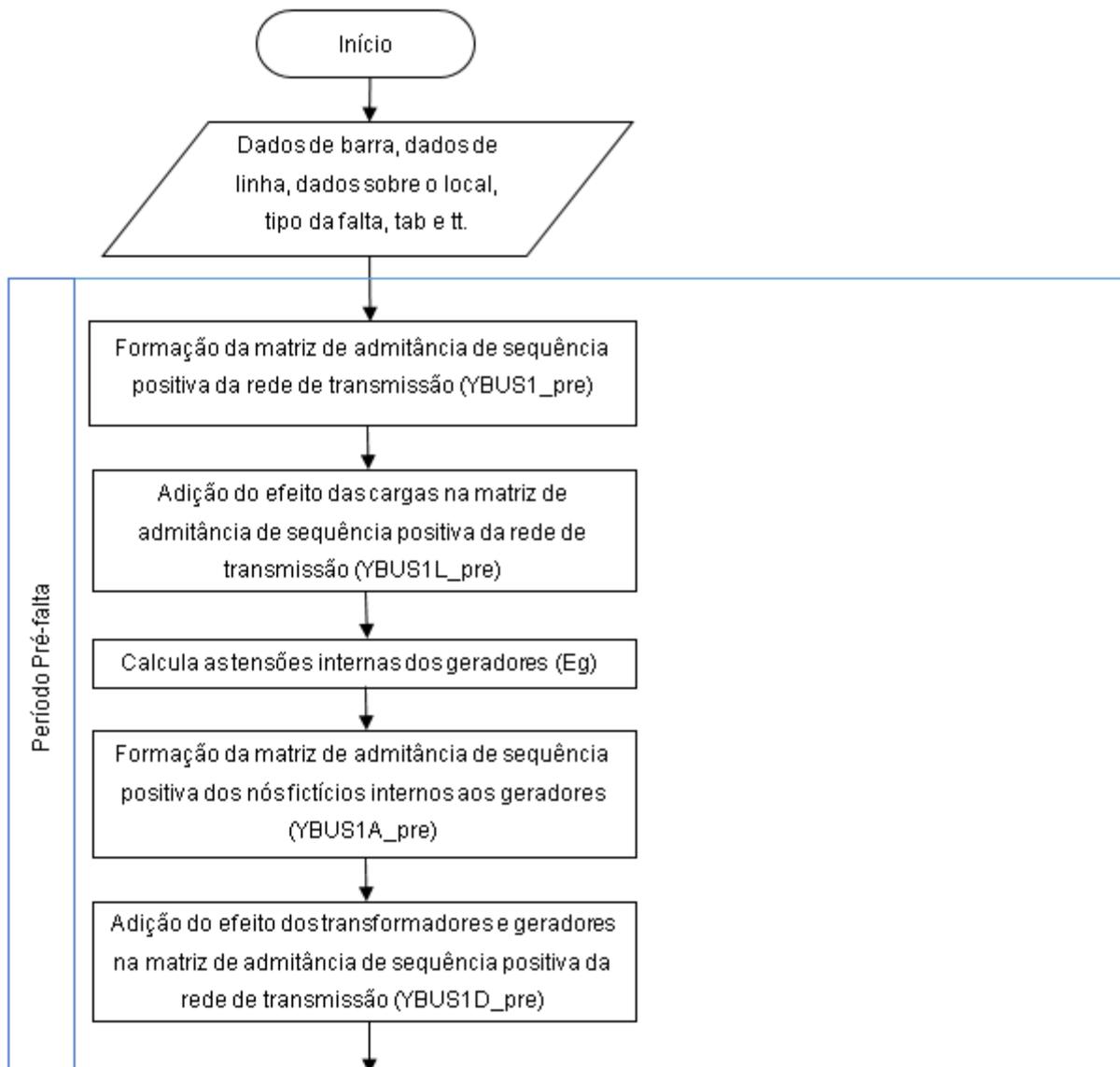


Figura 4.1: Fluxograma do algoritmo final para análise de estabilidade transitória

Fonte: Autoria própria.

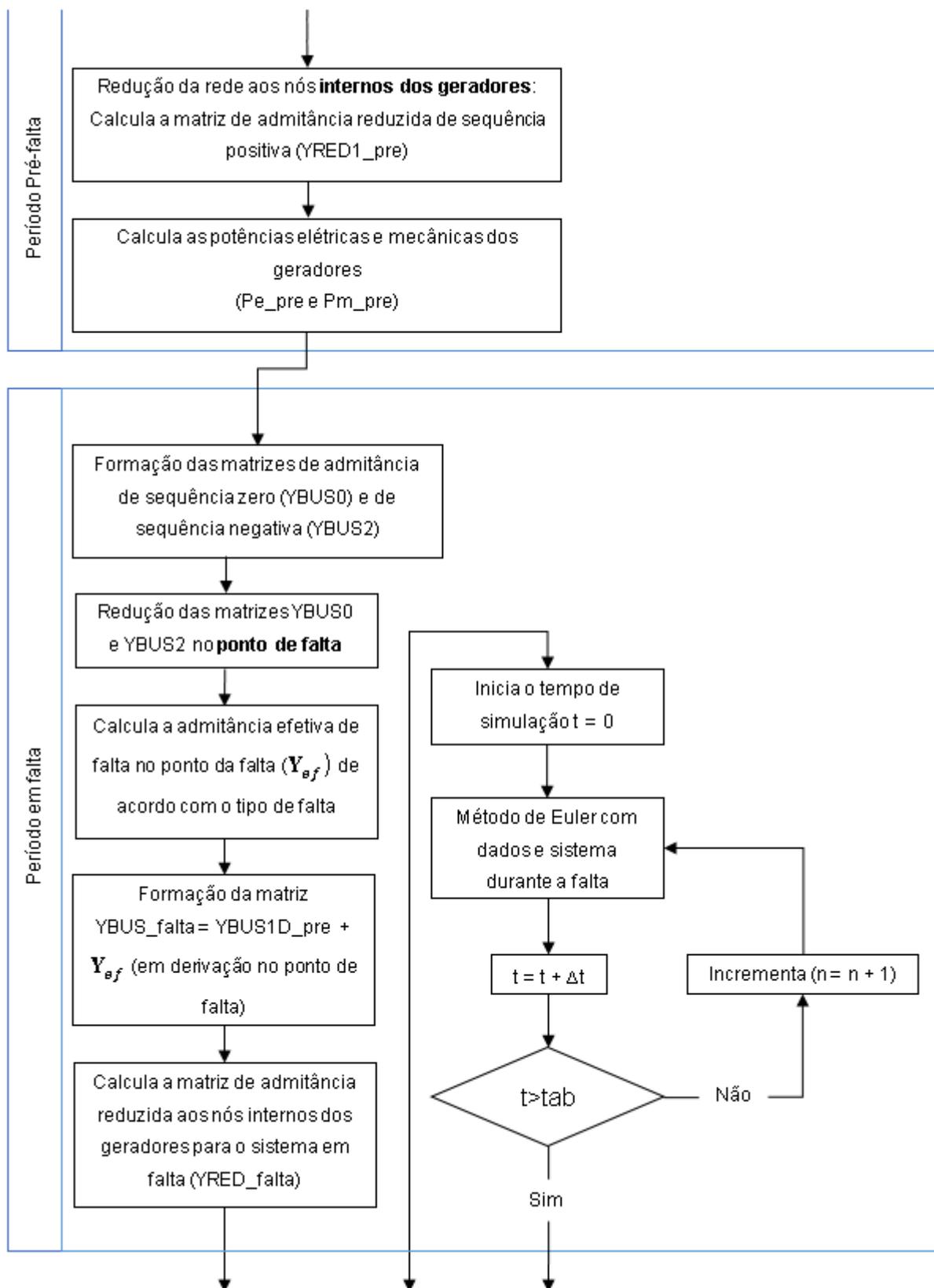
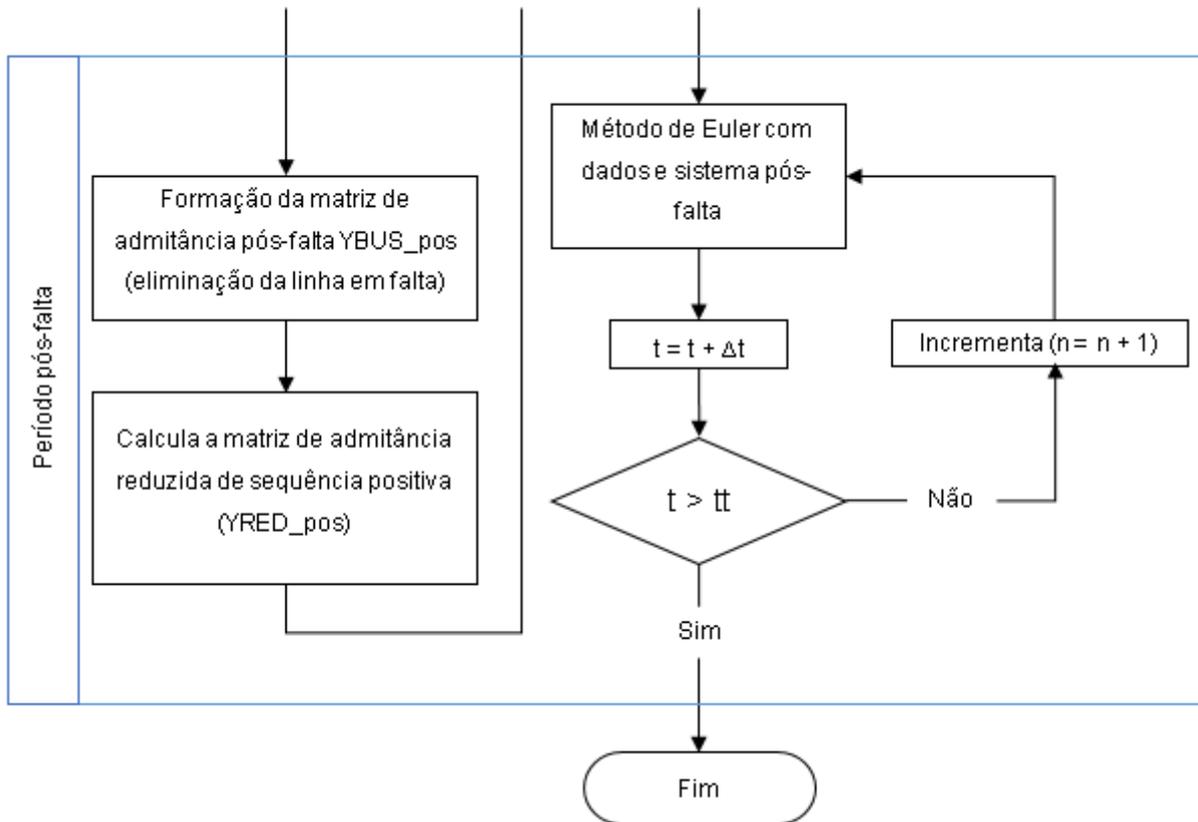


Figura 4.1: Fluxograma do algoritmo final para análise de estabilidade transitória (continuação)

Fonte: Autoria própria.



**Figura 4.1: Fluxograma do algoritmo final para análise de estabilidade transitória (continuação)**  
**Fonte: Autoria própria.**

onde

$t_{ab}$  = tempo para eliminação da falta;

$t_t$  = tempo total de simulação;

$\Delta t$  = incremento do passo de simulação

Os detalhes da formação da matriz de admitância nodal da rede de transmissão de sequência positiva e a redução da rede aos nós internos dos geradores podem ser encontrados nos trabalhos de Bretas e Alberto (2000) e Garcia *et al.* (2013).

Para a formação das redes de sequência negativa e nula, e para a redução das mesmas no ponto de falta (barra em falta) foi utilizado o procedimento apresentado no Capítulo 2, entretanto utilizou-se de um modelo matricial das redes em admitância ( $Y$ ) ao invés de impedância como apresentado anteriormente. No cálculo da admitância efetiva de falta ( $Y_{ef}$ ) utilizou-se como referência as Equações 2.31 a 2.34, porém adaptando-as para admitância; posteriormente, adicionou-se este efeito à matriz completa de sequência positiva em derivação no ponto de falta. Após

isso, calculou-se a matriz de admitância reduzida aos nós internos dos geradores para o sistema em falta.

No sistema pós-falta, o sistema é representado apenas pela rede de sequência positiva, com a eliminação da linha em falta.

Na sequência, inicia-se a obtenção das trajetórias (soluções) de  $\delta$  e  $\omega$  para o sistema em falta até o tempo de abertura dos disjuntores ( $t_{ab}$ ) e, após isso, para o sistema pós-falta até atingir-se o tempo total de simulação ( $t_t$ ). Com a obtenção das trajetórias em falta e pós-falta, o programa expressa visualmente os gráficos das mesmas, para posterior análise do sincronismo. Para obtenção do tempo crítico de abertura, utiliza-se uma estratégia de tentativa e erro aumentando-se ou diminuindo-se o valor de  $t_{ab}$ , para chegar-se mais próximo ao tempo crítico, utilizando-se o valor de um milissegundo como diferença para a perda ou não do sincronismo.

## 4.2 APLICAÇÃO DO ALGORITMO FINAL PARA UM SISTEMA DE TRÊS BARRAS

Após o desenvolvimento do algoritmo, conforme descrito no fluxograma da Figura 4.1, agora o mesmo será aplicado para solução do problema de encontrar-se o tempo crítico para eliminação de faltas simétricas e assimétricas, para um sistema maior e mais complexo que aquele apresentado no Exemplo 3.1 do capítulo anterior.

### **Exemplo 4.1** (Adaptado de Bretas e Alberto, 2000)

O sistema escolhido para analisar a funcionalidade do algoritmo desenvolvido é um sistema de três barras conectado em anel composto por três máquinas e três transformadores adaptado de Bretas e Alberto (2000), apresentado na Figura 4.2 abaixo. Os dados apresentados são por unidade (pu) e estão referenciados para uma potência base de 100MVA.

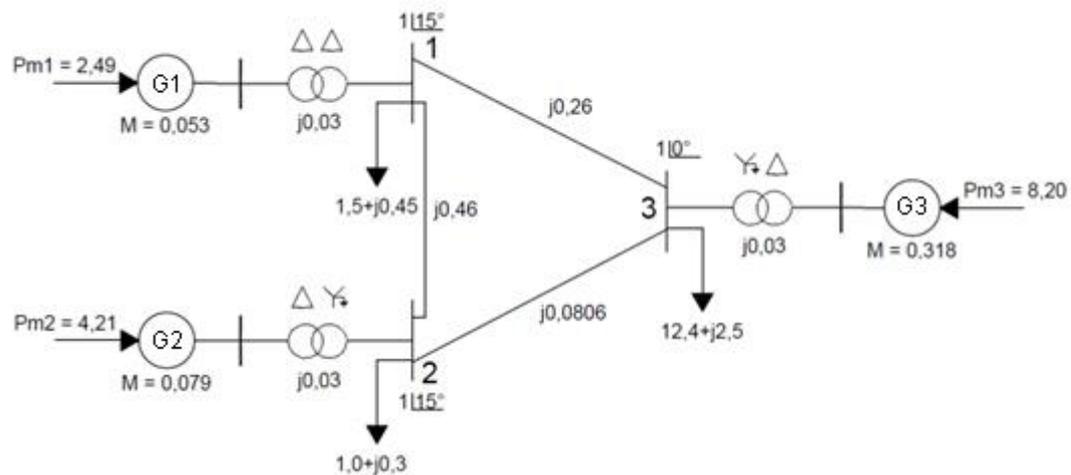


Figura 4.2: Representação da rede de sequência positiva do sistema de potência composto por três máquinas e três barramentos.

Fonte: Adaptado de Bretas e Alberto, 2000.

Os dados de sequência positiva de linha, dos transformadores, os dados de barra e os dados do fluxo de carga pré-falta estão apresentados na Figura 4.2. Nas tabelas a seguir serão apresentados também os dados de sequência negativa e nula, dados quais foram criados com base na literatura e no exemplo anterior estudado (Exemplo 3.1), para adaptar o problema para fins de análise de faltas assimétricas.

A Tabela 4.1 mostra os dados de linha de sequência negativa.

Tabela 4.1: Dados de linha de sequência negativa para o Exemplo 4.1.

Origem	Destino	Resist. (pu)	Reat. (pu)	B_sh_tot (pu)
1	2	0,0	0,46	0,0
1	3	0,0	0,26	0,0
2	3	0,0	0,0806	0,0

Fonte: Autoria própria.

onde

Resist. = resistência série da linha em pu;

Reat. = reatância indutiva série da linha em pu;

B\_sh\_tot = susceptância capacitiva (shunt) total da linha em pu;

A Tabela 4.2 a seguir mostra os dados de linha de sequência nula.

**Tabela 4.2: Dados de linha de seqüência nula para o Exemplo 4.1.**

Origem	Destino	Resist. (pu)	Reat. (pu)	B_sh_tot (pu)
1	2	0,0	0,74	0,0
1	3	0,0	0,42	0,0
2	3	0,0	0,13	0,0

Fonte: A autoria própria.

A Tabela 4.3 a seguir mostra os dados de seqüência negativa e nula das máquinas e dos transformadores, identificados pela barra onde estão conectados.

**Tabela 4.3: Dados de seqüências positiva, negativa e nula das máquinas e dos transformadores para o Exemplo 4.1.**

Barra	$X1'_d$ (pu)	$X2$ (pu)	$X0$ (pu)	$Xt$ (pu)
1	0,088	0,088	0,015	0,03
2	0,050	0,050	0,0085	0,03
3	0,015	0,015	0,0026	0,03

Fonte: A autoria própria.

onde

$X1'_d$  = reatância transitória de eixo direto de seqüência positiva da máquina síncrona em pu;

$X2$  = reatância de seqüência negativa da máquina síncrona em pu;

$X0$  = reatância de seqüência nula da máquina síncrona em pu;

$Xt$  = reatância do transformador em pu ( $Xt2 = Xt$ ).

Considerando um passo de integração de  $h = 1 \times 10^{-4}$  e um tempo total de simulação de 3 segundos, foram simuladas faltas nas linhas de transmissão ligando dois barramentos, admitindo-se que a falta ocorra na proximidade de uma das barras, que, com isso, prioriza-se o pior caso, tal que se possa considerar que a falta tenha ocorrido na própria barra. A obtenção dos tempos críticos deu-se através do método de tentativa e erro; entretanto, o primeiro valor escolhido como tempo de abertura da proteção ( $t_{ab}$ ) foi um valor típico de atuação da proteção para sistemas de potência, neste caso utilizou-se o tempo de 150 ms. Os resultados obtidos para o tempo crítico

de abertura da proteção, considerando diferentes tipos de faltas, podem ser visualizados na Tabela 4.4 a seguir.

**Tabela 4.4: Tempo crítico de abertura da proteção para diferentes tipos de faltas.**

Linha em falta	Proximidade da falta (barramento)	Valor aproximado para o tempo crítico de abertura $t_{crit}(s)$ , para os diferentes tipos de falta abaixo:			
		Trifásico	Fase-fase-terra	Fase-fase	Fase-terra
1-2	1	0,174	0,306	0,359	*
	2	0,199	0,267	0,49	*
1-3	1	0,082	0,16	0,196	*
	3	0,202	*	*	*
2-3	2	**	**	**	**
	3	**	**	**	**

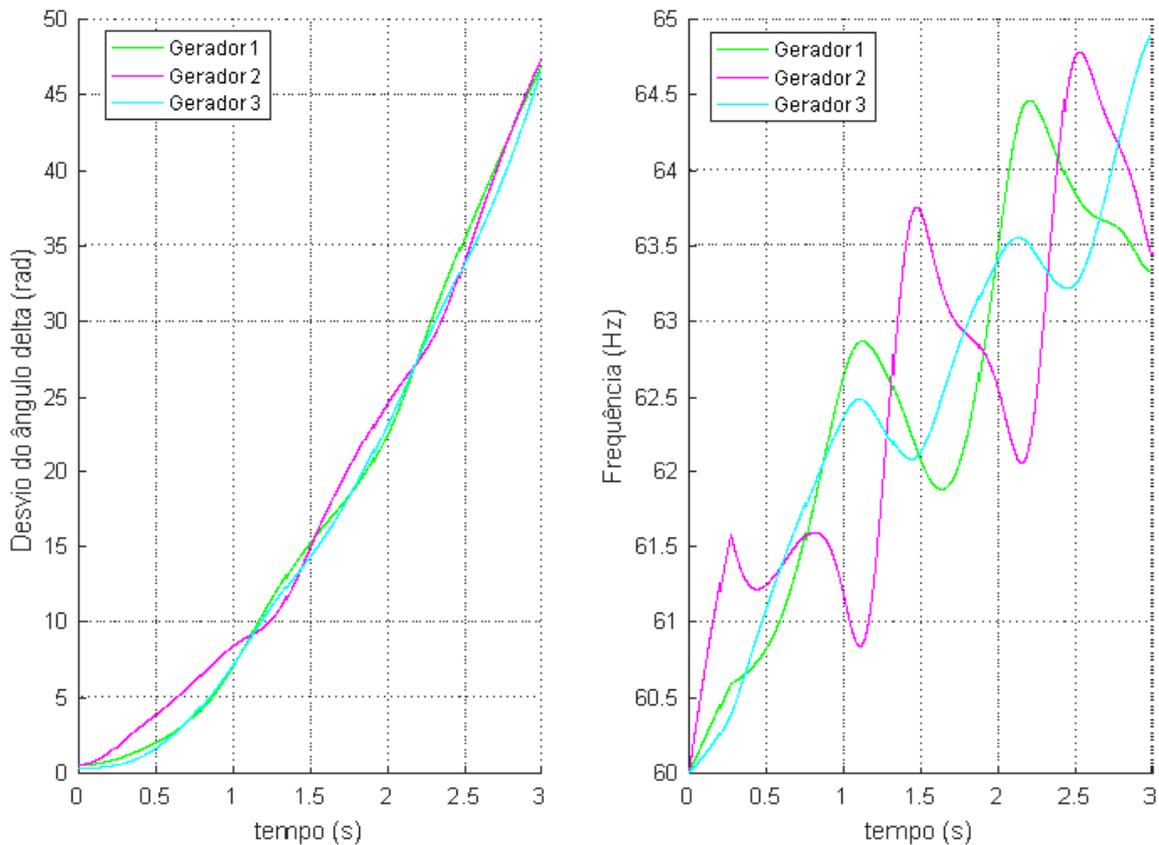
\* Não perde o sincronismo, mesmo para  $t_{ab}$  sendo igual ao tempo máximo de simulação

\*\* Perde o sincronismo para qualquer tempo de abertura

**Fonte: Autoria própria.**

- ❖ Considerando o tipo de *falta curto-circuito fase-fase-terra* ocorrido na linha “1-2” próximo à barra “2”, tem-se os seguintes resultados de trajetórias para  $\delta$  e  $\omega$ , através de simulações no MATLAB:
  - Para um tempo de abertura simulado de  $t_{ab} = 0,267$  s, tem-se o seguinte comportamento dinâmico da máquina síncrona, como mostrado na Figura 3.14:

## Comportamento Dinâmico das Máquinas Síncronas



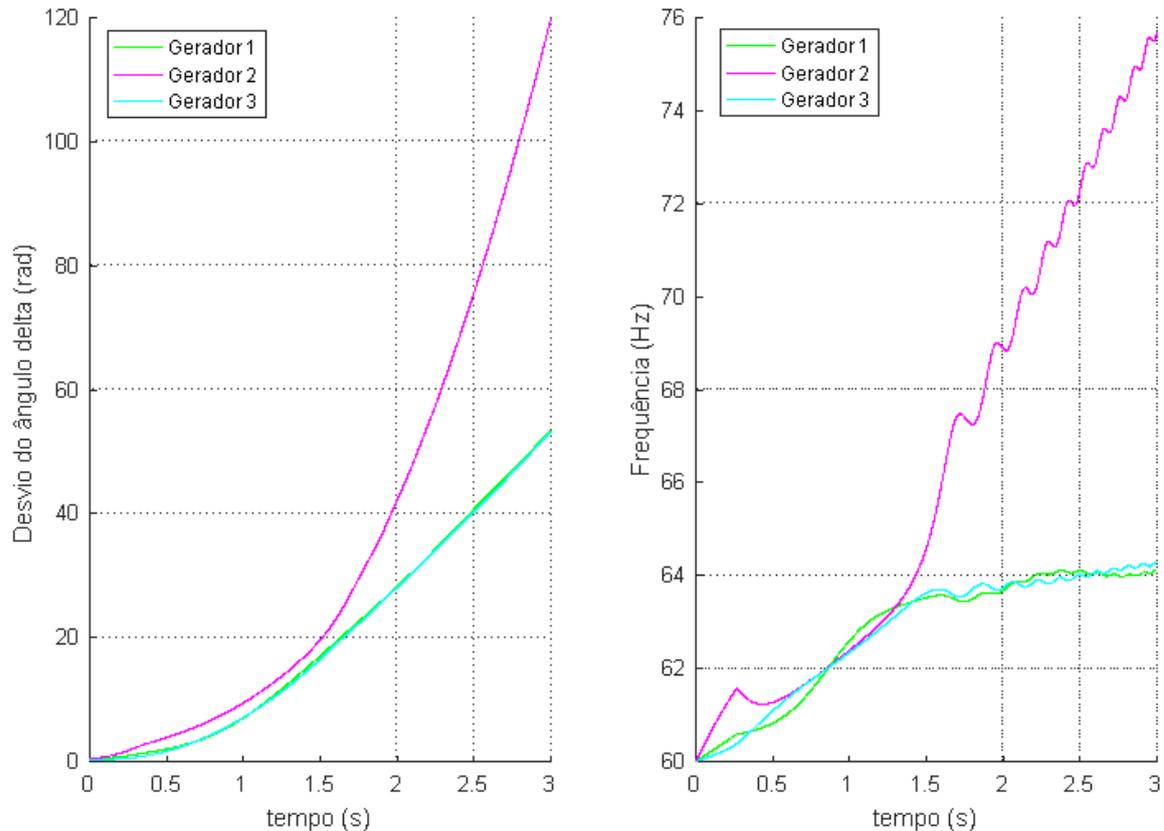
**Figura 4.3: Comportamento dinâmico das máquinas síncronas considerando uma falta do tipo curto-circuito fase-fase-terra ocorrido na linha “1-2” próximo à barra “2” e um  $t_{ab} = 0,267$  s. (Exemplo 4.1.)**

Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 4.3, verifica-se que os geradores não perdem o sincronismo para um tempo de abertura de 0,267 s e, portanto, considera-se que este sistema é transitóriamente estável.

- Agora, para um tempo de abertura simulado de  $t_{ab} = 0,268$  s, tem-se o seguinte comportamento dinâmico das máquinas síncronas, como mostrado na Figura 4.4:

## Comportamento Dinâmico das Máquinas Síncronas



**Figura 4.4: Comportamento dinâmico das máquinas síncronas considerando uma falta do tipo curto-circuito fase-fase-terra ocorrido na linha “1-2” próximo à barra “2” e um  $t_{ab} = 0,268$  s. (Exemplo 4.1.)**

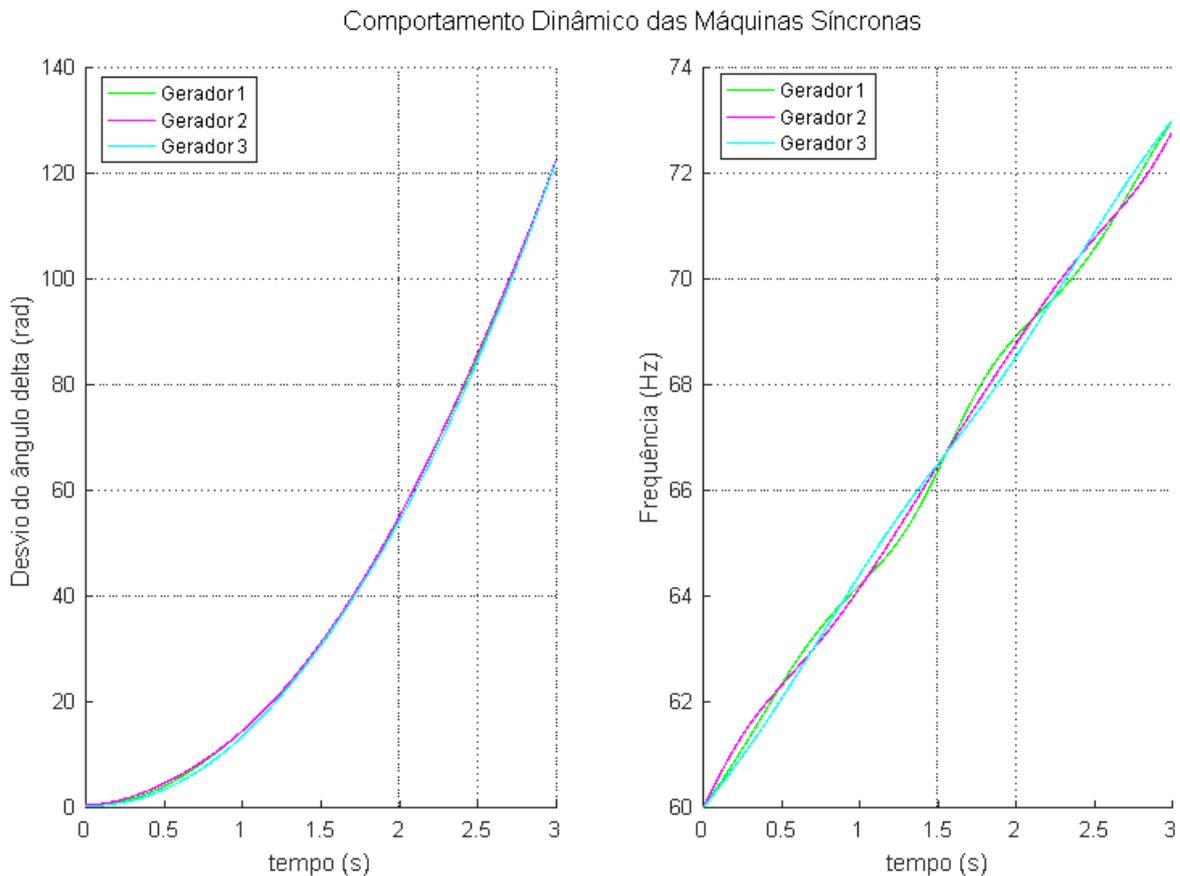
Fonte: Autoria própria.

Com isso, através da Figura 4.4, verifica-se que as máquinas perdem o sincronismo, onde o gerador “2” acelera mais que as outras máquinas do sistema, para um tempo de abertura de 0,268 s, ou seja, o sistema é transitoriamente instável. Portanto, a partir das Figura 4.3 e Figura 4.4, verifica-se que o tempo crítico para abertura da proteção encontra-se entre 0,267 e 0,268 s.

A seguir apresentar-se-á um dos casos onde o sistema não perde o sincronismo mesmo para um tempo de abertura da proteção ( $t_{ab}$ ) igual ao tempo máximo de simulação.

- ❖ Considerando o tipo de *falta curto-circuito fase-fase-terra* ocorrido na linha “1-3” próximo à barra “3”, tem-se os seguintes resultados de trajetórias para  $\delta$  e  $\omega$ , através de simulações no MATLAB:

- Para um tempo de abertura simulado de  $t_{ab} = 2,990$  s, tem-se o seguinte comportamento dinâmico da máquina síncrona, como mostrado na Figura 4.5:



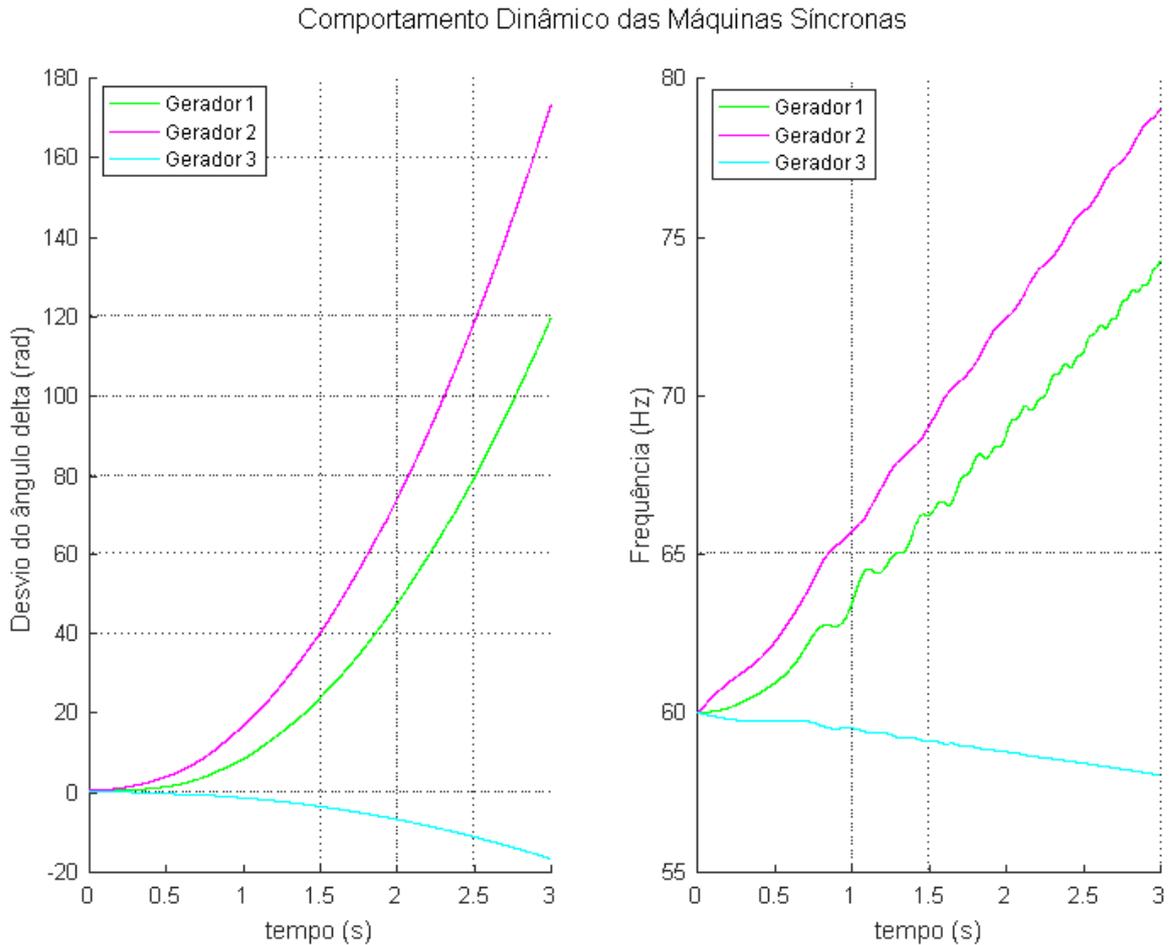
**Figura 4.5: Comportamento dinâmico das máquinas síncronas considerando uma falta do tipo curto-circuito fase-fase-terra ocorrido na linha “1-3” próximo à barra “3” e um  $t_{ab} = 2,990$  s. (Exemplo 4.1.)**

Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 4.5, verifica-se que os geradores não perdem o sincronismo mesmo para um tempo de abertura alto, para fins de análises transitórias, de 2,990 s e, portanto, considera-se que este sistema é transitóriamente estável mesmo para  $t_{ab}$  igual ao tempo máximo de simulação. Porém, deve-se ressaltar que a proteção deve atuar no menor tempo possível, para evitar-se danos aos equipamentos que compõem o sistema elétrico de potência em função das altas correntes de curto-circuito que circularão pelo mesmo.

Agora estudar-se-á um dos casos onde o sistema perde o sincronismo para qualquer tempo de abertura.

- ❖ Considerando o tipo de *falta curto-circuito fase-fase-terra* ocorrido na linha “2-3” próximo à barra “2”, tem-se os seguintes resultados de trajetórias para  $\delta$  e  $\omega$ , através de simulações no MATLAB:
  - Para um tempo de abertura simulado de  $t_{ab} = 0,001$  s, tem-se o seguinte comportamento dinâmico da máquina síncrona, como mostrado na Figura 4.6:



**Figura 4.6: Comportamento dinâmico das máquinas síncronas considerando uma falta do tipo curto-circuito fase-terra ocorrido na linha “2-3” próximo à barra “2” e um  $t_{ab} = 0,001$  s. (Exemplo 4.1.)**

**Fonte: Autoria própria.**

Através da Figura 4.6, verifica-se que os geradores perdem o sincronismo mesmo para um tempo de abertura muito pequeno de 0,001 s e, portanto, considera-se que este sistema é transitóriamente instável para qualquer tempo de abertura. Além disso, a mesma situação é verificada para os outros tipos de faltas, conforme os

resultados apresentados na Tabela 4.4. Isso se deve pelo fato do sistema pós-falta ser o mesmo para todas as faltas analisadas ocorrendo na linha de transmissão “2-3”.

Ao eliminar a linha de transmissão “2-3”, o defeito é isolado, entretanto o sistema perde grande capacidade de transmissão de potência, já que a linha em questão é a mais importante do sistema e o sistema pós-falta não possui ponto de equilíbrio estável. Como consequência, haverá um desbalanço permanente de potência no sistema pós-falta, ocasionando oscilação permanente entre os ângulos dos rotores e a perda de sincronismo.

Para contorno deste problema sistêmico, pode-se sugerir as seguintes medidas sobre o sistema em estudo:

- ❖ Duplicação da linha de transmissão “2-3”, para aumentar-se a confiabilidade caso uma das duas sofra uma falta e, assim, o sistema encontrar um ponto de equilíbrio também no pós-falta;
- ❖ Duplicação ou aumento de capacidade de transferência de potência das linhas de transmissão “1-2” e “1-3”, para aumentar a estabilidade transitória e capacidade de transmissão de potência caso a linha “2-3” sofra uma falta;

Nas figuras das análises anteriores, verifica-se que as máquinas aceleram mesmo em condições de sincronismo entre as mesmas. Assim, diferentemente do constatado na solução do Exemplo 3.1, aqui estabilidade e sincronismo não são a mesma coisa. Pois, conforme citam Bretas e Alberto 2000, a análise de estabilidade transitória em sistemas de potência é uma análise de sincronismo entre as máquinas e não de estabilidade do sistema.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como proposto para este trabalho, alcançou-se o objetivo geral de desenvolver-se um algoritmo computacional para a análise de estabilidade transitória em sistemas elétricos de potência considerando faltas assimétricas e simétricas. Além disso, verificou-se através de simulações que o algoritmo desenvolvido atendeu de forma satisfatória aos objetivos específicos propostos no Capítulo 1. Tudo isso a partir de conhecimentos adquiridos durante o curso, pesquisa sobre o assunto e ao aproveitamento de muitas das rotinas tradicionais utilizadas em programas de estabilidade que consideram apenas faltas trifásicas, adaptando-as para contemplarem as faltas assimétricas.

O ponto chave deste trabalho foi o uso de componentes simétricas para representação da rede durante a falta, isto para que o algoritmo contemplasse a análise tanto de faltas simétricas quanto assimétricas. Uma das dificuldades encontradas foi justamente com a revisão bibliográfica sobre componentes simétricas e de como aplicá-la ao estudo proposto, isso devido aos poucos trabalhos encontrados sobre o tema. Com isso, procurou-se utilizar uma linguagem de fácil compreensão durante a revisão sobre o assunto no Capítulo 2 deste trabalho, podendo o mesmo servir de material de apoio para outros estudantes.

Por fim, após o desenvolvimento do algoritmo e simulações, os resultados demonstraram que:

- ❖ Os diferentes tipos de faltas estudados seguem a seguinte ordem de severidade para os sistemas elétricos estudados neste trabalho: curto-circuito trifásico; curto-circuito fase-fase-terra; curto-circuito fase-fase; e curto-circuito fase-terra;
- ❖ O ponto de ocorrência da falta e, conseqüentemente, a configuração do sistema após a eliminação da mesma (sistema pós-falta) foi determinante para haver ou não um ponto de equilíbrio estável para o sistema pós-falta e assim ter-se tempo crítico de abertura.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após demonstrar-se como a ferramenta das componentes simétricas pode ser utilizada para estudos de faltas assimétricas, pode-se sugerir que:

- ❖ Sejam analisados sistemas maiores e mais complexos, como os de 14 e 30 barras do IEEE e outros sistemas utilizados na literatura;
- ❖ Diminua-se as hipóteses simplificadoras utilizadas no decorrer deste trabalho, com isso, aproximar-se-ia a análise aos sistemas reais encontrados na prática;
- ❖ Sejam considerados os efeitos de amortecimento do sistema e dos equipamentos de atuação rápida, como, por exemplo, os sistemas de excitação (regulação de tensão) microprocessados existentes nos dias atuais, dentre outros;
- ❖ Faça-se o estudo tomando uma máquina como referência ou um centro de ângulo como referência, para com isso evitar-se o problema encontrado no Exemplo 4.1 deste trabalho, onde as máquinas continuavam acelerando juntas em sincronismo, mesmo para sistemas considerados transitoriamente estáveis.

## REFERÊNCIAS

BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. **“Estabilidade transitória em sistemas eletroenergéticos”** São Carlos - SP: EESC/USP, 2000.

EVANS, R.D.; BERGVALL, R. C., **“Experimental Analysis of Stability and Power Limitations”** *AIEE Trans.*, pp. 1924.

EVANS, R.D.; WAGNER, C.F., **“Further Studies of Transmission System Stability”** *AIEE Trans.*, pp. 51-80, 1926.

FORTESCUE, C. L., **“Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks”** *AIEE Trans.*, vol. 37, pp. 1027-1140, 1918.

GARCIA, L. M.; LOPES, L. G.; DA SILVA, P. M. **“Estudo de estabilidade transitória em sistemas multimáquinas”** 2013. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1922/1/CT\\_COELE\\_2013\\_1\\_05.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1922/1/CT_COELE_2013_1_05.pdf)>. Acesso em: Abril, 2016

GRAINGER, John J.; STEVENSON, William D., **“Power System Analysis.”** Singapore: McGraw-Hill Book Co, 1994.

KIMBARK, Edward W., **“POWER SYSTEM STABILITY: Volume 1: Elements of Stability Calculations”** New York: Wiley-IEEE Press, 1995.

KINDERMANN, Geraldo., **“Curto-Circuito”** Florianópolis: 5ª Edição do autor, 2010.

KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSON, G.; BOSE, A.; CANIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; VAN CUTSEM, T.; VITTAL, V. **“Definition and Classification of Power System Stability”** *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, 2004.

KUNDUR, P. **“Power System Stability and Control”**. UNITED STATES OF AMERICA: ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1994.

ROBBA, Ernesto João. **“Introdução a sistemas elétricos de potência”** São Paulo: Editora Blücher, 1977.

STEINMENTZ, C. P., **“Power Control and Stability of Electric Generating Stations”** *AIEE Trans.*, Vol. XXXIX, Part II, pp. 1215, July-December, 1920.

WILKINS, R., **“Practical Aspects of System Stability”** *AIEE Trans.*, pp. 41-50, 1926.



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
DBAR(1,4) = asin((DBAR(1,5)*(X1eq_B1_B2+X1t2))/DBAR(1,3)*DBAR(2,3));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Criação dos fasores de tensão dos barramentos %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
E1 = DBAR(1,3).*exp(i*DBAR(1,4));
EB = DBAR(2,3).*exp(i*DBAR(2,4));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Cálculo da corrente entre o barramento #1 e #2 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
I1B = (E1-EB)/(i*(X1eq_B1_B2+X1t2));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Cálculo da tensão interna dos geradores #1 e #2 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Eg1 = (i*(X1g1+X1t1))*I1B + E1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Cálculo da tensão interna eficaz do gerador #1 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Eg1_ef = abs(Eg1)
EB_ef = abs(EB);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Cálculo do ângulo da tensão interna do gerador #1 em graus %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
deltaG1 = angle(Eg1);
deltaG1_graus = rad2deg(angle(Eg1))

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Cálculo da potência elétrica durante a falta e pós-falta %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Pe_falta = (Eg1_ef * EB_ef)/Xab
Pe_pos_falta = (Eg1_ef * EB_ef)/X1eq_pos_falta

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Critérios de simulação %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
h = 10^(-4); %passo
tab = input('Qual o tempo de abertura tab(s)? '); %tempo de abertura
tt = 3; %tempo total de simulação
t(1) = 0; %tempo inicial da simulação
c = 1; %contador da simulação
Omega_inicial = 0;

while t<=tt
    if t==0
        d(c) = deltaG1; %situação inicial
        o(c) = Omega_inicial; %situação inicial
    elseif t < tab
        d(c) = d(c-1)+o(c-1)*h; %iteração durante a falta
        o(c) = o(c-1)+((1-Pe_falta*sin(d(c-1)))/0.0265)*h;
    else
        d(c) = d(c-1)+o(c-1)*h; %iteração no pós-falta
        o(c) = o(c-1)+((1-Pe_pos_falta*sin(d(c-1)))/0.0265)*h;
    end
    t(c) = c*h; %matriz tempo
    c = c+1; %incrementa o contador da simulação
end

```

```

end

plot(t,d)
xlim([0 tt])
xlabel('tempo (s)')
ylabel('Desvio do ângulo delta (rad)')
figure
plot(t,o)
xlim([0 tt])
xlabel('tempo (s)')
ylabel('Desvio da velocidade (rad/s)')
figure
plot(d,o)
xlabel('Desvio do ângulo delta (rad)')
ylabel('Desvio da velocidade (rad/s)')

%%
clc, clear all, close all

t = 0:0.0001:pi;
Ppre = 1.5465*sin(t);
plot(t,Ppre,'b')
hold on
Ppos = 1.2209*sin(t);
plot(t,Ppos,'g')
Pft = 1.1716*sin(t);
plot(t,Pft,'c')
Pff = 0.9586*sin(t);
plot(t,Pff,'y')
Pfft = 0.7837*sin(t);
plot(t,Pfft,'m')
P3f = 0.3932*sin(t);
plot(t,P3f,'r')
pm = ones(1,length(t));
plot(t,pm,'k--')
xlim([0 pi])
xlabel('Ângulo \delta (rad)')
ylabel('Potência (pu)')
title('Relação de Ângulo-Potência para as Diversas Situações do Exemplo 3.1')
legend('Ppré-falta','Ppós-falta','Pfalta F-T','Pfalta F-F','Pfalta F-F-T','Pfalta 3F','Pm')

```

## ANEXO A – Método de integração numérica

Conforme Kundur (1994), as equações diferenciais para serem resolvidas em análises de estabilidade em sistemas de potência são equações com valores iniciais conhecidos:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad (\text{A.1a})$$

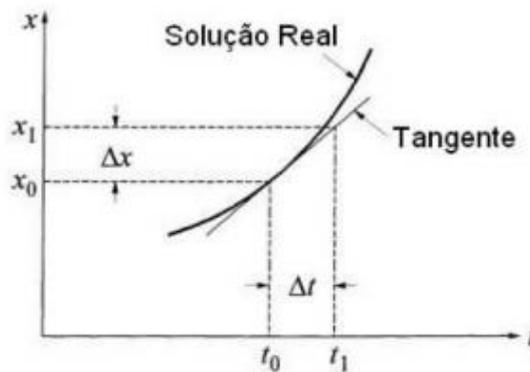
onde  $\mathbf{x}$  é o vetor de estado de  $n$  variáveis dependentes e  $t$  é a variável independente (tempo). Onde o objetivo é resolver  $\mathbf{x}$  como uma função de  $t$ , com valores iniciais de  $\mathbf{x}$  e  $t$  iguais à  $\mathbf{x}_0$  e  $t_0$ , respectivamente.

### A.1 MÉTODO DE EULER

Considere-se a equação diferencial de primeira ordem

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad (\text{A.1b})$$

com  $x = x_0$  em  $t = t_0$ . A Figura A.1 ilustra o princípio de aplicação do método de Euler.



**Figura A.1: Representação do método de Euler**

**Fonte: Kundur, 1994.**

Em  $x = x_0$ ,  $t = t_0$  pode-se aproximar a curva representando a solução real por sua tangente tendo uma inclinação

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} = f(x_0, t_0)$$

Portanto,

$$\Delta x = \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} \cdot \Delta t$$

O valor de  $x$  em  $t = t_1 = t_0 + \Delta t$  é dado por

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_0} \cdot \Delta t \quad (\text{A.2})$$

O método de Euler é equivalente ao uso dos dois primeiros termos da expansão em séries de Taylor por  $x$  em volta do ponto  $(x_0, t_0)$ :

$$x_1 = x_0 + \Delta t(\dot{x}_0) + \frac{\Delta t^2}{2!}(\ddot{x}_0) + \frac{\Delta t^3}{3!}(\dddot{x}_0) + \dots \quad (\text{A.3})$$

Após usar a técnica de Euler para determinação de  $x = x_1$  correspondendo à  $t = t_1$ , pode-se pegar outra pequena variação de tempo  $\Delta t$  e determinar  $x_2$  correspondendo à  $t_2 = t_1 + \Delta t$  como segue:

$$x_2 = x_1 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x=x_1} \cdot \Delta t \quad (\text{A.4})$$

Pela aplicação sucessiva da técnica, valores de  $x$  podem ser determinados correspondendo à diferentes valores de  $t$ .

O método considera apenas a primeira derivada de  $x$  e é, portanto, referido a um método de primeira ordem. Para dar-se precisão suficiente para cada passo,  $\Delta t$  deve ser pequeno. Isso vai aumentar erros de arredondamento, e o esforço computacional necessário vai ser muito alto.

## REFERÊNCIAS

KUNDUR, P. **“Power System Stability and Control”**. UNITED STATES OF AMERICA: ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1994.