

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Mateus Franco Silva

**Estudo de estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência utilizando o método
passo-a-passo para cálculo da curva de oscilação da máquina síncrona.**

UBERLÂNDIA

2017

Mateus Franco Silva

Estudo de estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência utilizando o método passo-a-passo para cálculo da curva de oscilação da máquina síncrona.

Trabalho de conclusão de curso de graduação, apresentado a Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães.

UBERLÂNDIA

2017

Mateus Franco Silva

Estudo de estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência utilizando o método passo-a-passo para cálculo da curva de oscilação da máquina síncrona.

Trabalho de conclusão de curso de graduação, apresentado a Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Uberlândia, MG _____ de _____ de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adélio José de Moraes - UFU

Mestre Thales Lima Oliveira - UFU

Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães – UFU (Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada seria possível.

Ao meus pais que sempre me incentivaram a estudar, se esforçando ao máximo para me fornecer aquilo que eu necessitava, me encorajando nos momentos de fraqueza, se alegrando comigo nas vitórias e me aconselhando sempre, para que além de um estudante eu me tornasse uma pessoa melhor.

A minha namorada que sempre me incentivou a correr atrás dos meus sonhos e esteve ao meu lado, eu os alcançando ou não.

Ao meu professor orientador Dr. Geraldo Caixeta Guimarães e ao professor Dr. Adélio José de Moraes, pela sabedoria e prestatividade que sempre tiveram para comigo.

As minhas irmãs e demais familiares por todo suporte ao longo destes anos.

Aos meus amigos de graduação e ao grupo PET Elétrica por terem tornado esses anos de aprendizado melhores de se viver.

“Tudo posso naquele que me Fortalece.”

Filipenses 4:13

SILVA, Mateus Franco. **Estudo de estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência utilizando o método passo-a-passo para cálculo da curva de oscilação da máquina síncrona**. 2017. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo utilizando o Método Passo-a-Passo no módulo GUIDE do software MATLAB com o objetivo de estudar a estabilidade de um sistema de potência constituído por uma máquina contra um barramento infinito. Além do algoritmo, este trabalho objetiva também realizar o estudo de estabilidade transitória do sistema por meio da análise do comportamento da curva de oscilação da máquina síncrona logo após um distúrbio. Para isso, primeiramente se realiza uma introdução sobre o estudo de estabilidade em sistemas elétricos de potência, apresentando os problemas e premissas e classificando dentro dessa área os diferentes tipos de fenômenos que são considerados. Em seguida, é abordada a parte teórica do estudo onde são fornecidos conceitos fundamentais e a base matemática para se entender o comportamento das máquinas síncronas dentro desta área de estudo. Por fim, são apresentados o método, algoritmo desenvolvido, os resultados obtidos, comparações com outros resultados já validados e as conclusões desse trabalho.

Palavras chave: Ângulo de potência; Estabilidade transitória; Máquinas síncronas, Sistemas de Potência.

SILVA, Mateus Franco. **Transient stability study of electrical power systems using the step-by-step method for calculating the oscillation curve of the synchronous machine**. 2017. 68 f. Graduation conclusion Work (Graduation in Electrical Engineering) – Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2017.

ABSTRACT

This work presents the development of an algorithm using the Step-by-Step Method in the GUIDE module of MATLAB software in order to study the stability of a power system constituted by a machine against an infinite bus. Besides the algorithm, this work also aims to study the transient stability of the system by analyzing the behavior of the oscillation curve of the synchronous machine soon after a disturbance. For this, an introduction is made first to the study of stability in electric power systems, presenting the problems and premises and classifying within this area the different types of phenomena that are considered. Next, the theoretical part of the study is presented, where fundamental concepts and the mathematical basis are provided to understand the behavior of synchronous machines within this area of study. Finally, the algorithm developed, the obtained results, comparisons with other validated results and the conclusions of this work are presented.

Key words: Power angle, transient stability, synchronous machine, power system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Pêndulo Simples	16
Figura 2-Sistema Estável	18
Figura 3-Sistema Instável	18
Figura 4-Representação Máquina Síncrona.....	23
Figura 5-Representação dos torques: mecânico e elétrico	24
Figura 6-Representação ângulos mecânicos.....	25
Figura 7: Valores típicos de H para alternadores hidráulicos do tipo vertical	29
Figura 8: Valores típicos de H para alternadores hidráulicos para turbo-alternadores de grande porte	30
Figura 9-Representação trifásica no tempo e vetorial das tensões induzidas no estator da MS a vazio	32
Figura 10- Conjugados elétrico e mecânico para uma MS operando como gerador	33
Figura 11: Representação clássica de uma máquina síncrona	34
Figura 12: Transferência de potência entre duas máquinas	35
Figura 13: Diagrama fasorial do exemplo	36
Figura 14- Curva do ângulo de Potência	36
Figura 15: Diagrama máquina barramento infinito	37
Figura 16: Inclinação da curva potência-ângulo, S_p	40
Figura 17: Curvas de potência- Critério das áreas :.....	44
Figura 18: Sistemas estável e instável- Critério das áreas	46
Figura 19: Sistema duas máquinas finitas	48
Figura 20: Diferença angular entre as máquinas	49
Figura 21: Representação clássica de um sistema multimáquinas	51
Figura 22: Valores reais e supostos pelo método	53
Figura 23: Diagrama unifilar do exercício.	55
Figura 24: Curva de oscilação do G1-Sistema Estável	56
Figura 25: Diagrama Modelo	56
Figura 26: Circuito durante a falta	57
Figura 27: Fluxograma do Algoritmo	57

Figura 28: Caso 1 para um $\Delta t = 0.1s$	59
Figura 29: Caso 1 para um $\Delta t = 0.001s$	60
Figura 30: Caso 1 para uma falta na linha 2 a 30% de G1- Sistema Instável $t_{chav} = 0,3$	60
Figura 31: Caso 1 para uma falta na linha 2 a 30% de G1- Sistema Instável $t_{chav} = 0,28$...	61
Figura 32: Esquemático caso 2 PSP-UFU	62
Figura 33: Caso 2 – Sistema Estável - Comparação	63
Figura 34: Caso 2 – Sistema Instável - Comparação $X_f[pu] = 0$	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	TEMA.....	12
1.1.1	Delimitação do Tema	13
1.1.2	Problemas e Premissas	13
1.3	OBJETIVOS.....	14
1.3.1	Objetivo Geral.....	14
1.3.2	Objetivos Específicos	14
1.4	JUSTIFICATIVAS	14
2	ESTUDO DA ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	15
2.1	INTRODUÇÃO A ESTABILIDADE.....	15
2.2	ESTABILIDADE DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	17
2.2.1	Estabilidade de Regime Permanente.....	19
2.2.2	Estabilidade de Regime Dinâmico	19
2.2.3	Estabilidade de Regime Transitório.....	20
3	CONCEITOS E MODELAGEM PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	20
3.1	INTRODUÇÃO A MECÂNICA DE ROTAÇÃO	20
3.2	MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA.....	22
3.3	CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO A CONSTANTE DE INÉRCIA H E SOBRE A EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO	28
3.4	MODELAGEM CLÁSSICA DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS DENTRO DO ESTUDO DE ESTABILIDADE	32
3.5	CURVA DO ÂNGULO DE POTÊNCIA DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA.....	35
3.6	SISTEMA MÁQUINA BARRAMENTO INFINITO	37
3.7	COEFICIENTES DE POTÊNCIA SINCRONIZANTE	38
3.8	CRITÉRIO DAS ÁREAS IGUAIS	41
3.8.1	Crítério das Áreas Iguais para um Sistema de duas Máquinas Finitas.....	48
3.9	REPRESENTAÇÃO CLÁSSICA PARA UM SISTEMA MULTIMÁQUINAS.....	49
4	MÉTODO E RESULTADOS OBTIDOS	52
4.1	DESCRIÇÃO DO MÉTODO PASSO A PASSO PARA CÁLCULO DA CURVA DE OSCILAÇÃO	52

4.2	DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO	56
4.3	RESULTADOS OBTIDOS	59
5	CONCLUSÃO.....	64
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE	67

1 INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial em meados do século XIX a eletricidade influi diretamente na qualidade de vida das pessoas e na economia global. Sendo a relação entre o consumo energético e o PIB bastante evidentes, desde o processo de industrialização até os dias atuais. A ponto de no passado se considerar que quanto maior o consumo energético do país maior o seu PIB. Hoje essa relação é mais complexa, mas sem dúvidas a eletricidade continua sendo um dos elementos primordiais do desenvolvimento econômico e tecnológico.

Os sistemas elétricos de potência podem ser divididos em três partes principais: centrais geradoras, linhas de transmissão e os sistemas de distribuição. As centrais geradoras são compostas por um conjunto de máquinas síncronas, responsáveis pela conversão de uma determinada fonte de energia para a energia elétrica. As linhas de transmissão constituem o elo de ligação entre as centrais geradoras e os sistemas de distribuição. E os sistemas de distribuição, por sua vez são responsáveis por interligar as cargas ao sistema (STEVENSON JR., 1986).

A priori os sistemas elétricos eram operados como unidades individuais, sistemas isolados. No entanto, com o passar do tempo a demanda de potência e a necessidade de uma maior confiabilidade, ocasionaram em um aumento da malha elétrica de maneira a interligar uma região a outra. A maioria dos sistemas elétricos atuais são interligados, o que fornece vantagens, como o aumento da capacidade de reserva do sistema e o intercâmbio de energia entre as concessionárias. É graças a esse intercâmbio que uma região cujos reservatórios das hidrelétricas estejam baixos, pode não ficar totalmente dependente de fontes de energias mais caras, por exemplo as termoeletricas, podendo importar energia de outras regiões.

Apesar das malhas interligadas terem proporcionado a criação de caminhos alternativos e aumentado a confiabilidade na transmissão de energia, é necessário respeitar alguns padrões para que o paralelismo entre as máquinas síncronas seja atendido e o sistema não entre em colapso. É importante salientar também que os níveis de curto circuito aumentam, a falha de um sistema pode propagar-se para o outro e o estudo do fluxo de potência e planejamento da operação se tornam bem mais complexos.

Visando essa complexidade e a qualidade da energia entregue ao consumidor, os sistemas elétricos de potência são responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica dentro de certos limites de tensão e frequência estabelecidos via contrato, caso um desses indicadores não

seja devidamente atendido, além do lesão ao consumidor a concessionária também será responsabilizada pelo não cumprimento do contrato.

Segundo o autor Kundur (1994) os sistemas elétricos para serem considerados confiáveis devem permanecer intactos e capazes de resistir a uma larga série de distúrbios. Portanto, é essencial que o sistema seja projetado e operado de maneira que as contingências sejam suportadas sem a perda de cargas (exceto na qual ocorreu a falta) e que as mais desfavoráveis faltas não resultem na perda do controle do sistema, ocasionando em interrupções em cascata do suplemento das cargas.

Para garantir, portanto, uma operação mais confiável do sistema, se faz necessário o estudo dessas perturbações. A estabilidade de sistemas elétricos de potência aborda os aspectos gerais da operação de um sistema elétrico, levando em consideração seu funcionamento subsequente a uma perturbação no sistema (GUIMARÃES, 2016). A estabilidade de sistemas elétricos de potência pode ser analisada considerando três parâmetros básicos: ângulo do rotor das máquinas síncronas, frequência e tensão (MACHOWSKI ET AL., 2008).

A estabilidade das máquinas síncronas pode ser classificada em dois segmentos um para pequenos impactos sobre a rede, impactos aleatórios, que geram problema de estabilidade dinâmica, por exemplo, a perda de uma carga de pequeno porte ou um chaveamento de capacitores de baixa potência. E o outro para grandes impactos, estabilidade transitória, que podem, por exemplo, ocorrer devido a uma falta de grande amplitude ou a perda de um gerador de grande porte.

Desse modo, é importante se ter um estudo adequado dos sistemas de potência no que rege a estabilidade. Visto que o ângulo do rotor da máquina síncrona é um parâmetro importante para se ter uma resposta quanto a estabilidade ou instabilidade do sistema após uma perturbação, o estudo ou simulação que venha modelar o comportamento do sistema perante uma contingência, monitorando o ângulo do rotor e verificando se ocorrerá a perda ou não do sincronismo entre os geradores se faz importante em relação a confiabilidade dos sistemas elétricos de potência.

1.1 TEMA

Estabilidade em sistemas elétricos de potência.

1.1.1 Delimitação do Tema

Segundo Kundur (1994) a estabilidade de sistemas elétricos pode ser definida de forma ampla como sendo a propriedade de um sistema elétrico de potência que permite que ele permaneça em funcionamento sob condições normais de operação e a capacidade que ele possui para se recuperar a um estágio de equilíbrio aceitável, após ter sido submetido a um distúrbio.

O estudo da estabilidade em sistemas elétricos de potência é bastante amplo e complexo, podendo ser dividido entre duas vertentes: o da estabilidade dinâmica e o da estabilidade transitória. O estudo da estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência consiste no estudo de casos envolvendo variações grandes e bruscas (impactos) de gerações e/ou cargas, as quais podem provocar perdas de sincronismo entre máquinas síncronas ligadas no sistema (GUIMARÃES, 2016).

Este trabalho irá abordar a estabilidade transitória de um sistema máquina barramento infinito, tendo como elemento primordial o monitoramento do ângulo do rotor da máquina síncrona, de maneira que após uma contingência do sistema de potência possa se determinar a estabilidade ou instabilidade dele através do método passo-a-passo para o cálculo da curva de oscilação da máquina síncrona.

1.1.2 Problemas e Premissas

Os sistemas elétricos de potência estão sujeitos a condições que podem alterar o seu estado normal de operação. Muitas dessas condições possuem caráter transitório e o estudo e modelagem destes fenômenos são de fundamental importância dentro da engenharia elétrica.

O problema da estabilidade constitui no estudo do comportamento das máquinas síncronas quando há uma contingência no sistema elétrico de potência. Esta contingência levará a uma nova condição de operação que ocasionará na estabilidade ou instabilidade do sistema. Para se determinar o estado deste sistema após essa nova condição, pode-se monitorar os parâmetros elétricos, tensão, frequência e ângulo de potência das máquinas síncronas.

O estudo da estabilidade transitória envolve grandes distúrbios que para a sua resolução exige o uso de equações algébricas e diferenciais não lineares. Estes problemas podem ser resolvidos por meio de métodos diretos ou por procedimentos iterativos passo a passo (STEVENSON JR., 1986).

Considerando que os problemas de estabilidade, principalmente os que envolvem a estabilidade transitória são de resolução matemática complexa, para facilitar na resolução do método empregado neste trabalho, foi utilizado o *software* MATLAB.

O uso de programas computacionais, a fim de auxiliar e possibilitar uma resolução mais eficaz para o problema é de extrema importância, uma vez que as ferramentas computacionais estão a todo tempo presente durante a formação acadêmica e irão fazer parte da vida profissional do engenheiro eletricista. A opção pelo MATLAB, apesar de não ser um *software open source*, foi realizada pela alta versatilidade e boa reputação que este *software* possui dentro da engenharia.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho possui como objetivo principal o desenvolvimento de um algoritmo para o cálculo da curva de oscilação de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito após ocorrida uma contingência, utilizando o módulo GUIDE do *software* MATLAB.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar a estabilidade em sistemas elétricos de potência.
- Estudar o comportamento da máquina síncrona durante uma contingência.
- Estudar a programação aplicada ao *software* MATLAB.
- Estudar alguns dos métodos existentes para se analisar a resposta do sistema, após uma contingência.
- Desenvolver, através do MATLAB um algoritmo para o cálculo da curva de oscilação de um sistema máquina barramento infinito.
- Comparar os resultados obtidos com a literatura e o *software* PSP-UFU.

1.4 JUSTIFICATIVAS

A confiabilidade no fornecimento elétrico de energia depende entre outras variáveis da capacidade que esse possui de manter os parâmetros de tensão e corrente constantes, ou dentro da faixa de tolerância considerável aceitável. Pois, uma queda de apenas alguns hertz pode

comprometer a alimentação de uma série de cargas, principalmente as que dependem de uma eletrônica de potência mais sofisticada.

Uma série de condições pode levar o sistema a não atender estes parâmetros adequadamente, como: curtos-circuitos, rompimento de linhas de transmissão, descargas atmosféricas, entrada ou saída de cargas de grande porte. Essas anomalias afastam o sistema do seu ponto de operação original, podendo o levar a instabilidade.

Se em algum momento os geradores que compõem o fornecimento de energia perdem o sincronismo, ou seja, perdem a estabilidade, podem-se ocasionar flutuações significativas de tensão e corrente, acarretando no desligamento pela proteção de linhas de transmissão e consequentemente no não suprimento das cargas do sistema (ANDERSON E FOUAD, 2003).

Portanto, se faz necessário ter um bom conhecimento sobre o comportamento do sistema após uma contingência, monitorando se a anomalia ao qual ele foi submetido pode o levar ao indesejável ponto de instabilidade, não permitindo que o mesmo opere adequadamente. Este trabalho vem agregar a esta análise, utilizando o método passo a passo para o cálculo da curva de oscilação de uma máquina síncrona. Por meio do módulo GUIDE do *software* MATLAB, simula-se um sistema máquina barramento infinito permitindo que o usuário entre com os parâmetros do sistema e realize a análise perante uma falha, a capacidade que o sistema possui de manter o sincronismo, consequentemente manter a estabilidade do sistema.

2 ESTUDO DA ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

2.1 INTRODUÇÃO A ESTABILIDADE

O conceito de estabilidade é abordado em diversas áreas da engenharia, não sendo aplicável somente a engenharia elétrica. Segundo Bretas e Alberto (2000) conceitos de estabilidade no âmbito científico, surgiram com os estudos de sistemas dinâmicos no século XVII quando conceitos fundamentais do cálculo diferencial foram desenvolvidos, em especial as contribuições de Isaac Newton e Leibniz.

Destas contribuições, pode-se destacar a conhecida equação de Newton:

$$f = \frac{d}{dt}(mv) = ma \quad (2.1)$$

Onde:

f - Força [N];

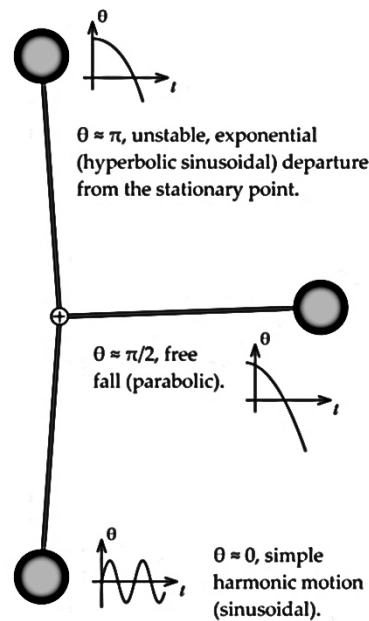
m - Massa [kg];

v - Velocidade [m/s];

a - Aceleração [m/s²];

Esta foi uma das primeiras equações diferencial desenvolvidas e através de suas variações, foi possível descrever vários problemas dos sistemas físicos dinâmicos. A fim de exemplificar um problema que envolva o conceito de estabilidade, aborda-se o pêndulo simples que é bastante conhecido e de resolução matemática não tão complexa.

Figura 1-Pêndulo Simples



Fonte: Nonlinear (2017)

A equação diferencial que descreve o movimento de um pêndulo simples pode ser descrita como:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \cdot \sin\theta = 0 \quad (2.2)$$

θ - Ângulo descrito pelo movimento do pêndulo [rad/s²];

g - Aceleração da gravidade [m/s²];

l - Comprimento do fio que sustenta o pêndulo [m];

Pela Figura 1, pode-se concluir que a estabilidade do movimento descrito pelo pêndulo dependerá do seu ângulo θ , por exemplo para um ângulo $\theta \cong \pi$ o sistema encontra-se em um ponto de equilíbrio considerável instável. Os pontos de equilíbrio são caracterizados fisicamente por aceleração e velocidades nulas. Desta forma pode-se definir que um sistema é

estável quando após perturbações aplicadas ao elemento no estado de equilíbrio, este retorna ao estado original ou pelo menos não se afasta significativamente dele (BRETAS; ALBERTO, 2000).

2.2 ESTABILIDADE DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Os sistemas elétricos de potência devem atender ao cliente garantindo a continuidade, a confiabilidade e a economia. No entanto, entre a cadeia de geração, transmissão e distribuição os sistemas estão sujeitos a condições que podem levá-lo a condições atípicas de operação, como curtos-circuitos. Quando a ocorrência destas condições ocasiona no desbalanço entre a potência gerada e a demandada pelas cargas, o sistema buscará um novo ponto de operação com o propósito de encontrar um novo ponto de equilíbrio.

O período que o SEP (Sistema Elétrico de Potência), leva para se ajustar a nova condição de operação é chamado de período transitório, sendo o comportamento do sistema durante este período de ajuste denominado de desempenho dinâmico. Esse desempenho é de fundamental importância para o estudo da estabilidade.

O critério determinante para se garantir a estabilidade do sistema após a condição atípica ao qual ele foi submetido, leva em conta a capacidade das máquinas síncronas manterem o sincronismo passado o período transitório.

Segundo o autor Kundur (1994) um sistema elétrico de potência pode ser considerado estável se a resposta oscilatória dele ao longo de um período transitório, passada a perturbação é amortecida e o sistema é capaz de estabelecer um novo ponto de operação em um tempo finito. Caso o sistema não venha conseguir a alcançar este ponto num tempo finito, ele será considerado instável.

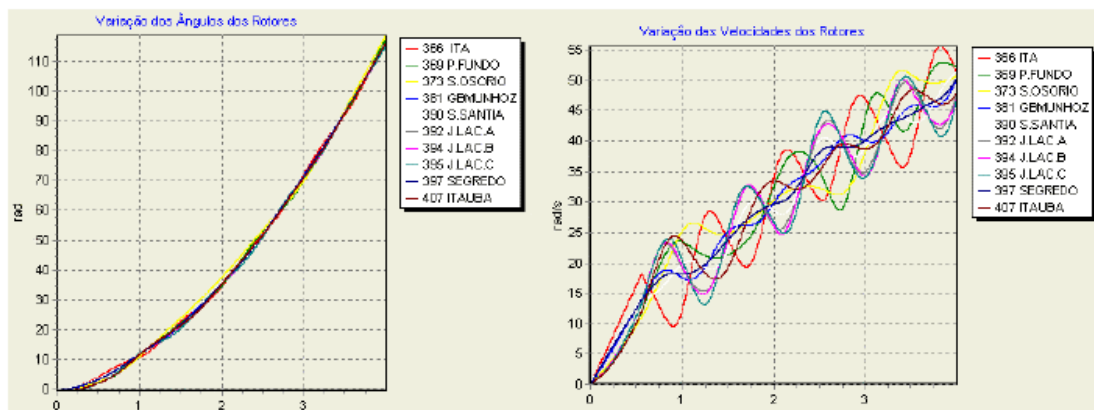
É importante atentar-se ao fato de que o desbalanço de potência ocasionará na alteração da velocidade das máquinas síncronas, mas mesmo um aumento considerável pode não levar a perda de sincronismo. O parâmetro primordial nessa análise, levando-se em conta um sistema multimáquinas deverá ser a diferença angular entre os seus ângulos rotóricos (GUIMARÃES, 2016).

Considera-se que um sistema pode ser julgado transitoriamente estável quando todas as suas máquinas aceleram ou desaceleram de maneira a não se afastarem de maneira significativa, ou seja, as máquinas oscilam em conjunto permanecendo a diferença entre seus ângulos limitada após a eliminação do defeito. Vale salientar que basta apenas uma das máquinas

componentes do sistema acelerar, de tal modo que a diferença entre o ângulo dela e o das demais se torne ilimitada para que o sistema seja considerado instável. (BRETAS; ALBERTO, 2000)

Pode-se aferir pela Figura 2 que os geradores sofreram um aumento angular e de velocidade, no entanto eles oscilam em conjunto não havendo um aumento significativo na diferença angular deles, portanto, é perceptível que o sistema ilustrado se trata de um sistema estável.

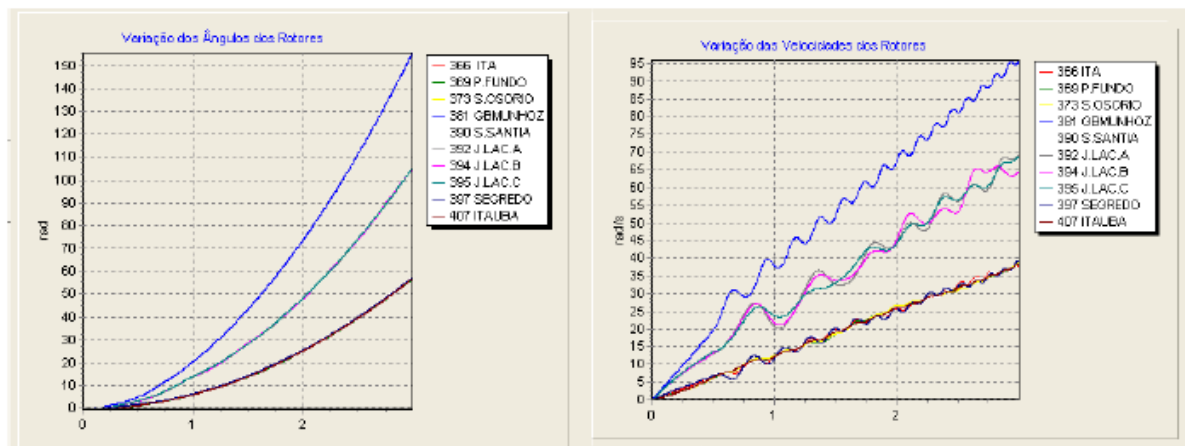
Figura 2-Sistema Estável



Fonte: Benedito (2007)

Já na Figura 3 após a perturbação do sistema os geradores se separam oscilando em três conjuntos distintos, com a diferença angular entre os conjuntos aumentando. Sabe-se que basta apenas uma máquina se afastar tornando a diferença entre o ângulo dela e o das demais ilimitada para que ocorra a instabilidade do sistema, portanto, o sistema ilustrado é instável.

Figura 3-Sistema Instável



Fonte: Benedito (2007)

2.2.1 Estabilidade de Regime Permanente

O estudo da estabilidade em regime permanente, ou estabilidade a pequenos sinais é empregado quando se tem variações graduais, pequenas e lentas no SEP. Essas variações produzem oscilações, porém nada que possa ser considerado alarmante, o que permite uma série de simplificações na modelagem da máquina síncrona.

Os estudos nessa área compreendem geralmente um período de tempo maior do que 300 segundos, 18000 ciclos, que é um tempo consideravelmente grande no âmbito da engenharia elétrica (GUIMARÃES, 2016). Segundo o IEEE um sistema de potência pode ser considerado estável em regime permanente para uma dada condição, se após uma pequena perturbação ele seja capaz de atingir uma condição de operação idêntica ou próxima à condição anterior da perturbação.

Os problemas que envolvem estabilidade de regime permanente, dificilmente ocasionaram na perda da estabilidade do SEP principalmente no que diz respeito a grandes sistemas, uma vez que as variações ocorridas durante este regime são normalmente já esperadas.

2.2.2 Estabilidade de Regime Dinâmico

O estudo das perturbações de pequena ordem no SEP, denomina-se estabilidade dinâmica. Entende-se, por pequenas perturbações, por exemplo variações normais de cargas nos barramentos. Este tipo de estudo envolve geralmente equações do sistema linearizadas em torno de um ponto de operação estável (BRETAS; ALBERTO, 2000). É importante se atentar ao fato de que uma perturbação somente poderá ser considerada suficientemente pequena, se não houver perda considerável de precisão ao se analisar a falta por meio de um modelo linearizado (BOMFIM, 2000).

Ainda segundo Bomfim (2000) a instabilidade do sistema poderá ser de duas formas: devido ao aumento aperiódico do ângulo do rotor causado pela falta de suficiente torque sincronizante; ou por oscilações angulares de amplitudes crescentes devido à falta de torque amortecedor da máquina síncrona.

Nesse tipo de regime a preocupação é com o comportamento a longo tempo do sistema, deve-se, portanto, levar em conta a ação dos sistemas de regulação de velocidade e de tensão das máquinas síncronas. As análises ou simulações que envolvam essa área devem ser realizadas durante vários segundos (GUIMARÃES, 2016).

2.2.3 Estabilidade de Regime Transitório

Como já mencionado ao longo deste trabalho, o estudo de estabilidade transitória aborda as grandes variações que o SEP está sujeito, como a perda de um grupo gerador, curto-circuito de grande magnitude e perda de linhas de grande importância. Essas contingências acabam por causar um desequilíbrio entre a potência gerada e a demandada o que podem levar a um excesso ou déficit de energia nas máquinas, fazendo com que elas acelerem ou desacelerem. Esta aceleração ou desaceleração fará com que os ângulos das máquinas variem ao longo do tempo, buscando um novo ponto de equilíbrio (BRETAS; ALBERTO, 2000).

Os problemas dessa área de estudo não permitem procedimentos de linearização e as equações algébricas e diferenciais não lineares, devem ser resolvidas por métodos diretos ou por procedimentos iterativos passo a passo. Eles podem ser subdivididos nos que levam em conta a primeira oscilação ou nos que consideram multioscilações do sistema (STEVENSON JR., 1986).

O estudo de estabilidade transitória é de grande importância prática, pois aborda fenômenos de grande impacto para o sistema elétrico. Possibilitando a previsão do seu comportamento, após a condição atípica ao qual ele foi submetido. Podendo dessa forma, antecipar as devidas mudanças que devem ser efetuadas na rede para que ocorrida uma falta o sistema seja capaz de se recuperar e alcançar uma condição estável de equilíbrio.

Uma análise de estabilidade transitória deve se estender por um período de tempo próximo a 1 segundo, devendo-se considerar as variações nas tensões induzidas nos enrolamentos de campo e enrolamentos amortecedores das máquinas (GUIMARÃES, 2016). Há uma série de métodos dentro do estudo de estabilidade transitória que não levam em conta os efeitos amortecedores acima, analisando a estabilidade do sistema elétrico de maneira considerada pessimista.

3 CONCEITOS E MODELAGEM PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

3.1 INTRODUÇÃO A MECÂNICA DE ROTAÇÃO

Dentre as análises realizadas em sistemas elétricos de potência, as mais comuns são as de curto-circuito, fluxo de potência e de estabilidade, sendo a última considerada a mais complexa (STOTT, 1979). A complexidade da análise transitória deve-se em grande parte na

difficuldade para se modelar o comportamento dos ativos, máquinas, transformadores e etc. quando ocorre uma contingência.

O comportamento transitório das máquinas síncronas envolve tanto os fenômenos de natureza elétrica quanto os de natureza mecânica. O primeiro, analisa o comportamento de fluxos magnéticos e correntes, o segundo é responsável por descrever as variações do ângulo do rotor e da velocidade das máquinas síncronas (DA MATA, 2005).

Para um melhor entendimento da física envolvida neste estudo, é necessário a priori ter uma boa noção da mecânica de rotação das máquinas. A fim de atender essa demanda será abordado alguns conceitos básicos dessa área, facilitando o entendimento de uma matemática mais complexa que será utilizada futuramente.

Suponha que o eixo da máquina se encontra em uma posição angular θ_1 para um instante de tempo t_1 e na posição angular θ_2 no instante t_2 , a esse deslocamento que ocorre durante o intervalo Δt se dá o nome de velocidade angular, expressa por:

$$w_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (3.1)$$

Sendo:

w_m = Velocidade angular mecânica [rad/s];

θ_m = Deslocamento angular mecânico [rad/s];

A velocidade e a aceleração angular descrita pela máquina durante o período transitório são parâmetros importantes para se determinar a estabilidade do sistema após uma contingência, pois como já exposto quando ocorre uma falta às máquinas tendem a acelerar ou desacelerar, essa aceleração ou desaceleração irá causar uma variação no ângulo do rotor das máquinas. Essa variação angular levará a uma diferença angular, que por sua vez será determinante quanto a estabilidade ou instabilidade da máquina.

A aceleração angular mecânica (α_m [rad/s²]) realizada pela máquina durante um intervalo de tempo Δt é descrita como:

$$\alpha_m = \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{dw_m}{dt} \quad (3.2)$$

Quando o eixo da máquina se encontra em rotação a energia cinética associada a esse movimento não pode simplesmente ser expressa pela fórmula convencional da energia cinética $K = \frac{1}{2}mv^2$ [J], pois isso somente nos forneceria a energia cinética do centro de massa do eixo, que é nula (HALLIDAY, 2009).

Ao invés disso, deve-se tratar o eixo como um conjunto de partículas com diferentes velocidades e somar as energias cinéticas de cada partícula, para obter a energia cinética do corpo como um todo.

$$K = \frac{1m_1v_1}{2} + \frac{1m_2v_2}{2} + \frac{1m_3v_3}{2} + \dots \sum \frac{1m_iv_i}{2} \quad (3.3)$$

Sendo m_i [kg] a massa da partícula de ordem i e v_i [m/s] a velocidade da partícula. No entanto, na Equação (3.3) a velocidade v_i não se aplica a todas as partículas do eixo. Podendo, portanto, ser substituída por $v = wr$, onde r [m] representa o raio do eixo nos dando a equação:

$$K = \frac{1}{2} (\sum m_i r_i^2) w_m^2 \quad (3.4)$$

O valor entre parênteses representa a resistência que o eixo possui ao movimento de rotação, a essa resistência chamamos de momento de inércia J [kg.m²] que pode ser expressa pela equação:

$$J = \sum m_i r_i^2 \quad (3.5)$$

Finalmente, substituindo a Equação (3.5) na Equação (3.4) iremos encontrar a expressão utilizada para a energia cinética de G [J] um corpo em rotação:

$$G = \frac{1}{2} J w_m^2 \quad (3.6)$$

Outra grandeza importante em relação a mecânica de rotação das máquinas é a quantidade de movimento angular ou momento angular M [Js/rad]. Fazendo uma analogia com a quantidade de movimento linear, pode-se dizer que o momento angular expressa o quão difícil seria parar o eixo da máquina em rotação. Expresso por:

$$M = J w_m \quad (3.7)$$

3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA

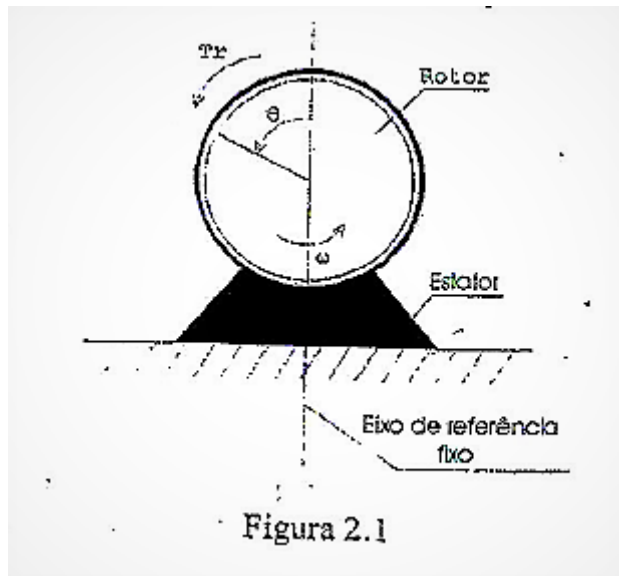
Na seção anterior foram apresentados conceitos bastante básicos em relação a mecânica de rotação das máquinas, no entanto para um devido estudo de estabilidade deve-se ter uma modelagem adequada do balanço delas durante o período transitório. As equações diferenciais

que serão apresentadas, descrevem o comportamento dinâmico do sistema obtido através de um balanço de potência individual das máquinas.

O gerador é movimentado por um elemento primário que lhe fornece potência mecânica em seu eixo. Parte dessa energia é convertida em elétrica que é entregue aos consumidores, mas a outra parte que não é convertida em energia elétrica transforma-se em potência de aceleração do rotor da máquina (BRETAS; ALBERTO, 2000).

Considere a máquina síncrona representada pela Figura 4:

Figura 4-Representação Máquina Síncrona



Fonte: Bretas e Alberto (2000)

A equação que descreve o movimento desenvolvido pelo rotor da máquina, é baseada no princípio elementar da dinâmica que diz ser o torque de aceleração igual ao produto do momento de inércia do rotor pela sua aceleração angular (STEVENSON JR., 1986). Descrita por:

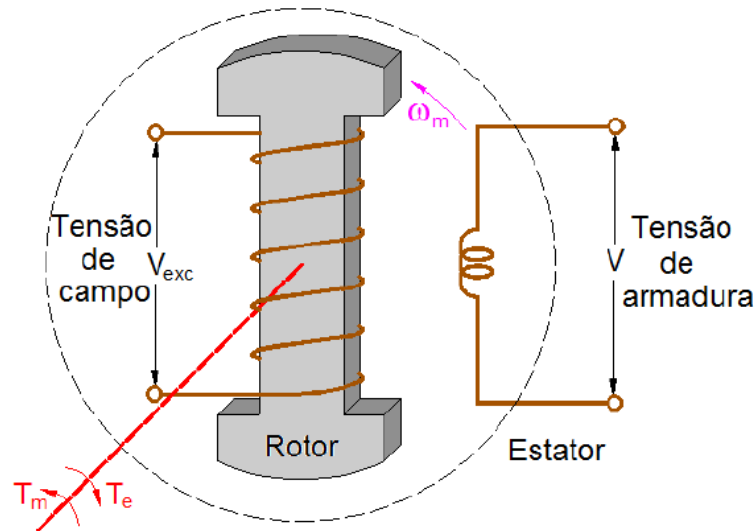
$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (3.8)$$

O torque mecânico T_m [N.m] representa o torque do eixo, suprido pela máquina primária movimentada por (água em hidrelétricas, ar em eólicas e etc.) menos o torque de retardo devido às perdas rotacionais, T_e [N.m] o torque eletromagnético que surge por meio dos campos magnéticos e T_a [N.m] o torque acelerante sofrido pela máquina. Para a máquina operando como gerador, o torque mecânico atua acelerando o rotor da máquina e o elétrico desacelerando.

Quando o gerador está operando em condições normais de operação o torque acelerante é nulo, ou seja, T_m é igual a T_e . Para essa condição, não há aceleração ou desaceleração das

massas do rotor, sendo a velocidade constante a própria velocidade síncrona, porém sob condições transitórias poderá ocorrer uma aceleração ou desaceleração da máquina fazendo com que T_a não seja nulo (STEVENSON JR., 1986). A Figura 5, ilustra a representação dos torques que a máquina está submetida.

Figura 5-Representação dos torques: mecânico e elétrico



Fonte: Guimarães e Oliveira (2017)

Na ocorrência de um torque acelerante deve-se levar em conta o movimento mecânico do rotor. Para facilitar, é estabelecido como referência um eixo que gira à velocidade síncrona, sendo o movimento angular descrito dado em função do tempo por (GUIMARÃES; OLIVEIRA, 2017):

$$\theta_m = \theta_0 + (w_m - w_s)t = \theta_0 + \delta_m = \theta_0 + w't \quad (3.9)$$

Onde:

θ_0 O ângulo inicial mecânico [rad];

w_m É a velocidade do eixo da máquina [rad/s];

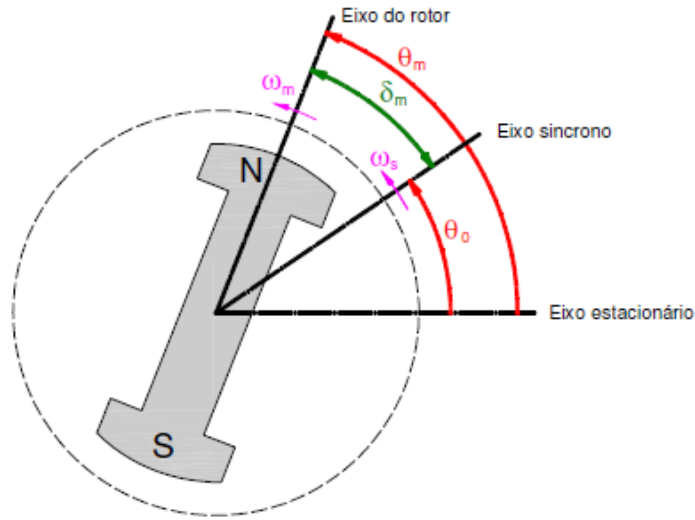
w_s É a velocidade síncrona da máquina [rad/s];

δ_m É o deslocamento angular do rotor, a partir do eixo de referência de rotação síncrono [rad];

w' É a velocidade angular relativa dada por $w' = w_s - w_m$ [rad/s];

Para uma melhor visualização da matemática que está sendo utilizada, tem-se a Figura 6 que ilustra os ângulos e as velocidades estudadas.

Figura 6-Representação ângulos mecânicos



Fonte: Guimarães e Oliveira (2017)

Derivando-se a Equação (3.9) em função do tempo:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{d\theta_o}{dt} + \frac{d\delta_m}{dt} = w_s + w' \quad (3.10)$$

A Equação (3.10) nos fornece a velocidade angular, para encontrarmos a expressão para a aceleração angular desenvolvida pela máquina, basta derivar novamente.

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \frac{dw'}{dt} \quad (3.11)$$

É importante ressaltar que a aceleração angular independe da referência utilizada, ou seja, o sistema de referência girante é um sistema inercial (BRETAS; ALBERTO, 2000). Portanto, a equação diferencial que descreve o comportamento de δ_m em relação ao tempo é a mesma que descreve o comportamento de θ_m , expressa por:

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (3.12)$$

A Equação (3.12) é dada em [N.m]. Em regime permanente o gerador gira a velocidade constante, velocidade síncrona, portanto a aceleração δ_m também será constante. Realizando uma simples mudança de variáveis poderemos simplificar a abordagem matemática, passando de um problema de soluções de equilíbrio para um problema de pontos de equilíbrio de um conjunto de equações diferenciais (BRETAS; ALBERTO, 2000).

É usual em sistemas elétricos trabalhar com potências ao invés de torques, pois a medição do torque é um processo complicado e de alto custo, enquanto que o de potência é mais simples já que pode ser realizado utilizando somente parâmetros puramente elétricos (BRETAS; ALBERTO, 2000). Sabe-se que a potência é igual ao torque vezes a velocidade angular, sendo assim para expressar a Equação (3.12) em termos de potência como desejado, basta multiplicar ambos os lados da equação por w_m .

$$Jw_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (3.13)$$

Onde:

P_m É a potência de entrada no eixo da máquina menos as perdas racionais [W];

P_e É a potência elétrica injetada na rede [W];

P_a É a potência de aceleração que leva em conta qualquer desbalanço entre P_e e P_m [W];

Vale salientar que usualmente utiliza-se a P_m como sendo a potência mecânica suprida pela máquina primária, desprezando-se as perdas rotacionais e as térmicas ocorridas na armadura. O termo Jw_m como visto na seção 3.1, fornece o momento angular M também conhecido como constante de inércia da máquina.

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (3.14)$$

Considerando que w_m não é igual a velocidade síncrona para todas as condições de operação, portanto o coeficiente M nem sempre poderá ser considerado constante. Na prática w_m não diverge muito da velocidade síncrona quando a máquina está estável e como expressar em termos de potência é mais usual do que em termos de torque, a Equação (3.14) é mais utilizada (STEVENSON JR., 1986).

A potência elétrica P_e entregue a rede é expressa em termos de parâmetros elétricos, logo é interessante relacionar o ângulo mecânico δ_m em termos de seu correspondente elétrico. Dado por:

$$\delta = \delta_m \frac{P}{2} \quad (3.15)$$

Onde:

P É o número de pólos da máquina.

A equação diferencial responsável por descrever o comportamento dinâmico da máquina em termos do ângulo elétrico é expressa por:

$$\frac{2M}{P} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (3.16)$$

Em sistemas elétricos de potência é preferível trabalhar com grandezas por unidade [p.u], dividindo ambos os lados da equação pela potência nominal da máquina S_b [W], tem-se:

$$\frac{2M}{PS_b} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_a}{S_b} = \frac{P_m}{S_b} - \frac{P_e}{S_b} \quad (3.17)$$

A equação 3.17 é fornecida em [p.u]. Para o estudo de geradores, principalmente os voltados a estabilidade, outra constante relacionada a inércia e amplamente utilizada é a constante H [MJ/MVA] que pode ser definida por:

$$H = \frac{\text{Energia cinética armazenada em megajoule na velocidade síncrona}}{\text{Potência nominal da máquina em MVA}}$$

e

$$H = \frac{\frac{1}{2} J w_m^2}{S_b} = \frac{\frac{1}{2} M w_m}{S_b} \quad (3.18)$$

Pode-se relacionar as duas constantes H e M pela equação:

$$M = \frac{2H}{w_m} S_b \quad (3.19)$$

a Equação (3.18) é dada em [MJ/rad mecânicos]. Substituindo (3.19) na equação (3.14):

$$\frac{2H}{w_m} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_a}{S_b} = \frac{P_m - P_e}{S_b} \quad (3.20)$$

A Equação (3.20) pode ser descrita em grandezas por unidade [p.u] como:

$$\frac{2H}{w_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (3.21)$$

A velocidade síncrona da máquina, w_s [rad/s], pode ser expressa como sendo $2\pi f$. Para um sistema de frequência elétrica f [Hz], a Equação (3.21) pode ser representada por:

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (3.22)$$

A Equação (3.22) está escrita em termos de radianos elétricos e é dada em [p.u.]. Se for de interesse expressar a mesma em termos de graus elétricos:

$$\frac{H}{180^\circ f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (3.23)$$

A Equação (3.21) é de fundamental importância para os estudos de estabilidade, pois é ela quem governa as dinâmicas rotacionais das máquinas, ela é conhecida como equação de oscilação. Pode-se escrever essa equação em termos de equações diferenciais de primeira ordem, da seguinte maneira:

$$\frac{2H}{w_s} \frac{dw}{dt} = P_a = P_m - P_e \quad (3.24)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = w - w_s \quad (3.25)$$

As grandezas utilizadas nas duas equações acima envolvem graus ou radianos elétricos. Diante de toda a matemática que foi exposta nesta seção é importante deixar claro que quando a equação de oscilação é resolvida, obtemos a expressão para o ângulo δ em função do tempo. O gráfico da solução nos fornece a curva de oscilação da máquina, objeto de estudo deste trabalho, e é a inspeção de todas as curvas do conjunto de máquinas do SEP analisado que fornecerá se as máquinas conseguiram manter a estabilidade após uma contingência, ou seja, se elas não saíram de sincronismo passada a falta.

3.3 CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO A CONSTANTE DE INÉRCIA H E SOBRE A EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO

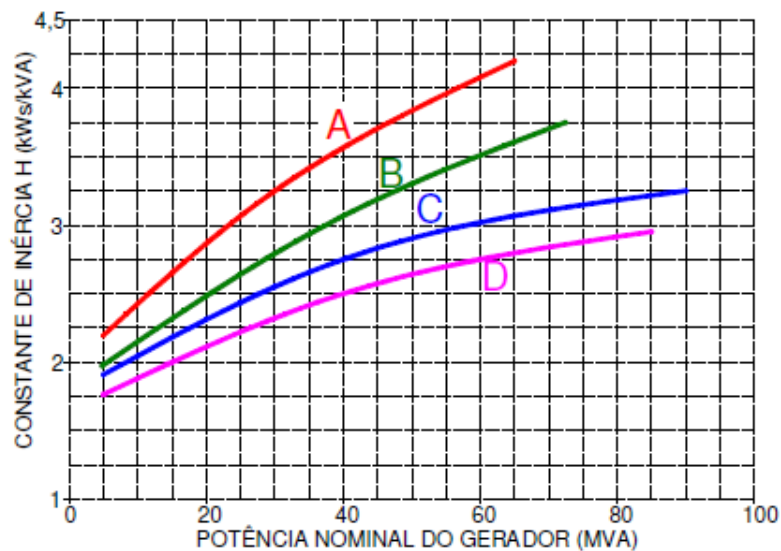
Como descrito na seção anterior a equação de oscilação também pode ser escrita em termos da constante M , no entanto isso não é usual, pois o valor de M varia amplamente com o tamanho e o tipo da máquina síncrona. Já a constante H não é tão sensível as características construtivas da máquina, assumindo uma faixa mais estreita de valores (STEVENSON JR., 1986). Para ilustrar essa afirmação, abaixo se encontra a Tabela 1 e as Figuras 7 e 8 que expressam alguns valores típicos da constante H :

Tabela 1-Valores típicos de H
Fonte: Adaptado de Barbosa (2013)

Tipo de máquina	Contaste de inércia H [MJ/MVA]
<i>Turbo Alternador</i>	—
1800 rpm	$6 < H < 9$
3600 rpm	$4 < H < 7$
<i>Alternador de pólos salientes</i>	—
Baixa velocidade < 200 rpm	$2 < H < 3$
Alta velocidade > 200 rpm	$2 < H < 4$
<i>Condensadores síncronos</i>	—
Grande capacidade	1,25
Pequena velocidade	1,00
<i>Motores síncronos</i>	2,00

A Figura 7, apresenta alguns valores típicos da constante H para um alternador hidráulico do tipo vertical, representados pelas curvas: A (curva em vermelho) 450 a 514 rpm, B (curva em verde) 200 a 400 rpm, C (curva em azul) 138 a 180 rpm, D (curva em rosa) 80 a 120 rpm.

Figura 7: Valores típicos de H para alternadores hidráulicos do tipo vertical

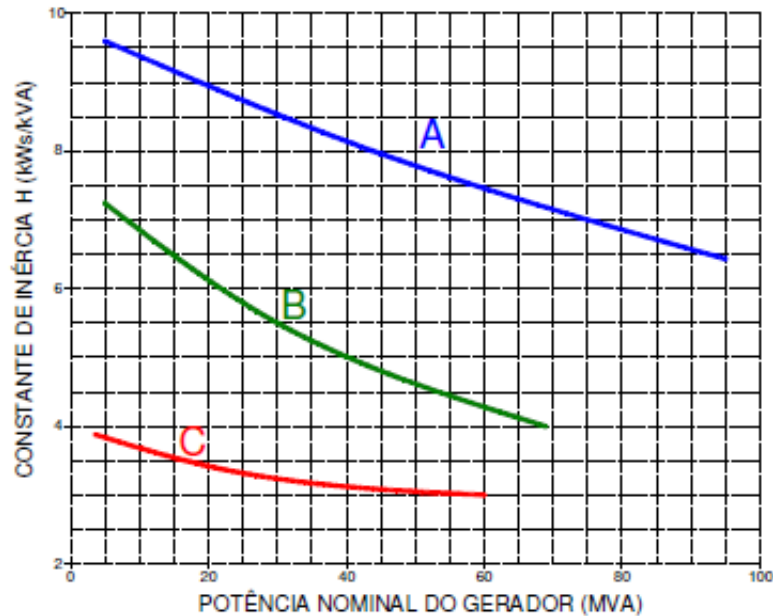


Fonte: Guimarães e Oliveira (2017)

A Figura 8, apresenta alguns valores típicos da constante H para turbo-alternadores de grande porte com a turbina já inclusa, representados pelas curvas: A (curva em azul) 1800 rpm

com condensação, B (curva em verde) 3600 rpm com condensação e C (curva em vermelho) 3600 rpm sem condensação.

Figura 8: Valores típicos de H para alternadores hidráulicos para turbo-alternadores de grande porte



Fonte: Guimarães e Oliveira (2017)

Considerando sistemas elétricos de potência que possuam uma grande malha interligada, haverá muitas máquinas dispersas em uma ampla área geográfica, portanto minimizar o número de equações de oscilação a serem resolvidas é de grande utilidade para facilitar no estudo de estabilidade destes sistemas. Isto poderá ser realizado quando ocorre uma falta onde se pode considerar que os geradores estão oscilando juntos, nestes casos as máquinas podem ser combinadas em uma única máquina equivalente. Essa simplificação considera como se os rotores dos geradores estivessem todos mecanicamente acoplados e, portanto, somente uma equação de oscilação seria descrita por eles (STEVENSON JR., 1986).

A fim de descrever a equação em termos de oscilação de um sistema multimáquinas, considerando que elas oscilam em conjunto. Toma-se um exemplo, considere que há uma usina com dois geradores conectados a um mesmo barramento e que essa esteja eletricamente remota do local de distúrbio. As equações de oscilação individuais das máquinas podem ser descritas em [p.u] por:

$$\frac{2H_1}{w_s} \frac{d^2\delta_1}{dt^2} = P_{a1} = P_{m1} - P_{e1} \quad (3.26)$$

$$\frac{2H_2}{w_s} \frac{d^2\delta_2}{dt^2} = P_{a2} = P_{m2} - P_{e2} \quad (3.27)$$

Como as máquinas oscilam em conjunto $\delta = \delta_1 = \delta_2$ e somando-se $H = H_1 + H_2$, $P_m = P_{m1} + P_{m2}$ e $P_e = P_{e1} + P_{e2}$, portanto as duas máquinas podem ser expressas em função da equação de oscilação já dada, realizando-se apenas essas simples substituições. A essas máquinas que oscilam em conjunto denomina-se máquinas coerentes (STEVENSON JR., 1986).

Para as máquinas não consideradas coerentes, pode-se expressar as equações de oscilação delas de maneira análoga ao que foi feito anteriormente. Considere:

$$\frac{d^2\delta_1}{dt^2} - \frac{d^2\delta_2}{dt^2} = \frac{w_s}{2} \left(\frac{P_{m1} - P_{e1}}{H_1} - \frac{P_{m2} - P_{e2}}{H_2} \right) \quad (3.28)$$

Multiplicando ambos os lados da equação por $H_1H_2/(H_1 + H_2)$ e rearranjando:

$$\frac{2}{w_s} \left(\frac{H_1H_2}{H_1 + H_2} \right) \frac{d^2(\delta_1 - \delta_2)}{dt^2} = \frac{P_{m1}H_2 - P_{m2}H_1}{H_1 + H_2} - \frac{P_{e1}H_2 - P_{e2}H_1}{H_1 + H_2} \quad (3.29)$$

Fazendo:

$$H_{12} = \frac{H_1H_2}{H_1 + H_2} \quad (3.30)$$

$$P_{m12} = \frac{P_{m1}H_2 - P_{m2}H_1}{H_1 + H_2} \quad (3.31)$$

$$P_{e12} = \frac{P_{e1}H_2 - P_{e2}H_1}{H_1 + H_2} \quad (3.32)$$

Pode-se então escrever a Equação (3.29) de maneira mais simples, como sendo:

$$\frac{2H_{12}}{w_s} \frac{d^2\delta_{12}}{dt^2} = P_{m12} - P_{e12} \quad (3.33)$$

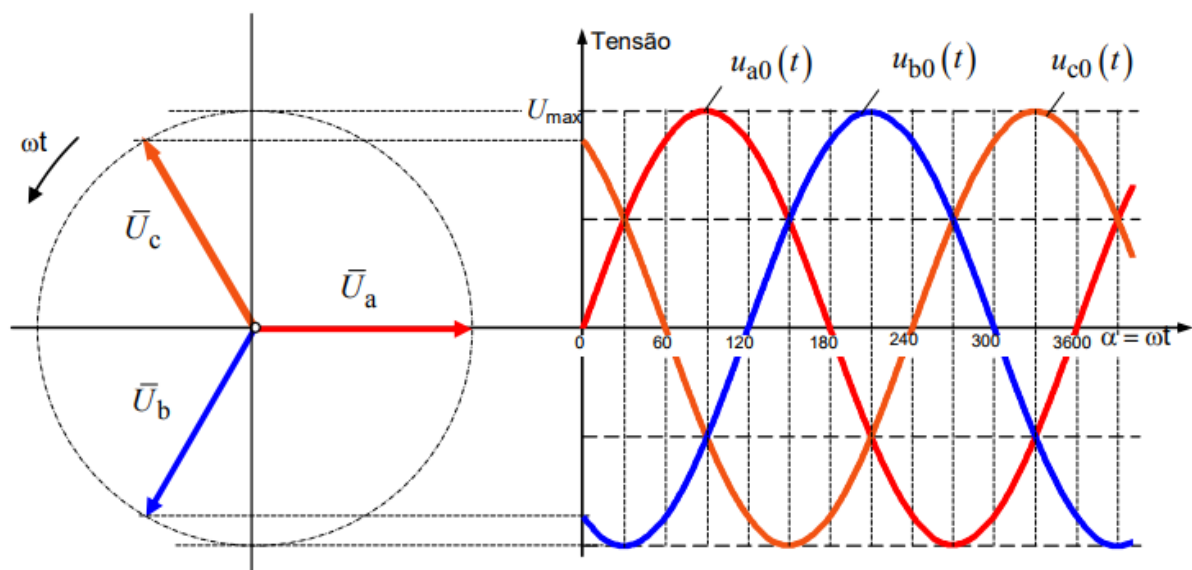
As equações acima que relacionam a equação de oscilação para um sistema elétrico composto por multimáquinas, ressaltam a característica relativa do estudo de estabilidade e demonstra que os problemas dessa área podem fundamentalmente ser exemplificados pela simples consideração do problema de interação entre duas máquinas (STEVENSON JR., 1986).

3.4 MODELAGEM CLÁSSICA DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS DENTRO DO ESTUDO DE ESTABILIDADE

Uma máquina síncrona tem dois elementos essenciais, a armadura ou estator e o campo ou rotor. A excitação da máquina ocorre por meio do enrolamento de campo que é alimentado por corrente contínua que por sua vez possibilita a indução de tensão nos enrolamentos da armadura. Quando uma máquina primária impõe um torque no eixo do gerador o rotor irá rotacionar gerando um fluxo magnético girante, esse fluxo irá induzir uma tensão alternada nas três fases do enrolamento de campo do estator. A frequência da tensão alternada induzida e das correntes alternadas que fluem nos enrolamentos do estator quando uma carga é conectada, depende da velocidade do rotor (KUNDUR, 1994).

A Figura 9 ilustra as tensões induzidas pelo rotor no estator para uma máquina síncrona operando a vazio. Vale ressaltar que mesmo com a excitação de campo, se não houver o movimento de rotação do rotor não haverá o campo magnético girante, consequentemente a tensão induzida no estator será nula.

Figura 9-Representação trifásica no tempo e vetorial das tensões induzidas no estator da MS a vazio

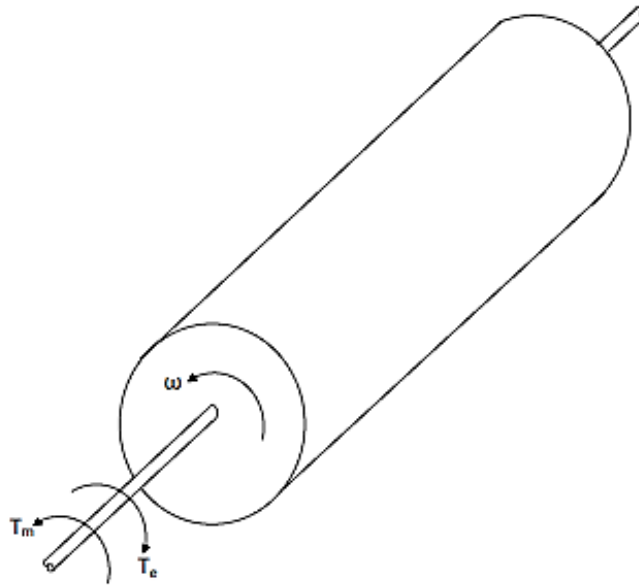


Fonte: Fernandes (2006)

Para uma máquina síncrona operando como gerador, o efeito do aumento do torque mecânico fornecido pela máquina primária, resulta no avanço do rotor para uma nova relativa posição do campo magnético girante do estator. Em contrapartida, a redução do torque mecânico irá retardar a posição do rotor e sob condições normais de operação o campo gerado pelo rotor e o campo do estator terão a mesma velocidade, síncrona. Contudo, haverá um ângulo de separação entre eles dependente da potência de saída fornecida a rede pelo gerador

(KUNDUR, 1994). A Figura 10, ilustra a oposição entre o torque mecânico T_m e T_e para uma máquina síncrona operando como gerador.

Figura 10- Conjugados elétrico e mecânico para uma MS operando como gerador



Fonte: Stevenson Jr. (1986)

Dada algumas noções básicas sobre o funcionamento de uma máquina síncrona, é importante entender o seu comportamento dentro do estudo de estabilidade, pois é quando elas são submetidas a condições atípicas de operação. O comportamento da máquina durante uma contingência irá depender dentre outros fatores, da duração e da magnitude da falta. Como já mencionado ao longo deste trabalho os estudos que envolvem o período transitório são realizados para um intervalo curto de tempo. Exposto isso, faz-se algumas considerações sobre a representação clássica das máquinas síncronas durante esse período.

Segundo Guimarães (2016) o modelo clássico das máquinas síncronas pode ser utilizado dentro do estudo de estabilidade transitória desde que as seguintes suposições sejam atendidas. São elas:

- A potência mecânica P_m fornecida pela máquina primária permanece constante, uma vez que se espera modificações na rede elétrica antes que as ações de controle possam ser realizadas na turbina, devido essas serem de ordem mecânica e, portanto, mais lentas.
- Os efeitos de amortecimento (potência assíncrona) são desprezados.
- A máquina síncrona é representada eletricamente por uma tensão constante E' atrás de uma reatância transitória X_d' .
- O ângulo mecânico do rotor δ_m é coincidente com o ângulo elétrico δ de E' .

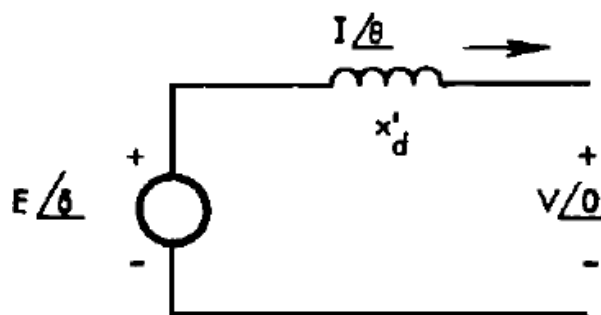
- A carga pode ser representada por impedância constante.
- As ações dos reguladores de velocidade e de tensão são desprezadas.

Entre as simplificações adotadas a do amortecimento é considerada conservadora, pois o seu efeito é de reduzir as oscilações eletromecânicas. Os efeitos dos torques amortecedores, se devem devido ao efeito dos enrolamentos amortecedores, sinais estabilizadores, resistências e etc., que provocam a redução da amplitude das oscilações, ajudando a máquina a manter o sincronismo.

Para justificar a representação do circuito equivalente da máquina, ser dado por uma tensão constante atrás de uma reatância transitória deve-se levar em conta o fato de que após a ocorrência de uma falta, a corrente de campo do gerador aumenta, contrabalanceando o efeito desmagnetizante da reação da armadura decorrente. Esse efeito da armadura garante que os enlaces de fluxo com o enrolamento do capô permaneçam aproximadamente constantes, logo após a falta. Passado um certo tempo, o fluxo deixará de ser constante e irá decair sendo que o mesmo acontece com a tensão atrás da reatância transitória, contudo esse tempo é suficiente para que o regulador de tensão entre em ação, em resposta à queda de tensão da máquina devido à falta. A combinação desses dois efeitos, o aumento da corrente de campo e a ação dos reguladores de tensão, justifica a representação adotada (COSTA, 2000).

O modelo clássico é amplamente utilizado dentro dos estudos que envolvem estabilidade transitória, pois proporciona uma simplicidade analítica e computacional, reduzindo a representação equivalente do comportamento de uma máquina síncrona durante o período transitório a uma simples fonte de tensão E' de magnitude fixa atrás de uma reatância X_d' transitória, conforme Figura 11.

Figura 11: Representação clássica de uma máquina síncrona



Fonte: Anderson e Fouad (2003)

Ainda de acordo com esse modelo, a estabilidade de uma máquina é definida na primeira oscilação do rotor, sendo o período de análise inferior ou bastante próximo a um segundo.

3.5 CURVA DO ÂNGULO DE POTÊNCIA DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

Uma importante característica que tem uma forte influência em relação à estabilidade do sistema, é a relação entre o intercâmbio de potência e o ângulo do rotor das máquinas síncronas (KUNDUR, 1994). Essa relação pode ser descrita de uma forma simples, pela equação:

$$P_e = \frac{E_g V}{X} \sin \delta \quad (3.34)$$

Onde:

P_e É a potência elétrica transmitida [W];

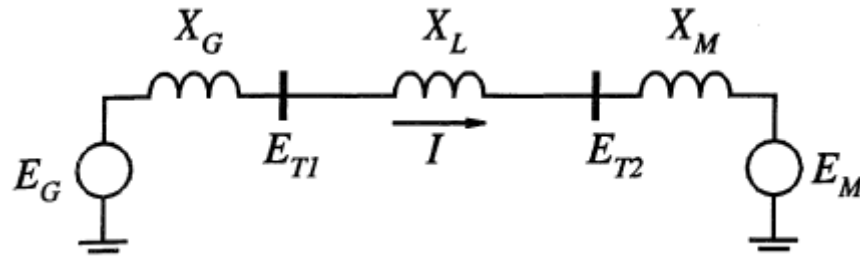
E_g É a tensão interna da máquina síncrona [V];

V É a tensão do barramento [V];

X É a reatância série [Ω];

Considerando a reatância série constante, $\vec{E} = E \angle \delta$ e $\vec{V} = V \angle 0$. A potência transferida ficará somente em função do ângulo δ . Esse ângulo como descrito na seção anterior, é o de separação entre os rotores das máquinas síncronas, conhecido como ângulo de potência. Tome-se agora um exemplo, duas máquinas conectadas por uma linha de transmissão, como mostra a Figura 12:

Figura 12: Transferência de potência entre duas máquinas



Fonte: Kundur (1994)

A equação que representa a transferência de potência entre as duas máquinas, será dada pelas equações:

$$P_e = \frac{E_g E_m}{X} \sin \delta \quad (3.35)$$

$$X = X_g + X_l + X_m \quad (3.36)$$

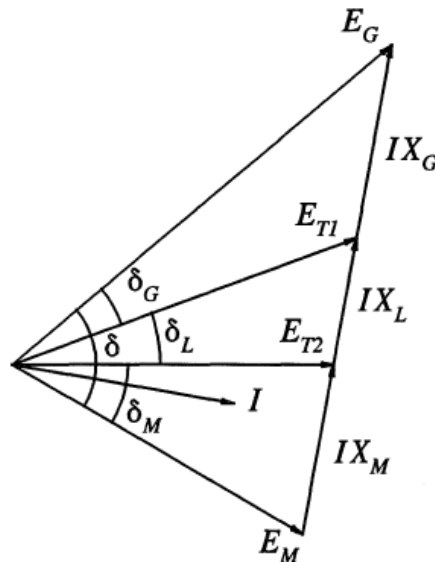
Onde:

E_m É a tensão interna do motor [V];

X_l, X_g e X_m São as impedâncias da linha, e internas do gerador e motor respectivamente [Ω];

O diagrama fasorial do exemplo, é ilustrado pela Figura 13.

Figura 13: Diagrama fasorial do exemplo

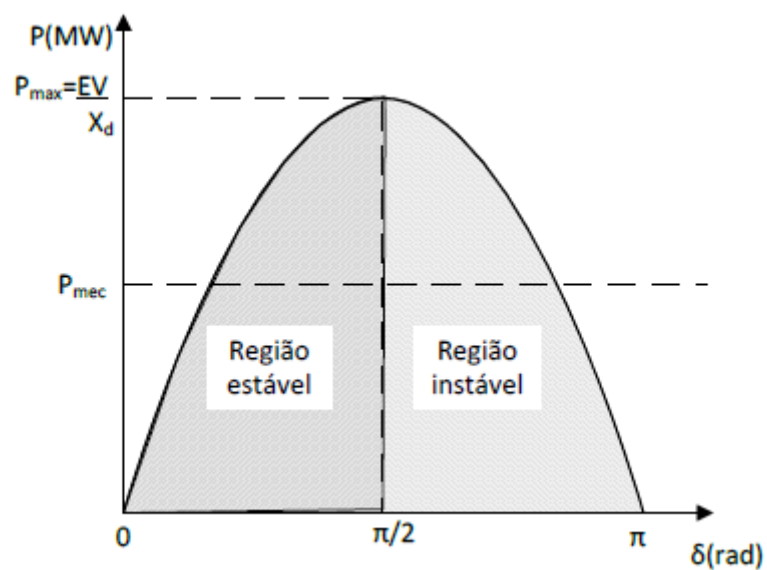


Fonte: Kundur (1994)

O ângulo δ_g e δ_m são os ângulos internos do gerador e do motor, respectivamente e δ_l é a diferença angular entre os terminais do gerador e do motor. O ângulo de potência será dado pela equação:

$$\delta = \delta_g + \delta_m + \delta_l \quad (3.37)$$

Figura 14- Curva do ângulo de Potência



Fonte: Ferreira (2012)

Para finalizar a seção ilustra-se o comportamento altamente não linear da potência de saída em relação ao ângulo de potência, a Figura 14 mostra também as regiões estáveis dessa curva. É interessante notar que apesar da potência máxima ocorrer para $\pi/2$ na prática opera-se com um ângulo inferior a esse, evitando se aproximar da região instável de operação da máquina.

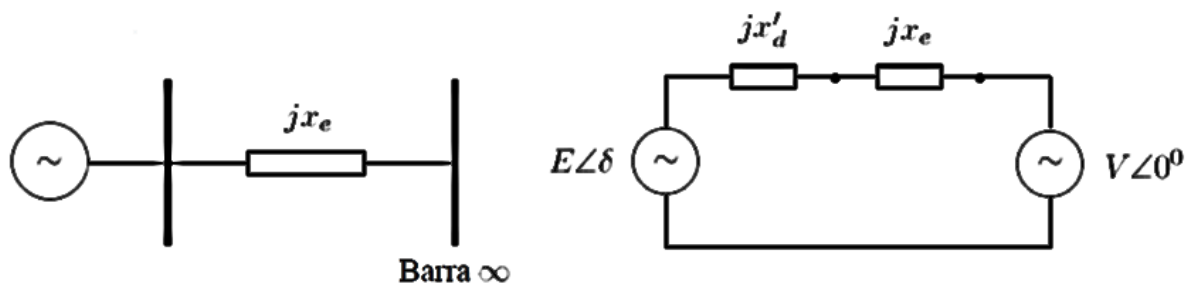
3.6 SISTEMA MÁQUINA BARRAMENTO INFINITO

Uma análise frequente dentre os estudos de estabilidade é a do comportamento de uma máquina síncrona perante um barramento infinito. O barramento infinito pode ser definido como uma máquina síncrona operando como gerador infinito, ou seja, com capacidade de geração de potência ilimitada e com uma constante de inércia infinita, $H = \infty$ (BRETAS; ALBERTO, 2000).

Este modelo analisa o comportamento de uma máquina conectada a um sistema elétrico de potência, cujo tamanho é muito maior do que o da máquina síncrona. Sendo, portanto justificável adotar que a frequência ou equivalente $d\delta/dt$, e a tensão da barra como constantes independentes da potência que o sistema gera ou absorve durante uma contingência. Considerar a frequência constante é o equivalente a considerar $H = \infty$, considerar a tensão constante equivale a considerar nula a impedância interna da máquina equivalente do sistema (COSTA, 2000).

Toma-se agora um exemplo de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito, conforme ilustrado pela Figura 15.

Figura 15: Diagrama máquina barramento infinito



Fonte: Costa (2000)

A potência elétrica transmitida pela máquina ao barramento pode ser expressa pela Equação (3.34), onde a reatância equivalente X será dada pela soma da reatância interna do gerador x_d' mais a reatância equivalente do sistema que interliga a máquina ao barramento, representada por x_e .

$$X = x_d' + x_e \quad (3.38)$$

Levando em conta a expressão da potência fornecida pela máquina ao barramento, pode-se escrever a correspondência da equação de oscilação para o sistema máquina barramento infinito. Para isso, basta substituir a expressão da potência elétrica na Equação (3.21) e teremos a equação que descreve a oscilação deste sistema.

$$\frac{2H}{w_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - \frac{EV}{X} \sin\delta \quad (3.39)$$

3.7 COEFICIENTES DE POTÊNCIA SINCRONIZANTE

Um importante requisito para que um ponto de operação seja considerável aceitável, é de que o gerador não deve sair da zona estável para pequenas variações de carga que ocorrem temporariamente, causando variações na potência elétrica de saída do gerador (STEVENSON JR., 1986).

Para analisar este requisito, considere a potência mecânica de entrada P_m , fornecida pela máquina primária ao gerador. Com pequenas variações de carga ocorrerá pequenas variações na P_e e no ângulo δ da máquina, supondo um pequeno aumento de carga esse incremento poderá ser dado por:

$$\delta = \delta_0 + \delta_\Delta \quad (3.40)$$

$$P_e = P_{e0} + P_\Delta \quad (3.41)$$

Os parâmetros com subscrito 0, representam os valores de regime permanente e os com subscrito Δ o aumento incremental. Substituindo as equações dadas, na equação de transferência de potência apresentada na seção 3.5 (Ângulo de potência).

$$P_e = P_{e0} + P_{e\Delta} = P_{max} \sin(\delta_0 + \delta_\Delta) = P_{max} (\sin\delta_0 \cos\delta_\Delta + \sin\delta_\Delta \cos\delta_0) \quad (3.42)$$

$$P_{max} = \frac{EV}{X} \quad (3.43)$$

Como o valor δ_Δ é um valor incremental, pode-se realizar as seguintes aproximações:

$$\sin\delta_\Delta \cong \delta_\Delta \text{ e } \cos\delta_\Delta \cong 1 \quad (3.44)$$

Substituindo as aproximações realizadas na Equação (3.42), obtemos:

$$P_e = P_{e0} + P_{e\Delta} = P_{max}\sin\delta_0 + (P_{max}\cos\delta_0)\delta_\Delta \quad (3.45)$$

Considerando no ponto inicial de operação δ_0 que P_m seja dado por:

$$P_m = P_{e0} = P_{max}\sin\delta_0 \quad (3.46)$$

Rearranjando a Equação (3.46) em termos da Equação (3.45):

$$P_m - (P_{e0} + P_{e\Delta}) = -(P_{max}\cos\delta_0)\delta_\Delta \quad (3.47)$$

Substituindo os dados incrementais na equação de oscilação, dado por:

$$\frac{2H}{w_s} - \frac{d^2(\delta_0 + \delta_\Delta)}{dt^2} = P_m - (P_{e0} + P_{e\Delta}) \quad (3.48)$$

Substituindo o lado direito dessa equação pela sua igualdade dada por (3.47), se obtém:

$$\frac{2H}{w_s} - \frac{d^2\delta_\Delta}{dt^2} + (P_{max}\cos\delta_0)\delta_\Delta = 0 \quad (3.49)$$

Vale lembrar que $d^2\delta_0/dt^2 = 0$, pois δ_0 é um valor constante. Observe que o termo $(P_{max}\cos\delta_0)$ para $\delta = \delta_0$ equivale a:

$$S_p = \frac{dP_e}{d\delta} = P_{max}\cos\delta_0 \text{ [W]} \quad (3.50)$$

Sabe-se que a derivada de uma função fornece a inclinação instantânea de $f(x)$ em cada ponto de x , portanto S_p representa a inclinação da curva de potência-ângulo da máquina no ponto de operação $\delta = \delta_0$. Onde S_p é denominado coeficiente de potência sincronizante. Reescrevendo a equação de oscilação em função das variações incrementais do ângulo do rotor, Equação (3.49), em termos de S_p :

$$\frac{d^2\delta_\Delta}{dt^2} + \frac{w_s S_p}{2H} \delta_\Delta = 0 \quad (3.51)$$

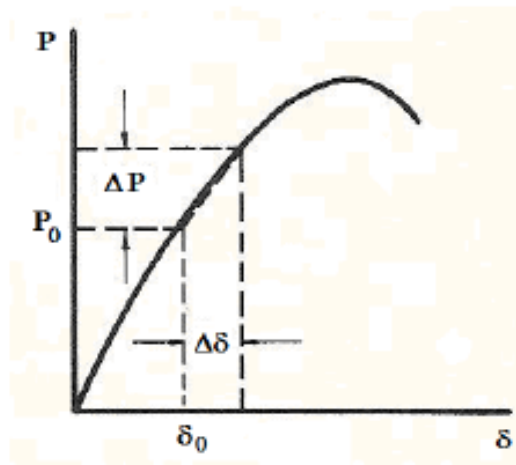
A resolução dessa equação diferencial de segunda ordem, depende do sinal algébrico do coeficiente de potência sincronizante, pois quando S_p for positivo a resposta $\delta_\Delta(t)$ será correspondente à do movimento harmônico simples, no entanto quando S_p for negativo a resposta $\delta_\Delta(t)$ cresce exponencialmente sem limite (STEVENSON JR., 1986).

É interessante, voltar na Figura 14 (Curva do ângulo de potência) ela demonstra bem as regiões consideráveis estável e instável para o regime de operação da máquina síncrona operando como gerador. Para um ângulo inferior a 90° pode-se observar que a derivada terá um valor positivo, logo poderá se considerar que a máquina se encontra em uma região estável e para um ângulo maior do que 90° ela terá um valor negativo, logo ela se encontra em uma região instável.

Para um melhor entendimento, veja as seguintes observações e a Figura 16:

- Região estável de operação $\delta \leq 90^\circ \rightarrow S_p > 0$.
- Região instável de operação $\delta \geq 90^\circ \rightarrow S_p < 0$.

Figura 16: Inclinação da curva potência-ângulo, S_p



Fonte: Guimarães (2016)

Vale destacar que este critério foi amplamente utilizado no passado para determinar o limite de estabilidade de regime permanente (GUIMARÃES, 2016). Este limite ocorreria para $\delta = 90^\circ$ resultando em $S_p = P_{max}$, no entanto na prática os ângulos de operação não se aproximam muito desse limite, pois há um grande risco de se cair na região instável de operação da máquina.

A frequência angular das oscilações não amortecidas da máquina devido a pequenas perturbações no sistema, pode ser dada em função de S_p por:

$$w_{osc} = \sqrt{\frac{w_s S_p}{2H}} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (3.52)$$

De posse da frequência angular de oscilação do sistema, fica fácil fornecer a frequência elétrica de oscilação da máquina diante da perturbação sofrida. Dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{w_s S_p}{2H}} \text{ [Hz]} \quad (3.53)$$

3.8 CRITÉRIO DAS ÁREAS IGUAIS

Imagine um sistema operando em regime permanente sob condição normal de operação, com uma potência mecânica P_m fornecida pela máquina primária ao gerador, igual as perdas térmicas e rotacionais mais a potência elétrica de saída P_e . Suponha agora um defeito no barramento de interligação da máquina ou em uma linha tronco do sistema de transmissão, a contingência será considerada de grande porte e a potência elétrica fornecida pela máquina ao sistema passaria a ser praticamente nula, pois o gerador perderia as cargas que estava alimentando e o circuito equivalente corresponderia basicamente a característica indutiva do sistema.

Sabe-se que as ações de ordem mecânica são lentas quando comparadas ao comportamento das grandezas elétricas, por isso a máquina primária não sentirá tão rapidamente a falta e continuará a fornecer potência para o gerador, isso se deve à inércia do sistema de regulação. Levando em conta a consideração acima, a P_m permaneceria praticamente constante nos primeiros instantes após a falta, ocasionando em um torque mecânico maior do que o torque elétrico. O rotor então por sua vez tenderia a acelerar, armazenando assim sob a forma de energia cinética o excesso de energia.

Devido a essa aceleração e caso a falta se mantenha por muito tempo o ângulo do rotor irá aumentar até que o sistema não seja mais capaz de se recuperar e a máquina saia do sincronismo.

Para um sistema constituído por uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito ou duas máquinas finitas, pode-se determinar se máquina será capaz de manter o sincronismo, estabilidade, utilizando o critério das áreas iguais (STEVENSON JR., 1986). Esse critério é de grande importância dentro dos estudos de estabilidade, pois permite que se conheça o comportamento do sistema sem a necessidade de se recorrer à resolução da equação de oscilação das máquinas, uma vez que a matemática necessária para isso é complexa e sem o auxílio de ferramentas computacionais se torna praticamente inviável.

O critério das áreas iguais é baseado no princípio de conservação de energia do sistema (BRETAS; ALBERTO, 2000). Pelo exposto nesta seção, se houver um desbalanceamento entre a potência de entrada fornecida pela máquina primária e a potência elétrica de saída, haverá um

desbalanceamento de energia. Este desbalanceamento ou balanceamento que serão decisivos em relação a estabilidade da máquina.

Segundo Bretas e Alberto (2000) “A energia de um sistema físico é uma função que depende apenas do seu estado, ou seja, sua posição e velocidade”.

Considere agora a equação do movimento de uma partícula descrita pela segunda Lei de Newton:

$$m \frac{dv}{dt} = F(x) \quad (3.54)$$

Para não deixar a equação em função do tempo podemos multiplicar o lado direito pela velocidade v e sua igualdade correspondente dx/dt no lado esquerdo.

$$mv \frac{dv}{dt} = F(x) \frac{dx}{dt} \leftrightarrow mv dv = F(x) dx \quad (3.55)$$

Como os efeitos dissipativos do sistema são desprezados, os amortecimentos, pode-se considerar que a energia mecânica do sistema é dada pela soma das energias cinética e potencial do sistema:

$$Em = Ec + Ep \quad [J] \quad (3.56)$$

Onde a energia cinética pode ser expressa por:

$$Ec = \frac{mv^2}{2} \quad (3.57)$$

Agora, integrando a Equação (3.55) de um certo estado (x_1, v_1) até (x_2, v_2) , se obtém:

$$\int_{v_1}^{v_2} mv dv = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2 = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \quad (3.58)$$

Como o sistema analisado é dado como conservativo, pode-se expressar a variação das energias cinéticas e potenciais da seguinte maneira:

$$\Delta Ec = -\Delta Ep \quad (3.59)$$

Com base na Equação (3.59) pode se reescrever a Equação (3.58), obtendo:

$$\Delta Ec = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2 = -\Delta Ep = - \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \quad (3.60)$$

Para facilitar a dedução do critério, pode-se fazer a consideração de que $\delta_m = \delta$, mesmo sabendo que isso só ocorrerá quando a máquina analisada possuir apenas um par de pólos, ou seja, $P = 2$. Com base nessa consideração, pode-se então reescrever a equação de oscilação dada em função da constante M para um sistema máquina barramento infinito, por:

$$M \frac{dw}{dt} = P_m - \frac{E_g E_\infty}{X} \sin \delta = P_m - P_{emax} \sin \delta \quad (3.61)$$

Novamente é interessante expressar a equação sem ser em função do tempo, para isso multiplicasse o lado esquerdo da equação por w e o lado direito pela sua igualdade equivalente $d\delta/dt$.

$$Mw \frac{dw}{dt} = P_m - P_{emax} \sin \delta \frac{d\delta}{dt} \leftrightarrow Mw dw = P_m - P_{emax} \sin \delta d\delta \quad (3.62)$$

Integrando a Equação (3.62) tomando como referência o desvio de velocidade para o sistema em equilíbrio antes da falta ($w = 0$) e o ângulo de equilíbrio estável do sistema pré-falta δ_0 :

$$\int_0^w Mw dw = \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_{emax} \sin \delta) d\delta \quad (3.63)$$

$$\leftrightarrow$$

$$\frac{Mw^2}{2} = P_m(\delta - \delta_0) + P_{emax}(\cos \delta - \cos \delta_0)$$

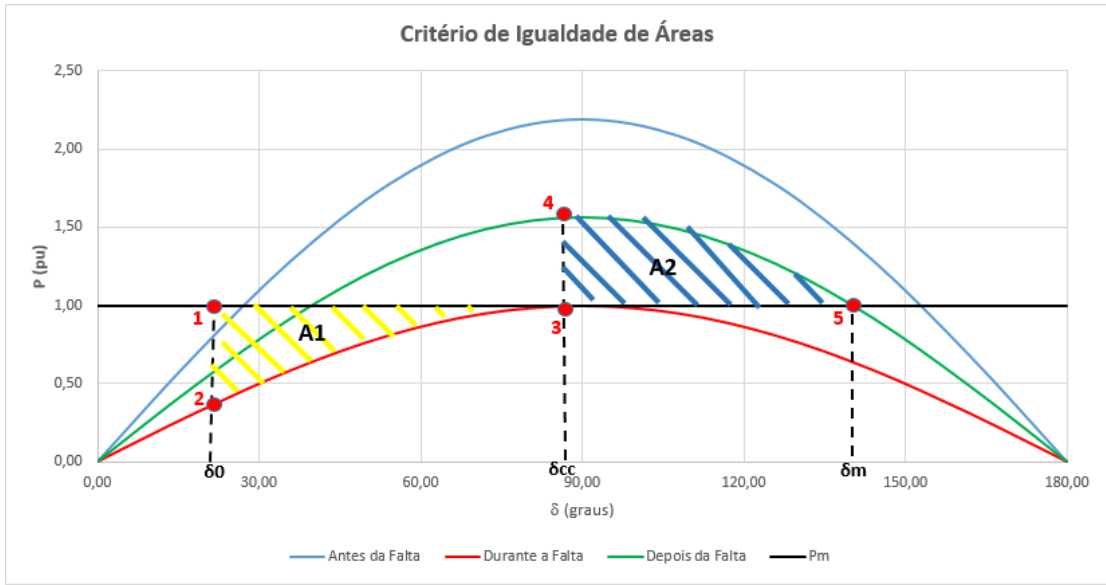
A Equação (3.62) representa fisicamente a variação das energias cinética e potencial para o sistema máquina barramento infinito, expressas por:

$$Ec = \frac{Mw^2}{2} \quad (3.64)$$

$$Ep = -P_m(\delta - \delta_0) - P_{emax}(\cos \delta - \cos \delta_0) \quad (3.65)$$

A energia potencial do sistema está relacionada ao cálculo das áreas delimitadas pelas curvas de potência. A Figura 17 ilustra essas curvas, para dar continuidade na dedução do critério se utilizará agora dos conceitos energéticos já apresentados.

Figura 17: Curvas de potência- Critério das áreas Iguais



Fonte: Autoria própria

Considerando a ocorrência de uma contingência, como uma falta trifásica, ocorrerá um desbalanço entre a potência mecânica de entrada e a potência elétrica de saída. Apesar, do sistema ser conservativo na ocorrência da falta haverá um desbalanço energético e o sistema tentará encontrar um novo ponto de equilíbrio, ou seja, a energia mecânica do sistema irá se alterar para um novo valor constante, dependente das características atuais do SEP.

Analisaremos para alguns pontos da Figura 17 o seu balanço energético. Considere a curva delimitada pelos pontos 2 e 3, para este intervalo delimitado entre a curva constante da potência mecânica e a curva da potência elétrica transmitida durante a falta, a energia mecânica no ponto 2 é igual a energia no ponto 3, dadas pela equação:

$$Em(2) = Em(3) \quad \Leftrightarrow \quad (3.66)$$

$$Ec(2) + Ep(2) = Ec(3) + Ep(3)$$

Para o instante de tempo inicial a potência acelerante é nula, pois considera-se a potência mecânica de entrada igual a potência elétrica de saída, ou seja, $P_m = P_e$. Para este ponto a aceleração da máquina é nula e, portanto, o desvio de velocidade da máquina também é nulo, assim:

$$Ec(2) = Ec(3) + Ep(3) \quad (3.67)$$

$$Ec(3) = Ep(2) - Ep(3) \quad (3.68)$$

No ponto 5, novamente se tem $P_m = P_e$, consequentemente a aceleração neste ponto é nula e, portanto, o desvio de velocidade da máquina também será nulo $Ec(5) = 0$.

Considerando isso, se faz então a mesma analogia anterior realizada para os pontos 2 e 3 para os pontos 4 e 5.

$$Em(4) = Em(5) \quad (3.69)$$

$$Ec(4) + Ep(4) = Ep(5) \quad (3.70)$$

Quando ocorre o chaveamento ponto 3 e 4, a curva de potência passa a não ser mais a vermelha, potência transmitida durante a falta, e passa a ser a verde, potência transmitida depois da falta. Esta variação é instantânea e considera-se que não há também um desvio de velocidade para esse ponto, consequentemente não há variação da energia cinética para estes pontos, portanto:

$$Ec(4) = Ec(3) \quad (3.71)$$

Substituindo a expressão fornecida para o ponto 3 pela Equação (3.68) na Equação (3.71):

$$Ec(4) = Ep(2) - Ep(3) \quad (3.72)$$

Substituindo na Equação (3.70) a Equação (3.72):

$$Ep(2) - Ep(3) + Ep(4) = Ep(5) \quad (3.73)$$

Rearranjando:

$$Ep(2) - Ep(3) + Ep(4) - Ep(5) = 0 \quad (3.74)$$

A energia potencial de um sistema conservativo pode ser representada pela integral da função, sem dependência do caminho escolhido (BRETAS; ALBERTO, 2000). Considerando as Equações (3.58) e (3.59) e a relação entre as áreas delimitadas pelas curvas de potência e a energia potencial do sistema, pode-se então representar a Equação (3.45) pelas áreas:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} P_m - (P_{emaxDurante} \sin \delta) d\delta - \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_{emaxApos} \sin \delta) - P_m d\delta = 0 [J] \quad (3.75)$$

$$A1 = \int_{\delta_0}^{\delta_c} P_m - (P_{emaxDurante} \sin \delta) d\delta \quad (3.76)$$

$$A2 = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_{emaxApos} \sin \delta) - P_m d\delta \quad (3.77)$$

Onde:

$P_{emaxDurante}$ É o ponto máximo dado pela curva de potência durante a falta.

$P_{emaxApos}$ É o ponto máximo dado pela curva de potência depois da falta.

A Equação (3.75) fornece na verdade o limite para que se ocorra à estabilidade do sistema. Este limite ocorrerá quando a área de aceleração for igual a de desaceleração.

Na área $A1$ representada pela Figura 17 $P_m > P_e$, pois como exposto no início desta seção a potência mecânica permanece praticamente constante devido a inércia da máquina, no entanto a potência elétrica varia muito rapidamente o seu valor. Uma vez que na ocorrência da falta o circuito elétrico equivalente passaria a corresponder basicamente a indutância do sistema, sendo a potência elétrica transmitida inferior à da condição pré-falta. Nesta área, o sistema se encontra em aceleração, adquirindo energia cinética e aumentando o ângulo de potência δ .

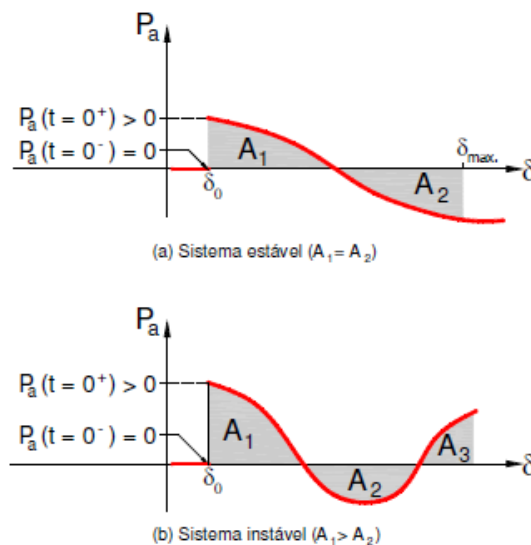
Na área $A2$ $P_e > P_m$, uma vez que a falta foi extinguida o sistema se encontra na condição pós falta e o circuito equivalente já não passa a ter somente a característica indutiva do sistema. Nesta região o torque elétrico é maior do que o torque mecânico, pesando o eixo da máquina e fazendo com que ela desacelere perdendo energia cinética e adquirindo energia potencial.

É importante salientar que $A1 = A2$ é o limite para o qual ocorrerá a estabilidade, faz-se então as seguintes observações:

- Área de Aceleração $>$ Área de Desaceleração - O sistema será considerado instável.
- Área de Aceleração $\leq$ Área de Desaceleração – O sistema será considerado estável.

A Figura 18 representa para o critério das áreas iguais, um sistema dado como estável e um sistema considerado instável.

Figura 18: Sistemas estável e instável- Critério das áreas



Fonte: Guimarães e Oliveira (2017)

Tendo em mente que a potência acelerante é dada pela diferença entre a potência elétrica de saída e a potência mecânica de entrada fornecida pela máquina primária, a Equação (3.75) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_m} P_a d\delta = 0 [J] \quad (3.78)$$

Os ângulos pertinentes a este critério são representados na Figura 17 e representam:

- δ_0 É o ângulo para o qual o gerador estava operando antes da falta, em condição de regime permanente e com velocidade síncrona.
- δ_{cc} É o ângulo para o qual ocorre o limite de estabilidade, ou seja, para esse ângulo é utilizada toda a área de desaceleração.
- δ_m É o ângulo para o qual ocorrerá a interseção entre a potência elétrica transmitida após a falta e a potência mecânica, ou seja, $P_{emaxApos} = P_m$.

Agora que já se conhece o significado dos ângulos relacionados ao critério, dá-se agora uma atenção especial ao ângulo de chaveamento crítico do sistema. Considerando que o chaveamento de um sistema ocorra para $\delta_c = \delta_{cc}$, se reescreve a Equação (3.75):

$$\begin{aligned} \int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} P_m - (P_{emaxDurante} \sin \delta) d\delta &= - \int_{\delta_{cc}}^{\delta_m} P_m - (P_{emaxApos} \sin \delta) d\delta \\ &= 0 [J] \end{aligned} \quad (3.79)$$

Integrando a Equação (3.79), se obtém:

$$\begin{aligned} P_m(\delta_{cc} - \delta_0) + P_{emaxDurante}(\cos \delta_{cc} - \cos \delta_0) \\ = P_m(\delta_{cc} - \delta_m) + P_{emaxApos}(\cos \delta_{cc} - \cos \delta_m) \end{aligned} \quad (3.80)$$

Rearranjando a Equação (3.80):

$$\begin{aligned} (P_{emaxDurante} - P_{emaxApos}) \cos \delta_{cc} \\ = P_m(\delta_0 - \delta_m) + P_{emaxDurante} \cos \delta_0 - P_{emaxApos} \cos \delta_m \end{aligned} \quad (3.81)$$

Rearranjando a Equação (3.81) em função do ângulo de interesse, se obtém:

$$\cos \delta_{cc} = \frac{P_m(\delta_0 - \delta_m) + P_{emaxDurante} \cos \delta_0 - P_{emaxApos} \cos \delta_m}{(P_{emaxDurante} - P_{emaxApos})} \quad (3.82)$$

A Equação (3.82) possibilita o cálculo do ângulo crítico do sistema, esse ângulo é de grande interesse para este critério, pois como explicado é para ele que ocorrerá o limite de estabilidade. Conhecendo esse ângulo, é possível determinar para qual instante de tempo máximo deverá ocorrer o chaveamento crítico do sistema, ou seja, para qual máximo instante de tempo a proteção deverá atuar para que o sistema não se torne instável.

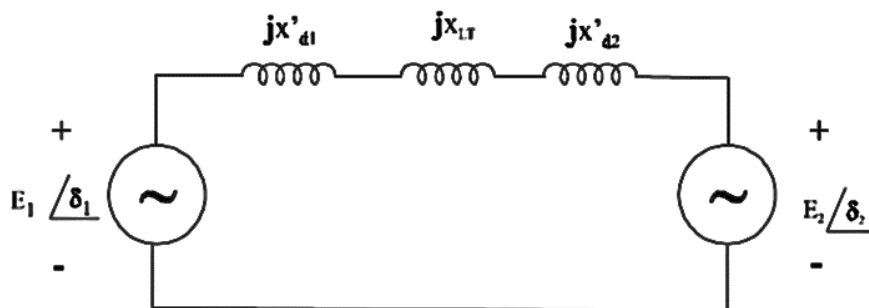
Este instante é denominado de tempo crítico, t_{cc} , e é possível conhecer o seu valor através de simulações do sistema, em que se encontrará o tempo em questão para quando ocorrer a igualdade $\delta = \delta_{cc}$ (BRETAS; ALBERTO, 2000).

3.8.1 Critério das Áreas Iguais para um Sistema de duas Máquinas Finitas

A seção 3.8, apresenta o critério das áreas para um sistema máquina barramento infinito, essa análise é bastante comum e se aplica geralmente quando se tem um gerador equivalente de uma usina conectado a um sistema elétrico de potência de grande porte. No entanto, no início desta seção também foi falado de que o critério poderia se estender a um sistema composto por duas máquinas finitas.

A análise para um sistema composto por duas máquinas finitas possui grande interesse prático, pois há diversos sistemas onde há dois grupos geradores interconectados que são de porte parecidos, não podendo se realizar a aproximação de que a inércia de um é infinita em relação a do outro (COSTA, 2000). Apesar disso, a solução para este tipo de sistema se dá de maneira análoga ao do sistema máquina barramento infinito, a Figura 19 ilustra o circuito equivalente para um sistema duas máquinas finitas.

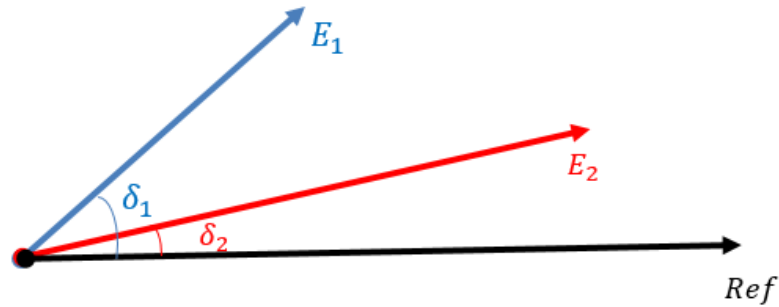
Figura 19: Sistema duas máquinas finitas



Fonte: Costa (2000)

A diferença angular para este sistema se dará conforme Figura 20:

Figura 20: Diferença angular entre as máquinas



Fonte: Autoria própria

A potência transferida entre as máquinas será em função da diferença angular entre elas. Sabendo que o sistema apresentado pela Figura 19 pode ser reduzido a um sistema equivalente representado por uma máquina barramento infinito, se apresenta uma equação semelhante à Equação (3.78), a fim de se representar o critério das áreas para um sistema composto por duas máquinas finitas.

$$\int_{\delta_{120}}^{\delta_{12m}} \left(\frac{P_{a1}}{H1} - \frac{P_{a2}}{H1} \right) d\delta = 0 [J] \quad (3.83)$$

Sendo $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$, as denotações δ_{120} e δ_{12m} possuem significados análogos para os apresentados na seção 3.8. Recomenda-se, caso haja maiores dúvidas em relação a representação equivalente do sistema duas máquinas em um sistema máquina barramento infinito que se volte na seção 3.3 e dê uma olhada nas Equações (3.29) à (3.31).

3.9 REPRESENTAÇÃO CLÁSSICA PARA UM SISTEMA MULTIMÁQUINAS

Até o presente momento foi analisado o comportamento dos modelos dados por um sistema máquina barramento infinito e um sistema representado por duas máquinas finitas, sendo que o estudo deste último se baseia na equivalência dele para o primeiro modelo. No entanto, há muitos casos onde se deseja analisar o comportamento de um sistema onde há mais de dois geradores equivalentes conectados, não sendo possível de fazê-lo sem analisar a influência de cada máquina.

Para um sistema multimáquinas, a potência acelerante individual de cada máquina é dada em função da influência do conjunto. A potência mecânica de entrada é fornecida pela máquina primária de cada uma delas, já a potência elétrica de saída não dependerá somente da carga que a máquina estava suprindo, mas também da potência que ela transmitirá as outras máquinas do sistema durante a perturbação (GUIMARÃES, 2016).

As resoluções das equações que envolvem estes sistemas são ainda mais complexas, pois a potência elétrica transmitida pelas máquinas será dada em função das equações diferenciais que representam o comportamento das máquinas síncronas e das equações algébricas da rede e das outras máquinas que compõem o conjunto gerador daquele sistema elétrico (BRETAS; ALBERTO, 2000).

Para a representação abordada, deve-se levar em conta as mesmas considerações realizadas na seção 3.4 para a representação clássica de uma máquina síncrona. A representação de um sistema múltimáquinas clássico, pode ser dado pela Figura 21.

A rede elétrica ilustrada pela Figura 21 mostra n geradores que são representados por n nós ativos, o sistema de transmissão responsável por interligar os n geradores é representado por uma matriz admitância quadrada de ordem $m \times m$. Por análise nodal sabe-se que a corrente de uma máquina i deste sistema é dada por:

$$\dot{I}_i = \dot{E}_i \sum_{j=1}^N \dot{Y}_{ij} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \dot{E}_j (\dot{Y}_{ij}) \quad [A] \quad (3.84)$$

A matriz de admitância nodal possui como elementos da diagonal principal:

$$\dot{Y}_{ii} = \sum_{j=1}^N \dot{Y}_{ij} \quad (3.85)$$

Os elementos fora da diagonal principal são representados por:

$$\dot{Y}_{ii} = -\dot{Y}_{ij} \quad (3.86)$$

A admitância $\dot{Y}$ possui uma parte real dada por $\dot{G}$ e uma parte imaginária dada por $j\dot{B}$, como se deseja saber a transmissão de potência ativa se pega a parte real da expressão:

$$P_{ei} = \text{Re}\{\dot{E}_i \dot{I}_i^*\} \quad (3.87)$$

Com base nas equações, pode-se expressar a potência elétrica transmitida por uma máquina i por:

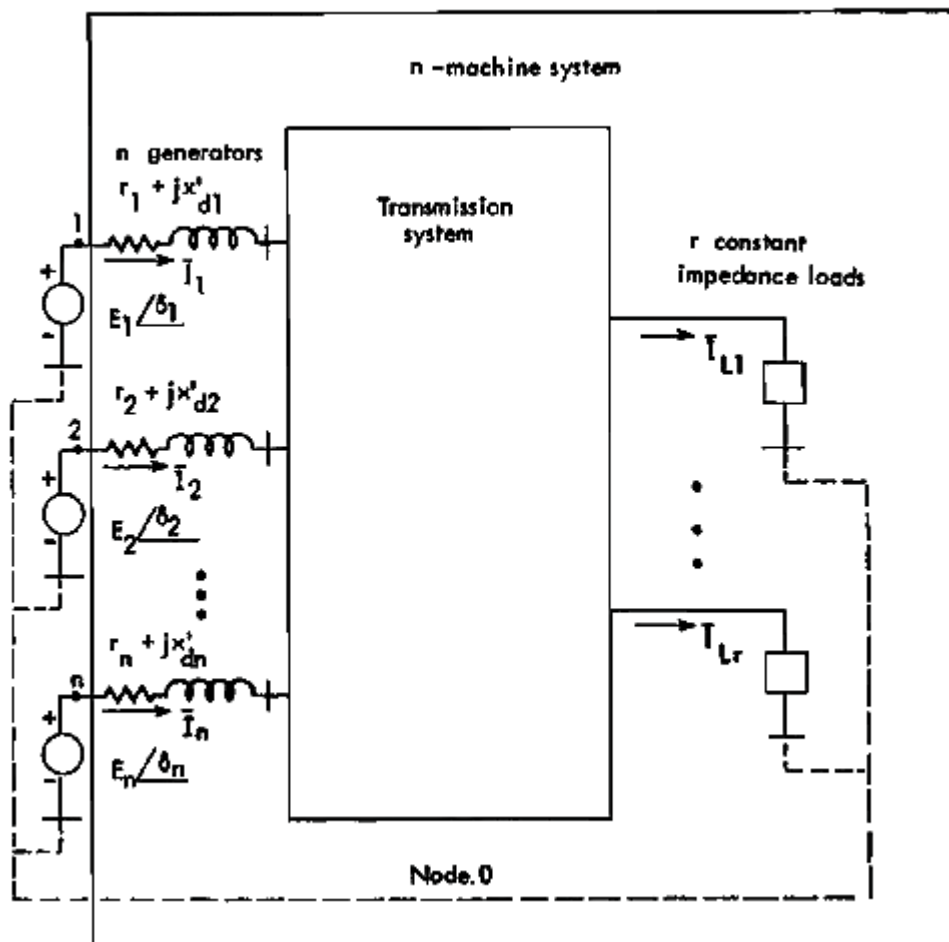
$$\begin{aligned} P_{ei} &= E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \dot{E}_i \dot{E}_j \dot{Y}_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ &= \sum_{j=1}^N \dot{E}_i \dot{E}_j \dot{Y}_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \end{aligned} \quad (3.88)$$

A equação que representa o balanço de uma máquina i para um sistema multimáquinas é expressa por:

$$\frac{2H_i}{w_r} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{mi} - P_{ei} = P_{mi} - \sum_{j=1}^N \dot{E}_i \dot{E}_j \dot{Y}_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.89)$$

A Equação (3.89) descreverá o comportamento das n máquinas do SEP durante a perturbação, vale ressaltar novamente que a determinação da estabilidade para um conjunto de máquinas baseia-se se elas estão oscilando próximas ou não umas das outras. Uma vez que estão oscilando próximas e as suas diferenças angulares são pequenas o sistema poderá ser considerado estável quando isso não ocorre o sistema será considerado instável.

Figura 21: Representação clássica de um sistema multimáquinas



Fonte: Anderson e Foadud (2003)

4 MÉTODO E RESULTADOS OBTIDOS

4.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO PASSO A PASSO PARA CÁLCULO DA CURVA DE OSCILAÇÃO

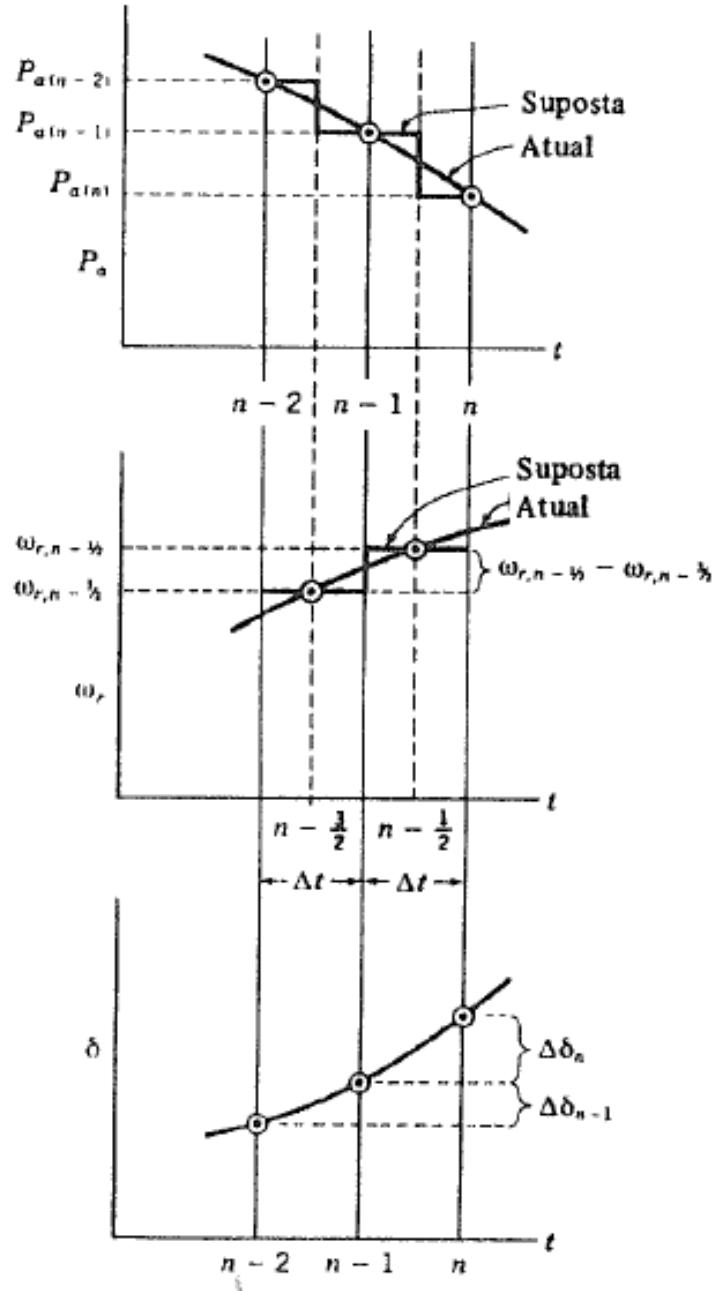
Neste critério é calculado o ângulo de potência da máquina (δ) em função do tempo, a fim de se levantar a sua curva de oscilação e verificar se δ aumenta sem limites ou alcança um máximo e começa a decrescer. Quando o ângulo alcança um valor máximo e decresce é sinal de que mesmo oscilando diante da perturbação, a máquina síncrona conseguiu manter o sincronismo e retornar a operar em um ponto considerado estável (STEVENSON JR., 1986).

Há uma ampla diversidade de métodos numéricos para a resolução das equações diferenciais de segunda ordem que expressam o comportamento da máquina síncrona, durante o período transitório. O método passo a passo é relativamente simples quando comparado a esses métodos, pois é calculado realizando-se as seguintes considerações segundo o autor Stevenson Jr. (1986):

- A potência de aceleração da máquina calculada no início de um intervalo é constante a partir da metade do intervalo anterior até a metade do intervalo atual.
- A velocidade angular da máquina é constante através de qualquer intervalo no valor calculado até a sua metade.

Para um melhor entendimento das considerações realizadas, veja a Figura 22.

Figura 22: Valores reais e supostos pelo método



Fonte: Stevenson Jr. (1986)

Para as ordenadas $n - \frac{3}{2}$ e $n - \frac{1}{2}$ há uma variação de velocidade oriunda da consideração da potência acelerante constante para este intervalo. Essa variação é descrita pela equação:

$$w_{r,n-1/2} - w_{r,n-3/2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} \Delta t = \frac{180f}{H} P_{a,n-1} \Delta t \quad (4.1)$$

Sabe-se que a variação de um ângulo qualquer é obtida através da velocidade angular multiplicada pelo intervalo de tempo. Portanto, a variação do ângulo δ durante o intervalo $n - 1$ é dada por:

$$\Delta\delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t w_{r,n-1/2} \quad (4.2)$$

Para um determinado intervalo de ordem n , irá se ter:

$$\Delta\delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t w_{r,n-3/2} \quad (4.3)$$

Subtraindo a Equação (4.2) da (4.3) e substituindo a Equação (4.1) do resultado encontrado com o objetivo de se excluir o parâmetro w_r , se obtém:

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{180f}{H} (\Delta t)^2 P_{a,n-1} \quad (4.4)$$

Ao valor dado por $\frac{180f}{H} (\Delta t)^2 P_{a,n-1}$ denomina-se K , uma constante obtida em graus elétricos que é utilizada no método. E ainda se tem:

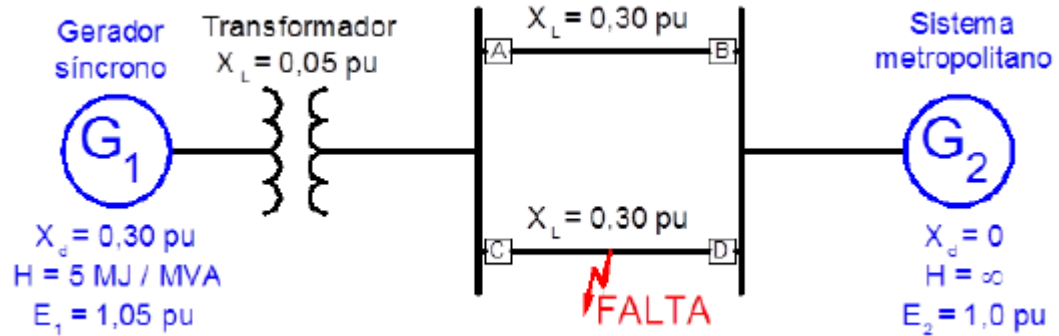
$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n \quad (4.5)$$

Vale ressaltar que a constante e as equações apresentadas, derivam da equação de oscilação da máquina síncrona apresentada na seção 3.2. Este método também se assemelha ao critério das áreas iguais abordado na seção 3.8, pois também se utiliza das três curvas de potência da máquina, antes, durante e após a falta.

Calculado todos os parâmetros para o método, se monta a matriz utilizada e se levanta a curva de oscilação da máquina. Para um melhor entendimento se apresenta um exercício desenvolvido por Guimarães e Oliveira (2017).

A Figura 23 representa um gerador $G1$ que alimenta um sistema de grande porte, representado pelo barramento infinito $G2$, por meio de duas linhas de transmissão. Em regime permanente o gerador transmitia 90MW ao barramento, até o momento em que ocorre um curto trifásico na metade de uma das linhas de transmissão. A proteção abre a linha em 0,3 segundos, considerando todas as reatâncias em pu, na base de 100 MVA e a frequência do sistema em regime permanente como 60 Hz, se levanta a curva de oscilação da máquina para um intervalo de 0,8 segundos.

Figura 23: Diagrama unifilar do exercício.



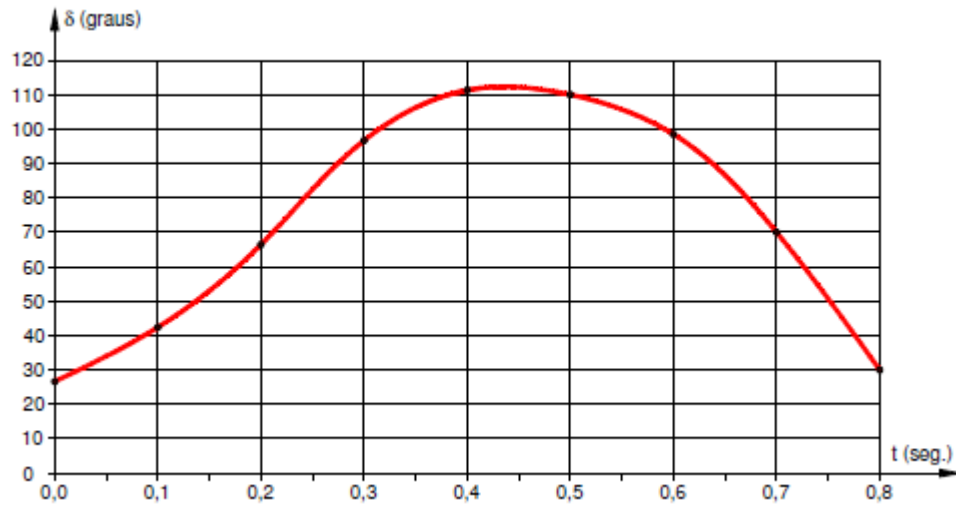
Fonte: Guimarães e Oliveira (2017)

Depois de calculado os parâmetros para a aplicação do método, se tem a Tabela 2 representando as iterações, por fim se levanta a curva de oscilação da máquina conforme Figura 24.

Tabela 2: Método passo a passo
Fonte: Adaptado de Guimarães (2017)

Tempo	$P_{e\max}$	$\sin\delta$	P_e	$P_a = P_m - P_e$	KPa	$\Delta\delta$	δ
(seg)	(pu)		(pu)	(pu)	30,86° Pa	(graus)	(graus)
0 –	2,1000	0,4286	0,9000	0,0000	0,0000	0,0000	25,3800
0 +	0,7778	0,4286	0,3334	0,4364	–	–	25,3800
0med	–	–	–	0,2450	6,1200	–	25,3800
						6,1200	
0,1	0,7778	0,5225	0,4064	0,3700	10,6600	–	42,1600
		(sen31,5°)				16,7800	
0,2	0,7778	0,6712	0,5221	0,2200	8,1600	–	67,1000
						24,9400	
0,3 –	0,7778	0,9212	0,7165	–0,0300	3,9600	28,9000	96,0000
0,3 +	1,6154	0,9212	1,4881	–0,5600	–	–	96,0000
0,3med	–	–	–	–0,3000	–4,3700	–	96,0000
						24,5300	
0,4	1,6154	0,8614	1,3915	–0,5800	–10,6200	–	109,9100
						13,9100	
0,5	1,6154	0,9402	1,5188	–0,6700	–13,3700	–	110,4500
						0,5400	
0,6	1,6154	0,9370	1,5136	–0,5600	–13,2500	–	97,7400
						–12,7100	
0,7	1,6154	0,9909	1,6007	0,1500	–15,1400	–	69,8900
						–27,8500	
0,8	1,6154	0,9390	1,5169	1,0900	–13,3300	–	28,7120
						–41,1800	

Figura 24: Curva de oscilação do G1-Sistema Estável

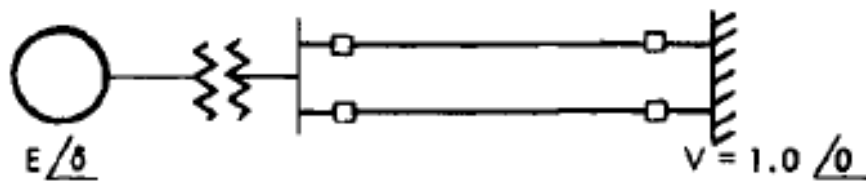


Fonte: Guimarães e Oliveira (2017)

4.2 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

Como descrito na seção 4.1 o método implementado neste trabalho tem por objetivo estudar a estabilidade transitória de uma máquina síncrona, após uma grande perturbação do sistema. Considerando as condições pré-falta, durante a falta e após a falta para poder levantar a curva do ângulo de potência da máquina e assim determinar se ela encontrará, passada a falta, um ponto de operação estável ou não. O sistema referência adotado para o desenvolvimento do algoritmo é o mesmo adotado para o exercício exemplo apresentado na seção 4.1, representado em outra bibliografia pela Figura 25.

Figura 25: Diagrama Modelo



Fonte: Anderson e Foadud (2003)

Vale salientar a simplicidade, mas ao mesmo tempo a versatilidade que essa tipologia de sistema proporciona, pois representa um grupo gerador conectado através de dois circuitos a um sistema de porte muito superior ao seu. Esse tipo de tipologia não é difícil de encontrar na prática e é muito abordada nas literaturas relacionadas a estabilidade transitória.

Para o desenvolvimento do algoritmo foi considerado o modelo clássico para representação da máquina síncrona dentro do estudo de estabilidade transitória, apresentado na

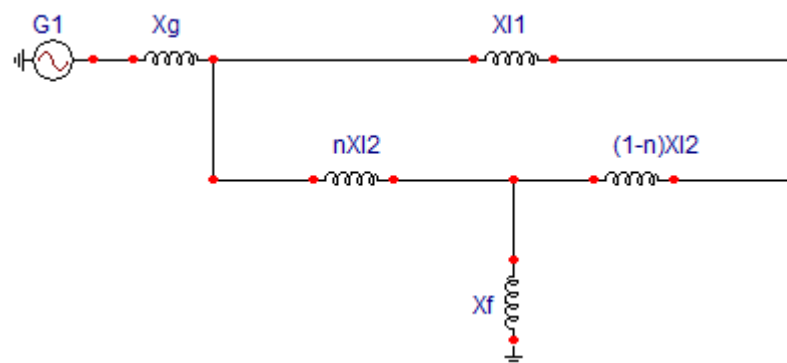
seção 3.4. As considerações realizadas na seção foram levadas em conta e ainda de acordo com o modelo adotado, foi analisado o comportamento da máquina para a primeira oscilação do rotor.

A fim de facilitar o entendimento da aplicação do método e do desenvolvimento do algoritmo utilizando o *software* MATLAB e o seu módulo de interface gráfica GUIDE, se apresenta em alto nível os passos seguidos.

Primeiramente o usuário deverá declarar os dados do sistema durante o período pré-falta, como as características do gerador (tensão interna da máquina, reatância transitória, a potência fornecida pelo gerador ao barramento e a constante de inércia), as reatâncias das linhas de transmissão e do transformador. Ainda durante essa etapa, o usuário deverá entrar com os dados da falta, como o valor da reatância de falta, caso haja, o tempo para o qual ocorre a abertura da linha, o tamanho do passo de iteração, o tempo para o qual ele deseja simular, lembrando que o critério tem como período de interesse um intervalo de tempo de um segundo ou menos. E por fim, informar a linha e em qual ponto dela ocorre a falta. A interface gráfica do programa desenvolvido, com todos os dados aqui explanados, é apresentada no Apêndice desse trabalho.

Após a etapa de aquisição de dados o algoritmo passa para o cálculo das reatâncias equivalentes, X_{antes} , $X_{durante}$ e $X_{após}$. Para ilustrar esse passo demonstra-se, de maneira genérica como é calculada a reatância equivalente durante a falta, veja o circuito apresentado pela Figura 26.

Figura 26: Circuito durante a falta



Fonte: Autoria própria

Supondo que ocorra um curto em um ponto n da linha dois, o circuito equivalente seria representado pela Figura 26. Para se encontrar a reatância série equivalente entre o gerador e o barramento infinito, se efetua algumas transformações $Y \rightarrow \Delta$ até se obter a reatância desejada.

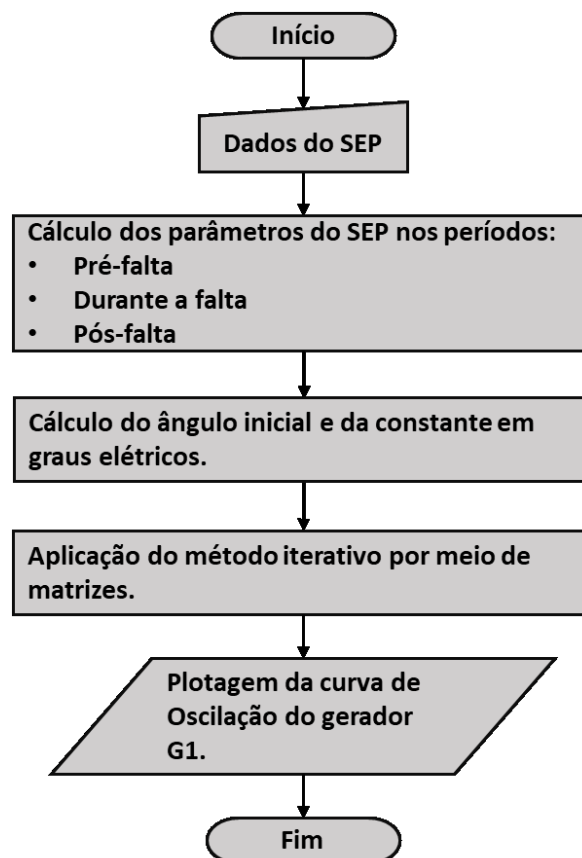
De posse das reatâncias se passa para o cálculo das máximas potências transmitidas pelo gerador ao barramento infinito, $P_{maxantes}$, $P_{maxdurante}$ e $P_{maxapós}$. Este cálculo é realizado utilizando as devidas reatâncias e conforme descrito na seção 3.5, onde se demonstra a relação entre a potência transferida e o ângulo do rotor das máquinas síncronas.

Calculadas as máximas potências, o algoritmo realiza o cálculo do ângulo inicial δ_0 de acordo com a potência transmitida ao barramento antes da falta e a $P_{maxantes}$, esse é o ângulo para o qual o sistema estava operando em regime permanente, antes da perturbação. O próximo passo é o cálculo da constante em graus elétricos K .

Uma vez conhecido todos os parâmetros necessários para a aplicação do método, o algoritmo por meio de matrizes, efetua o cálculo da curva de oscilação da máquina síncrona conectada ao barramento infinito e a plota.

A Figura 27 ilustra o fluxograma do algoritmo desenvolvido.

Figura 27: Fluxograma do algoritmo



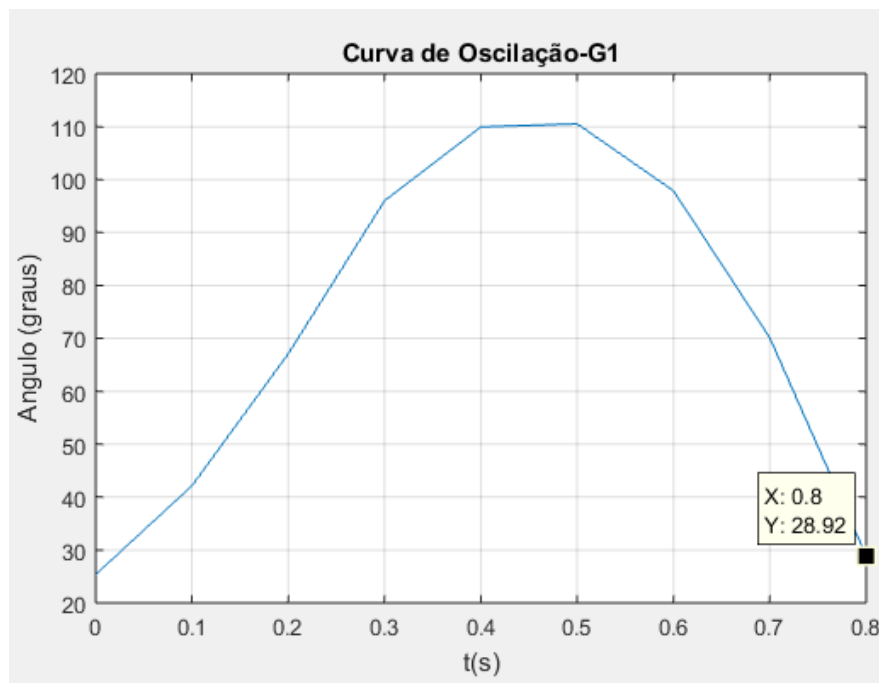
Fonte: Autoria Própria

4.3 RESULTADOS OBTIDOS

Para apresentar e validar os resultados obtidos pelo algoritmo, compara-se os resultados obtidos com a bibliografia e com o software PSP-UFU (Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia), desenvolvido pelo doutorando em dinâmica de sistemas pela UFU, Thales Lima Oliveira

O primeiro caso a ser abordado será o do exemplo apresentado na seção 4.1, desenvolvido por Guimarães e Oliveira (2017). A Figura 28 apresenta a interface gráfica e a curva de oscilação do gerador G1, levando em conta as mesmas características do exercício.

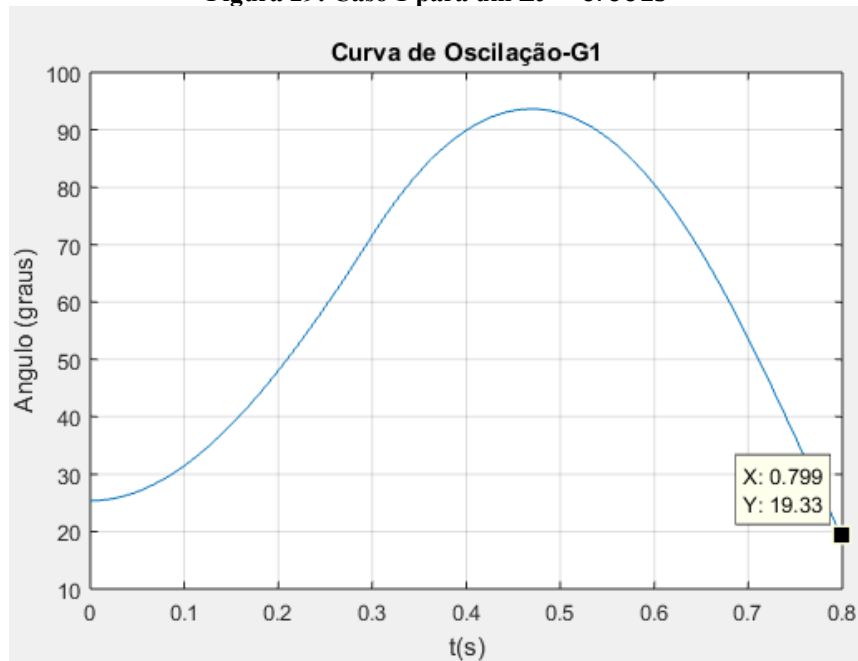
Figura 28: Caso 1 para um $\Delta t = 0.1s$



Fonte: Autoria Própria

O ângulo encontrado no exemplo para o instante $t = 0,8s$ e um passo $\Delta t = 0,1s$ por Guimarães e Oliveira (2017) foi $\delta = 28,712^\circ$ e o encontrado pelo algoritmo foi $\delta = 28,92^\circ$. A diferença mínima encontrada se deve pela quantidade de casas decimais utilizadas pela bibliografia e pelo algoritmo. A Figura 29 apresenta a curva de oscilação para o mesmo caso, para um $\Delta t = 0,001s$.

Figura 29: Caso 1 para um $\Delta t = 0.001s$

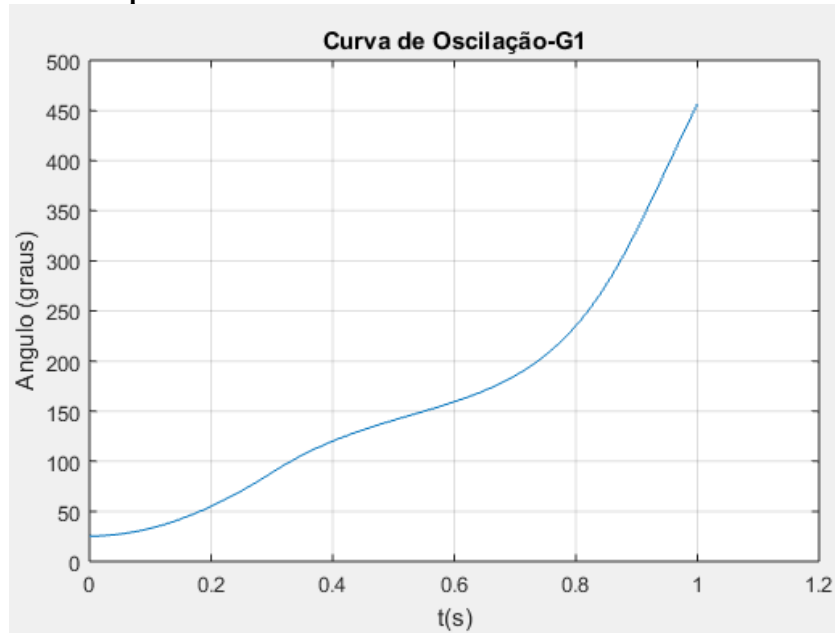


Fonte: Autoria Própria

Pode-se observar pela Figura 29 que aumentando a quantidade de iterações o ângulo final $\delta = 19,33^\circ$, não ultrapassando também o valor de 100° como para o caso anterior, isso demonstra que aumentando a quantidade de iterações se aumenta também a precisão do método.

Simula-se agora um caso que possui os mesmos parâmetros do caso anterior, no entanto agora se considera um intervalo de 1s e que a falta ocorreu para um ponto n da linha 2 igual a 30% da distância entre G1 e G2, a curva de oscilação obtida é ilustrada pela Figura 30.

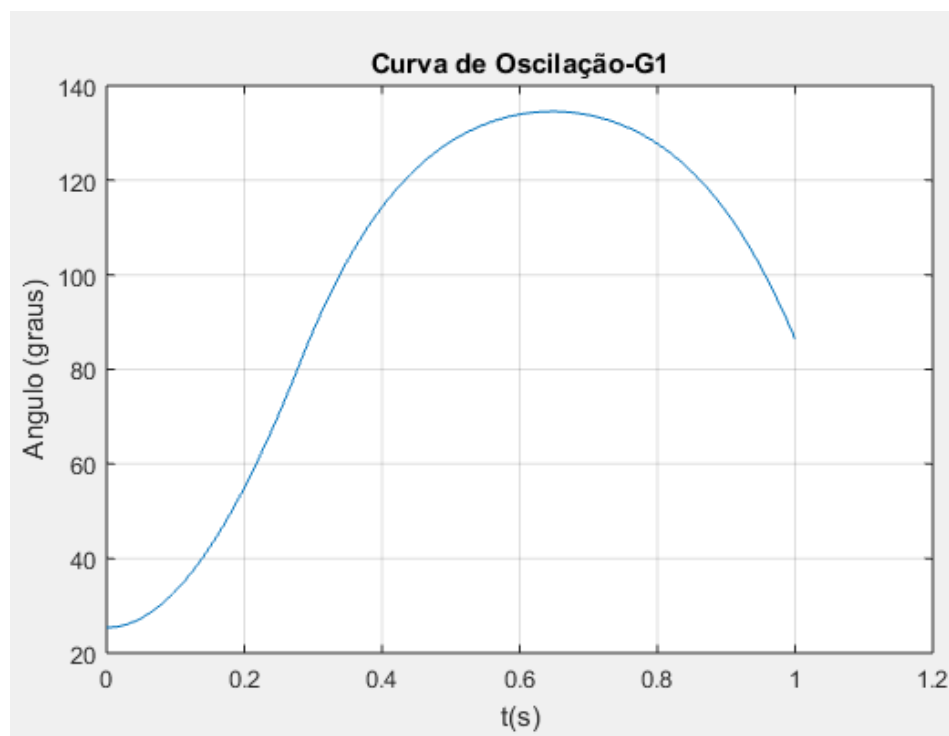
Figura 30: Caso 1 para uma falta na linha 2 a 30% de G1- Sistema Instável $t_{chav} = 0,3$



Fonte: Autoria Própria

Pela Figura 29 é visível que o ângulo de potência do gerador G1 cresce sem limites, portanto para uma falta que ocorra a 30% de G1 a máquina não conseguirá manter o sincronismo, caindo na região instável de operação e devendo ser tirada do sistema para que não ocorra maiores prejuízos. No entanto, se considerar um tempo de chaveamento igual a 0,28s o sistema já não caíra na região instável de operação, como demonstrado pela Figura 31. O mesmo não ocorreria para um tempo de chaveamento igual a 0,29s o que demonstra que por tentativa e erro pode-se determinar para qual instante ocorrerá o chaveamento crítico do sistema, sem recorrer as fórmulas apresentadas na seção 3.8.

Figura 31: Caso 1 para uma falta na linha 2 a 30% de G1- Sistema Instável $t_{chav} = 0,28$



Fonte: Autoria Própria

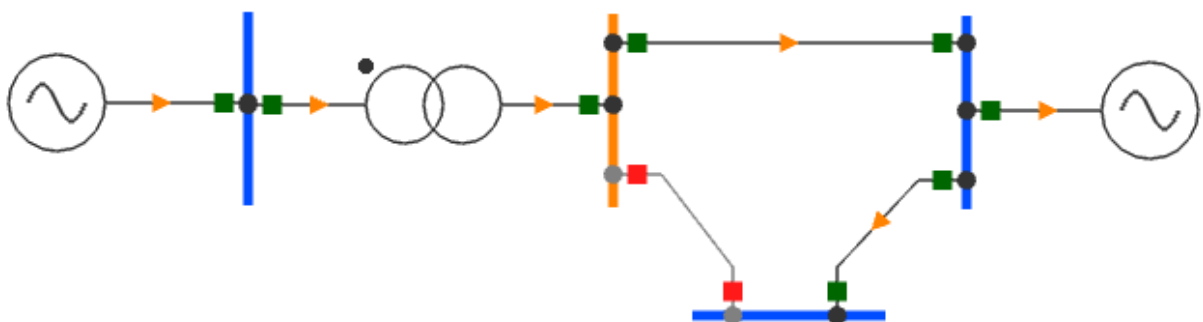
Simula-se agora outro caso com diferentes parâmetros de entrada e compara-se os resultados obtidos com o software PSP-UFU. Considere uma falta não sólida no barramento após o transformador que interliga o gerador G1 as linhas de transmissão, cujo os parâmetros são apresentados pela Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros para a falta no barramento de G1
Fonte: Autoria Própria

G1	
$Pe[pu]$	0,8
$H[s]$	5
$Eg[pu]$	1,11
$Xg'[pu]$	0,2
Transformador	
$Xt[pu]$	0,1
Reatância das linhas	
$Xl1[pu]$	0,4
$Xl2[pu]$	0,4
Reatância de Falta	
$Xf[pu]$	0,1
Tempo	
$\Delta t[s]$	0,01
$tchavemaento[s]$	0,3
$tfinal[s]$	1
Ponto da falta	
$Linha$	2
n	0

O diagrama utilizado para esse caso simulado pelo *software* PSP-UFU é representado pela Figura 32.

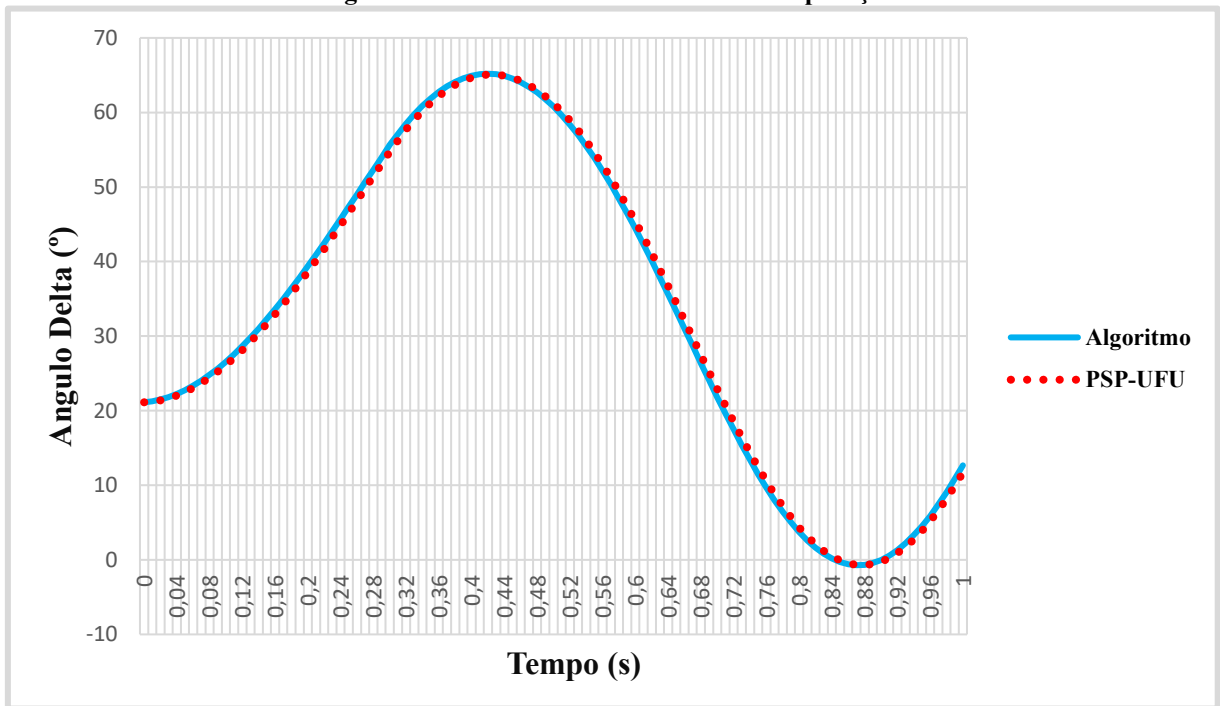
Figura 32: Esquemático caso 2 PSP-UFU



Fonte: Autoria Própria

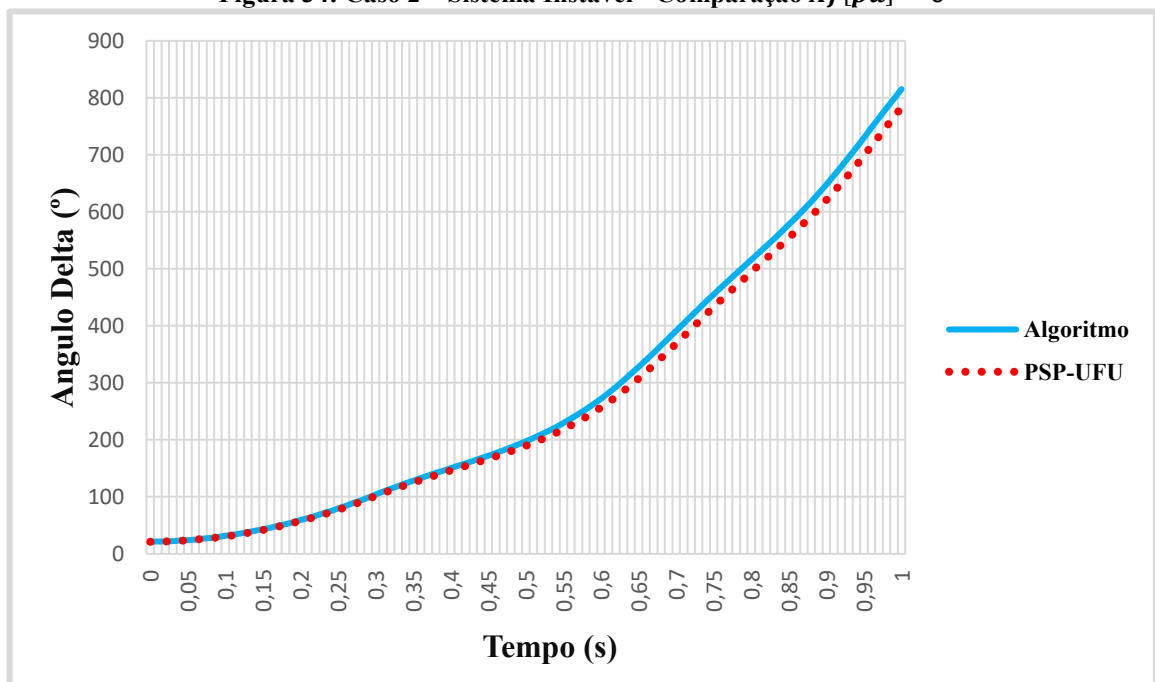
As curvas obtidas pelo *software* e pelo algoritmo, foram exportadas por meio de um arquivo de extensão *.csv*, conforme ilustra a Figura 33.

Figura 33: Caso 2 – Sistema Estável - Comparação



Fonte: Autoria Própria

Pode-se perceber que as respostas para o novo caso simulado, foram muito próximas, uma vez que o máximo valor obtido pelo PSP-UFU foi $\delta_{max} = 65,572^\circ$ e para o algoritmo foi $\delta_{max} = 65,21^\circ$. Simula-se novamente o caso abordado, mas considerando agora uma falta sólida em cima do barramento após o transformador, ou seja, $Xf[pu] = 0$ e $n = 0$, os resultados encontrados são ilustrados pela Figura 34.

Figura 34: Caso 2 – Sistema Instável - Comparação $Xf[pu] = 0$ 

Fonte: Autoria Própria

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um algoritmo que aplica o método passo a passo para cálculo da curva de oscilação da máquina síncrona, por meio do *software* MATLAB. Através deste método pode-se concluir se a máquina síncrona sujeita a contingência será capaz de se manter em um regime de operação dado como estável ou não. Além disso, pode-se determinar por tentativa e erro para qual instante de tempo ocorrerá o chamado chaveamento crítico do sistema, apresentado na seção 3.8.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, procurou-se também não se limitar somente ao método utilizado, mas também em abordar o estudo da estabilidade dentro da área de sistemas elétricos de potência. Para isso, foi apresentado na seção 2 os diferentes regimes de estabilidade que se fazem presentes dentro dessa área, a modelagem do problema, apresentando a equação de oscilação que rege o comportamento da máquina para essas condições na seção 3.2, a modelagem clássica da máquina síncrona seção 3.4 e diferentes análises realizadas dentro deste estudo, como o critério das áreas apresentado na seção 3.8.

Toda a parte teórica abordada, permitiu aprofundar os conceitos e entender melhor essa área tão relevante na engenharia elétrica, principalmente no que rege a parte de geração e dinâmica dos sistemas de energia.

Para o algoritmo desenvolvido, além da aplicação do método foi implementada também uma interface gráfica utilizando o módulo GUIDE do MATLAB, facilitando o entendimento e a interação do usuário.

Foram analisados dois casos distintos e mudou-se alguns parâmetros como o tempo de chaveamento, impedância de falta e porcentagem da linha, comparando os resultados obtidos e verificando para quais condições o gerador G1 conseguiria manter a estabilidade do sistema. Para os casos simulados o algoritmo desenvolvido apresentou resultados bem próximos aos obtidos pela bibliografia e o *software* PSP-UFU, o que valida os resultados obtidos por ele.

Por fim, pode-se concluir que além do estudo sobre estabilidade transitória realizado, também se obteve sucesso em relação ao algoritmo desenvolvido, pois ele apresentou um resultado satisfatório para o sistema proposto, máquina contra barramento infinito, permitindo ao usuário uma certa versatilidade em relação as condições da falta, uma vez que ele pode determinar os parâmetros do sistema adotado e escolher a porcentagem da linha para qual ocorre o curto e se ele ocorre em cima de uma impedância de falta nula ou não.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A., **Power system control and stability**. United States of America: IEEE Power Engineering Society, 2ª edição, 2003.
- BARBOSA, F. Maciel. **Estabilidade de sistemas elétricos de energia**. 2013. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~fmb/Textos/EstabilidadeSEE2013.pdf>>. Acesso em: out. 2017.
- BENEDITO, R. A. S. **Análise de estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência: através de método passo-a-passo e de método energético pebs**. Relatório da disciplina de Estabilidade de Sistemas Elétricos – EESC/USP, 2007.
- BOMFIM, A. L. B. **Ajuste Coordenado de Estabilizadores de Sistema de Potência Usando Algoritmos Genéticos**. 2000. 181 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <http://www.eletrica.ufrj.br/teses/textocompleto/200003_7001.pdf>. Acesso em: out. 2017.
- BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. **Estabilidade Transitória em Sistemas Eletroenergéticos**. São Carlos - SP: EESC/USP, 2000.
- FERREIRA, Gislene Cristiane de Lima. **Análise da estabilidade de sistemas de potência via ATP e comparação dos resultados com o PSAT**. 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14547/1/GisleneCristiane.pdf>>. Acesso em: out. 2017.
- COSTA, Antônio Simões. **Estabilidade de Sistemas de Potência**. 2007. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/~simoes/>>. Acesso em: out. 2017.
- DA MATA, C. G. **Uma contribuição na análise da estabilidade transitória dos sistemas elétricos de distribuição na presença de geração distribuída**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora – MG, 2005. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/ppee/files/2008/12/211044.pdf>>. Acesso em: set. 2017
- FERNANDES, João Leal. **Máquina Síncrona em Regime Transitório após Brusco Curto-Circuito no Estator**. 2006. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2006. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/1071/1/fernandes_2006.pdf>. Acesso em: out. 2017.
- GUIMARÃES, Geraldo Caixeta. **Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência**. Uberlândia: Ufu, 2016.

GUIMARÃES, Geraldo Caixeta; OLIVEIRA, José Carlos de. **Máquinas Síncronas e Estabilidade**. Uberlândia: Ufu, 2017.

IEEE Task Force on Terms & Definitions, **Proposed Terms & Definitions for Power System Stability**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 7, Julho de 1982, págs. 1894-1898.

HALLIDAY, DAVID, RESNICK, ROBERT, WALKER, JEARL; **Fundamentos de Física - v.1. 8ª.Ed.** Rio de Janeiro: LTC, 2009.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: McGraw-Hill, 1994. xxiii, 1176p., il.

MACHOWSKI, J.; BIALEK, J. W.; BUMBY, J. R.; **Power System Dynamics: Stability and Control**. Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.

NONLINEAR System. 2017. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nonlinear_system>. Acesso em: ago. 2017.

STEVENSON JR., W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. São Paulo - SP: McGraw-Hill do Brasil, 1986.

STOTT, B. **Power System Dynamic Response Calculations**. IEEE Proceeding, vol. 67, n. 2, p. 219 - 241, Feb. 1979. Disponível em: <ieeexplore.ieee.org/iel5/5/31274/01455502.pdf>. Acesso em: out. 2017.

APÊNDICE

INTERFACE GRÁFICA DO ALGORITMO DESENSOLVIDO

