

Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Elétrica

Curso de Engenharia Elétrica

BRUNO LABOISSIERE CAMARGOS BORGES

**COMPARAÇÕES DE DESEMPENHO DOS PROGRAMAS DO CEPEL,
DO TRANSUFU E DO PSP-UFU PARA REALIZAR A ANÁLISE
DINÂMICA DE UM DADO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA PARA
UMA PERTURBAÇÃO DO TIPO CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO**

UBERLÂNDIA 2018

BRUNO LABOISSIERE CAMARGOS BORGES

**COMPARAÇÕES DE DESEMPENHO DOS PROGRAMAS DO CEPEL,
DO TRANSUFU E DO PSP-UFU PARA REALIZAR A ANÁLISE
DINÂMICA DE UM DADO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA PARA
UMA PERTURBAÇÃO DO TIPO CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em engenharia elétrica.

Orientador: Geraldo Caixeta Guimarães

UBERLÂNDIA 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Mônica que me deu total apoio e que sempre se dedicou para que eu pudesse ter uma educação de qualidade.

Aos meus avós, Solange e Renato por todo carinho e por me introduzirem ao início do conhecimento.

Ao meu professor orientador Dr. Geraldo Caixeta Guimarães por toda ajuda, incentivo e conselhos.

Ao meu co-orientador Thales Lima Oliveira por toda a paciência e consideração em me ajudar nesse trabalho.

A todos os meus colegas e amigos que contribuíram de alguma forma para o meu aprendizado.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	4
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	6
LISTA DE TABELAS	9
RESUMO	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUÇÃO	12
1.1 ESTABILIDADE.....	12
1.2 OBJETIVOS	13
2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 ESTABILIDADE TRANSITÓRIA.....	14
2.2 MODELO CLÁSSICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA.....	15
2.3 A MODELAGEM MATEMÁTICA.....	16
2.4 MÉTODO PASSO-A-PASSO.....	21
2.5 TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA ATIVA	22
2.6 O BARRAMENTO INFINITO	25
2.7 O CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.....	26
2.8 CRITÉRIO DE IGUALDADE DE ÁREAS	27
2.9 O REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO	30
3. ANÁLISE TEÓRICA DE ESTABILIDADE DO SISTEMA.....	31
4. ANÁLISE COMPUTACIONAL DA ESTABILIDADE DO SISTEMA	39
4.1 PRIMEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES	39
4.1.1 AS SIMULAÇÕES COM O ANATEM.....	39
4.1.2 AS SIMULAÇÕES COM O TRANSUFU	41
4.1.3 AS SIMULAÇÕES COM O PSP-UFU.....	44
4.1.4 AS COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS	47
4.2 A SEGUNDA ETAPA DE SIMULAÇÕES.....	50
4.3 A TERCEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES	53
5. CONCLUSÃO.....	58
6. REFERÊNCIAS.....	60
7. ANEXOS	62
7.1 ARQUIVOS DE SIMULAÇÃO DO ANATEM PARA O PRIMEIRO CASO	62
7.2 ARQUIVOS DE SIMULAÇÃO DO ANATEM PARA O SEGUNDO CASO	65

7.3	ARQUIVOS DE SIMULAÇÃO DO TERCEIRO CASO	66
7.4	TABELA DO DESENVOLVIMENTO TEÓRICO DO MÉTODO PASSO- A-PASSO	67

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 – REPRESENTAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA NO PERÍODO TRANSITÓRIO.....	15
FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA NO PERÍODO SUBTRANSITÓRIO.....	15
FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO DAS REFERÊNCIAS ANGULARES PARA A CONSTRUÇÃO DA EQUAÇÃO HORÁRIA DO ÂNGULO DE DESLOCAMENTO DO ROTOR.....	17
FIGURA 2.4 – DIAGRAMA UNIFILAR DE UM SISTEMA CONSTITUÍDO POR DUAS MÁQUINAS SÍNCRONAS.....	23
FIGURA 2.5 – DIAGRAMA UNIFILAR DO EXEMPLO ADOTADO.....	24
FIGURA 2.6 – DIAGRAMA UNIFILAR DO EXEMPLO ADOTADO SIMPLIFICADO.....	24
FIGURA 2.7 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE IGUALDADE DAS ÁREAS.....	29
FIGURA 3.1 – SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA ADOTADO PARA A ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....	31
FIGURA 3.2 – CIRCUITO ELÉTRICO VISTO DOS TERMINAIS DO GERADOR AO BARRAMENTO INFINITO.....	32
FIGURA 3.3 – CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE VISTO DOS TERMINAIS DO GERADOR AO BARRAMENTO INFINITO.....	32
FIGURA 3.4 – CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE VISTO DA EXCITAÇÃO DO GERADOR ATÉ OS SEUS TERMINAIS.....	33
FIGURA 3.5 – DIAGRAMA UNIFILAR EQUIVALENTE VISTO DA EXCITAÇÃO DO GERADOR ATÉ O BARRAMENTO INFINITO DURANTE A FALTA.....	34
FIGURA 3.6 – CIRCUITO EQUIVALENTE EM ESTRELA VISTO DA EXCITAÇÃO DO GERADOR ATÉ O BARRAMENTO INFINITO DURANTE A FALTA.....	35
FIGURA 3.7 – CIRCUITO EQUIVALENTE EM DELTA VISTO DA EXCITAÇÃO DO GERADOR ATÉ O BARRAMENTO INFINITO DURANTE A FALTA.....	35

FIGURA 3.8 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO ELÉTRICO PELO MÉTODO PASSO-A-PASSO.....	37
FIGURA 3.9 – ANÁLISE DA ESTABILIDADE PELO CRITÉRIO DAS ÁREAS IGUAIS.....	38
FIGURA 4.1 – SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA MODELADO NO ANAREDE.....	39
FIGURA 4.2 – OSCILAÇÃO DO ÂNGULO ELÉTRICO PARA A PRIMEIRA ETAPA MODELADO NO ANATEM.....	40
FIGURA 4.3 – OSCILAÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA A PRIMEIRA ETAPA MODELADO NO ANATEM.....	40
FIGURA 4.4 – OSCILAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA PARA A PRIMEIRA ETAPA MODELADO NO ANATEM.....	41
FIGURA 4.5 – OSCILAÇÃO DA TENSÃO PARA A PRIMEIRA ETAPA MODELADO NO ANATEM.....	41
FIGURA 4.6 – REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA NO TRANSUFU.....	42
FIGURA 4.7 – OSCILAÇÃO DO ÂNGULO ELÉTRICO PARA A PRIMEIRA ETAPA MODELADO NO TRANSUFU.....	43
FIGURA 4.8 – OSCILAÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA A PRIMEIRA ETAPA MODELADO NO TRANSUFU.....	43
FIGURA 4.9 – OSCILAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA PARA A PRIMEIRA ETAPA MODELADO NO TRANSUFU.....	44
FIGURA 4.10 – OSCILAÇÃO DA TENSÃO PARA A PRIMEIRA ETAPA MODELADO NO TRANSUFU.....	44
FIGURA 4.11 – SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA MODELADO NO PSP-UFU.....	45
FIGURA 4.12 – OSCILAÇÃO DO ÂNGULO ELÉTRICO PARA A PRIMEIRA ETAPA MODELADO NO PSP-UFU.....	45
FIGURA 4.13 – OSCILAÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA A PRIMEIRA ETAPA MODELADO NO PSP-UFU.....	46
FIGURA 4.14 – OSCILAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA PARA A PRIMEIRA ETAPA MODELADO NO PSP-UFU.....	46

FIGURA 4.15 – OSCILAÇÃO DA TENSÃO PARA A PRIMEIRA ETAPA MODELADO NO PSP-UFU.....	47
FIGURA 4.16 – COMPARAÇÃO DA OSCILAÇÃO DO ÂNGULO ELÉTRICO PARA A PRIMEIRA ETAPA	47
FIGURA 4.17 – COMPARAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA A PRIMEIRA ETAPA.....	48
FIGURA 4.18 – COMPARAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA PARA A PRIMEIRA ETAPA	49
FIGURA 4.19 – COMPARAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA TENSÃO PARA A PRIMEIRA ETAPA	49
FIGURA 4.20 – COMPARAÇÃO DA OSCILAÇÃO DO ÂNGULO ELÉTRICO PARA A SEGUNDA ETAPA	51
FIGURA 4.21 – COMPARAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA A SEGUNDA ETAPA.....	51
FIGURA 4.22 – COMPARAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA PARA A SEGUNDA ETAPA	52
FIGURA 4.23 – COMPARAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA TENSÃO PARA A SEGUNDA ETAPA	52
FIGURA 4.24 – DIAGRAMA DO CONTROLE UTILIZADO NO AVR NA TERCEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES COM O ANATEM.....	54
FIGURA 4.25 – DIAGRAMA DO CONTROLE UTILIZADO NO AVR NA TERCEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES COM O PSP-UFU.....	55
FIGURA 4.26 – COMPARAÇÃO DA OSCILAÇÃO DO ÂNGULO ELÉTRICO PARA A TERCEIRA ETAPA	55
FIGURA 4.27 – COMPARAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA A TERCEIRA ETAPA.....	56
FIGURA 4.28 – COMPARAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA PARA A TERCEIRA ETAPA	56
FIGURA 4.29 – COMPARAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA TENSÃO PARA A TERCEIRA ETAPA	57

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – PARÂMETROS ELÉTRICOS ADOTADOS PARA O GERADOR 1 NA SEGUNDA ETAPA.....	50
TABELA 4.2 – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O CONTROLE DO AVR.....	54

RESUMO

COMPARAÇÕES DE DESEMPENHO DOS PROGRAMAS DO CEPEL, DO TRANSUFU E DO PSP-UFU PARA REALIZAR A ANÁLISE DINÂMICA DE UM DADO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA PARA UMA PERTURBAÇÃO DO TIPO CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.

Objetivo: O programa PSP-UFU é um *software* desenvolvido na Universidade Federal de Uberlândia com o intuito de realizar análise de fluxo de carga, curtos-circuitos e estabilidade transitória. Assim, o objetivo desse trabalho é demonstrar a correta operação da análise dinâmica desse programa perante ao curto-circuito trifásico. Com isso, comparou-se os resultados de simulações dos programas do CEPEL e do TRANSUFU com os do PSP-UFU para um dado sistema elétrico de potência. Na primeira etapa de simulações, considerou-se um gerador de polos lisos conectado a um barramento infinito, na segunda etapa substituiu-se o gerador de polos lisos por um gerador de polos salientes e na terceira acrescentou-se um regulador automático de tensão (AVR) ao gerador síncrono. Em conclusão, os resultados mostraram que o PSP-UFU obteve um bom desempenho para o distúrbio proposto.

Palavras chave: Análise dinâmica, ANAREDE, ANATEM, CEPEL, curto-circuito trifásico, TRANSUFU.

ABSTRACT

COMPARISONS OF PERFORMANCE BETWEEN THE CEPEL, THE TRANSUFU AND THE PSP-UFU PROGRAMS TO PERFORM DYNAMIC ANALYSIS FOR A THREE-PHASE SHORT-CIRCUIT OF A CERTAIN ELECTRICAL POWER SYSTEM.

Objective: The PSP-UFU program is a software developed in the Federal University of Uberlândia with the purpose of performing load flow, fault, and transient stability analysis. Therefore, the objective of this work is to demonstrate the correct behavior of dynamic of dynamic analysis of this program for a three-phase short-circuit. For that, this study compares the CEPEL and the TRANSUFU simulations results to those originated from PSP-UFU, for a certain electrical power system. In the first stage of simulations, the analysis considered a cylindrical pole generator connected to an infinity bus. In the second stage, the cylindrical pole generator was replaced for a salient pole generator. Finally, in the third stage, an automatic voltage regulation (AVR) was added to the synchronous generator. In conclusion, the results have shown that the PSP-UFU performed well for the given disturbance.

Key words: Dynamic Analysis, ANAREDE, ANATEM, CEPEL, Three-Phase Short-Circuit, TRANSUFU.

1.INTRODUÇÃO

1.1 ESTABILIDADE

A estabilidade de um sistema elétrico pode ser definida como a capacidade deste sistema em resgatar as suas condições estáveis de operação após ter transcorrido algum distúrbio (KUNDUR, et al., 2004).

Devido ao crescimento do sistema elétrico brasileiro, a manutenção de sincronismo entre diversos segmentos torna-se um problema cada vez mais árduo e complexo. Isso acontece porque em grandes sistemas elétricos de potência, a chance de ocorrer perturbações, tais como, faltas, perda de geração, perda de carga e outros é maior do que em sistemas menores (Bretas, et al., 2000).

Dessa forma, a descrição do nível de estabilidade de um sistema torna-se fundamental tanto para o planejamento quanto para a operação em condições de emergência e imprevisibilidade.

De acordo com Guimarães (2016), o conceito de estabilidade está atrelado com o comportamento apresentado pelas máquinas síncronas quando ocorre uma perturbação no sistema. Logo, se houver uma diferença entre o fornecimento e o requerimento de potência, o sistema buscará novas condições de operação em regime permanente.

Assim, pode-se dizer que um sistema é dito estável quando todas as máquinas síncronas do sistema permanecem em sincronismo, ou seja, operam em paralelo e com mesma velocidade.

Inerentemente, o distúrbio em um sistema pode causar efeitos transitórios, que possuem natureza oscilatória. Portanto, se um sistema é estável, então estas oscilações devem ser amortecidas em um determinado intervalo de tempo. Todavia, estas oscilações podem ser traduzidas como variações de potência no sistema, o que pode proporcionar a atuação da proteção em certos trechos do sistema, e por sua vez o desligamento de uma ou mais linhas (Barbosa, 2013).

Neste cenário, podemos denominar o período entre a condição inicial de operação e a nova condição de período transitório. Conseqüentemente, o comportamento do sistema nesse intervalo de tempo será denominado de

desempenho dinâmico, o qual será o foco deste trabalho.

Para atingir a nova condição de operação com maiores amortecimentos, ou seja, minimizando as oscilações do sistema, é imprescindível a utilização do regulador automático de tensão e do regulador automático de velocidade. Portanto, nesse trabalho será incluído a presença do regulador de tensão na análise de estabilidade transitória.

Dentre os distúrbios mencionados, neste trabalho considerou-se apenas o curto-circuito trifásico, uma vez que esse tipo de perturbação costuma ser a mais severa. Assim, o foco deste trabalho será sobre estabilidade transitória, uma vez que as perturbações realizadas nas simulações são de grande impacto para o sistema.

1.2 OBJETIVOS

O presente projeto propõe alcançar os seguintes objetivos principais:

1. Estabelecer a compreensão e conceitos de curto-circuito trifásico e de análise dinâmica;
2. Apresentar os conceitos básicos do regulador automático de tensão;
3. Definir e apresentar as funcionalidades utilizadas nas simulações dos programas: ANATEM, ANAREDE, PSP-UFU e TRANSUFU;
4. Executar as simulações para o sistema elétrico de potência adotado;
5. Confrontar os resultados da primeira etapa de simulações com a teoria apresentada.
6. Comparar os resultados das simulações do PSP-UFU com o ANATEM e o TRANSUFU.

2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESTABILIDADE TRANSITÓRIA.

A estabilidade transitória pode ser classificada como o estudo de estabilidade que envolve grandes perturbações no sistema. Dessa forma, nesse tema, as oscilações costumam ser severas e de pequena duração (estendem por um período de aproximadamente 1 segundo) (Guimarães e Oliveira, 2017).

Devido a essas condições, não somente são consideradas as tensões induzidas nos enrolamentos de campo como também os efeitos dos enrolamentos amortecedores. Outra característica importante é que nesse estudo a análise primordial é a “oscilação inicial”, na qual pode-se desprezar as ações do regulador de velocidade.

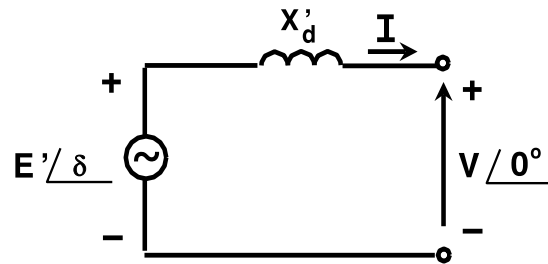
Apesar de que na estabilidade transitória a ação dos reguladores primários poderem ser desprezíveis, avaliou-se nesse trabalho o comportamento da análise dinâmica com a presença do regulador de tensão para demonstrar a eficácia do regulador automático de tensão com o *software* PSP-UFU.

Como foi descrito anteriormente, pode-se ter duas situações devido a uma perturbação brusca. A primeira situação é a qual somente o enrolamento de campo é considerado e a segunda situação é aquela que considera a superposição do efeito do enrolamento de campo com o do enrolamento dos amortecedores. Assim, dependendo da situação, o comportamento da máquina síncrona poderá ser diferente (Guimarães e Oliveira, 2017).

Para a primeira situação, ao analisar-se a circunstância após o distúrbio, pode-se constatar que dentro de um intervalo menor que 1 segundo (período transitório (T'_d)), a força eletromotriz originada do enrolamento de campo se mantém constante. Essa força eletromotriz é denominada tensão transitória e será representada por E' . A alta corrente causada pelo curto-circuito no período transitório fará com que a relutância (por onde passa a o fluxo produzido pelas correntes de armadura) aumente bastante, e com isso a reatância do circuito de armadura será reduzida significativamente. Essa reatância será denominada de reatância transitória de eixo direto e será representada por X'_d . A Figura 2.1 ilustra a representação da

máquina síncrona para essa situação.

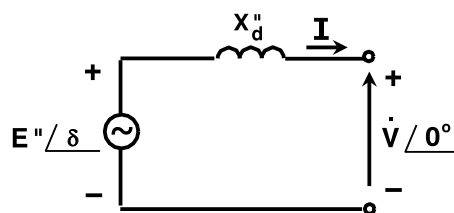
Figura 2.1 - Representação da máquina síncrona no período transitório.



Fonte: (Guimarães, 2016)

A segunda situação ocorre em um intervalo de tempo anterior ao período transitório e esse intervalo de tempo é denominado de período subtransitório (T_d''). Como já descrito anteriormente, nesse período as correntes também são induzidas nos enrolamentos amortecedores, contribuindo para que o fluxo permaneça constante (Guimarães, 2016). Assim, considerando esse fato e que os enrolamentos de campo estão posicionados próximo a linha do entreferro, a relutância será maior que a do primeiro caso e por consequência, a reatância do circuito de armadura será ainda menor. Essa reatância é denominada reatância subtransitória e será simbolizada por X_d'' . Como nessa situação a força eletromotriz terá uma contribuição dos enrolamentos amortecedores, essa tensão será representada por E'' e será denominada de tensão subtransitória. A Figura 2.2 ilustra a representação da máquina síncrona para essa situação.

Figura 2.2 - Representação da máquina síncrona no período subtransitório.



Fonte: (Guimarães, 2016)

2.2 MODELO CLÁSSICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA.

A partir das considerações que foram expostas pode-se definir o conceito de modelo clássico de uma máquina síncrona, o qual pode ser utilizado para determinar

a estabilidade de um sistema composto por um gerador ligado a um barramento infinito. As considerações desse modelo são:

- a) A potência mecânica é considerada constante durante o período dos transitórios.
- b) Os efeitos de amortecimento são desconsiderados.
- c) A máquina síncrona é representada pelo modelo do período transitório (Figura 2.1).
- d) O ângulo mecânico do rotor é igual ao ângulo elétrico de E' .
- e) A carga é representada por uma impedância constante.

Baseando-se no modelo clássico de máquina síncrona, a estabilidade pode ser determinada na primeira oscilação do rotor. Portanto, se houver uma mudança de sinal de $\frac{d\delta}{dt}$ no intervalo de um segundo, o sistema é estável (Guimarães, 2016).

As equações matemáticas apresentadas nesse trabalho, se baseiam no modelo clássico de uma máquina síncrona. Portanto, as premissas expostas acima serão base para a modelagem das equações eletromecânicas formuladas nesse estudo.

2.3 A MODELAGEM MATEMÁTICA

O comportamento dinâmico de um sistema pode ser descrito através de equações diferenciais, as quais são originadas devido a um balanço de potência. O gerador síncrono é uma máquina que é movimentada por um elemento primário, o qual fornece energia mecânica. Da conversão de energia eletromecânica, parte dessa energia é transformada em energia elétrica e a outra parcela é convertida em potência de aceleração do rotor. Logo, pode-se escrever:

$$P_m - P_e = P_a \quad (2.1)$$

Onde:

P_m é a potência mecânica movimentada pelo elemento primário;

P_e é a potência elétrica entregue à rede;

P_a é a potência acelerante do rotor.

Mas, como a velocidade angular é a mesma para as três potências no instante

em que ocorre a perturbação, uma vez que a máquina em questão é síncrona, tem-se que a equação (2.1) pode ser escrita como:

$$\omega_m T_a = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.2)$$

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.3)$$

Onde:

T_m é o torque mecânico oriundo do elemento primário;

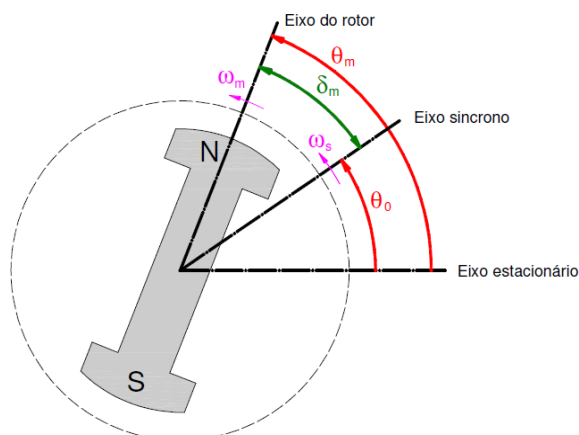
T_e é o torque elétrico;

T_a é o torque acelerante do rotor;

ω_m é a velocidade angular mecânica.

Como após o distúrbio o torque acelerante do rotor (T_a) será diferente de zero, o movimento do rotor possuirá uma equação horária do espaço angular. Essa equação pode ser escrita tomando-se como referência a velocidade síncrona. Assim, analisando-se a Figura 2.3 pode-se escrever a equação (2.4) (Guimarães e Oliveira, 2017):

Figura 2.3 - Representação das referências angulares para a construção da equação horária do ângulo de deslocamento do rotor.



Fonte: (Guimarães e oliveira, 2017)

$$\theta_m = \theta_0 + (\omega_m - \omega_s)t = \theta_0 + \omega' t = \theta_0 + \delta_m \quad (2.4)$$

Onde:

θ_m é o deslocamento angular mecânico;

ω_s é a velocidade síncrona;

t é o tempo após o distúrbio;

ω' é a velocidade angular relativa;

δ_m é o deslocamento angular mecânico entre o eixo do rotor e o eixo síncrono.

Outro ângulo que possui muita importância no estudo de estabilidade é o ângulo elétrico δ , o qual pode ser relacionado com o deslocamento angular mecânico relativo através da equação (2.5):

$$\delta = \frac{p}{2} \times \delta_m \quad (2.5)$$

Onde p é o número de polos.

A equação (2.3) pode ser reescrita em relação ao momento de inércia (J) como:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.6)$$

Mas, ao derivar-se a equação (2.4) em relação a t :

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{d\theta_0}{dt} + \frac{d\delta_m}{dt} = \omega_s + \omega' \quad (2.7)$$

Derivando-se a equação (2.7) em relação a t , obtém-se a equação (2.8):

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{d\omega'}{dt} \quad (2.8)$$

Substituindo a equação (2.8) na equação (2.6), tem-se:

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.9)$$

E ao se substituir a equação (2.5) na equação (2.9), tem-se:

$$J \frac{2 d^2 \delta}{p dt^2} = T_m - T_e \quad (2.10)$$

Para simplificar ainda mais a equação (2.10) é necessário expressar algumas equações da mecânica de rotação, como a quantidade de movimento angular, (M), a energia cinética de rotação (G) e a constante de inercia (H).

A quantidade de movimento angular é definida (quando a velocidade angular é constante) por (Guimarães e Oliveira, 2017):

$$M = J \omega_m \quad (2.11)$$

A energia cinética de rotação (G) é expressa por:

$$G = \frac{J \omega_m^2}{2} \quad (2.12)$$

A constante de inércia (H) é uma grandeza que é praticamente invariável com a potência da máquina e essa grandeza é definida por:

$$H = \frac{G_{nom}}{S_{nom}} \quad (2.13)$$

Onde:

G_{nom} é a energia cinética armazenada;

S_{nom} é a potência nominal da máquina.

Ao se substituir (2.11) e (2.12) em (2.13), tem-se:

$$H = \frac{\frac{J \omega_m^2}{2}}{S_{nom}} = \frac{JM \omega_m}{2 S_{nom}} \quad (2.14)$$

Ainda, se a quantidade de movimento angular estiver como referência angular em graus elétricos, então a velocidade angular mecânica também deve ser expressa em graus elétricos, por isso:

$$\omega_m = 360^\circ f \quad (2.15)$$

Onde:

f é a frequência.

Logo, pode-se relacionar a quantidade de movimento angular com a constante de inércia ao juntar-se a equação (2.15) com a (2.14), obtendo:

$$M = \frac{S_{nom}H}{180^\circ f} \quad (2.16)$$

Ao voltarmos na equação (2.2), podemos reescreve-la utilizando a equação (2.10):

$$J\omega_m \frac{2}{p} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.17)$$

Substituindo (2.11) em (2.17):

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{p(P_m - P_e)}{2M} \quad (2.18)$$

Usando a equação (2.16) em (2.18):

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{p}{2} \frac{180^\circ f}{S_{nom}H} (P_m - P_e)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{p}{2} \frac{180^\circ f}{H} (P_{m(pu)} - P_{e(pu)}) \quad (2.19)$$

Para uma máquina de dois polos, tem-se:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{180^\circ f}{H} (P_{m(pu)} - P_{e(pu)}) \quad (2.20)$$

Vale destacar que a equação (2.18) considera a máquina sendo ideal. Assim, alguns efeitos de amortecimento são desprezados. Dentre esses efeitos, pode-se destacar as perdas de energia por atrito e ventilação, as quais são proporcionas à velocidade da máquina (Bretas, et al., 2000). Portanto, considerando-se essas perdas, para uma máquina de dois polos, o balanço de potência poderia ser escrito como:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} = p(P_m - P_e) \quad (2.21)$$

Onde:

D é uma constante de amortecimento.

Entretanto, para simplificar as resoluções das equações diferenciais e considerar uma análise mais severa, desprezou-se o efeito de amortecimento nesse trabalho.

2.4 MÉTODO PASSO-A-PASSO

A equação (2.20) apresenta uma equação diferencial de segunda ordem. Para simplificar a resolução dessa equação pode-se utilizar um método que consiste em transformar uma equação diferencial de segunda ordem em uma equação linear (Bretas, et al., 2000). Assim, essa equação linear apresentará pequenas variações (Δ) ao invés de derivadas e poderá estimar o valor do ângulo elétrico δ para cada intervalo de tempo. Essa técnica possui o nome de Método Passo-a-Passo e será apresentada a seguir para a equação (2.20) (Bretas, et al., 2000).

Ao se substituir as derivadas na equação (2.20) por variações (Δ), tem-se:

$$\frac{\Delta(\Delta\delta)}{(\Delta t)^2} = \frac{180^\circ f}{H} (P_{m(pu)} - P_{e(pu)})$$

Substituindo o conceito da equação (2.1), tem-se:

$$\Delta(\Delta\delta) = \frac{180^\circ f}{H} (\Delta t)^2 P_{a(pu)} \quad (2.22)$$

Como o intervalo de tempo adotado nesse método são sempre iguais, pode-se assumir que a seguinte expressão é uma constante:

$$K = \frac{180^\circ f}{H} (\Delta t)^2 \quad (2.23)$$

Substituindo a expressão (2.23) em (2.22):

$$\Delta(\Delta\delta) = KP_{a(pu)} \quad (2.24)$$

Mas, por definição, tem-se que para os passos n e n-1:

$$\Delta(\Delta\delta)_n = \Delta\delta_n - \Delta\delta_{n-1} \quad (2.25)$$

Substituindo (2.24) em (2.25):

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + KP_{a(pu)_n} \quad (2.26)$$

Repetindo a definição de variação:

$$\Delta\delta_n = \delta_n - \delta_{n-1}$$

$$\delta_n = \Delta\delta_n + \delta_{n-1} \quad (2.27)$$

Assim, tendo-se as condições antes da falta, durante a falta e após a falta, pode-se estimar os valores do ângulo elétrico δ para cada intervalo de tempo adotado.

2.5 TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA ATIVA

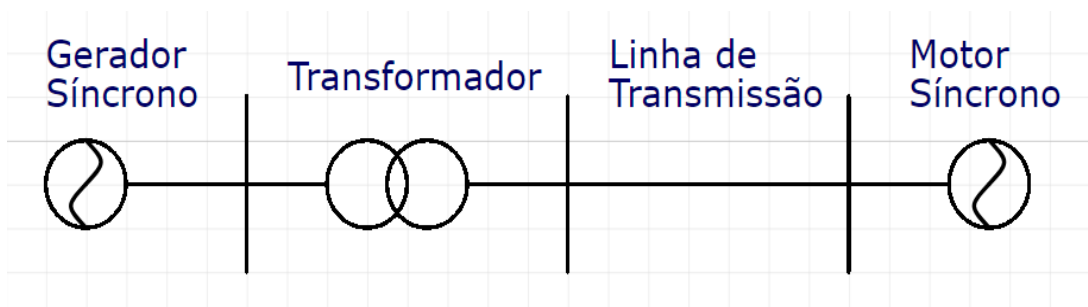
Como apresentado nas equações do Método Passo-a-Passo, a potência

elétrica ativa é uma importante grandeza que deve ser estimada para que se possa determinar as condições de operação de uma máquina síncrona antes da falta, durante a falta e depois da falta. Logo, nesse trabalho, será representado a transferência de potência ativa entre duas máquinas síncronas. As condições adotadas nessa representação, são:

- a) As resistências do sistema foram desprezadas para analisar a estabilidade do sistema na pior condição.
- b) Considerou-se a transferência de potência apenas entre duas máquinas porque o sistema adotado nesse estudo possui apenas uma máquina síncrona ligado a um barramento infinito.
- c) As máquinas síncronas adotadas são de rotor cilíndrico.

Com base nas premissas apresentadas, utilizou-se o modelo de sistema elétrico mostrado na figura 2.4 para demonstrar a transferência de potência entre duas máquinas síncronas:

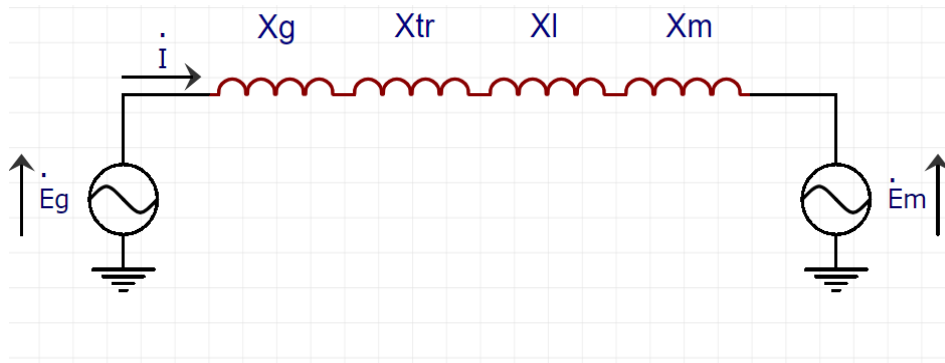
Figura 2.4 – Diagrama unifilar de um sistema constituído por duas máquinas síncronas.



Fonte: Autoria própria.

Considerando-se apenas as reatâncias indutivas do sistema, o diagrama unifilar do sistema é apresentado na figura 2.5:

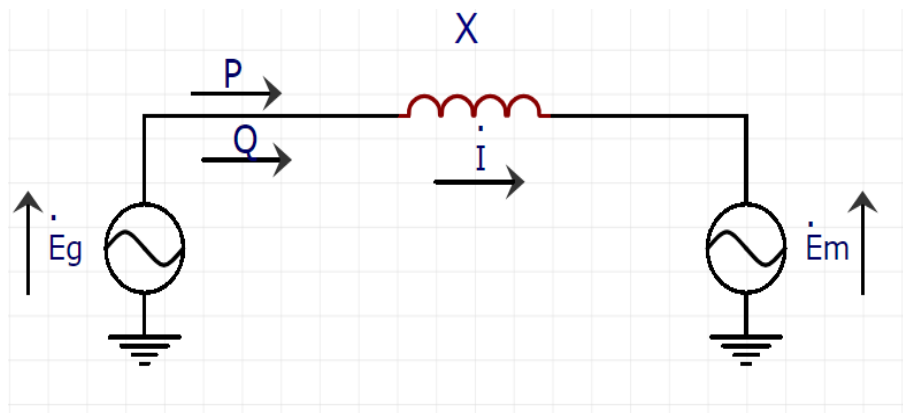
Figura 2.5 – Diagrama unifilar do exemplo adotado.



Fonte: Autoria própria

Reduzindo o sistema, tem-se a figura 2.6:

Figura 2.6 – Diagrama unifilar do exemplo adotado simplificado.



Fonte: Autoria própria

Utilizando a figura 2.6 como base do circuito elétrico, tem-se :

$$\dot{S} = P + jQ = \dot{E}_g \dot{I}^* \quad (2.28)$$

Onde:

\dot{I}^* é o conjugado de \dot{I}

E a corrente é dada por (2.29):

$$i = \frac{\dot{E}_g - E_m}{jX} \quad (2.29)$$

A referência adotada no sistema será o motor síncrono, assim o ângulo elétrico correspondente a essa máquina será zero, enquanto que para o gerador síncrono será δ . Logo, utilizando-se desse conceito e substituindo (2.29) em (2.28):

$$\begin{aligned} \dot{S} &= E_g \angle \delta \left(\frac{E_g \angle \delta - E_m \angle 0^\circ}{jX} \right)^* \\ \dot{S} &= E_g \angle \delta \left(\frac{E_g \angle -\delta - E_m \angle 0^\circ}{-jX} \right) \\ \dot{S} &= \frac{E_g^2 \angle 90^\circ}{X} - \left(\frac{E_g E_m \angle \delta + 90^\circ}{X} \right) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Como:

$$P = \text{Real}[\dot{S}] \quad (2.31)$$

$$P = -\frac{E_g E_m}{X} \cos(\delta + 90^\circ)$$

$$P = \frac{E_g E_m}{X} \text{sen } \delta \quad (2.32)$$

Assim, a equação (2.32) pode ser utilizada para a representação de transferência de potência entre duas máquinas síncronas sobre as condições estabelecidas nessa representação de sistema.

2.6 O BARRAMENTO INFINITO

Uma das análises mais comuns no estudo de estabilidade é o estudo de um

gerador síncrono conectado a um barramento infinito. Nesse estudo, o conceito de barramento infinito pode ser entendido como um sistema elétrico de potência tão grande que a tensão e a frequência permanecem constantes, independentemente da quantidade de potência gerada ou absorvida ou de qualquer perturbação que possa ocorrer nessa barra (Guimarães e Oliveira, 2017).

Dessa forma, pode-se representar um barramento infinito por uma máquina síncrona conectada a uma barra. Para que a condição de tensão constante possa ser satisfeita é necessário que a impedância interna dessa máquina seja igual a zero. Além disso, como a frequência desse sistema é constante, pode-se afirmar que a velocidade angular dessa máquina também será. Logo, da equação (2.14) pode-se observar que isso equivale a representar a máquina com uma constante de inércia constante.

2.7 O CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

O estudo das correntes de curto-circuito em sistemas elétricos de potência é fundamental para o planejamento e a operação de redes e equipamentos envolvidos, uma vez que esses distúrbios podem atingir grandes valores, podendo comprometer a integridade física da instalação e dos dispositivos presentes (Sato, et al., 2015).

Um equipamento que pode ser prejudicado pela ação do curto-circuito é o gerador síncrono. Da equação (2.3), pode-se observar que durante a operação normal o torque mecânico da turbina se iguala ao torque elétrico, o resultado é que a velocidade de rotação de todos os geradores envolvidos no sistema será igual a velocidade síncrona.

No entanto, na ocorrência de um curto-circuito próximo a alguma barra de geração, a tensão nesse local poderá atingir valores próximos ou iguais a zero, conseqüentemente o torque elétrico cairá significativamente. Dessa forma, como o torque mecânico manterá constante (devido a quantidade de água ou vapor na turbina permanecer a mesma), pela equação (2.3) pode-se observar que o turbogerador apresentará uma aceleração nos instantes iniciais (antes da atuação do regulador de velocidade), o que pode levar a danos físicos irreversíveis na máquina.

Além da possibilidade dessa perturbação causar danos no gerador, a diferença entre geração e consumo pode resultar em alterações e oscilações em grandezas como tensão e frequência, o que pode levar a problemas na operação do sistema.

Dentre os estudos envolvendo as correntes de curto-circuito, o curto-circuito trifásico geralmente é o mais severo, apesar de que em algumas situações o curto-circuito monofásico pode apresenta níveis maiores de corrente (Sato, et al., 2015).

O cálculo da corrente de curto-circuito trifásico simétrica consiste em determinar o circuito equivalente de Thévenin visto do ponto da perturbação. Logo, essa corrente pode ser determinada através da expressão:

$$I_{cc3\phi} = \frac{E_{th}}{Z_{th}} \quad (2.33)$$

Onde:

$I_{cc3\phi}$ é a corrente de curto-circuito trifásica;

E_{th} é a tensão de Thevenin vista do ponto da falta;

Z_{th} é a impedância de Thevenin vista do ponto da falta.

Para facilitar a determinação da equação (2.33), pode-se fazer algumas considerações, como desprezar as cargas do sistema, fazendo com que a impedância de Thévenin não leve em conta as impedâncias das cargas envolvidas.

2.8 CRITÉRIO DE IGUALDADE DE ÁREAS

Outro método para analisar a estabilidade transitória de um sistema sem resolver equações diferenciais é o “Critério de Igualdade de Áreas”. Ao contrário do Método Passo-a-Passo, o Critério de Igualdade de Áreas permite que os ajustes e as correções de instabilidade podem ser realizados em tempo real, mesmo que a perturbação não tenha sido testada em sua fase de projeto (Bretas, et al., 2000). Por esse motivo, será apresentada a seguir a dedução do Critério de Igualdade de Áreas para um gerador síncrono conectado a um barramento infinito.

Da equação (2.20), ao multiplicar-se ambos os lados da equação por $2 \left(\frac{d\delta}{dt} \right)$, tem-se:

$$2 \left(\frac{d\delta}{dt} \right) \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{180^\circ f}{H} (P_{m(pu)} - P_{e(pu)}) 2 \left(\frac{d\delta}{dt} \right)$$

Mas, utilizando a propriedade da regra da cadeia:

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = 2 \left(\frac{d\delta}{dt} \right) \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.34)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{360^\circ f}{H} P_{a(pu)} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)$$

$$d \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{360^\circ f}{H} P_{a(pu)} d\delta \quad (2.35)$$

Ao integrar-se em ambos os lados da equação (2.35), tem-se:

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \frac{360^\circ f}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} P_{a(pu)} d\delta$$

Ou ainda:

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\left(\frac{360^\circ f}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} P_{a(pu)} d\delta \right)} \quad (2.36)$$

Onde:

δ_0 é o ângulo elétrico antes do distúrbio, quando a máquina está operando na velocidade síncrona.

Da equação (2.7), pode-se notar que a derivada $\frac{d\delta}{dt}$ representa a velocidade angular relativa (ω'). Assim, para que o sistema seja estável, a velocidade relativa deve ser zero quando a aceleração for menor ou igual a zero.

Se a aceleração do rotor for positiva, então a estabilidade para um ângulo δ_{max} só poderá ser atingida se:

$$P_{a(pu)}(\delta_{max}) \leq 0 \quad (2.37)$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{max}} P_{a(pu)} d\delta = 0 \quad (2.38)$$

Pode-se reescrever a equação (2.36) como:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{max}} P_{a(pu)} d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta'} P_{a(pu)} d\delta + \int_{\delta'}^{\delta_{max}} P_{a(pu)} d\delta = 0$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} P_{a(pu)} d\delta = \int_{\delta_{max}}^{\delta_c} P_{a(pu)} d\delta$$

$$A_1 = A_2 \quad (2.39)$$

Onde:

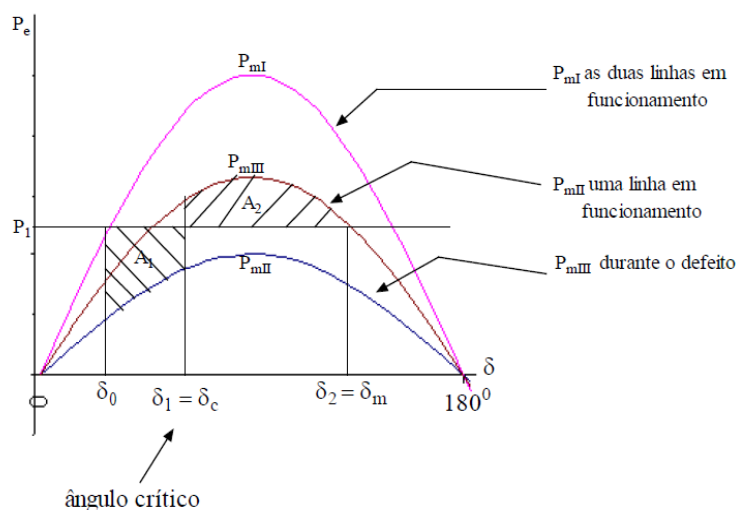
A_1 é a área correspondente entre os ângulos δ_0 e δ_c ;

A_2 é a área correspondente entre os ângulos δ_c e δ_{max} .

Portanto, o limite de estabilidade será atingido quando ocorrer a condição da equação (2.39) e quando $P_{a(pu)}(\delta_{max}) = 0$.

A representação gráfica do Critério de Igualdade das Áreas pode ser representada pela figura 2.7:

Figura 2.7 – Exemplo de aplicação do Critério de Igualdade das Áreas.



Fonte: (Barbosa, 2013)

2.9 O REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

O regulador automático de tensão (AVR) tem como função primordial manter a tensão gerada dentro de determinados limites pré-estabelecidos através do controle sobre o sistema de excitação da máquina síncrona (Guimarães, 2016).

Existem vários motivos para se utilizar o controle de um AVR em uma máquina síncrona, no entanto o foco desse trabalho será quanto ao aprimoramento da estabilidade transitória.

Se considerar-se a representação do gerador síncrono no período transitório como na figura 2.1, tem-se que a transferência de potência será definida por:

$$P = \frac{E'V}{X'} \text{sen } \delta = P_{max} \text{sen } \delta \quad (2.40)$$

Na ocorrência de um curto-circuito próximo a tensão terminal V , tem-se que essa irá diminuir significativamente, uma vez que é suposto a ausência de um AVR. Com o decréscimo da tensão V , pode-se notar pela equação (2.40) que a potência máxima também diminui. Assim, o gerador tende a aumentar o ângulo δ , ficando mais propício a perda de sincronismo (Guimarães, 2016).

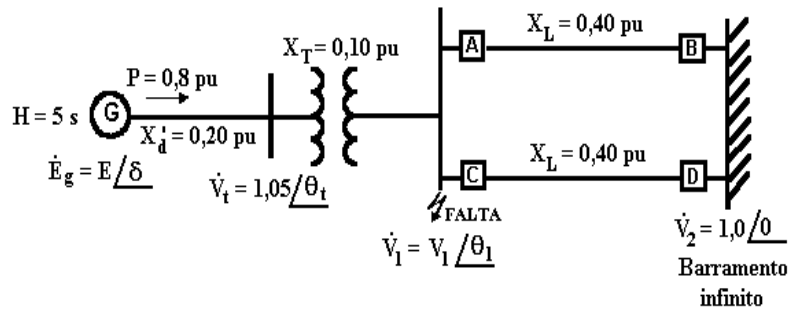
Contudo, se houvesse a presença de um AVR, este faria com que a tensão de excitação da máquina aumentasse, devido à queda de tensão nos terminais do gerador. Logo, o valor de P_{max} seria maior que a do cenário anterior e por isso a compensação do ângulo elétrico δ seria menor.

Com base nesse efeito, nota-se que a ação do AVR não só contribui para que a tensão se mantenha constante em regime permanente, como também propicia uma redução das oscilações de tensão transitórias. Portanto, quando o controle de um AVR estiver bem ajustado, esse consegue melhorar a estabilidade global do sistema (Guimarães, 2016).

3. ANÁLISE TEÓRICA DE ESTABILIDADE DO SISTEMA

O sistema adotado para análise de estabilidade nesse estudo é apresentado na figura 3.1:

Figura 3.1 – Sistema elétrico de potência adotado para a análise de estabilidade.



Fonte: Adaptação (Guimarães, 2016)

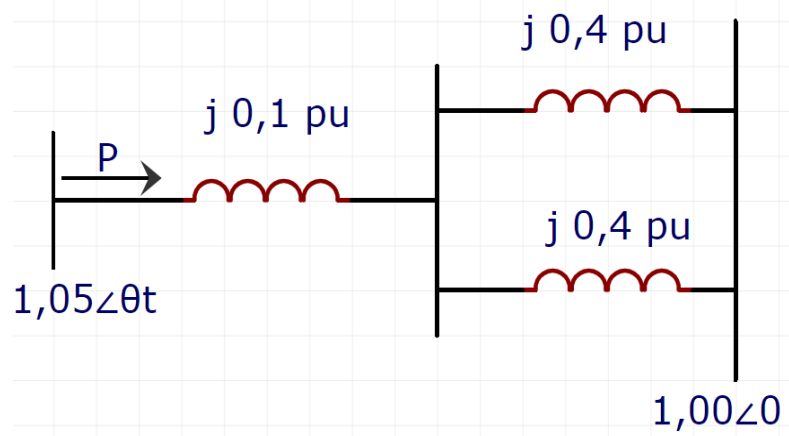
Na figura 3.1 verifica-se que o sistema em questão apresenta um gerador conectado a um barramento infinito, quando, durante um certo tempo, ocorre uma falta trifásica na barra 1. As condições iniciais (antes da falta) são:

- O gerador entrega uma potência ativa de 0,80 pu;
- A tensão no terminal do gerador é de 1,05 pu.

No instante de tempo igual a zero segundos ocorre um curto-circuito trifásico na barra 1, o qual dura 0,15 segundos, quando o curto-circuito é eliminado antes que os disjuntores A, B, C e D atuem. O distúrbio na barra 1 apresenta uma impedância balanceada para o neutro de $j0,1$ pu.

Utilizando o Método Passo-a-Passo para resolver a análise de estabilidade, tem-se que, antes da falta, olhando dos terminais do gerador ao barramento infinito, o sistema apresenta o circuito equivalente mostrado na figura 3.2:

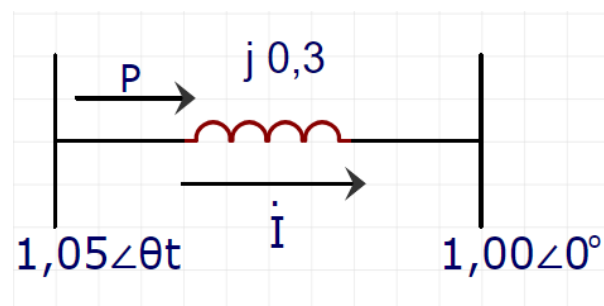
Figura 3.2 – Circuito elétrico visto dos terminais do gerador ao barramento infinito.



Fonte: Autoria própria.

Esse circuito pode ser reduzido para:

Figura 3.3 – Circuito elétrico equivalente visto dos terminais do gerador ao barramento infinito.



Fonte: Autoria própria.

Finalmente, utilizando-se da equação (2.32) e a figura 3.3, pode-se escrever:

$$P = \frac{V_T V_2}{X} \sin \theta_T = \frac{1,05 * 1,00}{0,30} \sin \theta_T$$

Como P vale 0,80 pu:

$$\sin^{-1} \theta_T = \frac{0,8 * 0,3}{1,05}$$

Considerando que antes da perturbação o sistema era estável, então θ_T deve estar no intervalo do primeiro quadrante (entre 0° e 90°). Logo, o valor de θ_T será:

$$\theta_T = 13,21^\circ$$

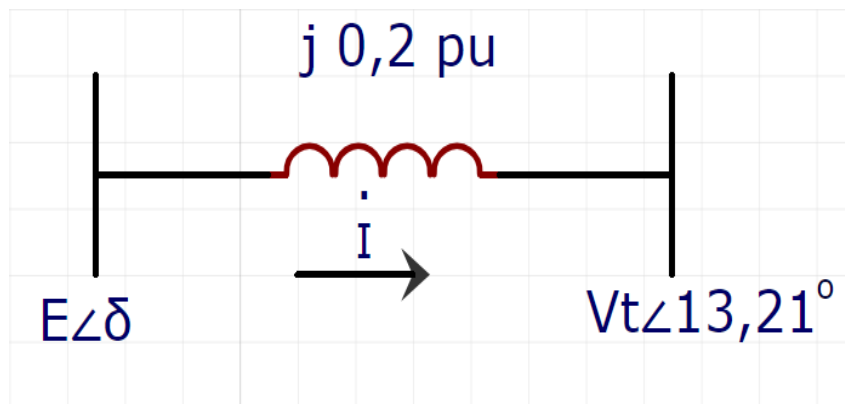
Ainda, utilizando-se da figura 3.3, pode-se definir a corrente I:

$$i = \frac{\dot{V}_T - \dot{V}_2}{jX} \quad (3.1)$$

$$i = \frac{1,05 \angle 13,21^\circ - 1,00 \angle 0^\circ}{0,3 \angle 90^\circ} = 0,80 \angle -5,29^\circ \text{ pu}$$

Outra forma de circuito que poderia ser utilizado seria considerar-se uma representação da excitação do gerador até os seus terminais:

Figura 3.4 – Circuito elétrico equivalente visto da excitação do gerador até os seus terminais.



Fonte: Autoria própria.

Da figura 3.4, pode-se escrever a equação:

$$\dot{E}_g = \dot{V}_T + jX_d \dot{I} \quad (3.2)$$

$$\dot{E}_g = 1,05 \angle 13,21^\circ + 0,20 \angle 90^\circ * 0,80 \angle -5,29^\circ$$

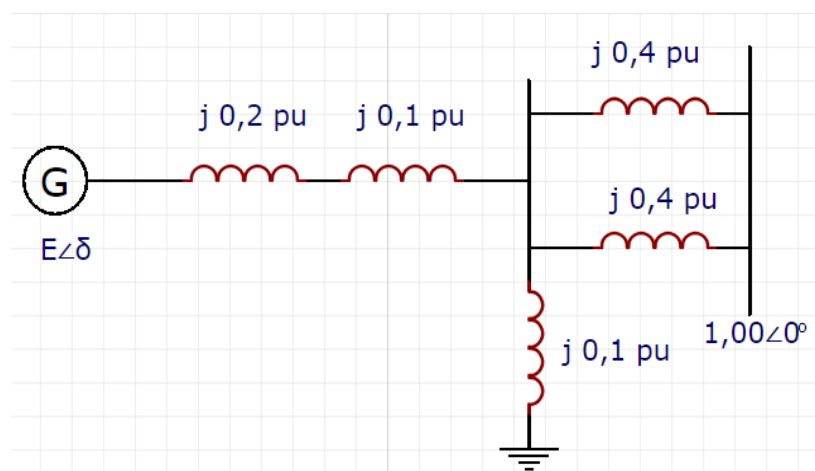
$$\dot{E}_g = 1,11 \angle 21,06^\circ \text{ pu}$$

Assim, percebe-se que o ângulo elétrico δ_0 vale aproximadamente $21,06^\circ$. Outro valor importante que pode ser determinado antes da falta é a potência P_{max} . Utilizando-se da equação (2.40), tem-se que:

$$P_{max_0} = \frac{1,11 * 1,00}{0,50} = 2,22 \text{ pu}$$

Como descrito anteriormente, durante a falta, o curto-circuito trifásico possui uma impedância balanceada para o neutro de $j0,1 \text{ pu}$. Assim, podemos representar nesse período o diagrama unifilar visto da excitação do gerador até o barramento infinito como ilustrado na figura 3.5:

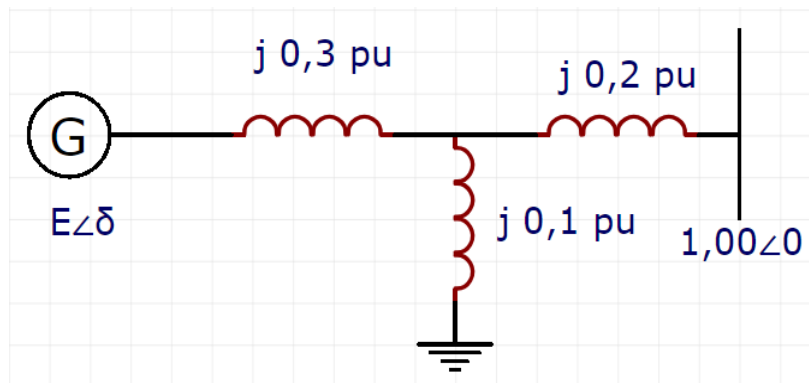
Figura 3.5 – Diagrama unifilar equivalente visto da excitação do gerador até o barramento infinito durante a falta.



Fonte: Autoria própria.

A figura 3.5 pode ser simplificada para o circuito em estrela:

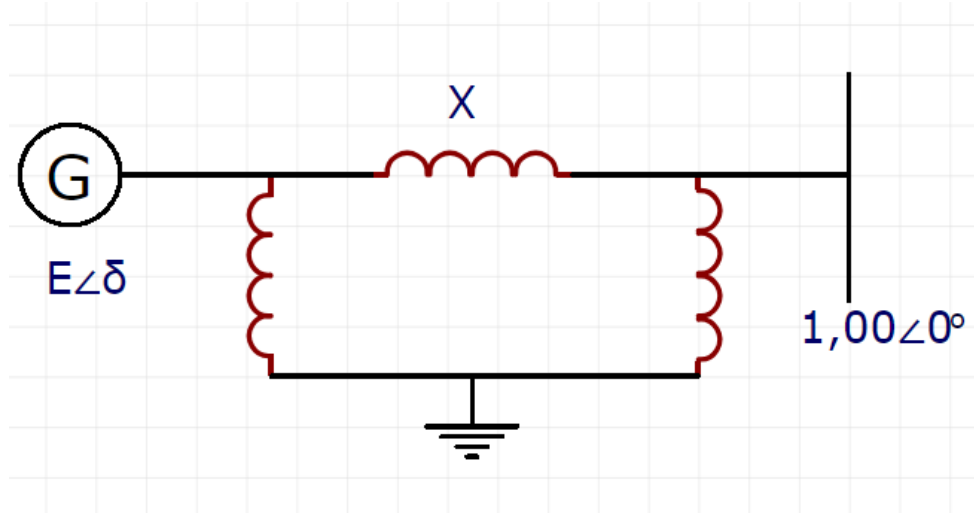
Figura 3.6 – Circuito equivalente em estrela visto da excitação do gerador até o barramento infinito durante a falta.



Fonte: Autoria própria.

Para facilitar o cálculo de P_{max} durante o curto-circuito pode-se fazer a transformação delta-estrela obtendo o circuito equivalente:

Figura 3.7 – Circuito equivalente em delta visto da excitação do gerador até o barramento infinito durante a falta.



Fonte: Autoria própria.

Logo, utilizando a transformação delta-estrela, temos:

$$X = \frac{(j0,30)(j0,10) + (j0,30)(j0,20) + (j0,20)(j0,10)}{j0,10} = j1,10 \text{ pu}$$

As demais reatâncias do equivalente delta não contribuem para a

transferência de potência ativa durante o curto-circuito e, portanto, não serão calculadas.

Assim, da equação (2.40), tem-se que o valor de P_{max} durante a falta será:

$$P_{max_d} = \frac{1,11 * 1,00}{1,10} = 1,009 pu$$

Após a falta, o circuito equivalente entre o gerador síncrono e o barramento infinito volta a ser igual ao modelo anterior a falta, por isso o valor de P_{max} será:

$$P_{max_a} = 2,22 pu$$

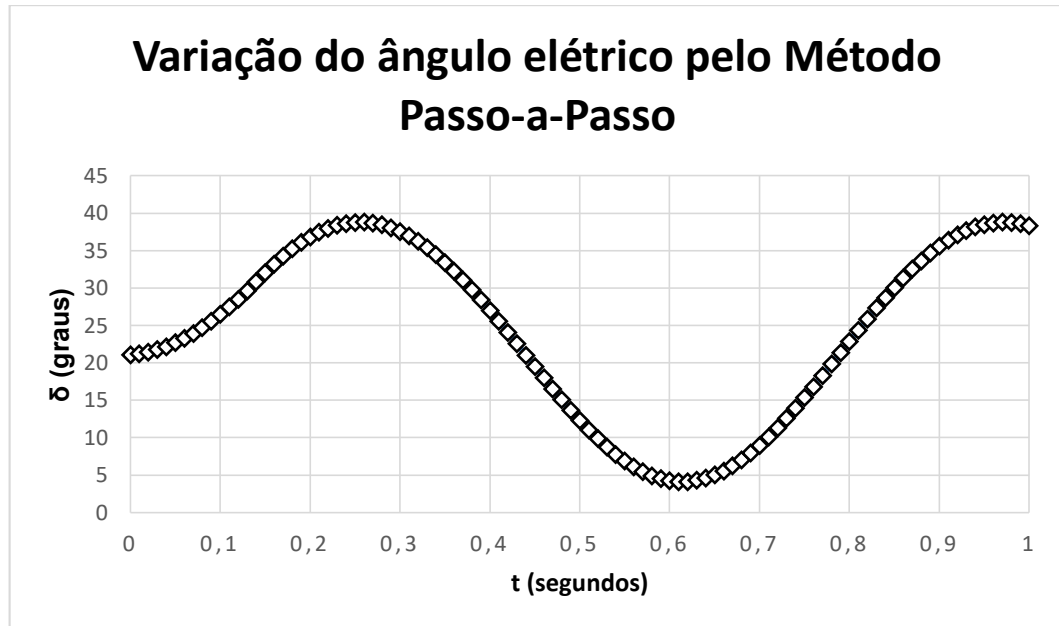
Da equação (2.23), e considerando um passo de integração (Δt) igual a 0,01 segundos, pode-se determinar a constante K:

$$K = \frac{180^{\circ}60}{5} (0,01)^2 = 0,216$$

Outra consideração que deve ser feita é que durante o instante de tempo igual a 0 segundo o valor da potência acelerante adotada será a média aritmética dessa potência imediatamente antes do curto-circuito e imediatamente depois da ocorrência da falta. Analogamente, para o tempo igual a 0,15 segundo a potência acelerante será a média aritmética dessa potência imediatamente antes da eliminação do distúrbio e imediatamente depois do término do curto-circuito. Essa ponderação faz com que o erro associado ao valor do ângulo elétrico se torne menor, uma vez que a variação deste não é instantânea.

Com as equações (2.1), (2.26), (2.27) e (2.40) pode-se construir o gráfico da figura 3.8:

Figura 3.8 – Variação do ângulo elétrico pelo Método Passo-a-Passo.



Fonte: Autoria própria

Analisando a figura 3.8, uma vez que houve mudança no sinal de $\frac{d\delta}{dt}$ pelo menos uma vez no intervalo de 1 segundo, pode-se concluir que, para a condição de curto-circuito apresentada e de acordo com o modelo clássico, o sistema é estável.

Uma outra forma de analisar a estabilidade é através do Critério de Igualdade de Áreas. Para isso, utilizaremos o cálculo do ângulo crítico para se determinar a estabilidade.

Com base na equação (2.39), tem-se:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} P_{a(pu)} d\delta = \int_{\delta_{max}}^{\delta_c} P_{a(pu)} d\delta$$

E como:

$$\delta_{max} = 180^\circ - 21,06^\circ = 158,94^\circ = 2,774 \text{ rad}$$

$$\delta_0 = 21,06^\circ = 0,368 \text{ rad}$$

Assim:

$$\int_{0,368}^{\delta_c} (0,8 - 1,009 \sin \delta) d\delta = \int_{2,774}^{\delta_c} (0,8 - 2,22 \sin \delta) d\delta$$

$$[0,8\delta]_{0,368}^{\delta_c} + [1,009 \cos \delta]_{0,368}^{\delta_c} = [0,8\delta]_{2,774}^{\delta_c} + [2,22 \cos \delta]_{2,774}^{\delta_c}$$

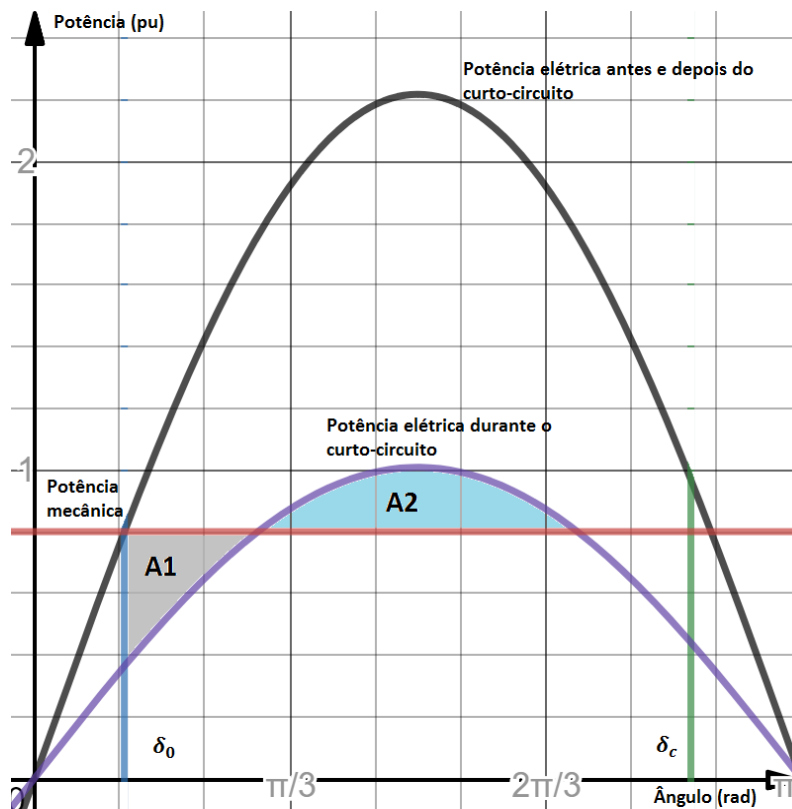
$$\begin{aligned} 0,8(\delta_c - 0,368) + 1,009(\cos \delta_c - \cos 0,368) \\ = 0,8(\delta_c - 2,774) + 2,22(\cos \delta_c - \cos 2,774) \end{aligned}$$

$$1,211 \cos \delta_c = -1,088$$

$$\delta_c = \cos^{-1} \frac{-1,088}{1,211} = 2,687 \text{ rad} = 153,95^\circ$$

Com esses valores pode-se construir o gráfico da figura 3.8:

Figura 3.9 – Análise de estabilidade pelo Critério das Áreas Iguais.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar-se a figura 3.9 pode-se inferir que a área A2 é maior que a área A1, uma vez que o ângulo crítico se localiza após a A2. Portanto, pode-se concluir que o sistema é estável.

4. ANÁLISE COMPUTACIONAL DA ESTABILIDADE DO SISTEMA

Para se obter uma resposta mais rápida e confiável a respeito do estudo de estabilidade é necessário realizar simulações computacionais para então poder-se interpretar os resultados obtidos. Dessa forma, nesse trabalho foram realizadas análises computacionais com três programas (ANATEM, PSP-UFU e TRANSUFU) em três condições. Na primeira etapa considerou-se uma máquina síncrona de polos lisos conectada a um barramento infinito, na segunda, uma máquina de polos salientes conectada ao mesmo barramento infinito e por último acrescentou-se um regulador automático de tensão na máquina de polos salientes.

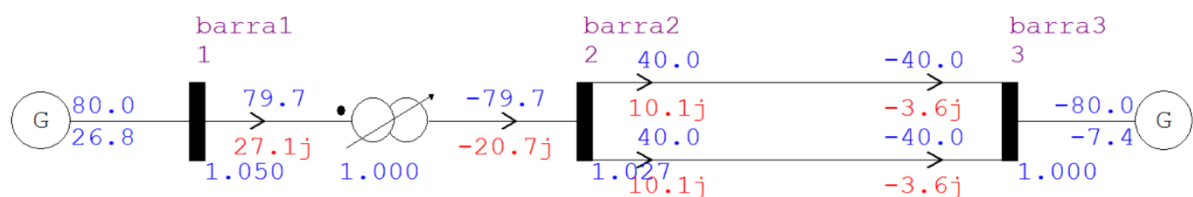
4.1 PRIMEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES

O sistema elétrico e a os parâmetros da máquina síncrona utilizados nessa etapa de simulações foram idênticos ao que foi exposto na figura 3.1, o que permite uma comparação com os resultados computacionais com o teórico.

4.1.1 AS SIMULAÇÕES COM O ANATEM

Antes de realizar qualquer estudo de estabilidade no *software* ANATEM, é necessário modelar-se o sistema elétrico no programa ANAREDE e obter-se a análise de fluxo de potência para encontrar-se os valores iniciais (antes da falta). Com isso, utilizando o ANAREDE, modela-se o sistema elétrico, conforme a figura 4.1:

Figura 4.1 – Sistema Elétrico de Potência modelado no ANAREDE.



Fonte: Autoria própria.

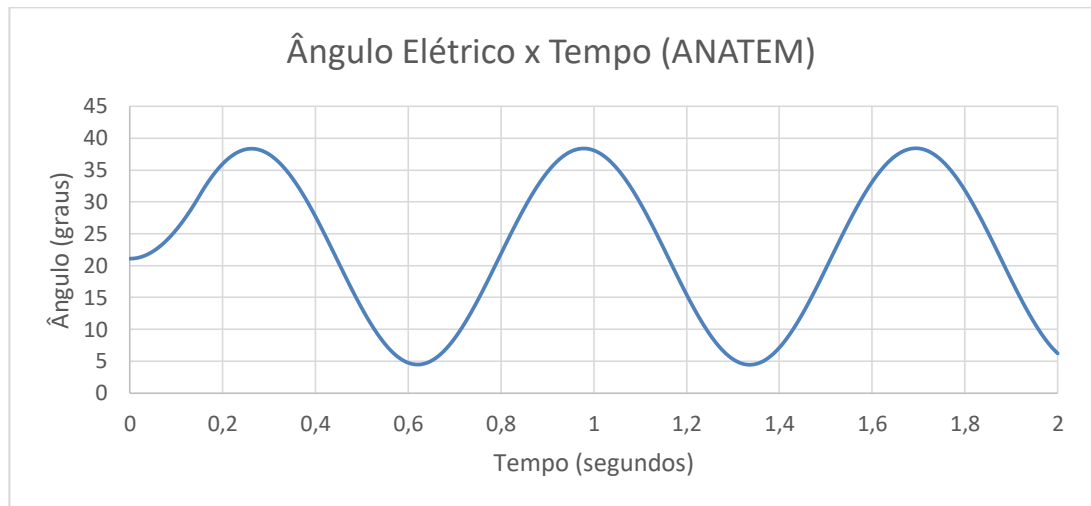
Na figura 4.1, pode-se observar o fluxo de potência considerando uma base de 100 MVA e que o barramento infinito foi representado por uma barra (barra 3) conectada a um gerador. Como apresentado anteriormente, para que o gerador síncrono conectado a barra 3 possa ser equivalente a um barramento infinito é necessário que a sua constante de inércia seja infinita (valor muito alto) e que a sua

reatância de eixo direto possui valor igual a zero. Essa condição será imposta no *software* ANATEM.

No programa ANATEM, utilizou-se tanto para o barramento infinito quanto para o Gerador 1 o modelo predefinido, Modelo 01 (MD01) (CEPEL, 2015).

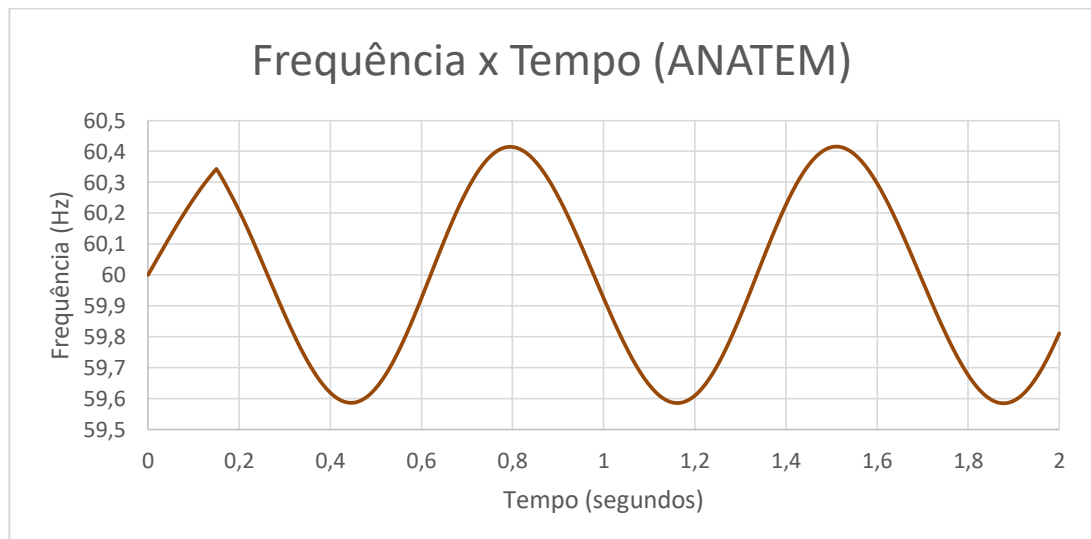
Os resultados obtidos da simulação no *software* ANATEM são apresentados a seguir:

Figura 4.2 – Oscilação do ângulo elétrico para a primeira etapa modelado no ANATEM.



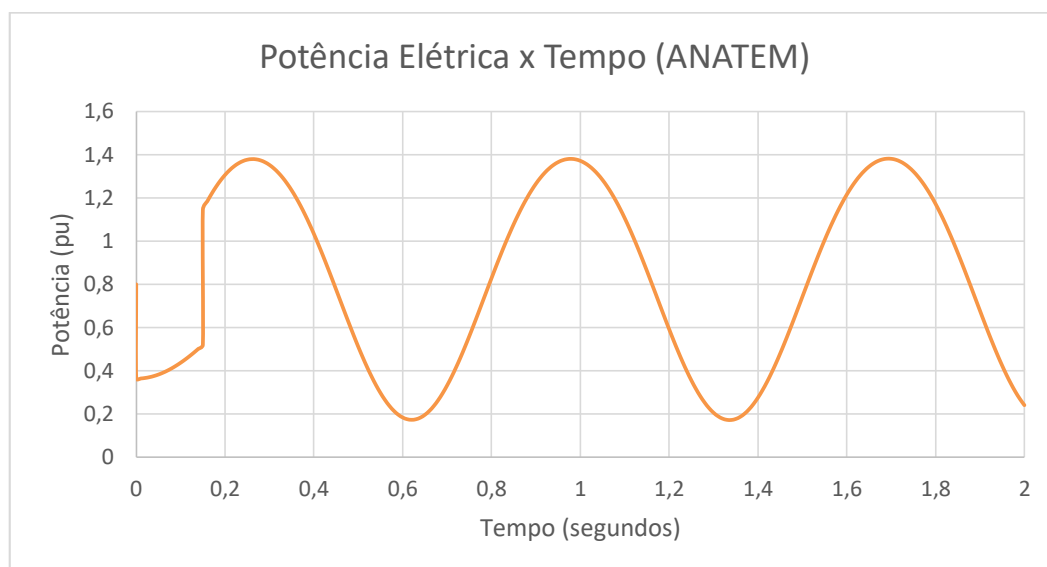
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.3 – Oscilação da frequência para a primeira etapa modelado no ANATEM.



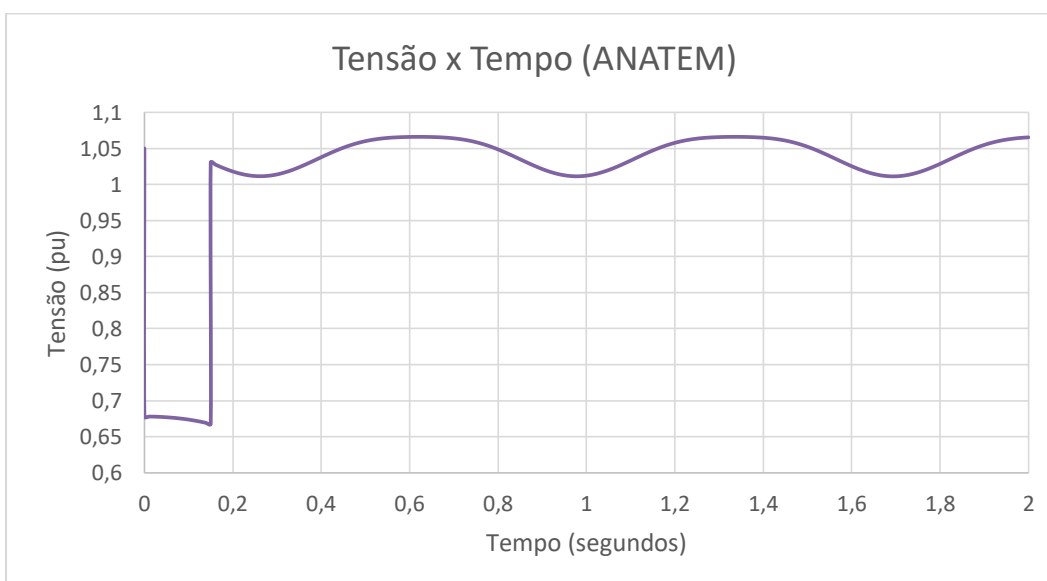
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.4 – Oscilação da potência elétrica para a primeira etapa modelado no ANATEM.



Fonte: Autoria própria

Figura 4.5 – Oscilação da tensão para a primeira etapa modelado no ANATEM.



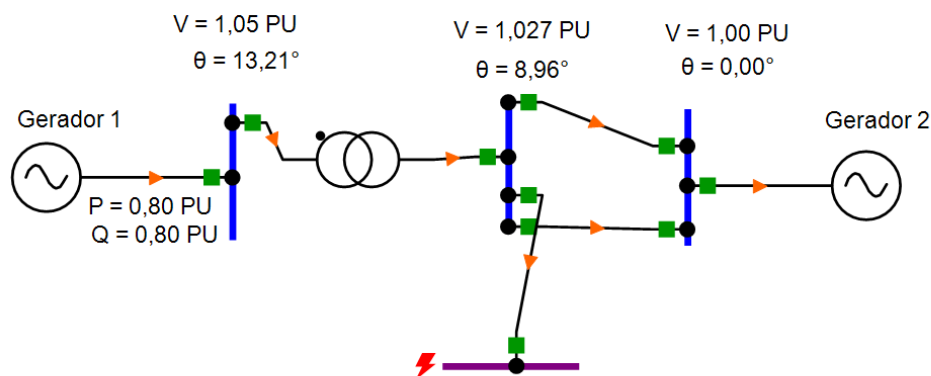
Fonte: Autoria própria.

4.1.2 AS SIMULAÇÕES COM O TRANSUFU

Assim como no ANATEM, deve se modelar um sistema elétrico e testar a convergência do fluxo de potência antes da perturbação para depois fazer a análise de estabilidade no TRANSUFU. Essa modelagem foi utilizada no PSP-UFU, sendo que o PSP-UFU irá automaticamente gerar os cartões de entrada do TRANSUFU com

o diagrama unifilar criado, e então será executado o TRANSUFU. O diagrama unifilar citado encontra-se na figura 4.5:

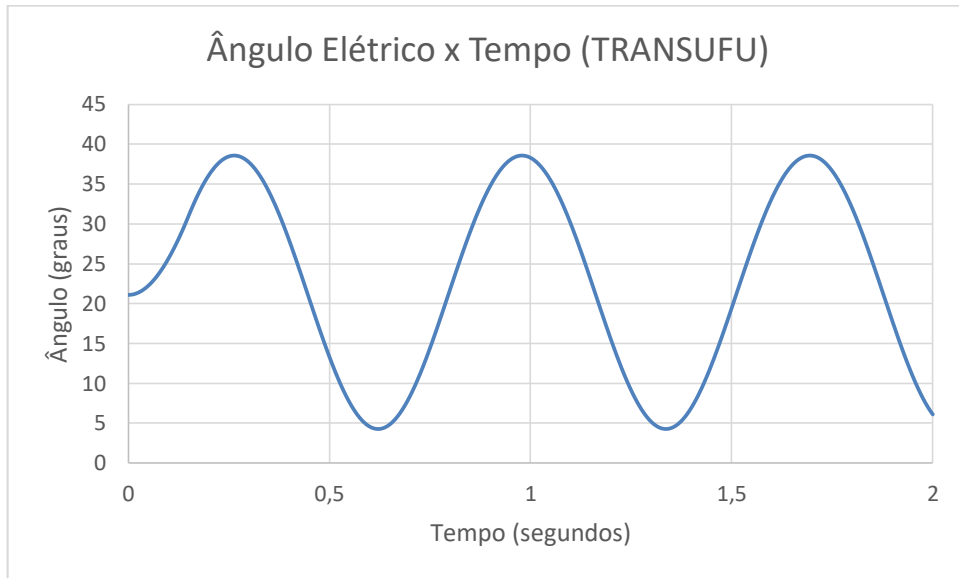
Figura 4.6 – Representação do sistema elétrico de potência no PSP-UFU para gerar os resultados do TRANSUFU.



Fonte: Autoria própria

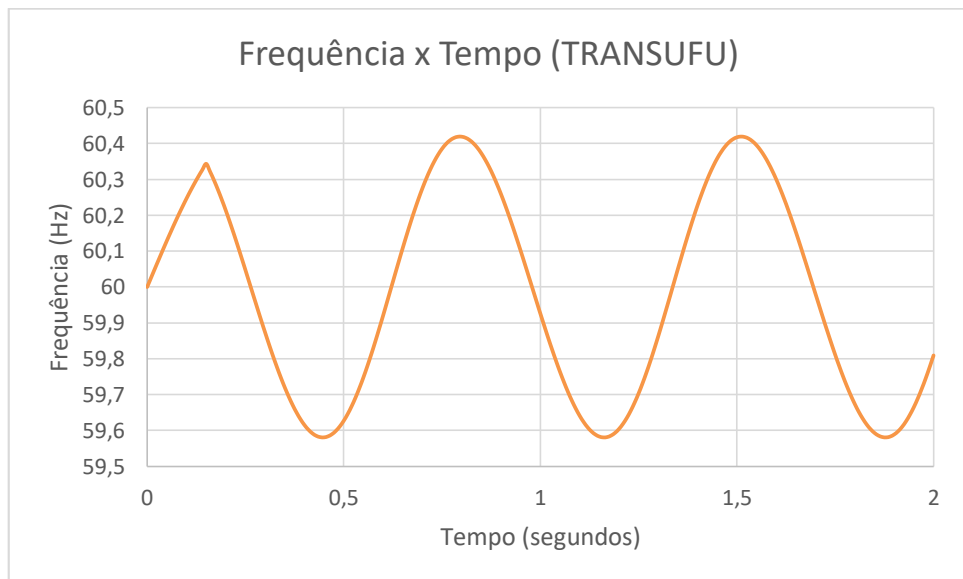
Na figura 4.6 podemos notar que o Gerador 1 apresenta os mesmos parâmetros definidos anteriormente para a máquina síncrona em estudo, enquanto que o Gerador 2 serve para representar o barramento infinito. Os resultados da simulação do TRANSUFU são apresentados a seguir:

Figura 4.7 – Oscilação do ângulo elétrico para a primeira etapa modelado no TRANSUFU.



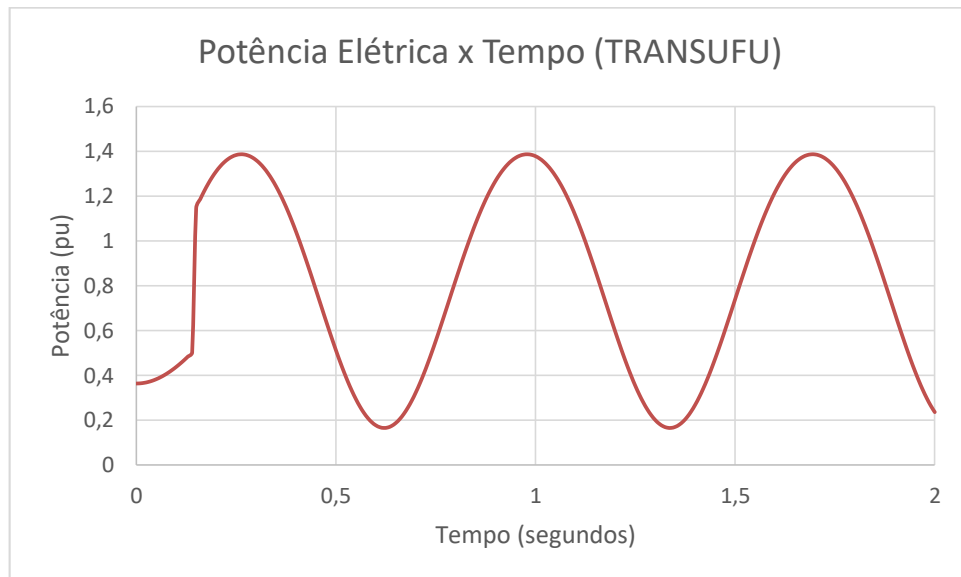
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.8 – Oscilação da frequência para a primeira etapa modelado no TRANSUFU.



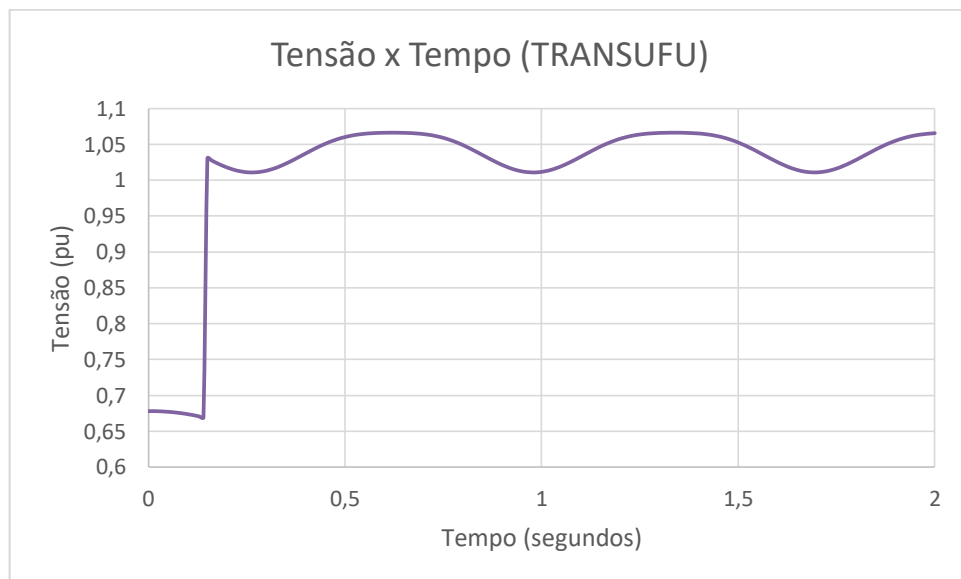
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.9 – Oscilação da potência elétrica para a primeira etapa modelado no TRANSUFU.



Fonte: Autoria própria

Figura 4.10 – Oscilação da tensão para a primeira etapa modelado no TRANSUFU.

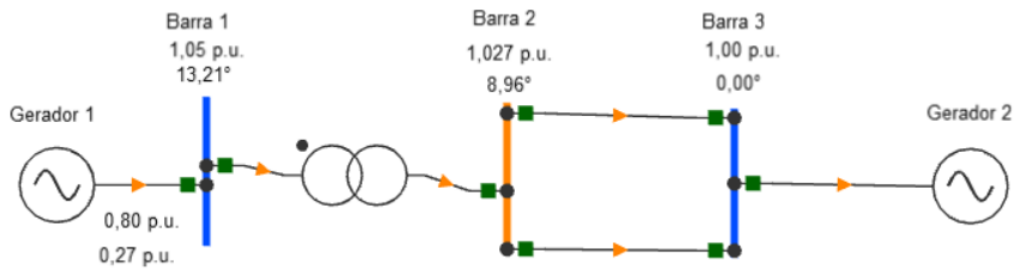


Fonte: Autoria própria.

4.1.3 AS SIMULAÇÕES COM O PSP-UFU

O diagrama unifilar utilizado nesse programa para representar o Sistema Elétrico de Potência adotado é representado na figura:

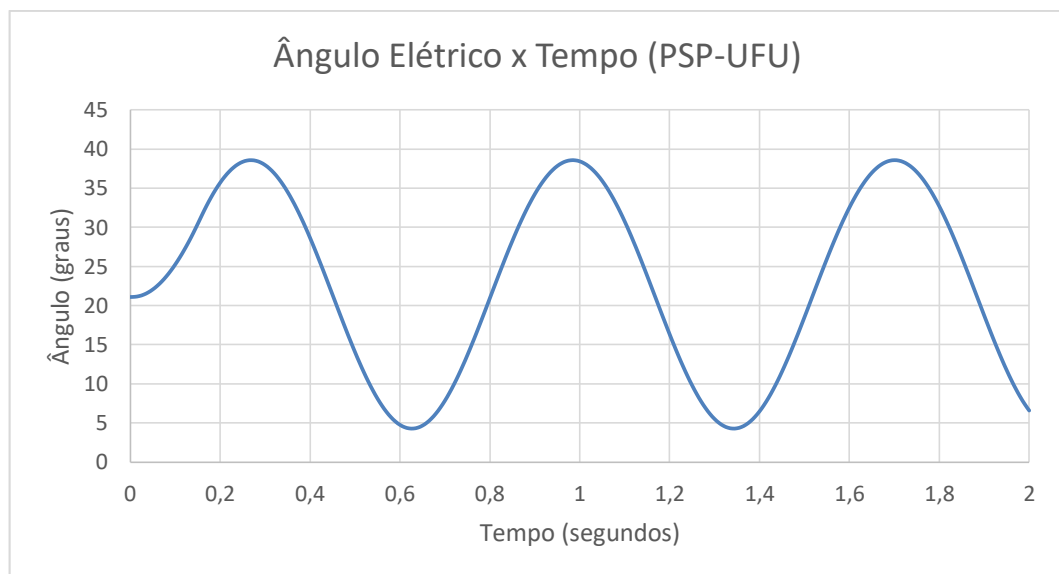
Figura 4.11 – Sistema Elétrico de Potência modelado no PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

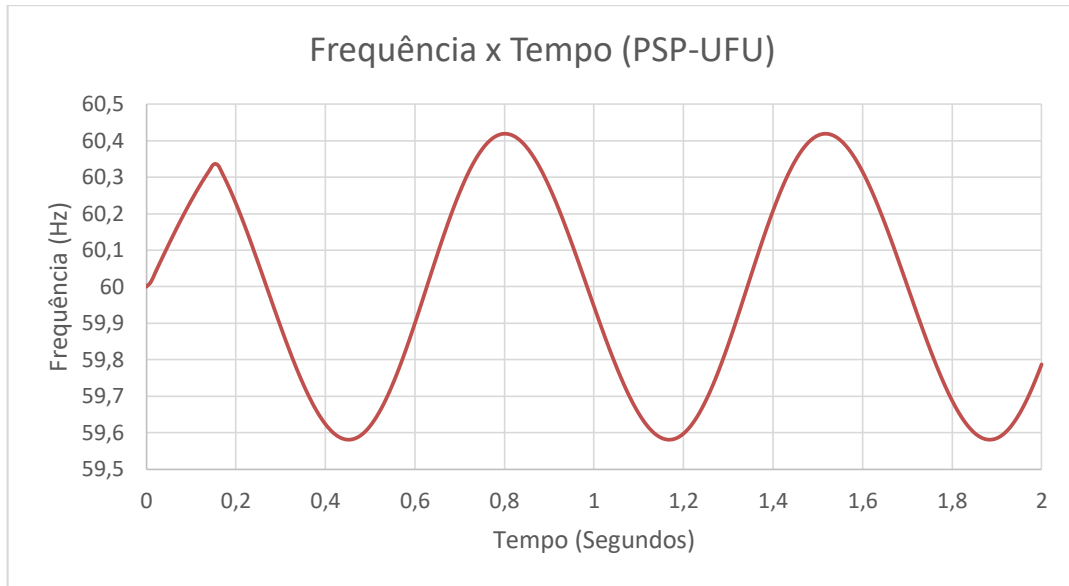
Novamente, na figura 4.11 podemos notar que o Gerador 1 é a máquina em estudo, enquanto que o Gerador 2 é responsável por representar o barramento infinito. As soluções da simulação são apresentadas a seguir:

Figura 4.12 – Oscilação do ângulo elétrico para a primeira etapa modelado no PSP-UFU.



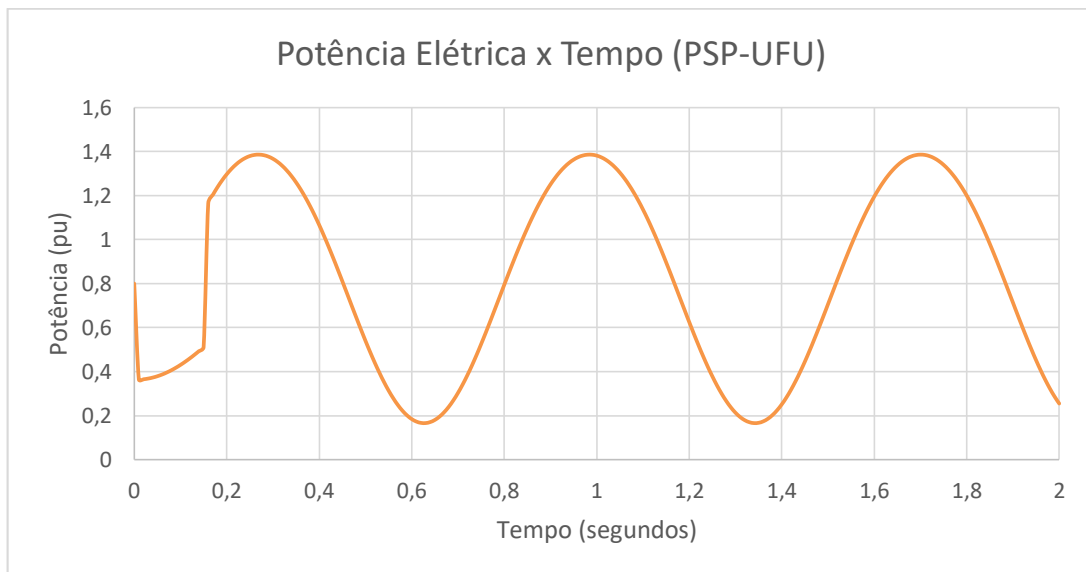
Fonte: Autoria própria

Figura 4.13 – Oscilação da frequência para a primeira etapa modelado no PSP-UFU.



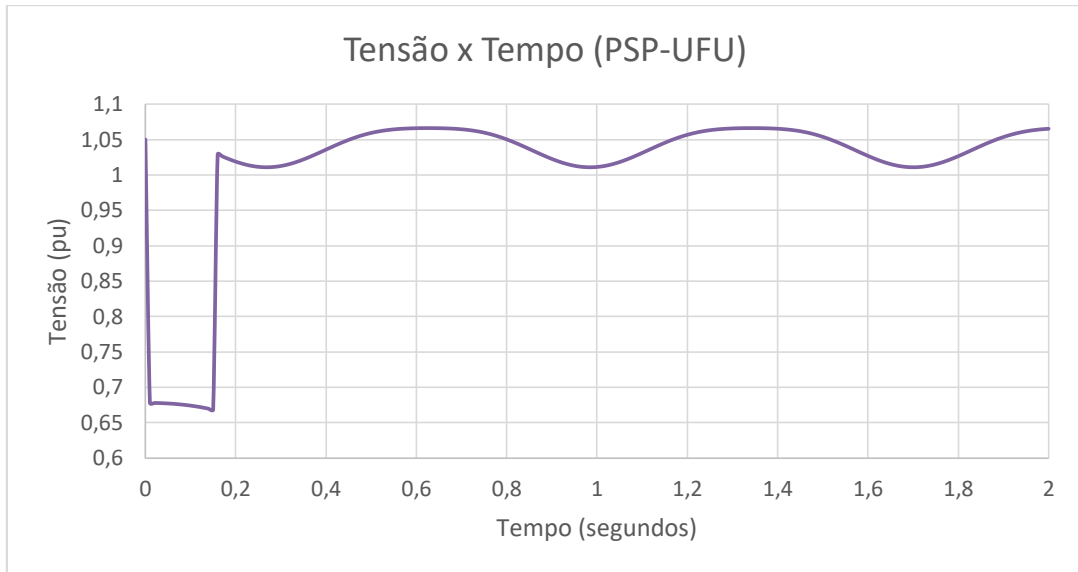
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.14 – Oscilação da potência elétrica para a primeira etapa modelado no PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.15 – Oscilação da tensão para a primeira etapa modelado no PSP-UFU.

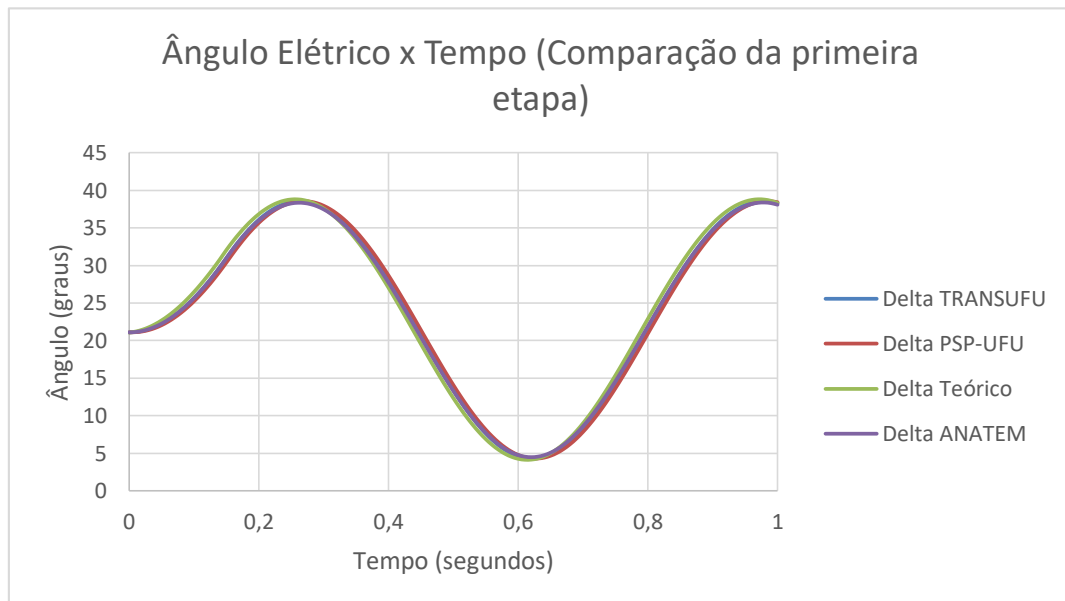


Fonte: Autoria própria

4.1.4 AS COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS

Unificando os gráficos obtidos das oscilações do ângulo elétrico das simulações com o teórico da figura 3.8, construiu-se o gráfico:

Figura 4.16 – Comparação da oscilação do ângulo elétrico para a primeira etapa.



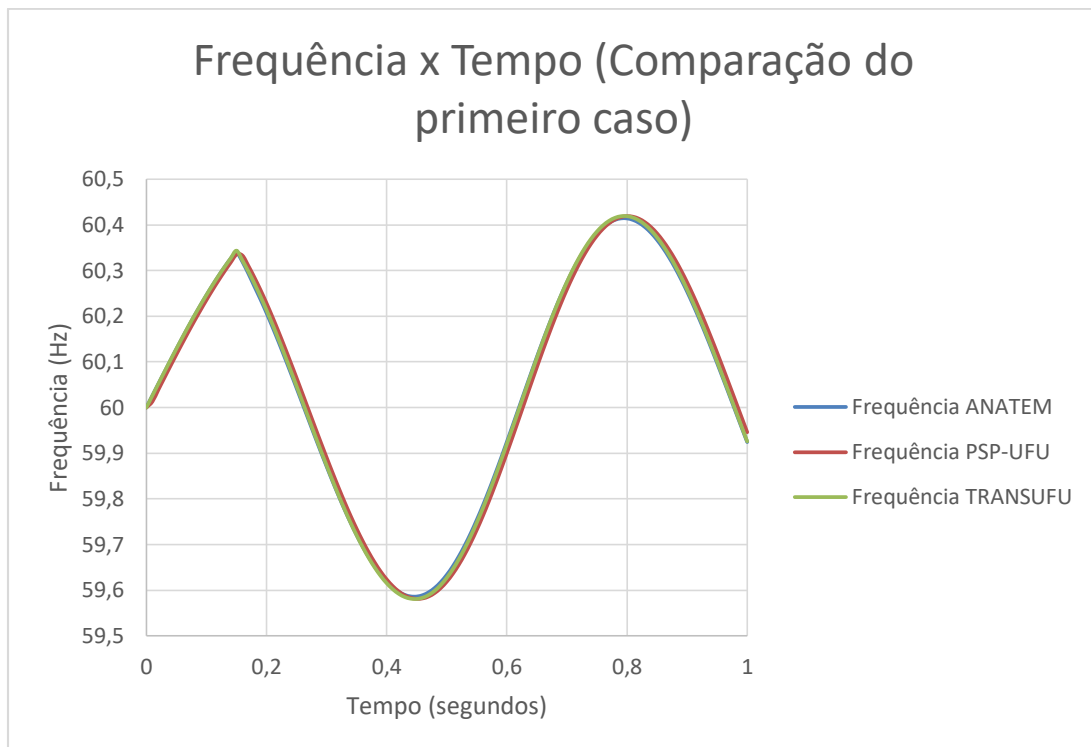
Fonte: Autoria própria.

Na figura 4.16 pode-se observar que as oscilações do ângulo elétrico dos três programas, assim como o valor teórico calculado, obtiveram valores muito próximos,

sendo que o maior erro percentual obtido nas curvas em relação ao ANATEM foi do valor teórico (11,6%), seguido do PSP-UFU (9,2%) e do TRANSUFU (4,5%) . Tomando-se como a referência o ANATEM pode-se constatar a proximidade dos programas utilizados e a confiabilidade do *software* PSP-UFU para essa simulação.

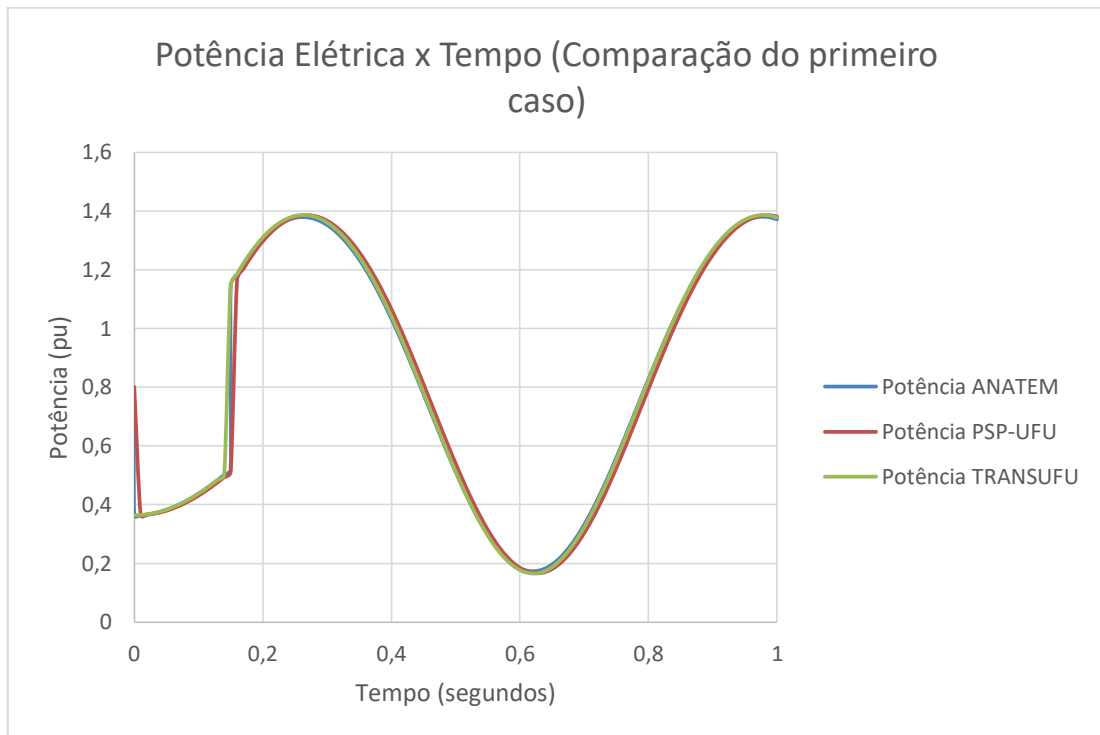
Para se comparar a frequência, a potência ativa e a tensão nos terminais do gerador devido a ocorrência da perturbação, elaborou-se os gráficos por meio dos resultados das simulações dos três programas:

Figura 4.17 – Comparação da oscilação da frequência para a primeira etapa.



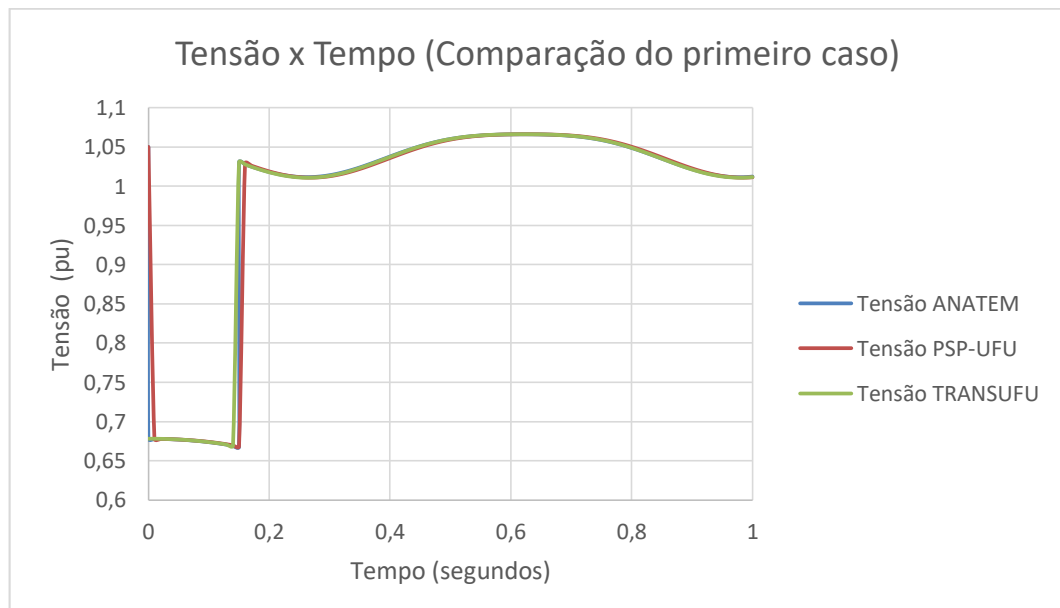
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.18 – Comparação da oscilação da potência elétrica para a primeira etapa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.19 – Comparação da oscilação da tensão para a primeira etapa.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisarmos os gráficos das figuras 4.17, 4.18 e 4.19 conseguimos notar que as curvas de oscilação de frequência, de tensão e de potência ativa possuem

valores muito próximos para os resultados dos três programas.

Para a figura 4.17, o maior erro percentual encontrado no TRANSUFU e no PSP-UFU foi de 0,3% em relação ao ANATEM. Na figura 4.18 esse erro foi de 9,1% para o PSP-UFU e de 4,6 % para o TRANSUFU. Quanto a figura 4.19, o maior erro percentual encontrado foi de 0,2 % para o PSP-UFU e de 0,1% para o TRANSUFU.

Essa comparação quantitativa consegue comprovar mais uma vez a similaridade do PSP-UFU com os outros dois programas em estudo.

4.2 A SEGUNDA ETAPA DE SIMULAÇÕES

Na segunda etapa de simulações, utilizou-se o mesmo sistema elétrico de potência anterior, entretanto substituiu-se o Gerador 1 de polos lisos por um gerador de polos salientes e diminuiu-se o passo de integração para 0,001 segundo. Os dados do gerador de polos salientes são apresentados na tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Parâmetros elétricos adotados para o Gerador 1 na segunda etapa.

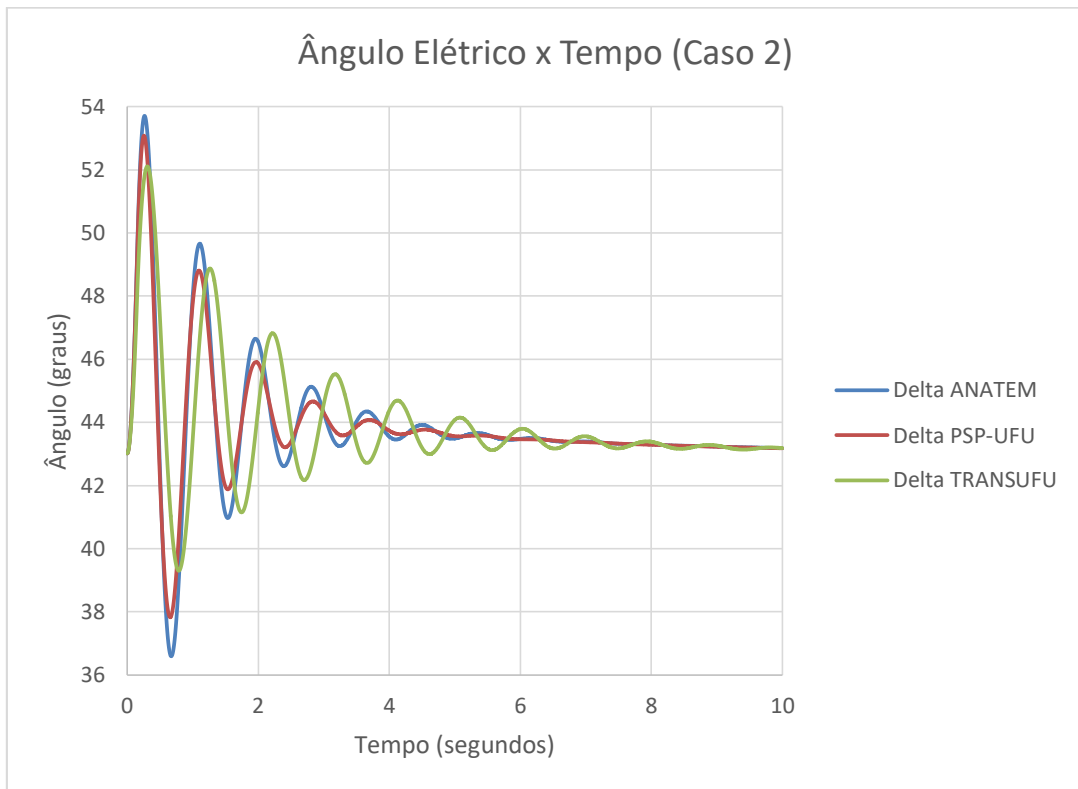
Parâmetros	Valor adotado
X_d (pu)	1,05
X_q (pu)	0,98
X_d' (pu)	0,185
X_q' (pu)	0,36
X_d'' (pu)	0,13
R_a (pu)	0,0031
T_d' (s)	6,1
T_q' (s)	0,3
T_d'' (s)	0,04
T_q'' (s)	0,099
H (s)	6,54

Fonte: Autoria própria.

Com os valores adotados da tabela 4.1, bastou-se alterar os parâmetros no TRANSUFU e no PSP-UFU. Já no ANATEM, tanto os parâmetros quanto o modelo de máquina tiveram que ser alterados. Sendo que no ANATEM mudou-se o Modelo 01 (MD01) para o Modelo 03 (MD03) (CEPEL, 2015).

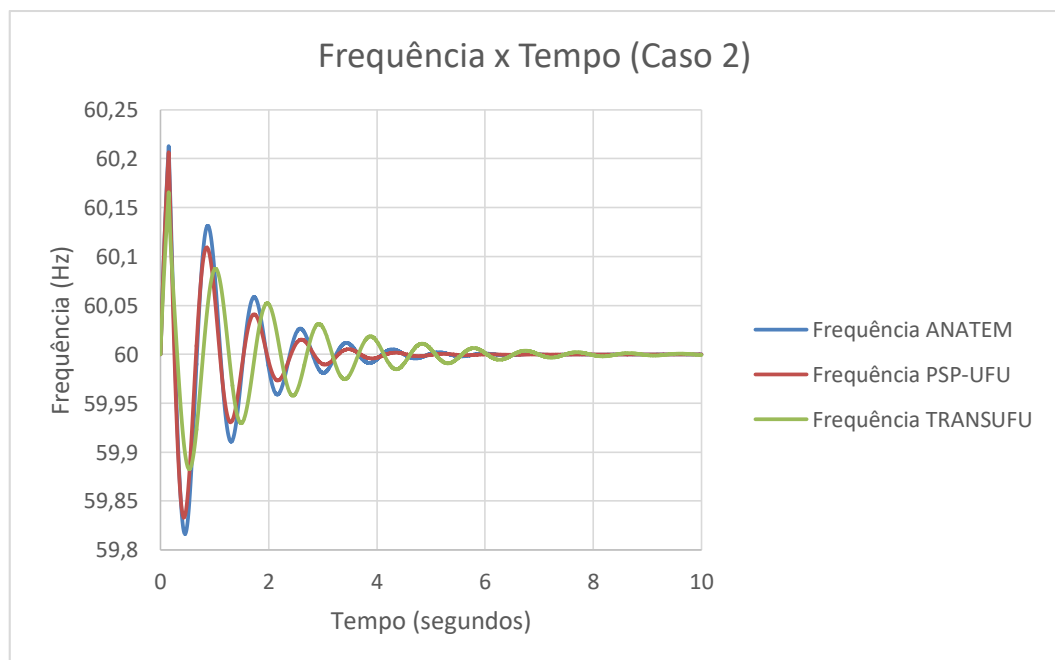
Processadas as simulações os resultados combinados são apresentados nas figuras de 4.20 a 4.23:

Figura 4.20– Comparação da oscilação do ângulo elétrico para a primeira etapa.



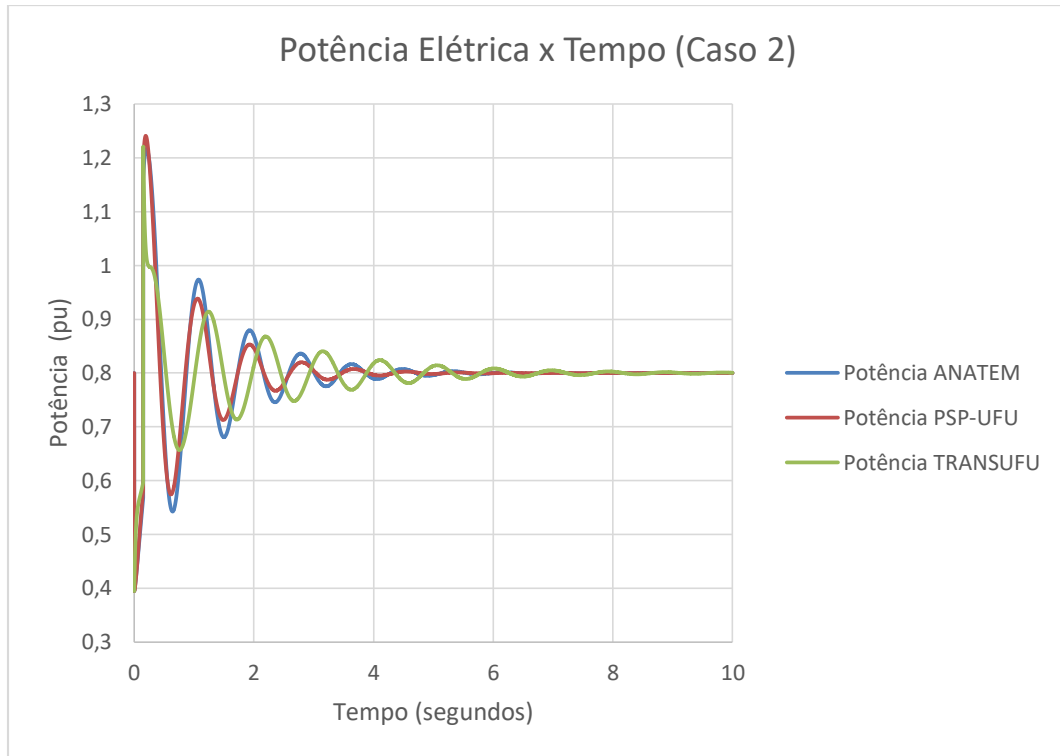
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.21 – Comparação da oscilação da frequência para a segunda etapa.



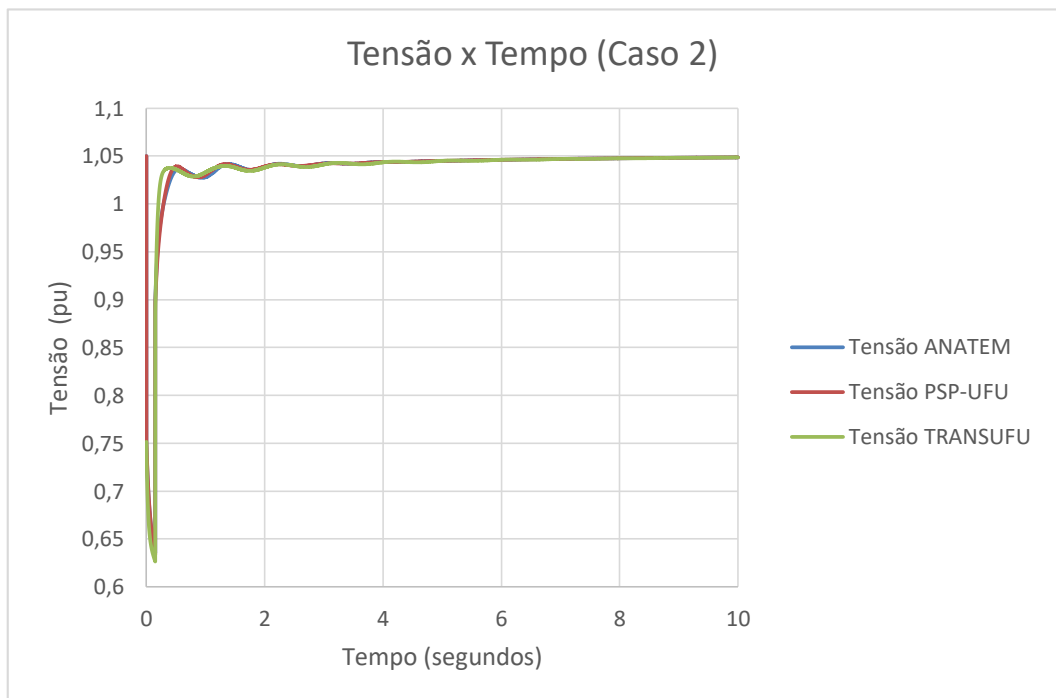
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.22 – Comparação da oscilação da potência elétrica para a segunda etapa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.23 – Comparação da oscilação da tensão para a segunda etapa.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados quantitativos para a figura 4.20, mostraram que o maior erro percentual do PSP-UFU em relação ao ANATEM foi de 4,0%, enquanto que para o TRANSUFU esse erro foi de 14,6%. Na figura 4.21, esse erro foi de 0,05% para o PSP-UFU e 0,2% para o TRANSUFU. Para a figura 4.22, os maiores erros encontrados foram de 8,7% e 31,3% para o PSP-UFU e para o TRANSUFU, respectivamente.

Assim, ao analisarmos as figuras 4.20, 4.21 e 4.22 e os dados quantitativos apresentados pode-se notar que os resultados do PSP-UFU e do ANATEM foram próximos, embora os amortecimentos das curvas no PSP-UFU foram um pouco maiores do que as do ANATEM. Nesses mesmos gráficos, as respostas do programa TRANSUFU divergiram um pouco das demais, apesar de que as três tenham atingido a estabilidade.

Na figura 4.23 o maior erro percentual do PSP-UFU em relação ao ANATEM foi de 0,7%, enquanto que para o TRANSUFU esse erro foi de 4,3%. Logo, com base nesses resultados e a com o auxílio de uma análise visual, pode-se inferir que a variação de tensão nos terminais do Gerador 1 dos três programas foram similares, entretanto os valores do PSP-UFU e do ANATEM foram mais parecidos.

4.3 A TERCEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES

A terceira etapa de simulações consistiu do mesmo sistema elétrico de potência, dos mesmos parâmetros do Gerador 1 da segunda etapa e o mesmo passo de integração. Todavia, nessa etapa acrescentou-se a presença do regulador automático de tensão (AVR).

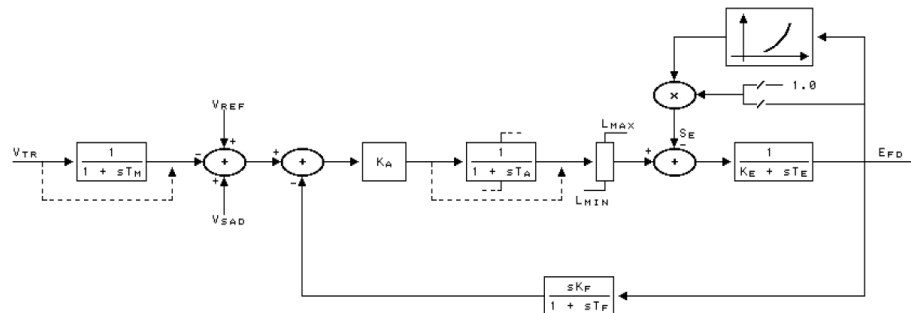
Para essas simulações comparou-se apenas os resultados dos programas do PSP-UFU com os do ANATEM. O motivo por não se ter utilizado o TRANSUFU nessa etapa é devido a incompatibilidade dos modelos de regulador de tensão presentes no ANATEM com os do TRANSUFU.

O modelo de AVR adotado na simulação do ANATEM é o Modelo 01 (MD01), o qual controle é representado na figura:

Figura 4.24 – Comparação da oscilação da tensão para a segunda etapa.

4.Formatos dos Dados de Modelos Predefinidos de Regulador de Tensão e Excitatriz de Máquina Síncrona

4.1.Formatos dos Dados do Modelo 01 Predefinido de Regulador de Tensão (opção *MD01* ativada).



Fonte: (CEPEL, 2015).

Os valores utilizados na figura 4.23 são apresentados na tabela 4.2:

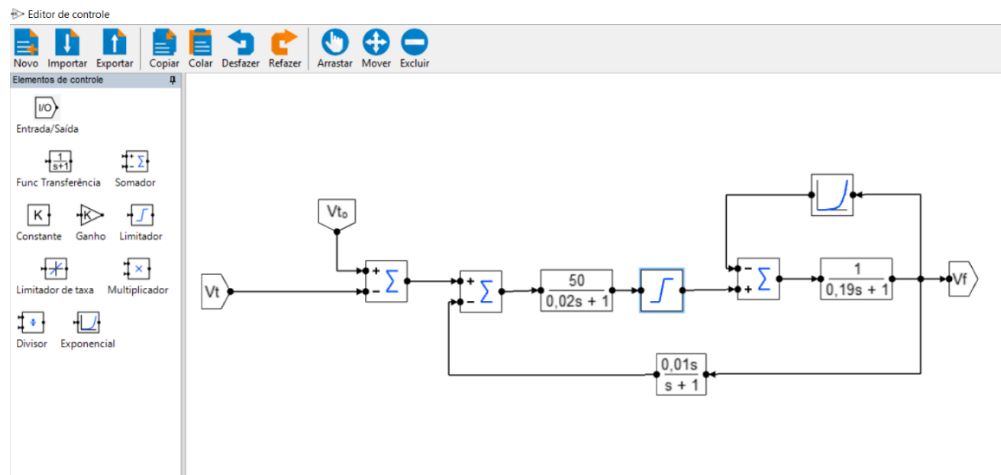
Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados para o controle do AVR.

Parâmetros do AVR	Valores
K _a	50
K _e	1
K _f	0,01
T _m	0
T _a	0,02
T _e	0,19
T _f	1
L _{min}	0
L _{max}	3

Fonte: (CEPEL, 2015).

Ao contrário do TRANSUFU e do ANATEM, o PSP-UFU permite modelar os controles tanto do regulador de tensão quanto o de velocidade conforme o usuário desejar. Assim, construiu-se um controle do AVR no PSP-UFU conforme o Modelo 01 do ANATEM. O controle modelado no PSP-UFU pode ser visto na figura:

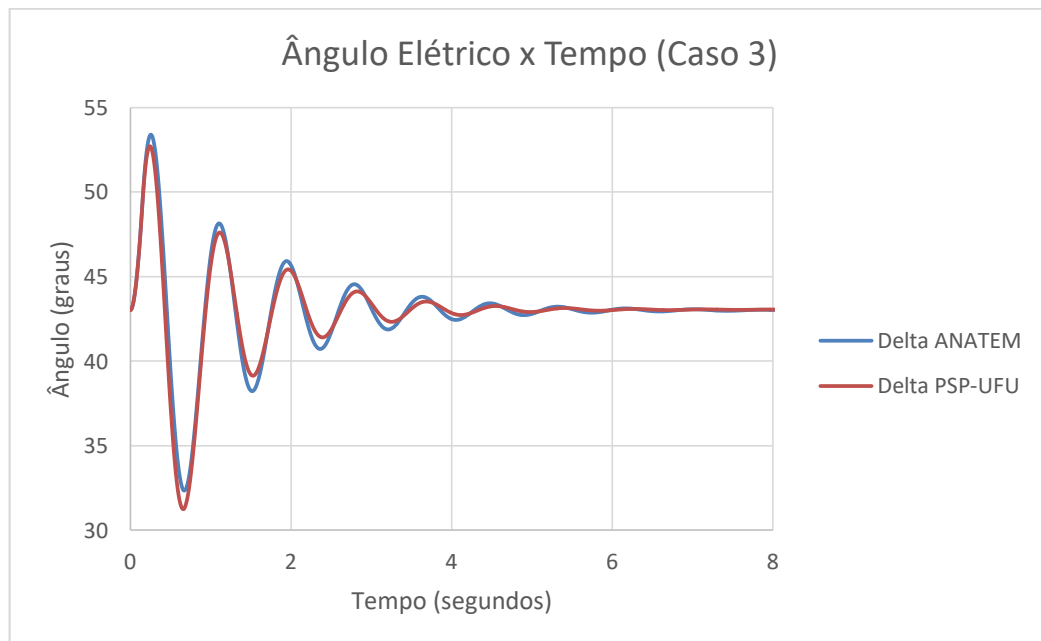
Figura 4.25 – Diagrama do controle utilizado no AVR na terceira etapa de simulações com PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

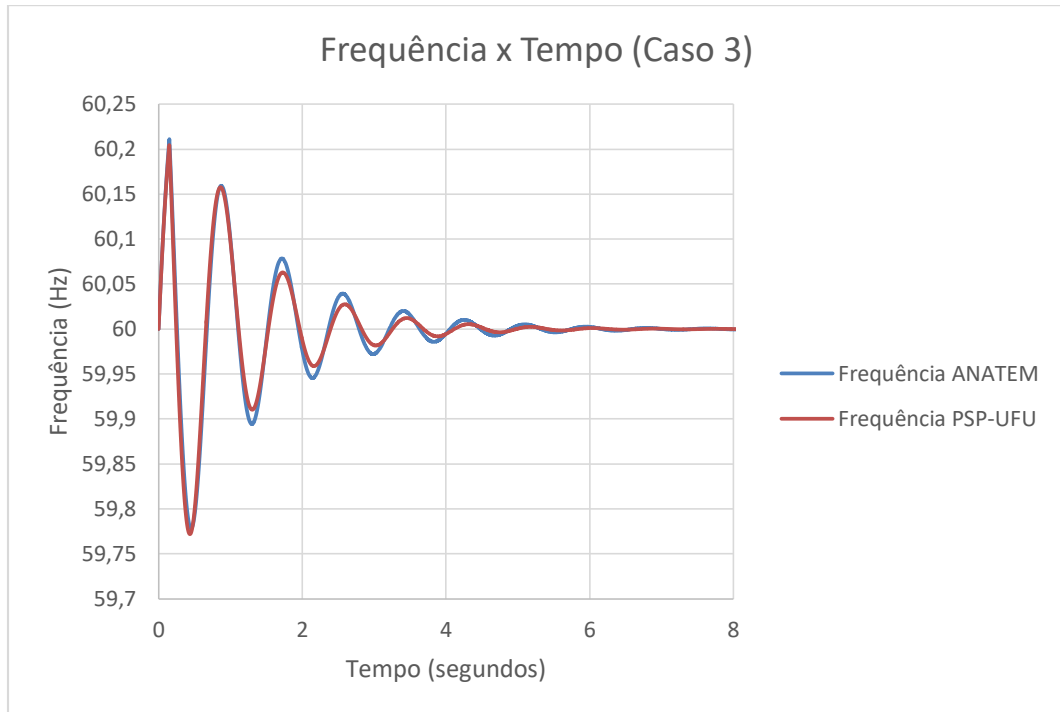
Finalmente, após realizar as simulações obtiveram-se os gráficos:

Figura 4.26 – Comparação da oscilação do ângulo elétrico para a terceira etapa.



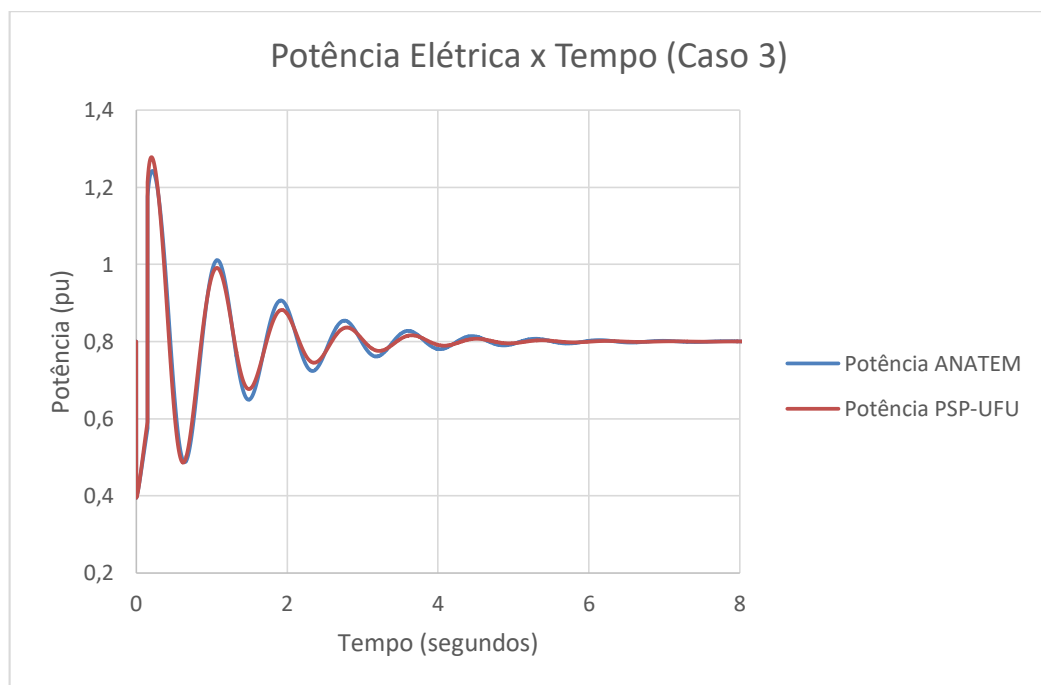
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.27 – Comparação da oscilação da frequência para a terceira etapa.



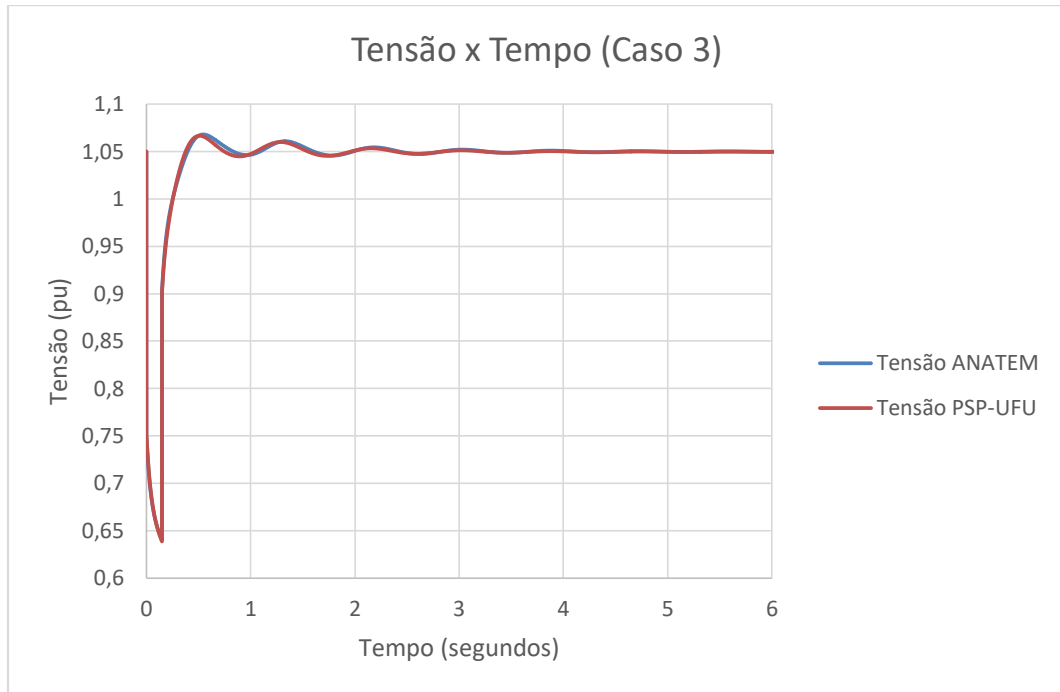
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.28 – Comparação da oscilação da potência elétrica para a terceira etapa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.29 – Comparação da oscilação da tensão para a terceira etapa.



Fonte: Autoria própria.

Analisando quantitativamente as figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29, pode-se constatar que os maiores erros percentuais do *software* PSP-UFU em relação ao ANATEM foram de 5,3%, 0,04%, 6,6% e 0,56% para as figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29, respectivamente

Assim, com base nos gráficos das figuras 4.26, 4.27 e 4.28 e os valores quantitativos encontrados nota-se que os resultados do PSP-UFU foram próximos do ANATEM, entretanto novamente as curvas do PSP-UFU apresentaram um amortecimento maior, atingindo a estabilidade um pouco antes das curvas do ANATEM.

Ao analisar a figura 4.29, percebe-se que ambas as respostas do PSP-UFU e do ANATEM foram praticamente idênticas, mostrando que o modelo de controle do AVR construído no PSP-UFU conseguiu ser o mesmo do ANATEM.

Se comparar-se as respostas das curvas de oscilação do ângulo elétrico, da frequência e da potência elétrica do terceiro caso com a do segundo caso pode-se perceber que não houve uma mudança significativa nos comportamentos da curva. Entretanto, ao compararmos as curvas de oscilação de tensão do segundo caso com a do terceiro caso pode-se notar que a última atingiu a estabilidade mais rápido, mostrando assim a vantagem de ter se utilizado o AVR.

5. CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho foi demonstrar a confiabilidade do programa PSP-UFU perante ao curto-circuito trifásico para análise dinâmica. Inicialmente introduziu-se os conceitos básicos que envolve estabilidade, estabilidade transitória e algumas equações eletromecânicas que descrevem o comportamento de uma máquina síncrona perante uma perturbação. Posteriormente, através do Método Passo-a-Passo e do Critério das Áreas Iguais pôde-se determinar a estabilidade do sistema para o curto-circuito trifásico proposto. Finalmente, após os resultados teóricos fez-se análises computacionais com três programas distintos para três condições diferentes.

Na primeira etapa considerou-se o mesmo sistema elétrico de potência, o mesmo gerador síncrono e o mesmo passo de integração dos cálculos teóricos. Assim, conseguiu-se comparar a oscilação do ângulo de torque para os três softwares utilizados e a curva teórica calculada. Tanto nesse gráfico, quanto os de oscilação da frequência, potência elétrica e tensão, as curvas foram praticamente idênticas, comprovando a precisão do *software* PSP-UFU para o primeiro caso.

Na segunda etapa, substituiu-se o gerador de polos lisos utilizado na primeira etapa por um de polos salientes. Dessa vez, considerou-se um maior número de parâmetros dessa máquina e diminuiu-se o passo de integração. Os resultados do PSP-UFU se apresentaram próximos do ANATEM, embora os amortecimentos das curvas do PSP-UFU ocorreram um pouco mais rápido do que os do ANATEM. O TRANSUFU apresentou uma diferença maior dos outros dois softwares, provavelmente isso ocorreu devido a divergências nas modelagens da máquina síncrona dos outros dois programas.

Na terceira etapa, acrescentou-se o regulador automático de tensão (AVR) ao gerador em estudo. Devido a divergência dos modelos de regulador de tensão do TRANSUFU com o do ANATEM, utilizou-se para comparação apenas o software PSP-UFU e o ANATEM. Para esse caso, as respostas do PSP-UFU se tornaram um pouco mais próximas do ANATEM do que no caso anterior. Isso provavelmente ocorreu devido ao fato que a modelagem do regulador de tensão do PSP-UFU conseguiu ser bem condizente com o modelo de AVR adotado no ANATEM.

Portanto, concluiu-se que os resultados das três simulações que envolveram o programa PSP-UFU mostraram-se em todos os casos uma significativa afinidade com as respostas do ANATEM, comprovando a confiabilidade do *software* para os

casos expostos.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A., **Power system control and stability**. United States of America: IEEE Power Engineering Society, 2ª edição, 2003.
- [2] BARBOSA, F. M. **Estabilidade de sistemas elétricos de energia**. 2013. Disponível em:
<<https://paginas.fe.up.pt/~fmb/Textos/EstabilidadeSEE2013.pdf>>. Acesso em: jul. 2018.
- [3] BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. **Estabilidade Transitória em Sistemas Eletroenergéticos**. São Carlos - SP: EESC/USP, 2000.
- [4] CEPEL. **Programa ANATEM: Análise de Transitórios Eletromecânicos – Manual do Usuário**. Rio de Janeiro, 2015.
- [5] GUIMARÃES, Geraldo Caixeta. **Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- [6] GUIMARÃES, Geraldo Caixeta; OLIVEIRA, José Carlos de. **Máquinas Síncronas e Estabilidade**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- [7] KUNDUR, P. **Power System Stability and Control** . 2. ed. United States Of America: McGraw-Hill, 2003. 1176 p.
- [8] KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSON, G.; BOSE, A.; CANIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; VAN CUTSEM, T.; VITTAL, V. **Definition and classification of power system stability**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, 2004.

[9] OLIVEIRA, T. L. **Desenvolvimento de uma plataforma computacional gráfica e de código aberto para estudos de sistemas de potência** . 2016. 177 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

[10] SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica** : Fundamentos e prática. São Paulo: Elsevier, 2015. 456 p.

7. ANEXOS

7.1 ARQUIVOS DE SIMULAÇÃO DO ANATEM PARA O PRIMEIRO CASO

```

001 (=====
002 ( TITULO DO CASO
003 (=====
004 TITU
005 | Caso exemplo 2
006 (
007 (=====
008 ( ASSOCIACAO DE ARQUIVOS
009 (=====
010 ( * Arquivo para saida de relatorios ( opcao FILE )
011 ULOG
012 | 4
013 | Exemplo2.out
014 (
015 ( * Arquivo para saida de plotagem
016 ULOG
017 | 8
018 | Exemplo2.plt
019 (
020 ( * Arquivo para saida de mensagens de eventos da simulacao
021 ULOG
022 | 9
023 | Exemplo2.log
024 (
025 (=====
026 ( DADOS DE OPCOES DEFAULT DE EXECUCAO
027 (=====
028 DOPC IMPR
029 | (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E
030 | IMPR I FILE L CONT L
031 | 999999
032 (
033 (=====
034 ( DADOS DE ALTERACAO DE CONSTANTES DO PROGRAMA
035 (=====
036 DCTE
037 | (Ct) (Val )
038 | TETE 1.e-4 Tolerancia relativa para convergencia de tensoes
039 | TEND 1.e-4 Tolerancia relativa para convergencia de modelos
040 | TABS 1.e-7 Tolerancia absotura
041 | TEPQ .1 Tolerancia de convergencia desejada para o fluxo de potencia
042 | 999999

```

```

ANATEM - [C:\Users\bruno\Desktop\Programas CEPEL\Caso_2_ANATEM\Exemplo2.stb]
Arquivo Editar Exibir Simulação Ferramentas Janela Ajuda
Exemplo2.stb
044 (=====
045 ( ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM FLUXO DE POTENCIA ( ANAREDE )
046 ( RESTABELECIMENTO DO CASO 1 DE FLUXO DE POTENCIA
047 (=====
048 ULOG
049 | 2
050 | Exemplo2.sav
051 ARQV REST
052 | 1
053 (
054 (=====
055 ( LEITURA DE ARQUIVOS DE MODELOS PREDEFINIDOS E POR CDU
056 (=====
057 ULOG
058 | 3
059 | maquinas.blc
060 | ARQM
061 (
062 (ULOG
063 (3
064 (MODELOS.CDU
065 (ARQM
066 (
067 (=====
068 ( ASSOCIACAO DE MAQUINAS SINCRONAS AOS RESPECTIVOS REGULADORES
069 (=====
070 DMAQ
071 | ( Nb) Gr (P) (Q) Und ( Mg ) ( Mt )u( Mv )u( Me )u(Xvd) (Nbc)
072 | 1 1 0010
073 | 3 1 0020
074 | (
075 | 999999
076 | (
077 | =====
078 | ( DADOS DE EVENTOS
079 | =====
080 DEVT
081 | (Tp) ( Tempo) ( El ) ( Pa)Nc( Ex ) ( % ) (ABS ) Gr Und (Bl)P ( Rc ) ( Xc ) ( Bc )
082 | APCL 0.00 2 3 1 2 0.0 10
083 | RMCL 0.15 2 3 1
084 | (
085 | 999999
086 |

```

Ln 44, Col 82 DOS


```

ANATEM - [C:\Users\bruno\Desktop\Programas CEPEL\Caso_2_ANATEM\Exemplo2.stb]
Arquivo Editar Exibir Simulação Ferramentas Janela Ajuda
Exemplo2.stb
076 (
077 (=====
078 ( DADOS DE EVENTOS
079 (=====
080 ▢ DEVT
081 | (Tp) ( Tempo) ( El ) ( Pa) Nc ( Ex) ( % ) (ABS ) Gr Und (Bl) P ( Rc ) ( Xc ) ( Bc )
082 | APCL 0.00 2 3 1 2 0.0
083 | RMCL 0.15 2 3 1
084 |
085 | 999999
086 |
087 (=====
088 ( DADOS PARA PLOTAGEM
089 (=====
090 ▢ DPLT
091 | (Tipo)M( El ) ( Pa) Nc Gp ( Br) Gr ( Ex) (Bl) P
092 | VOLT 1
093 | DELT 1 1 3 1
094 | FMAQ 1 1
095 | PTERM 1 1
096 |
097 | 999999
098 |
099 (=====
100 ( DADOS DE SIMULACAO
101 (=====
102 ▢ DSIM
103 | ( Tmax ) ( Stp ) ( P ) ( I )
104 | 10.0 .001 1
105 |
106 (=====
107 ( EXECUCAO DA SIMULACAO
108 (=====
109 EXSI ECHO
110 (
111 ( * Relatorio de valores maximos e minimos
112 RELA RMXG
113 (
114 (=====
115 ( FIM DA SIMULACAO
116 (=====
117 FIM
Ln 77, Col 82 DOS

```

```

ANATEM - [C:\Users\bruno\Desktop\Programas CEPEL\Caso_1_ANATEM\maquinas.blk]
Arquivo Editar Exibir Simulação Ferramentas Janela Ajuda
maquinas.blk*
01 ▢ DMDG MD01
02 | ( barra infinita
03 | (No) (L'd) (Ra ) ( H ) ( D ) (MVA) Fr C
04 | 0020
05 | 999999
06 |
07 ▢ DMDG MD01
08 | (
09 | (No) (L'd) (Ra ) ( H ) ( D ) (MVA) Fr C
10 | 0010 20.000.0005.0000.000100.060 N
11 | 999999
Ln 8, Col 3 DOS

```

7.2 ARQUIVOS DE SIMULAÇÃO DO ANATEM PARA O SEGUNDO CASO

```

ANATEM - [C:\Users\bruno\Desktop\Programas CEPEL\Caso_2_ANATEM\Exemplo2.stb]
Arquivo Editar Exibir Simulação Ferramentas Janela Ajuda
Exemplo2.stb      Espacos em branco
076 (
077 (=====
078 ( DADOS DE EVENTOS
079 (=====
080 DEVT
081 | (Tp) ( Tempo) ( El ) ( Pa) Nc ( Ex ) ( % ) (ABS ) Gr Und      (Bl) P ( Rc ) ( Xc ) ( Bc )
082 | APCL 0.00 2 3 1 2 0.0
083 | RMCL 0.15 2 3 1
084 |
085 | 999999
086 (
087 (=====
088 ( DADOS PARA PLOTAGEM
089 (=====
090 DPLT
091 | (Tipo)M( El ) ( Pa) Nc Gp ( Br) Gr ( Ex) (Bl) P
092 | VOLT 1
093 | DELT 1 1 3 1
094 | FMAQ 1 1
095 | PTERM 1 1
096 |
097 | 999999
098 (
099 (=====
100 ( DADOS DE SIMULACAO
101 (=====
102 DSIM
103 | ( Tmax ) (Stp) ( P ) ( I )
104 | 10.0 .001 1
105 |
106 (=====
107 ( EXECUCAO DA SIMULACAO
108 (=====
109 EXSI ECHO
110 (
111 ( * Relatório de valores maximos e minimos
112 RELA RMXG
113 (
114 (=====
115 ( FIM DA SIMULACAO
116 (=====
117 FIM

```

Visualizar espaços em branco Ln 77, Col 81 DOS

```

ANATEM - [C:\Users\bruno\Desktop\Programas CEPEL\Caso_2_ANATEM\maquinas.bit]
Arquivo Editar Exibir Simulação Ferramentas Janela Ajuda
maquinas.bit*
01 DMDG MD01
02 ( barra infinita
03 (No) (L'd) (Ra) ( H ) ( D ) (MVA) Fr C
04 0020
05 | 999999
06 (
07 DMDG MD03
08 ((No) (CS) (Ld) (Lq) (L'd) (L'q) (L'd) (Ll) (T'd) (T'q) (T''d) (T''q)
09 (No) (Ra) ( H ) ( D ) (MVA) Fr C
10 0010 105.098.0 18.5 36.0 13.0 6.1 0.3 0.04 0.099
11 0010 0.31 6.54 100 60 N
12
13 | 999999
14

```

Ln 1, Col 14 DOS

7.3 ARQUIVOS DE SIMULAÇÃO DO TERCEIRO CASO

```

ANATEM - [C:\Users\bruno\Desktop\Programas CEPEL\Caso_3_ANATEM\Exemplo3.stb]
Arquivo Editar Exibir Simulação Ferramentas Janela Ajuda
Exemplo3.stb
067 (=====
068 ( ASSOCIACAO DE MAQUINAS SINCRONAS AOS RESPECTIVOS REGULADORES
069 (=====
070 DMAQ
071 ( (Nb) Gr (P) (Q) Und ( Mg ) ( Mt )u( Mv )u( Me )u(Xvd)(Nbc)
072 | 1 1 0010 0101
073 | 3 1 0020
074 (
075 999999
076 (
077 (=====
078 ( DADOS DE EVENTOS
079 (=====
080 DEVT
081 ( (Tp) ( Tempo) ( El ) ( Pa)Nc ( Ex ) ( % ) (ABS ) Gr Und (Bl)P ( Rc ) ( Xc ) ( Bc )
082 | APCL 0.00 2 3 1 2 0.0 10
083 | RMCL 0.15 2 3 1
084 (
085 999999
Ln 1, Col 1 DOS

```

```

ANATEM - [C:\Users\bruno\Desktop\Programas CEPEL\Caso_3_ANATEM\maquinas.blit]
Arquivo Editar Exibir Simulação Ferramentas Janela Ajuda
maquinas.blit*
01 DMDG MD01
02 | ( barra infinita
03 | (No) (L'd) (Ra) ( H ) ( D ) (MVA) Fr C
04 | 0020
05 999999
06 (
07 DMDG MD03
08 | ((No) (CS) (Ld) (Lq) (L'd) (L'q) (L" d) (Ll) (T'd) (T'q) (T" d) (T" q)
09 | (No) (Ra) ( H ) ( D ) (MVA) Fr C
10 | 0010 105.098.0 18.5 36.0 13.0 6.1 0.3 0.04 0.099
11 | 0010 0.31 6.54 100 60 N
12
13 999999
14
15
16 (=====
17 ( MODELOS PREDEFINIDOS DE REGULADORES DE TENSÃO
18 (=====
19 DRGT MD01
20 | (No) (CS) (Ra) (Ke) (Kf) (Tm) (Ta) (Te) (Tf) (Lmn) (Lmx) LS
21 | (..... Modelo 101
22 | 0101 50 1.00 0.01 0.0 0.02 0.19 1.00 0.0 3.0 ED
23 | (..... Modelo 102
24 | (0102 32 408. 1.00.1046 0.0 0.0 1.00 3.17 -1.1 8.05EI
25 999999
Ln 1, Col 57 DOS

```

7.4 TABELA DO DESENVOLVIMENTO TEÓRICO DO MÉTODO PASSO-A-PASSO

Tempo	$P_{e_{max}}$	$\text{sen}\delta$	P_e	$P_a = P_m - P_e$	KPa	$\Delta\delta$	δ
(seg)	(pu)		(pu)	(pu)	5,4 Pa	graus	(graus)
0 ⁻	2,22	0,3593454	0,8	0	0	0	21,06
0 ⁺	1,0090909 1	0,3593454	0,3626121 7	0,43738782 8	-	-	21,06
0 ^{med}	-	-	-	0,21869391 4	0,04723788 5	-	21,06
						0,0472378 9	
0,01	1,0090909 1	0,3601146 6	0,3633884 3	0,43661157	0,09430809 9	-	21,201546
						0,1415459 8	
0,02	1,0090909 1	0,3639518 5	0,3672605	0,43273949 7	0,09347173 1	-	21,436563 7
						0,2350177 2	
0,03	1,0090909 1	0,3692858 6	0,3726430 1	0,42735699 2	0,09230911	-	21,763890 5
						0,3273268 3	
0,04	1,0090909 1	0,3760822 3	0,3795011 6	0,42049883 6	0,09082774 9	-	22,182045 1
						0,4181545 7	
0,05	1,0090909 1	0,3842985 4	0,3877921 6	0,41220783 7	0,08903689 3	-	22,689236 6
						0,5071914 7	
0,06	1,0090909 1	0,3938846 1	0,3974653 8	0,40253462 3	0,08694747 9	-	23,283375 5
						0,5941389 5	
0,07	1,0090909 1	0,4047827 6	0,4084626	0,39153739 7	0,08457207 8	-	23,962086 5
						0,6787110 2	
0,08	1,0090909 1	0,4169281 1	0,4207183 7	0,37928163 5	0,08192483 3	-	24,722722 4
						0,7606358 6	
0,09	1,0090909 1	0,4302489 2	0,4341602 7	0,36583972 6	0,07902138 1	-	25,562379 6
						0,8396572 4	
0,1	1,0090909 1	0,4446670 2	0,4487094 5	0,35129055 1	0,07587875 9	-	26,477915 6
						0,915536	
0,11	1,0090909 1	0,4600983 1	0,4642810 2	0,33571897 5	0,07251529 9	-	27,465966 9
						0,9880513	
0,12	1,0090909 1	0,4764533 3	0,4807847 2	0,31921528	0,0689505	-	28,522968 7

						1,0570018	
0,13	1,0090909 1	0,4936378 8	0,4981255	0,30187450 5	0,06520489 3	-	29,645175 4
						1,1222066 9	
0,14	1,0090909 1	0,5115537 8	0,5162042 7	0,28379572 6	0,06129987 7	-	30,828682
						1,1835065 7	
0,15⁻	1,0090909 1	0,5124727 9	0,5171316 4	0,28286836 5	0,06109956 7	1,2446061 3	32,073288 1
0,15⁺	2,22	0,5124727 9	1,1376896	-0,3376896	-	-	32,073288 1
0,15^{med}	-	-	-	-0,02741062	-0,00592069	-	32,073288 1
						1,2386854 4	
0,16	2,22	0,5491974 7	1,2192183 9	-0,41921839	-0,09055117	-	33,221422 4
						1,1481342 7	
0,17	2,22	0,5478760 4	1,2162848 2	-0,41628482	-0,08991752	-	34,279639 1
						1,0582167 5	
0,18	2,22	0,5632324 5	1,2503760 3	-0,45037603	-0,09728122	-	35,240574 6
						0,9609355 2	
0,19	2,22	0,5770108 4	1,2809640 7	-0,48096407	-0,10388824	-	36,097621 9
						0,8570472 9	
0,2	2,22	0,5891628 2	1,3079414 6	-0,50794146	-0,10971536	-	36,844953 9
						0,7473319 3	
0,21	2,22	0,5996516 6	1,3312266 9	-0,53122669	-0,11474497	-	37,477540 8
						0,6325869 6	
0,22	2,22	0,6084504	1,3507598 8	-0,55075988	-0,11896414	-	37,991163 7
						0,5136228 3	
0,23	2,22	0,6155399 4	1,3664986 6	-0,56649866	-0,12236371	-	38,382422 8
						0,3912591 2	
0,24	2,22	0,6209073 3	1,3784142 7	-0,57841427	-0,12493748	-	38,648744 4
						0,2663216 4	
0,25	2,22	0,6245442 5	1,3864882 3	-0,58648823	-0,12668146	-	38,788384 6
						0,1396401 8	
0,26	2,22	0,6264458 1	1,3907096 9	-0,59070969	-0,12759329	-	38,800431 5

						0,0120468 8	
0,27	2,22	0,6266096 8	1,3910734 9	-0,59107349	-0,12767187	-	38,684806 5
						- 0,1156249 9	
0,28	2,22	0,6250356 8	1,3875792 1	-0,58757921	-0,12691711	-	38,442264 4
						-0,2425421	
0,29	2,22	0,6217257	1,3802310 6	-0,58023106	-0,12532991	-	38,074392 4
						- 0,3678720 1	
0,3	2,22	0,6166841	1,3690387 1	-0,56903871	-0,12291236	-	37,583608
						- 0,4907843 7	
0,31	2,22	0,6099184 7	1,354019	-0,554019	-0,1196681	-	36,973155 5
						- 0,6104524 8	
0,32	2,22	0,6014407 8	1,3351985 2	-0,53519852	-0,11560288	-	36,247100 2
						- 0,7260553 6	
0,33	2,22	0,5912688 3	1,3126168 1	-0,51261681	-0,11072523	-	35,410319 6
						- 0,8367805 9	
0,34	2,22	0,5794279 8	1,2863301 1	-0,48633011	-0,1050473	-	34,468491 7
						- 0,9418278 9	
0,35	2,22	0,5659529 4	1,2564155 4	-0,45641554	-0,09858576	-	33,428078
						- 1,0404136 5	
0,36	2,22	0,5508897 9	1,2229753 4	-0,42297534	-0,09136267	-	32,296301 7
						- 1,1317763 2	
0,37	2,22	0,5342977 9	1,1861410 9	-0,38614109	-0,08340648	-	31,081118 9
						-1,2151828	
0,38	2,22	0,5162511 3	1,1460775 1	-0,34607751	-0,07475274	-	29,791183 4
						- 1,2899355 4	

0,52	2,22	0,1917407 1	0,4256643 7	0,37433563	0,08085649 6	-	9,8633043 4
						-1,191083	
0,53	2,22	0,1712981 4	0,3802818 7	0,41971812 5	0,09065911 5	-	8,7628804 5
						- 1,1004238 9	
0,54	2,22	0,1523455 7	0,3382071 7	0,46179283	0,09974725 1	-	7,7622038 1
						- 1,0006766 4	
0,55	2,22	0,1350619 8	0,2998375 9	0,50016240 8	0,10803508	-	6,8695622 5
						- 0,8926415 6	
0,56	2,22	0,1196094 3	0,2655329 4	0,53446706 4	0,11544488 6	-	6,0923655 8
						- 0,7771966 7	
0,57	2,22	0,1061315 8	0,2356121 1	0,56438789 4	0,12190778 5	-	5,4370766 9
						- 0,6552888 9	
0,58	2,22	0,0947525 3	0,2103506 2	0,58964937 9	0,12736426 6	-	4,9091520 7
						- 0,5279246 2	
0,59	2,22	0,0855760 7	0,1899788 8	0,61002112	0,13176456 2	-	4,5129920 1
						- 0,3961600 6	
0,6	2,22	0,0786851 5	0,1746810 3	0,62531897 1	0,13506889 8	-	4,2519008 5
						- 0,2610911 6	
0,61	2,22	0,0741415 8	0,1645943	0,63540570 3	0,13724763 2	-	4,1280573 3
						- 0,1238435 3	
0,62	2,22	0,0719858 8	0,1598086 4	0,64019135 7	0,13828133 3	-	4,1424951 3
						0,0144378	
0,63	2,22	0,0722372 1	0,1603666	0,63963340 2	0,13816081 5	-	4,2950937 5
						0,1525986 2	
0,64	2,22	0,0748933 4	0,1662632 1	0,63373679 1	0,13688714 7	-	4,5845795 1
						0,2894857 7	

0,65	2,22	0,0799306 5	0,1774460 4	0,62255395 7	0,13447165 5	-	5,0085369 3
						0,4239574 2	
0,66	2,22	0,0873041 7	0,1938152 6	0,60618473 7	0,13093590 3	-	5,5634302 6
						0,5548933 2	
0,67	2,22	0,0969476 6	0,2152238 1	0,58477618 7	0,12631165 6	-	6,2446352 4
						0,6812049 8	
0,68	2,22	0,1087738	0,2414778 3	0,55852216 8	0,12064078 8	-	7,0464810 1
						0,8018457 7	
0,69	2,22	0,1226745	0,2723374	0,52766260 4	0,11397512 2	-	7,9623019
						0,9158208 9	
0,7	2,22	0,1385215 2	0,3075177 7	0,49248223	0,10637616 2	-	8,9844989 5
						1,0221970 5	
0,71	2,22	0,1561672 5	0,3466912 9	0,45330871 4	0,09791468 2	-	10,104610 7
						1,1201117 3	
0,72	2,22	0,1754459 5	0,3894900 1	0,41050999 1	0,08867015 8	-	11,313392 6
						1,2087818 9	
0,73	2,22	0,1961753 5	0,4355092 8	0,36449071 8	0,07872999 5	-	12,600904 5
						1,2875118 9	
0,74	2,22	0,2181586 5	0,4843122	0,31568780 3	0,06818856 6	-	13,956604 9
						1,3557004 5	
0,75	2,22	0,2411869 4	0,535435	0,264565	0,05714604	-	15,369451 4
						1,4128464 9	
0,76	2,22	0,2650420 5	0,5883933 5	0,21160665	0,04570703 6	-	16,828004 9
						1,4585535 3	
0,77	2,22	0,2894996 8	0,6426892 9	0,15731071 1	0,03397911 4	-	18,320537 6
						1,4925326 4	
0,78	2,22	0,3143327 6	0,6978187 2	0,10218128 2	0,02207115 7	-	19,835141 4
						1,5146038	
0,79	2,22	0,3393149 3	0,7532791 4	0,04672085 6	0,01009170 5	-	21,359836 9
						1,5246955 1	

0,8	2,22	0,3642240 4	0,8085773 8	-0,00857738	-0,00185271	-	22,882679 7
						1,5228427 9	
0,81	2,22	0,3888454 6	0,8632369 2	-0,06323692	-0,01365918	-	24,391863 3
						1,5091836 2	
0,82	2,22	0,4129751	0,9168047 2	-0,11680472	-0,02522982	-	25,875817 1
						1,4839538	
0,83	2,22	0,4364220 7	0,968857	-0,168857	-0,03647311	-	27,323297 8
						1,4474806 9	
0,84	2,22	0,4590108 5	1,0190040 8	-0,21900408	-0,04730488	-	28,723473 6
						1,4001758	
0,85	2,22	0,4805828 2	1,0668938 5	-0,26689385	-0,05764907	-	30,066000 3
						1,3425267 3	
0,86	2,22	0,5009972 6	1,1122139 2	-0,31221392	-0,06743821	-	31,341088 8
						1,2750885 2	
0,87	2,22	0,5201317 4	1,1546924 6	-0,35469246	-0,07661357	-	32,539563 8
						1,1984749 5	
0,88	2,22	0,5378818 6	1,1940977 2	-0,39409772	-0,08512511	-	33,652913 6
						1,1133498 4	
0,89	2,22	0,5541605 3	1,2302363 8	-0,43023638	-0,09293106	-	34,673332 4
						1,0204187 9	
0,9	2,22	0,5688968 1	1,2629509 1	-0,46295091	-0,0999974	-	35,593753 8
						0,9204213 9	
0,91	2,22	0,5820343 3	1,2921162	-0,4921162	-0,1062971	-	36,407878 1
						0,8141242 9	
0,92	2,22	0,5935295 5	1,3176356 1	-0,51763561	-0,11180929	-	37,110193 1
						0,702315	
0,93	2,22	0,6033498 7	1,3394367 1	-0,53943671	-0,11651833	-	37,695989 8
						0,5857966 7	
0,94	2,22	0,6114716 6	1,3574670 8	-0,55746708	-0,12041289	-	38,161373 5
						0,4653837 8	

0,95	2,22	0,6178784 6	1,3716901 9	-0,57169019	-0,12348508	-	38,503272 2
						0,3418987	
0,96	2,22	0,6225593 3	1,3820817 2	-0,58208172	-0,12572965	-	38,719441 3
						0,2161690 5	
0,97	2,22	0,6255074 3	1,3886265	-0,5886265	-0,12714332	-	38,808467
						0,0890257 2	
0,98	2,22	0,6267189 7	1,3913161 2	-0,59131612	-0,12772428	-	38,769768 5
						- 0,0386985 6	
0,99	2,22	0,6261925 1	1,3901473 8	-0,59014738	-0,12747183	-	38,603598 1
						- 0,1661703 9	
1	2,22	0,6239286 7	1,3851216 5	-0,58512165	-0,12638628	-	38,311041 4
						- 0,2925566 7	