

TESE
107

EFEI

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES CRITÉRIOS
NO ESTUDO DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA**

Ricardo Pinto Pinheiro

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES CRITÉRIOS
NO ESTUDO DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

ricardo pinto pinheiro

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

E.F.E.I.

Tese submetida como requisito parcial para a obtenção
do grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

ÁREA: ENGENHARIA ELÉTRICA



RICARDO PINTO PINHEIRO

ITAJUBÁ - MG, abril de 1976

ANEXO I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

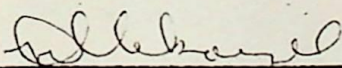
A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 074 de 24 / 03 / 76 , considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa pública de Dissertação de Mestrado intitulada:

"Influência de Diferentes Critérios no Estudo da Estabilidade Transitória".

apresenta pronunciamento no sentido de que a Coordenação da Comissão de Pós-graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite, ao Senhor Diretor, a expedição do título de Mestre em Ciências, na Área de Concentração de Elétrica

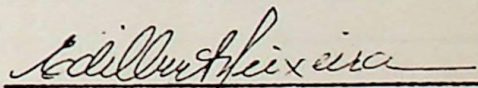
satisfeitas as demais exigências regimentais à RICARDO PINTO PINHEIRO

Itajubá, 13 de abril de 1976 .



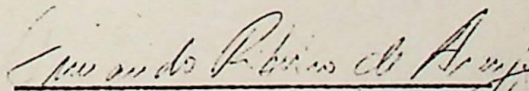
1º Examinador

Prof.: Helio Mokarzel



2º Examinador

Prof.: Edilberto Pereira Teixeira



3º Examinador - Presidente

Prof. Armando Ribeiro Araujo - orientador

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Influência de diferentes Critérios no Estudo da Estabilidade Transitória".

Autor: RICARDO PINTO PINHEIRO

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A	<i>Helio Mokarzel</i>
2º	A	<i>Edilberto Teixeira</i>
3º	A	<i>Armando Ribeiro Araujo</i>

Resultado médio: Conceito A, ou seja APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 13 de abril de 19

Helio Mokarzel
1º Examinador

Prof. Helio Mokarzel

Edilberto Teixeira
2º Examinador

Prof. Edilberto P. Teixeira

Armando Ribeiro Araujo
3º Examinador - Presidente

Prof. Armando Ribeiro Araujo - Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor ARMANDO RIBEIRO DE ARAÚJO pela orientação deste trabalho e pelo incentivo constante com que me distinguiu.

Agradeço ao meu amigo e companheiro MARIO GARDINO pela sua intensa colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os meus professores da ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ, pelos conhecimentos a mim transmitidos.

Finalmente, meus especiais agradecimentos a todos da Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A. - ELETRONORTE, que tornaram possível a realização deste trabalho e, em particular, ao Engenheiro desta Assessoria de Planejamento PAULO ALBERTO BUENO BRANDÃO WETTSTEIN e à Sra. ELIDA RAPELLO DOS SANTOS, que datilografou todo o original.

ã minha esposa e a meus filhos
flávia e ricardo

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES CRITÉRIOS
NO ESTUDO DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

SUMÁRIO:

O estabelecimento de critérios, para estudo da estabilidade transitória de um sistema elétrico, não é um problema de fácil solução. Até que ponto um sistema deve responder adequadamente é e será sempre uma dúvida dos engenheiros ligados ao planejamento.

A presença de uma condição aleatória, ou seja, a probabilidade de ocorrência de um determinado defeito é talvez uma das responsáveis por este estado de coisas.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência de diferentes critérios aplicados a um dado sistema e fornecer elementos para um estudo comparativo.

INFLUENCE OF DIFFERENT CRITERIA

IN TRANSIENT STABILITY STUDIES

ABSTRACT

The definition of criteria for a power system transient stability study is not an easy solution problem. At which extent should a system response adequately is and it will be for ever a key question for the planning system engineer.

The presence of a randone condition, i.e, the probability of occurrence of a given fault is perhaps the responsible for the existence of this problem.

This study has as a goal to analyse the influence of different criteria applied to a given system and to provide elements for a comparative study.

INDICE

	pag
CAPÍTULO 1 - Transitórios em Sistemas Elétricos	02
1.1 - Objetivo	02
1.2 - Transitórios	02
1.2.1- Transitórios Ultra rápidos - Surtos	02
1.2.2- Transitórios Rápidos - Curto-Circuitos	03
1.2.3- Transitórios Lentos - Estabilidade Transitória	06
 CAPÍTULO 2 - Estabilidade Transitória	 07
2.1 - Objetivo	07
2.2 - Estabilidade Transitória	07
2.2.1- Introdução	07
2.2.2- Modelo do Sistema	11
2.2.3- Solução da Equação de Equilíbrio Dinâmico (Swing)	19
2.2.4- Métodos de Análise	27
 CAPÍTULO 3 - Simulação Digital	 30
3.1 - Objetivo	30
3.2 - Programa Utilizado	30
3.2.1- Modelo da Máquina Síncrona	30
3.2.2- Solução das Equações Diferenciais	33
3.2.3- Fluxograma Simplificado do Programa	34
 CAPÍTULO 4 - Sistema Básico	 39
4.1 - Objetivo	39
4.2 - Características do Sistema	39
4.2.1- Parâmetros dos Geradores	39
4.2.2- Sistema de Excitação	40
4.2.3- Sinais Estabilizadores	40
4.2.4- Arranjos das Subestações	40

	pag
CAPÍTULO 5 - Influência dos Critérios	48
5.1 - Objetivo	48
5.2 - Introdução	48
5.3 - Critérios	50
5.4 - Conclusões Parciais	59
5.4.1 - Critério A	59
5.4.2 - Critério B	61
5.4.3 - Critério C	62
5.5 - Conclusões Finais	66
 BIBLIOGRAFIA	 67

CAPÍTULO 1

TRANSITÓRIOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS

1.1 - OBJETIVO

Com a finalidade de identificar bem o problema, que está sendo tratado, é feito a seguir uma análise dos vários tipos de transitórios, que podem ocorrer em um sistema elétrico de potência.

1.2 - TRANSITÓRIOS

Dependendo, sobretudo, do tempo de duração do defeito, pode-se agrupar os transitórios em três categorias:

Transitórios ultrarápidos	- Surtos
Transitórios rápidos	- Curto-circuitos
Transitórios lentos	- Estabilidade Transitória

1.2.1 - Transitórios Ultrarápidos

Surtos

Este tipo de transitório é causado por descargas atmosféricas nas linhas de transmissão, ou por manobras normais de chaveamento dos circuitos envolvidos.

Estes transitórios são elétricos por natureza e devem envolver apenas as linhas de transmissão.

Fisicamente, a ocorrência de um transitório deste tipo é caracterizado pelo aparecimento de ondas eletromagnéticas, que, transladando à velocidade próxima a da luz, ao longo da linha, refletem em seus terminais, provocando, conseqüentemente, ondas

refletidas.

Devido à constante presença de perdas nas linhas de transmissão, há uma atenuação rápida destas ondas e o fenômeno associado tem a duração de poucos milisegundos desde o seu início.

É dito que estes transitórios envolvem apenas as linhas de transmissão, porque, na maioria das vezes, as altas indutâncias dos transformadores atuam como anteparos dos enrolamentos do gerador. Não se deve esquecer que, no processo de reflexão, estas tensões podem tornar-se tão altas que resultem na destruição do isolamento do equipamento. Aqui entram em ação os para-raios, cuja função é descarregar à terra a energia associada a estas ondas, quando funcionam adequadamente.

Na ocorrência de destruição do isolamento do transformador, o curto-circuito é o transitório que vem logo a seguir com características mais lentas e que será visto adiante.

O objetivo principal dos estudos dos transitórios ultrarápidos é fornecer elementos para a seleção do nível de isolamento dos equipamentos e linhas de transmissão do sistema.

1.2.2 - Transitórios Rápidos

Curto-circuitos

Aqui agrupa-se os transitórios causados por mudanças bruscas e anormais, que ocorrem nos componentes do sistema, que são os curto-circuitos.

Na maioria das vezes, a ocorrência do curto-circuito dá-se logo após a destruição do isolamento devido a um surto de tensão, como comentado anterior

mente.

Em ordem de severidade os curto-circuitos podem ser divididos em:

- a.) curto-circuito simétrico, sólido, de todas as três fases;
- b.) curto-circuito de duas fases com a terceira fase sã. As fases em curto podem ser ou não alteradas simultaneamente;
- c.) curto-circuito entre fase e terra com as duas outras fases sãs.

A capacidade de transmissão de energia de uma linha sujeita ao primeiro tipo de curto-circuito é instantaneamente reduzida a zero e, a sujeita aos dois outros tipos, fica com a capacidade reduzida.

Como no caso de transitórios ultrarápidos, os transitórios rápidos são também totalmente de natureza elétrica, sendo determinados basicamente pelo acoplamento magnético entre os enrolamentos do gerador. As constantes de tempo envolvidas variam de poucos ciclos (onda de 60 Hz) para o enrolamento amortecedor para, talvez, 5 seg no caso do enrolamento de campo. Estes transitórios são, portanto, consideravelmente mais lentos que os anteriores.

Visto que, usualmente, os primeiros 10 ciclos das correntes de curto-circuito são os de maior importância prática, uma faixa de tempo de 10 a 100 ms, após a falta, é característico.

Um curto-circuito é sempre acompanhado por um colapso instantâneo, total ou parcial, de todas as tensões espalhadas pelas barras do sistema. Com

as tensões dos geradores reduzidas repentinamente há uma conseqüente redução na potência de saída dos geradores. Como a potência de entrada nos geradores permanece constante, durante aqueles primeiros instantes, até que o controle mecânico da turbina entre em operação, cada gerador fica sujeito a um torque de aceleração adicional, que, se mantido, dá origem às oscilações eletromecânicas. Isto será discutido nos transitórios lentos, a seguir.

Em adição a redução, total ou parcial, da capacidade de transmissão das partes envolvidas, as correntes de curto-circuito podem atingir valores muito além dos normais nos geradores ou transformadores. Tais correntes, se, permitido, persistirem, podem causar danos térmicos nos equipamentos.

É importante, portanto, isolar a seção faltosa, tão rápido quanto possível, para minimizar o sobreaquecimento dos equipamentos e a formação de oscilações mecânicas incontroláveis dos geradores.

Usualmente, não se deve desligar uma parte do sistema e nem mantê-lo desligado por longo tempo. Como uma grande percentagem de curto-circuito é auto-extinguível, ou seja, uma vez extinta a corrente de defeito, o caminho de curto é desionizado e o isolamento é refeito, na prática, utilizam-se disjuntores com religamento automático, que tentam recompor o sistema uma, duas ou várias vezes. Somente se a falta persistir é que o disjuntor isola a área de feituosa permanentemente. Tal ciclo de operação, fechar - abrir - fechar, pode levar 1 segundo ou mais.

Existem várias razões porque se deseja o conhecimento tão preciso, quanto possível, das tensões e correntes de curto-circuito em um sistema:

- a.) Determinar a capacidade de interrupção de cada disjuntor em cada ponto, baseado no caso mais severo de curto-circuito.
- b.) Fornecer valores e sentidos das correntes de defeito para orientação dos dispositivos de proteção.

1.2.3 - Transitórios Lentos

Estabilidade Transitória

Um surto (transitório ultrarrápido) pode dar origem a destruição de um isolamento e, com isso, iniciar o curto-circuito (transitório rápido), como vimos anteriormente.

Se o curto-circuito ocorrer em uma linha de interligação vital, ou, se o trecho com defeito não é desligado com sucesso, o que vem logo a seguir à falha é o desenvolvimento da mais grave situação transitória - as oscilações mecânicas dos rotores das máquinas síncronas. Estes transitórios eletromecânicos podem, em circunstâncias infelizes, tirar algumas ou todas as máquinas de serviço por falta de sincronismo. Tal ocorrência constitui uma queda parcial ou total do sistema. O sistema é dito ter atingido seu LIMITE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA.

Como tais circunstâncias devem ser evitadas ao máximo, a simulação das possíveis ocorrências por estudos em computador tem um alto significado.

Normalmente, os estudos de estabilidade transitória são limitados à análise da primeira oscilação. No entanto, a área de estabilidade dinâmica (oscilações após a primeira oscilação) pode ser examinada para se ter a certeza do amortecimento positivo das oscilações, mas isto será melhor apreciado no capítulo a seguir.

CAPÍTULO 2

ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

2.1 - OBJETIVO

Tendo sido anteriormente bem identificada a área de estudo a que se propõe este trabalho, o presente capítulo faz uma análise mais detalhada da estabilidade transitória, o mais lento, mas o mais importante dos transitórios, procurando, com isso, uma melhor orientação para o raciocínio a ser desenvolvido nas partes conclusivas.

2.2 - ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

2.2.1 - Introdução

Um análogo mecânico do tipo indicado na Fig.1 a seguir é interessante, para se obter um bom sentimento do problema considerado

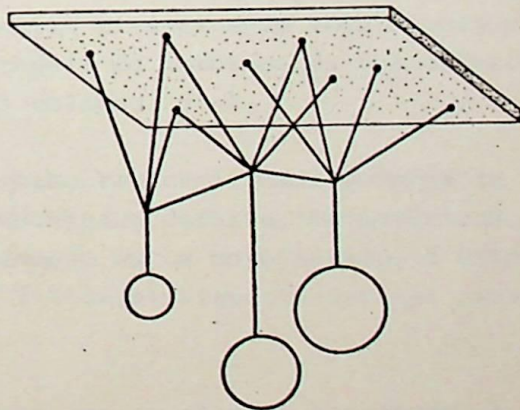


Figura 1

Análogo mecânico para demonstração da estabilidade transitória.

As massas do análogo mecânico correspondem os geradores no sistema elétrico e aos elásticos, as linhas de transmissão.

O análogo mecânico está em regime de estabilidade permanente com seus elásticos aquém de seu limite de ruptura, o que corresponde ser cada linha de transmissão operada abaixo de seu limite de estabilidade estática.

Se um elástico for rompido instantaneamente, o que corresponde a uma perda repentina de uma linha no sistema elétrico, as massas apresentarão movimentos transitórios e os esforços em cada elástico fluirão. O sistema mecânico ou elétrico poderá reagir nesse caso, de duas formas:

- a.) O sistema estabilizará em uma nova posição de equilíbrio, caracterizado por um novo conjunto de esforços nos elásticos, isto é, potências nas linhas, no caso elétrico.
- b.) Devido aos esforços transitórios, um outro cordão é rompido causando um enfraquecimento do circuito e resultando logo a seguir uma reação em cadeia de rompimentos dos elásticos e eventual colapso total.

Se o sistema tem capacidade própria de sobreviver a um determinado defeito, caracterizado pela sua estabilização em um novo estado, é dito que: "o sistema é transitóriamente estável para aquele defeito".

Os eventos que se seguem, sobretudo, a perda de uma linha de transmissão, em um sistema elétrico são quase idênticos aos que se seguem no análogo em discussão. Em detalhes, o análogo tem, naturalmente

te, muitas discrepâncias. Dependendo consideravelmente da natureza e duração da falta, os transitórios mecânicos do rotor, que vem logo a seguir, podem durar cerca de 1 segundo ou podem continuar nos próximos segundos ou minutos, aumentando, com isso, a sua severidade, podendo levar, eventualmente, ao restabelecimento ou ao colapso total.

É muito útil a divisão do período transitório em intervalos distintos de tempo, como indicado a seguir:

a.) Intervalo inicial - aquele que se estende aproximadamente até o 1º segundo.

As oscilações do rotor neste intervalo são quase incontroláveis, uma vez que o comportamento dos geradores é praticamente insensível à influência dos regulares Pf e a atuação do regulador de tensão pouco se faz sentir.

Os meios, de que se dispõe neste intervalo, são aqueles relativos às manobras automáticas, que podem incluir, desligar e religar linhas defeituosas, conectar capacitores, desligar geradores defeituosos etc., em se tratando de sistemas existentes. Para sistemas em planejamento, as características de inércia e dos reguladores de tensão dos geradores podem ser otimizadas para fornecer um melhor desempenho ao sistema. Outras providências, se bem que mais onerosas, podem ser tomadas, como, por exemplo, diminuição da impedância de transferência, quer pelo aumento do número de circuitos, quer pelo emprego de capacitores série, criação de subestações intermediárias de chaveamento, etc..

b.) Intervalo intermediário - aquele que, seguindo

ao intervalo inicial, se estende por aproximadamente outros 5 segundos.

Neste intervalo atuam os reguladores Pf e QV.

c.) Intervalo final - aquele que se estende, tal vez, a vários minutos após a ocorrência da falta. Neste período ocorrem os efeitos a longo prazo: perda permanente de gerador, conservação de cargas (load-shedding), alocação de geração (tie-line bias) intervenções dos operadores, etc..

Os acontecimentos, durante os primeiros dois intervalos, são importantes para se indicar se o sistema tem condições de sobreviver ao impacto inicial, ou seja, se a integridade do sistema é preservada, ou se ele entra em colapso total. Se o sistema sobreviver, o perigo ainda não estará eliminado, pois, se houver perda permanente de equipamento com posterior queda na frequência, ter-se-á que recorrer ao chamado controle secundário. Nesse caso a conservação de cargas (load-shedding) se apresenta como alternativa principal para o restabelecimento da frequência, podendo contar também com a parada de unidades diesel ou mesmo hidráulicas nesse período.

2.2.2 - Modelo do Sistema

Para investigar a estabilidade transitória do sistema da Fig. 1 deve-se proceder como a seguir:

- a.) Determina-se o estado antes do defeito;
- b.) Provoca-se o defeito;
- c.) Verificam-se os movimentos transitórios das massas após o defeito, bem como os esforços resultantes nos elásticos;
- d.) Se estes esforços não excederem o limite de ruptura dos elásticos, o sistema pode ser julgado estável para o defeito em questão.

Um estudo de estabilidade transitória de um sistema elétrico segue mais ou menos os mesmos princípios. Logo a seguir ao defeito, as posições angulares dos rotores apresentam desvios transitórios. Como a falta é suposta ser de grandes proporções, estas oscilações são de magnitude elevada. Se puder ser averiguado por análise que todos os ângulos dos rotores de cada máquina individualmente, se fixam em novos valores, correspondentes a um novo estado de equilíbrio, conclui-se que o sistema é de fato estável.

A precisão com a qual pode-se predizer as oscilações do rotor, após a falta, é a chave do problema. Daí concluir-se a necessidade de modelos realmente representativos do sistema em estudo.

EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DINÂMICO (SWING)

Um gerador qualquer, aqui designado por i , de um sistema de n unidades, recebe, via eixo da turbina, a potência mecânica de entrada ou potência de turbina P_{Ti} e entrega a potência elétrica de saída ou potência do gerador P_{Gi} , tal como mostra a Fig. 2 abaixo.

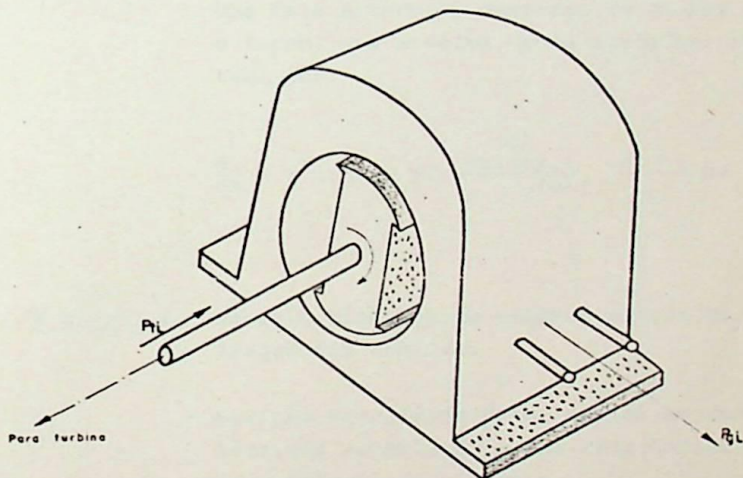


Figura 2

Definição de P_G e P_T

Se as duas potências envolvidas são iguais (desprezando as perdas na máquina que são relativamente insignificantes) o gerador se move à velocidade síncrona, constante.

Se, ao contrário, existe uma diferença entre estas duas potências, esta diferença é usada para:

a.) alterar a energia cinética, ou velocidade da unidade;

b.) compensar a queda de torque, que desenvolve principalmente no enrolamento amortecedor.

Matematicamente isto pode ser expresso por:

$$P_{Ti} - P_{Gi} = \frac{d}{dt} (W_{\text{cinet}, i}) + P_{\text{amort.}}$$

onde:

W_{cinet, i} - representa a energia cinética total do gerador mais a turbina expresso em MW seg ou MJ e o termo, que envolve, pode ainda ser representado por:

$$\frac{d}{dt} (W_{\text{cinet}, i}) = \frac{W_{\text{cinet}, i}^{(0)}}{\pi \cdot f^{(0)}} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} \text{ MW} \quad (2.1)$$

com:

W_{cinet, i}⁽⁰⁾ - energia cinética da unidade medida em MJ e $f^{(0)}$ frequência nominal.

δ_i - posição angular do rotor medida em radianos elétricos em relação a uma referência, que gira a velocidade síncrona.

P_{amort} - a velocidade do rotor, desviando-se da velocidade síncrona, causa o aparecimento de correntes induzidas, nos enrolamentos amortecedores situados no rotor. O efeito destas correntes induzidas é provocar torques que tendam a impedir o movimento e aí está a principal finalidade dos enrolamentos amortecedores ou seja, a criação de um torque estabilizante adicional. A magnitude do torque estabilizante aumenta com a velocidade relativa $\frac{d\delta_i}{dt}$ e é comum, embora não muito correto, supor uma proporcionalidade entre eles, isto é:

$$P_{amort} \approx D_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad \text{MW} \quad (2.3)$$

D_i - parâmetro positivo medido em MW/RadE/seg.

Com a substituição de (2.2) e (2.3) na equação (2.1) tem-se:

$$P_{Ti} - P_{Gi} = \frac{W_{cinet,i}^{(0)}}{\pi \cdot f^{(0)}} \cdot \frac{d^2\delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad \text{MW} \quad (2.1a)$$

A equação de equilíbrio dinâmico (2.1a), dividida por uma base MVA, fornece a equação de equilíbrio por unidade de MW, ou seja:

$$P_{Ti} - P_{Gi} = \frac{H_i}{\pi \cdot f^{(0)}} \cdot \frac{d^2\delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad \text{pu MW} \quad (2.1b)$$

onde:

H - constante de inércia em pu.

A dinâmica do rotor genérico i depende, portanto, inteiramente, de acordo com as equações (2.1), da diferença das potências P_{Ti} e P_{Gi} . Se esta diferença é positiva, há uma aceleração do rotor; se negativa, há frenagem.

Uma investigação mais detalhada de P_T e P_G faz-se necessária.

Potência transitória da turbina P_T

As mudanças, na potência mecânica de entrada ou potência da turbina, P_T , são inteiramente dependentes, sobretudo, da ação do regulador Pf.

No primeiro segundo, intervalo inicial, a potência da turbina permanece constante, ou seja, para este transitório inicial a potência, após a falta, é igual ao valor imediatamente anterior.

$$P_T \approx P_T^{(0)} = \text{constante} \quad (2.4)$$

Potência transitória do gerador P_G

A potência de saída, ou potência do gerador P_G , deve ser expressa em função da posição angular δ durante as oscilações transitórias.

Uma situação típica é descrita a seguir: um gerador está operando em regime permanente em um grande sistema; se um curto circuito ocorrer em algum ponto do sistema, as tensões em todas as barras são alteradas repentinamente, ou seja, a tensão na barra do gerador passa de um valor $v^{(o)}$, antes da falta, para um valor $v^{(f)}$, após a falta.

Para as discussões posteriores é admitido que:

- a.) $v^{(o)}$ e $v^{(f)}$ são senoidais e possuem simetria 3ϕ , sendo que a tensão após a falta $v^{(f)}$ pode não estar necessariamente em fase com a tensão antes da falta $v^{(o)}$.
- b.) A mudança na tensão é imediata, o que é uma suposição bastante razoável, comparada com os transitórios mecânicos do rotor, que são bastante lentos.

Com a mudança repentina na tensão terminal do gerador, há uma alteração correspondente na potência de saída, ativa e reativa, da máquina.

Os diagramas vetoriais apresentados na Fig. 3 mostram tensões e correntes antes da falta (linhas sólidas) e imediatamente após a falta (linhas tracejadas). A forma separada de indicação tem a finalidade única de não confundir o diagrama.

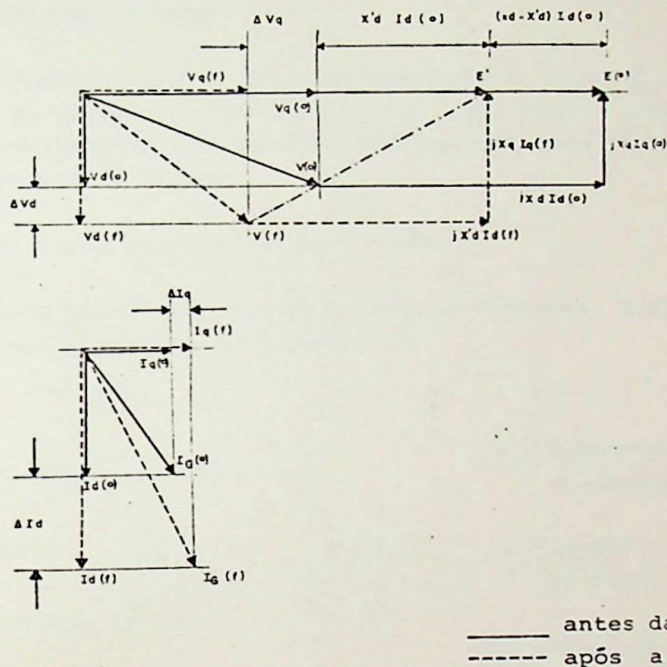


Figura 3

Diagramas Vetoriais de correntes e tensões, antes e após a falta

Corrente antes da falta

A corrente do gerador em regime permanente $I_G^{(0)}$ tem as componentes d e q , $I_d^{(0)}$ e $I_q^{(0)}$ respectivamente. Da Fig. 3 obtemos diretamente que:

$$|I_q^{(0)}| = \frac{|V_d^{(0)}|}{X_q} \quad (2.5)$$

$$|I_d^{(0)}| = \frac{|E^{(0)}| - |V_q^{(0)}|}{X_d} \quad (2.6)$$

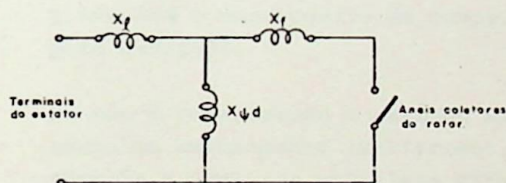


Corrente após a falta

Imediatamente após a falta, as componentes \underline{d} e \underline{q} da tensão na saída do gerador alteram de ΔV_d e ΔV_q respectivamente. À estas alterações correspondem mudanças nas componentes \underline{d} e \underline{q} da corrente do estator.

a.) Alteração da corrente da direção \underline{d} .

Do circuito equivalente da máquina síncrona, apresentado a seguir, na Fig. 4, é sabido que:



X_l = reatância de dispersão da armadura.

X_f = reatância de dispersão do campo.

$X_{\psi d}$ = reatância magnetizante do eixo direto.

Figura 4

Circuito equivalente para a máquina síncrona

- Com a máquina funcionando simetricamente e em regime permanente, a corrente do estator não tem efeito sobre o circuito do rotor, os terminais do rotor são vistos como em circuito aberto e a reatância vista dos terminais do estator é a reatância síncrona X_d .
- Com a máquina no estado transitório, a mudança na corrente do estator é acompanhada por uma corrente induzida no campo, os terminais do rotor são vistos como curto-circuitados e a reatância vista dos terminais do estator é a reatância transitória X_d' .

Uma mudança lenta na diferença de tensões $|E| - |V_q|$ poderia, conforme a equação (2.6), causar uma mudança na corrente, o que seria determinado pela reatância X_d . Uma mudança rápida de $|V_q|$, ao contrário, causa uma mudança de corrente muito maior, a qual é calculada então por:

$$|\Delta I_d| = \frac{|\Delta V_q|}{X'_d} \quad (2.7)$$

b.) Alteração da corrente na direção q.

As coisas são mais simples na direção q. O fluxo da armadura, associado com a componente de corrente i_q , não está acoplado com o enrolamento de campo, estando, portanto, livre para mudanças.

Se não é considerado o período subtransitório, devido à presença do enrolamento amortecedor, a alteração da corrente na direção q pode ser calculada diretamente de (2.6), ou seja:

$$|\Delta I_d| = \frac{|\Delta V_d|}{X_q} \quad (2.8)$$

Retornando à Fig. 3, supõe-se agora uma queda a zero da corrente da armadura. Tal fato é conseguido pelo desligamento do gerador do sistema. Como as componentes da corrente nas direções d e q devem mudar repentinamente dos valores $I_d^{(o)}$ e $I_q^{(o)}$, a troca correspondente nas componentes da tensão terminal nas direções d e q são, de acordo com (2.7) e (2.8), $X'_d I_d^{(o)}$ e $X_q I_q^{(o)}$.

A tensão terminal do gerador é então, instantaneamente, alterada para o valor E' na Fig. 3, que tem o seguinte valor:

$$|E'| = |E^{(o)}| - (X_d - X'_d) |I_d^{(o)}| \quad (2.9)$$

Substituindo o valor de $I_d^{(o)}$ da equação (2.6) em (2.9), obtem-se $|E'|$ em termos de tensões antes da falta.

$$|E'| = \frac{X'_d |E^{(o)}| + (X'_d - X'_d |V_q^{(o)}|)}{X'_d} \quad (2.9a)$$

O diagrama da Fig. 3 mostra claramente que os valores, após a falha, $V^{(f)}$, $j X'_d I_d^{(f)}$, $j X'_q I_q^{(f)}$ e E' são relacionáveis com os vetores $V^{(o)}$, $j X'_d I_d^{(o)}$, $j X'_q I_q^{(o)}$ e $E^{(o)}$. De fato, os diagramas vetoriais, em regime estático e transitório, tem forma idêntica, se são feitas as substituições de $E^{(o)}$ por E' e X'_d por X'_d .

Esta observação é importante, porque ela permite que se determine, muito facilmente, a potência do gerador nas condições transitórias.

$$P_G = \frac{|V^{(f)}| |E'|}{X'_d} \sin \delta + \frac{|V^{(f)}|^2}{2} \left(\frac{1}{X'_q} - \frac{1}{X'_d} \right) \sin 2\delta \quad (2.10)$$

onde:

$$\delta = \text{ângulo entre os vetores } E' \text{ e } V^{(f)}$$

2.2.3 - Solução da Equação de Equilíbrio Dinâmico (SWING) (caso de um único gerador)

Tendo sido concluído que a potência transitório do gerador P_{Gi} é uma função não linear da variável δ_1 , o problema a resolver consta, portanto, de um conjunto de equações diferenciais não lineares. Como em geral não existe solução analítica, recorre-se às técnicas numéricas.

O início da explanação pelo caso de um único gerador, operando contra uma barra infinita, serve para uma exposição das características dinâmicas mais importantes de um grande sistema.

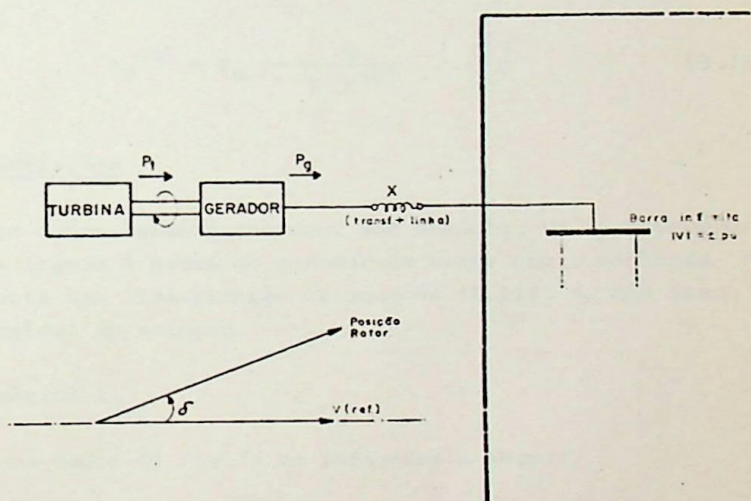


Figura 5

Um único gerador operando contra uma barra infinita

A Fig. 5 acima é representativa do caso em questão, onde as seguintes suposições são básicas:

- a.) a tensão, na barra infinita V , tem o valor de 1,00 pu e permanece constante durante o transiente;
- b.) a frequência do circuito é suposta constante sobre qualquer condição;

- c.) a potência da turbina P_T é constante;
- d.) a fem E' atrás da reatância transitória mantém-se constante;
- e.) despreza-se o torque de amortecimento.

Em vista das suposições (c) e (e) a equação de equilíbrio dinâmico (2.1b) tem a forma

$$P_T^{(0)} - P_G = \frac{H}{\pi \cdot f^{(0)}} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (2.11)$$

Pequenas oscilações

Um distúrbio relativamente pequeno, por exemplo, um desligamento de 5% da carga ligada à barra do gerador (a barra não é mostrada na Fig.5) permite uma linearização da equação (2.11), e, com isso, tornando-a passível de solução.

Exemplo numérico 1:

Sejam os dados da Fig. 5 os indicados a seguir:

$$H = 2,00 \text{ seg}$$

$$X_d = X_q = 0,9 \text{ pu}$$

$$X'_d = 0,3 \text{ pu}$$

$$X (\text{tranf} + \text{linha}) = 0,1 \text{ pu}$$

Onde a operação inicial é caracterizada por:

$$|E^{(0)}| = 1,50 \text{ pu}$$

$$P_G^{(0)} = P_T^{(0)} = 0,75 \text{ pu}$$

Solução:

A potência em regime é dada por:

$$P_G \text{ regime} = \frac{1,00 \times 1,50}{0,1 + 0,9} \text{ sen } \delta = 1,5 \text{ sen } \delta$$

Os valores das variáveis, na condição inicial, são:

$$\delta^{(0)} = \text{sen}^{-1} \delta \frac{0,75}{1,5} = 30^\circ$$

$$V_q^{(0)} = 1,00 \times \cos 30^\circ = 0,866 \text{ pu}$$

$$|E'| = \frac{0,4 \times 1,5 + 0,6 \times 0,866}{1,00} = 1,12 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} P_G \text{ transit} &= \frac{1,00 \times 1,12}{0,4} \text{ sen } \delta + \frac{(1,00)^2}{2} \left(\frac{1}{1,00} - \frac{1}{0,4} \right) \text{ sen } 2\delta \\ &= 2,80 \text{ sen } \delta - 0,75 \text{ sen } 2\delta \end{aligned} \quad (2.11)$$

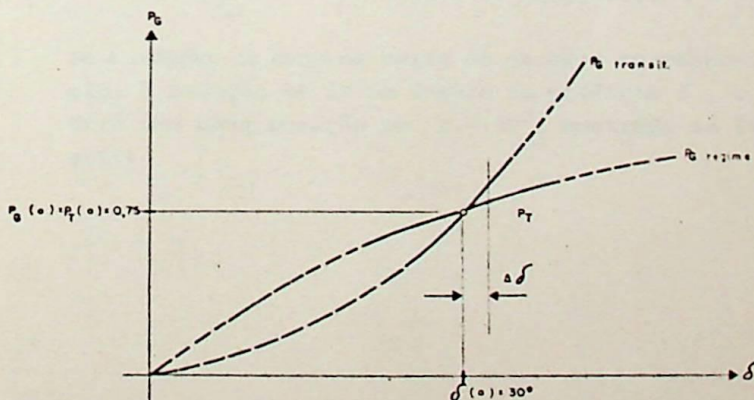


Figura 6
Potências do Gerador

Na Figura 6, são plotadas as funções P_G regime = $f(\delta)$ e P_G transit = $f(\delta)$.

Para um pequeno desvio $\Delta\delta$, pode forçar-se uma característica linear da função P_G transit e daí:

$$P_G \text{ transit} \approx P_G^{(0)} + \left(\frac{\partial P_G}{\partial \delta} \right)^{(0)} \cdot \Delta\delta$$

Da equação (2.12) tem-se:

$$\left(\frac{\partial P_G}{\partial \delta} \right)^{(0)} = 2,8 \times \cos 30^\circ - 1,5 \times \cos 60^\circ = 1,67 \text{ pu MW/rad}$$

Portanto,

$$P_G \text{ transit} \approx 0,75 + 1,67 \Delta\delta$$

Substituindo na equação (2.11)

$$\frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + 157 \Delta\delta = 0 \rightarrow \text{que traduz em uma oscilação não amortecida de frequência } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{157} = 2,1 \text{ Hz}$$

Se a redução da carga na barra do gerador corresponder, por exemplo, à redução de 19 no ângulo de potência δ , o rotor assumirá uma nova posição em $\delta = 29^\circ$, mostrada na Fig. 6A, a seguir:

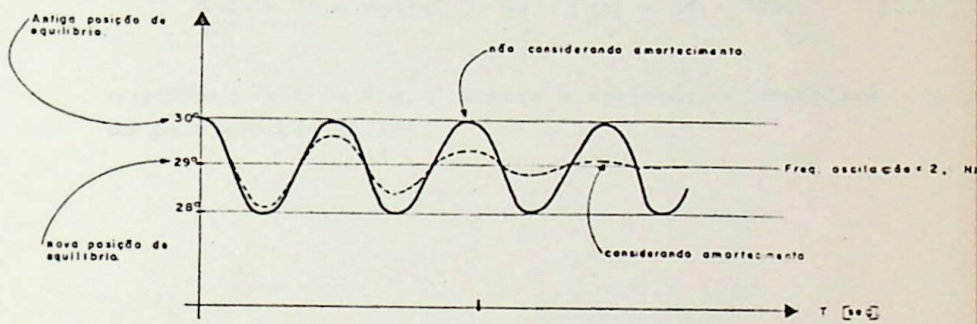


Figura 6A
Pequenas oscilações de um Gerador

Grandes Oscilações

O exemplo, a seguir, esclarece as situações dinâmicas de grandes proporções.

Exemplo numérico 2:

Um curto 3φ ocorre na linha entre o gerador e o sistema (Fig.5). A proteção, por sua vez, comanda um desligamento da linha e após uma fração de tempo, supondo que a falta tenha sido removida, consegue-se um religamento com sucesso.

Como durante o período de falta a potência do gerador P_G é zero, a potência da turbina, considerada inalterável, acelera o rotor.

Durante a aceleração, a equação de equilíbrio dinâmico (2.11) é da forma

$$P_{\text{acel}} = P_T^{(0)} = \frac{H}{\pi f^{(0)}} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.13)$$

Substituindo os valores numéricos:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = 70,6 \text{ Rad/s}^2 \quad \text{ou} \quad \delta(t) = 30 + 2020t^2 \quad (2.14)$$

O gráfico $\delta \times t$ da Fig. 7 mostra a trajetória parabólica δ_1 da pela equação (2.14).

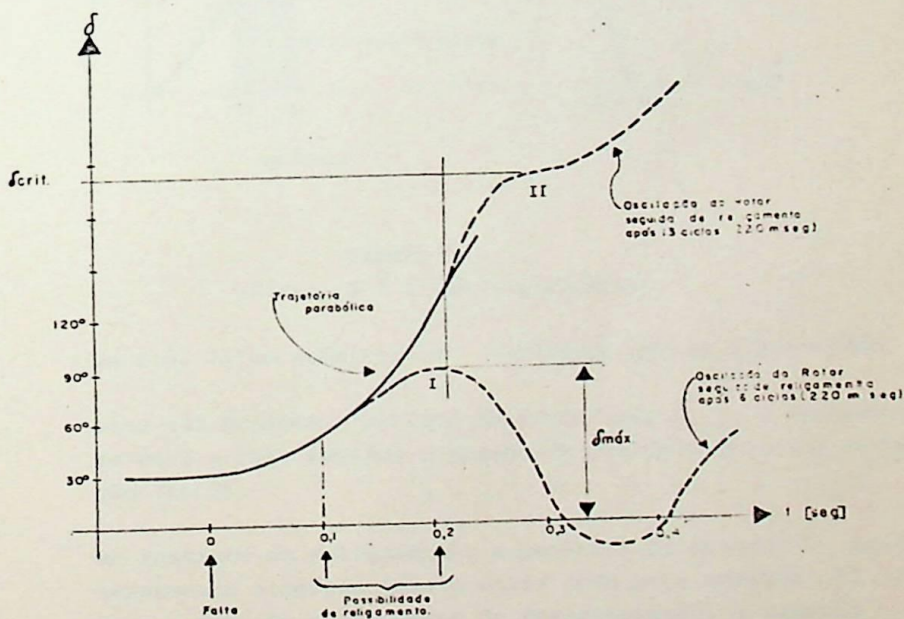


Figura 7
Oscilações angulares do rotor

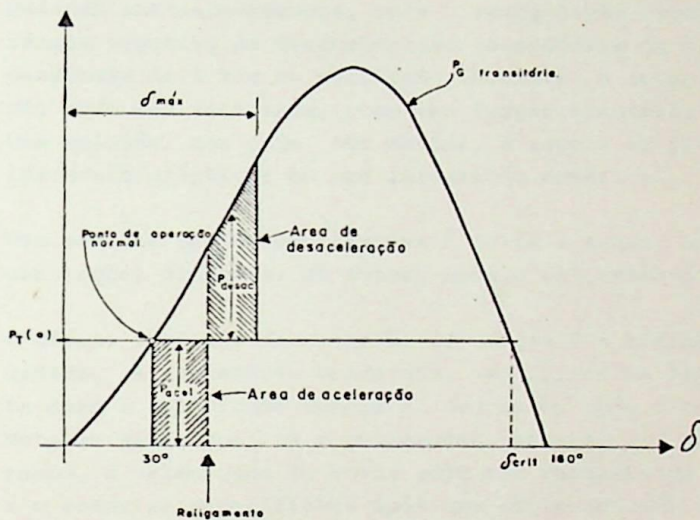


Figura 7A
Gráfico P x δ dos transitórios

Na Fig. 7A um gráfico P x δ esclarece melhor a situação.

Note que durante o período de aceleração P_{acel} é independente de δ e isto explica o porque de podermos integrar a equação (2.13).

No instante de religamento, a potência do gerador é instantaneamente alterada para o valor dado pela equação (2.12). Para o período subsequente de desaceleração, a equação de equilíbrio dinâmico toma a forma:

$$P_{desacel.} = 0,75 - (2,8 \operatorname{sen} \delta - 0,75 \operatorname{sen} 2\delta) = \frac{H}{\pi F(0)} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 0,0106 \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (2.15)$$

A Fig. 7A mostra a potência positiva de aceleração (independente de δ), mudando instantaneamente, após o religamento, para uma potência negativa de desaceleração (dependente de δ). A dependência de δ tem um resultado imediato: a equação (2.13) não pode ser integrada, como uma função elementar qualquer. Uma solução, que pode ser obtida, é aquela em termos das integrais elípticas ou por integração numérica.

Uma análise apenas qualitativa é feita a seguir acerca das oscilações dinâmicas do rotor, após o religamento da linha.

O efeito imediato da reversão do torque é a redução da velocidade. A trajetória tracejada, nas curvas da Fig. 7, indica como a velocidade começa a decrescer após o religamento. Note-se ainda que, se o religamento ocorrer até determinado tempo, a velocidade do rotor pode ser reconduzida (curva I) e o rotor se estabilizará após uma série de oscilações; o sistema é estável transitoriamente.

Se o religamento ocorrer mais tarde, o rotor terá atingido uma velocidade tão alta que o torque reverso não será suficiente para evitar que o ângulo δ crítico seja atingido. Ultrapassando o valor crítico, a diferença $P_T - P_G$ torna-se novamente para aceleração e a máquina não mais possui condição de se recuperar (curva II).

2.2.4 - Métodos de Análise

No exemplo anterior há, obviamente, um tempo limite, além do qual, a linha não deve permanecer aberta sob pena de tornar o sistema instável. Como calcular este limite?

Na prática dois métodos são utilizados:

a.) Método de solução indireta.

Este método é atualmente o mais aproximado e indicado na prática para sistemas de grande porte.

As equações representativas das oscilações são resolvidas durante e após o defeito por simulação analógica, digital ou por meio de métodos de integração numérica, etc.; a estabilidade é determinada pelo exame das curvas resultantes.

b.) Método de solução direta.

Os métodos de solução direta tem um uso muito restrito, quando envolvem o estudo de mais de um gerador. Em vista da disponibilidade universal de computadores, acredita-se que a solução indireta domina ainda por um longo período. Particularmente, o popular método de Liapunov apresenta um interesse apenas acadêmico na análise de sistemas de potência; no entanto, isto é passível de discussão e pesquisa.

O critério da igualdade de áreas, por exemplo, pode, para o caso de uma máquina, responder à indagação básica do tempo limite. A Fig. 8, a seguir, esclarece melhor.

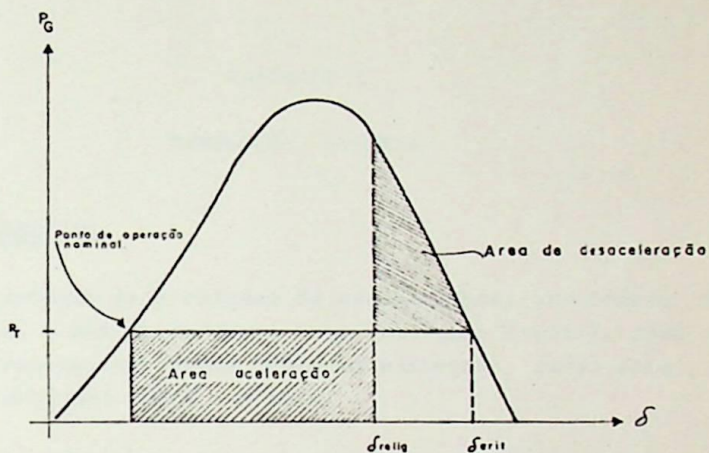


Figura 8

Aplicação do Critério das áreas Iguais.

Por observação de que o ângulo não pode ir além de crítico, o religamento deve ser feito, por inspeção da equação (2.14), no tempo máximo de:

$$t_{\max} = \sqrt{\frac{\delta_{\text{relig}} - 30}{2020}}$$

Note que o cálculo de t_{\max} foi obtido sem uma solução explícita das equações de equilíbrio dinâmico.

CAPÍTULO 3

SIMULAÇÃO DIGITAL

3.1 - OBJETIVO

Para a solução de problemas de estabilidade, envolvendo várias máquinas, o método indireto pela simulação digital, como visto anteriormente, apresenta inúmeras vantagens, razão pela qual ele é destacado neste capítulo.

3.2 - PROGRAMA UTILIZADO

O programa de estabilidade transitória utilizado neste estudo é o da Philadelphia Electric Co. (PECO), que resolve a equação de equilíbrio dinâmico (swing) pelo método de Park, enquanto que as equações do sistema de excitação são resolvidas pelo método das diferenças finitas.

Para se ter uma idéia da precisão do método numérico empregado, uma comparação feita com o programa CSMP (Continuous System Modeling Program) da IBM para vários métodos, Runge-Kutta de 4ª Ordem, Euler Modificado e Euler, apresenta resultados praticamente iguais durante a falta e após sua eliminação durante o primeiro "swing".

3.2.1 - Modelo da Máquina Síncrona

Nos estudos de estabilidade, a representação detalhada das máquinas síncronas conduz a um grande número de equações, das quais cinco são equações diferenciais (sem considerar aquelas correspondentes aos reguladores de tensão e de velocidade), e ainda exige a utilização de um grande número de parâmetros, sendo muitos destes de determinação difícil. Estes fatores, aliados à necessidade da solução numérica das equações diferenciais por

processos "ponto a ponto", obrigam a adoção de hipóteses simplificadoras para a redução do esforço computacional, para que os resultados obtidos tenham validade dentro da precisão aceita na prática. Estas hipóteses, no entanto, devem ser baseadas na realidade física do comportamento operacional da máquina.

Para intervalos de tempos Δt de integração numérica, suficientemente pequenos, são usuais as seguintes hipóteses:

- (1) Ao longo do intervalo Δt , como as variações dos enlaces de fluxo nos enrolamentos da armadura são pequenas, desprezam-se as derivadas destes enlaces em relação ao tempo; trabalhando-se nas variáveis dq isto implica em:

$$\frac{d\psi_d}{dt} = \frac{d\psi_q}{dt} = 0$$

Desta hipótese as correntes na armadura resultam-se senoidais, uma vez que as componentes de corrente contínua e de 2φ harmônico das tensões e correntes na armadura deixam de existir.

- (2) Como nos estudos de estabilidade são consideradas pequenas variações de velocidade, desprezam-se os efeitos destas sobre as tensões geradas.

As hipóteses (1) e (2) são usuais em todos os modelos de máquinas empregados nos estudos de estabilidade. A inclusão ou não de outras hipóteses simplificadoras pode conduzir a modelos mais sofisticados, dependendo das aproximações adotadas.

O modelo utilizado pelo programa PECO é o mais simples entre aqueles que permitem representar os reguladores de tensão. Além das hipóteses (1) e (2) são ainda adotados, no referido programa, as seguintes:

- (3) Os enlaces de fluxo do campo, Ψ_{fd} , são considerados constantes ao longo do intervalo Δt e igual ao valor no início do intervalo. Esta hipótese justifica-se pelo fato de que as constantes de tempo envolvidas são muito maiores que o intervalo de tempo Δt adotado.
- (4) Os efeitos das correntes nos enrolamentos amortecedores são desprezados. Esta hipótese dá resultados pessimistas para o caso de unidades eletricamente próximas, pois o efeito de amortecimento das oscilações entre estas, causados por aqueles enrolamentos, é desprezado.

Os enrolamentos amortecedores são responsáveis por um amortecimento na oscilação da máquina. O programa PECO considera um fator de amortecimento entre máquinas D_{12} , que pode levar em conta os conjugados de amortecimento, provocado pelos enrolamentos amortecedores, pelas cargas e pelos reguladores de velocidade. Assim, a utilização de um fator D_{12} conveniente entre máquinas próximas pode introduzir-se, de modo aproximado, o efeito do amortecimento introduzido por aqueles enrolamentos, para máquinas próximas eletricamente. Quando as máquinas estão distantes eletricamente, este efeito é praticamente desprezível.

- (5) A resistência da armadura das máquinas é desprezada. Esta hipótese é pessimista, pois a potência dissipada, na mesma, tem efeito amor

tecedor. Por esta razão, para casos de estudo de estabilidade com defeitos no terminal de uma máquina, o programa PECO considera uma redução de 15% na potência acelerante da mesma, durante o defeito.

- (6) A correção da saturação na máquina síncrona é feita considerando-se que o acréscimo da corrente necessária no campo é função da tensão de dispersão (E_l ou E_p).

$$\Delta E_I = A_G \cdot e^{B_G (E_p - 0,8)}$$

- (7) Quando o sistema de excitação usa excitatriz rotativa, a correção da saturação é feita considerando-se um acréscimo da corrente do campo da excitatriz, que é uma função exponencial da tensão nos terminais da mesma.

$$\Delta I_f = A_G \cdot \text{EXP}^{B_G (E_p - 0,8)}$$

3.2.2 - Solução das Equações Diferenciais

3.2.2.1 - Equação de Equilíbrio Dinâmico (Swing)

É usado o método de Park, no qual considera-se a potência acelerante constante durante o intervalo e igual àquela calculada no fim do intervalo anterior.

$$\Delta \omega_n = \frac{\Delta t}{M} (P_T - P_G)$$

$$\Delta \delta_n = \Delta t \cdot \omega_n - 1 + \frac{(\Delta t)^2}{M} (P_T - P_G)$$

O programa verifica se $\Delta\delta > 15^\circ$, subdividindo, quando isto ocorre, o intervalo em dois, ou ainda em quatro, de modo a obter a precisão adequada.

3.2.2.2 - Equações do Sistema de Controle (Reguladores de Tensão e de Velocidade)

É usado a diferença finita de 1ª ordem para representar derivadas (método do retângulo) e uma subrotina de simulação analógica.

O programa permite escolher o intervalo Δt para a solução das equações de controle, diferente daquele usado no cálculo do ângulo δ , usando $\Delta t = 0,005$ seg, se o mesmo não for especificado.

Com esta subrotina de simulação analógica, o programa permite representar reguladores de tensão e de velocidade em quaisquer modelos, bem como sinais adicionais.

3.2.3 - Fluxograma simplificado do Programa

A seguir, são apresentados o fluxograma básico do programa da PECO (Fig.9) e alguns comentários sobre detalhes não apresentados na figura.

- (1) No instante da eliminação da falta, $t = 0^+$, as tensões nas barras, excetuando-se aquela que apresentava defeito, tem as suas componentes multiplicadas por um fator $0,95/V$, onde V é a tensão na barra no instante $t = 0^-$, para permitir o cálculo das grandezas internas das máquinas.

quinas, levando-se em conta o aumento de ten
são, que ocorrer do instante $t = 0^+$ para $t = 0^-$,
 com a eliminação da falta.

- (2) Durante o curto-circuito é desprezada a varia-
 ção de E_ℓ numa determinada máquina, quando o
 curto é em seus terminais, tendo em vista que,
 nesta situação

$$E_\ell = E'_q \frac{X_\ell}{X'_d}$$

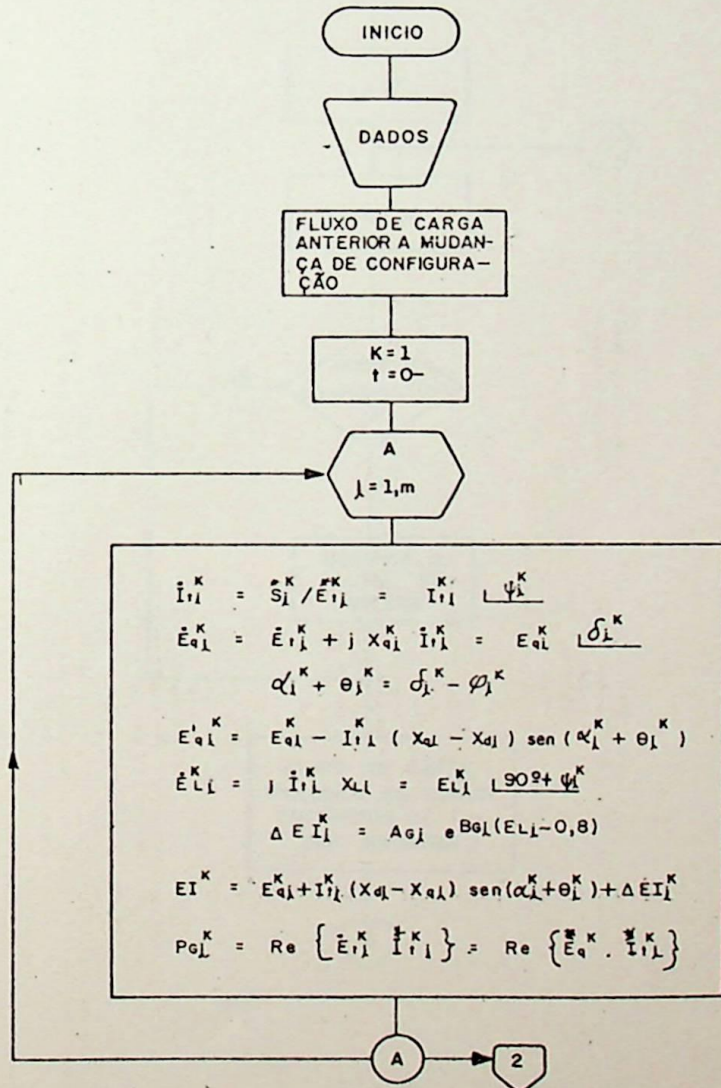
pois E'_q tem variação muito pequena no curto
 intervalo de tempo, em que a falta é elimina
da e ainda que $X < X'_d$, ficando, portanto, E_ℓ
 praticamente constante.

Figura 9

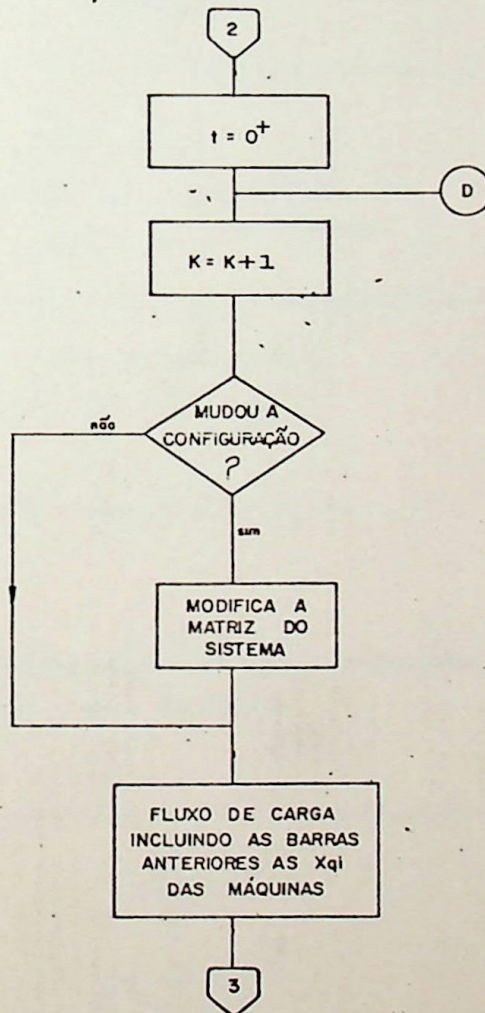
ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO PARA ANÁLISE DO PROGRAMA "TRANSTAB" DA PECO

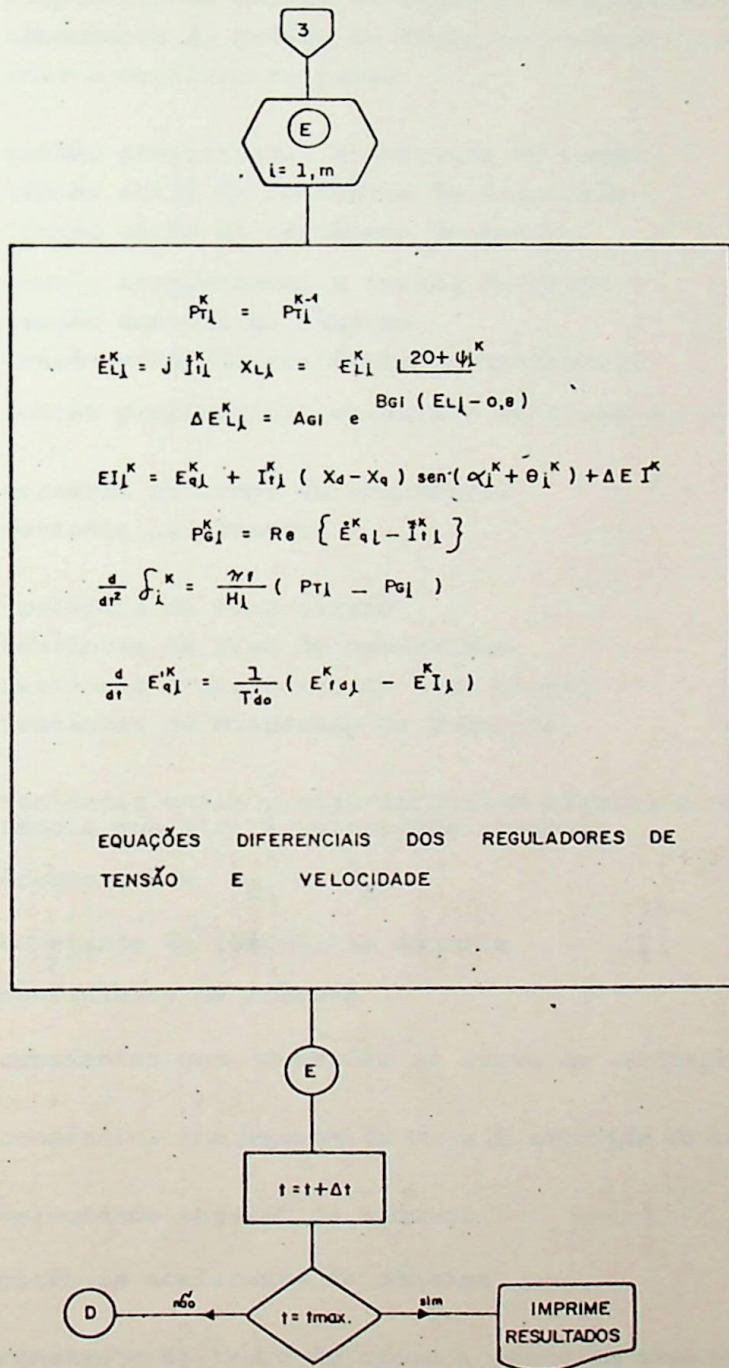
1. CONDIÇÕES INICIAIS



2 - FLUXO DE CARGA TRANSITÓRIO



3 - DETERMINAÇÃO DE $\delta(t)$



SIMBOLOGIA ADOTADA

Ψ_d	.....	componente do enlace de fluxo no eixo direto	
Ψ_q	.....	componente do enlace de fluxo no eixo de quadratura	
Ψ_{fd}	.....	enlace de fluxo no campo	
E_I	.....	tensão proporcional a corrente de campo	
E_L	.....	tensão atrás da reatância de dispersão	
E_p	.....	tensão atrás da reatância de Potier	
E_{fd}	.....	tensão proporcional a tensão do campo	
E_t	.....	tensão nominal da máquina	
E_q	.....	tensão atrás da reatância de quadratura	
E'_q	.....	tensão proporcional ao enlace de fluxo do campo	
I_d	.....	corrente no campo da excitatriz	
I_t	.....	corrente na armadura	
X_d	.....	reatância de eixo direto	
X_q	.....	reatância de eixo de quadratura	
X'_d	.....	reatância transitória de eixo direto	
X_ℓ	.....	reatância de dispersão da armadura	
δ	.....	reatância entre o eixo direto da máquina e uma referência que gira à velocidade síncrona	refe
θ	.....	ângulo entre \dot{E}_t e \dot{I}_t	
H	.....	constante de inércia da máquina	
M	.....	coeficiente de inércia	
A_g, B_g	...	constantes que dependem da curva de excitação da máquina	
A_{ex}, B_{ex}	...	constantes que dependem da curva de excitação da excitatriz	
ω	.....	velocidade angular da máquina	
P_a	.....	potência acelerante da máquina	
T'_{do}	.....	constante de tempo do campo a circuito aberto	

CAPÍTULO 4

SISTEMA BÁSICO

4.1 - OBJETIVO

O presente capítulo descreve com detalhes o sistema básico utilizado no estudo, onde procurar-se-á, no capítulo a seguir, avaliar as condições de estabilidade transitória, bem como selecionar os parâmetros adequados para as máquinas da usina a ser projetada, aqui designado Usina Hidroelétrica OURO PRETO.

4.2 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

As figuras 10 e 10A, a seguir, apresentam o diagrama simplificado do sistema e o fluxo de potência para a configuração em carga pesada, respectivamente, onde as usinas hidroelétricas CONGONHAS e SABARÁ são consideradas usinas existentes.

4.2.1 - Parâmetros dos Geradores

A tabela 1, a seguir, apresenta os parâmetros básicos das máquinas envolvidas no estudo. Os dados dos geradores da Usina Ouro Preto são valores típicos, enquanto que os das usinas de Congonhas e Sabará são valores existentes.

4.2.2 - Sistemas de Excitação

As figuras 11 e 12, a seguir, mostram os sistemas de excitação utilizados no programa PECO para as máquinas de Ouro Preto, Congonhas e Sabará, com a indicação dos ajustes dos diversos parâmetros envolvidos.

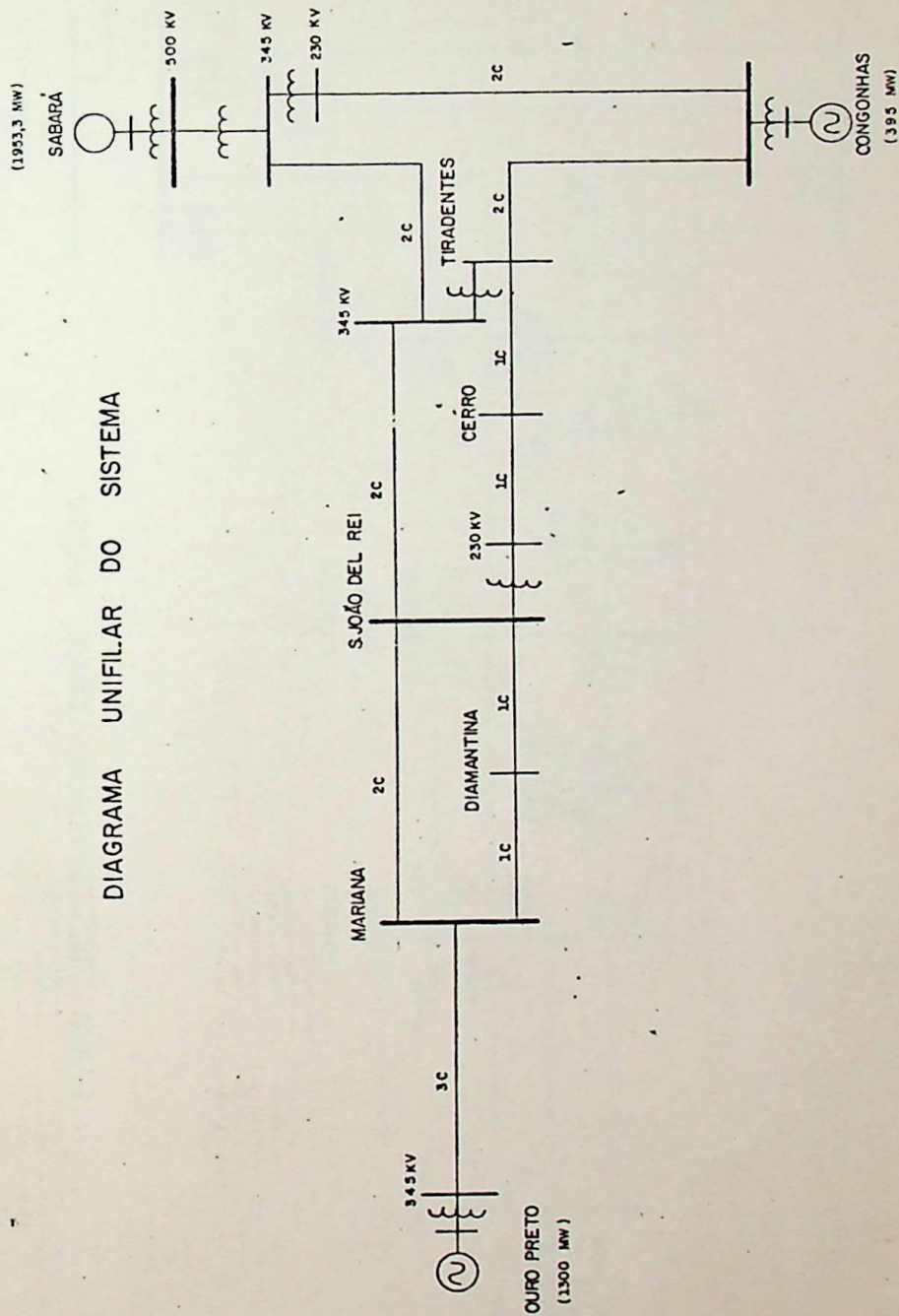
4.2.3 - Sinais Estabilizadores

Na usina Ouro Preto foi admitido a instalação de sinal estabilizador do tipo da Fig. 13, similar ao existente na usina hidroelétrica de Sabará.

4.2.4 - Arranjos das Subestações

As subestações de Ouro Preto, Mariana e Diamantina foram admitidas com arranjo do tipo barra dupla com disjuntor e meio.

DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA



FLUXO DE POTENCIA - CARGA PESADA

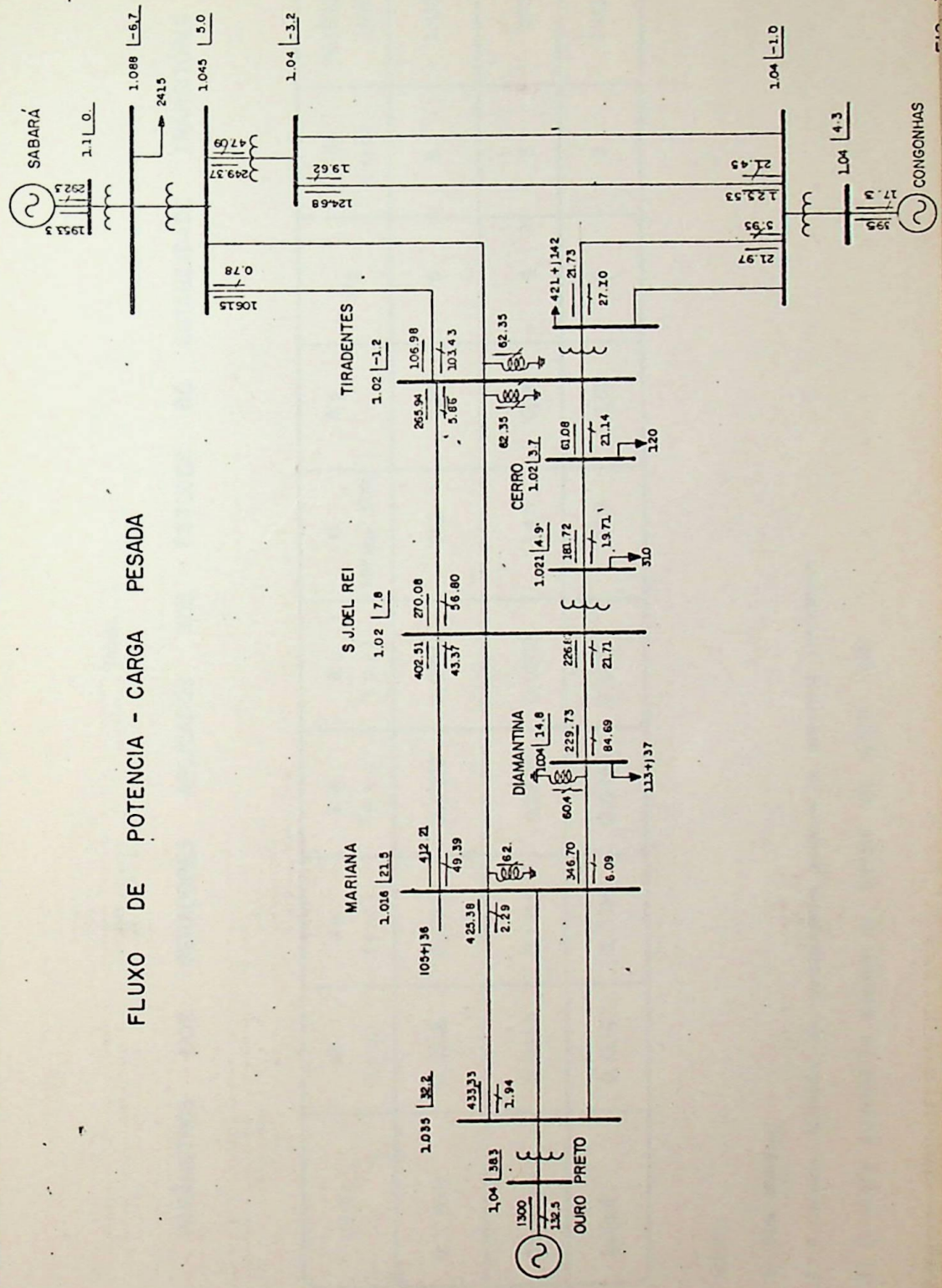


Tabela 1

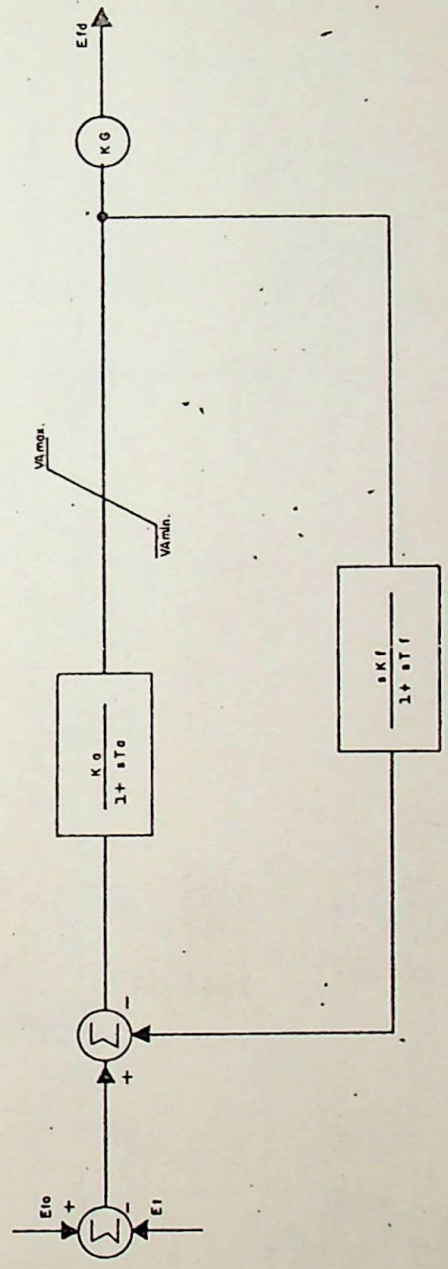
PARÂMETROS DOS GERADORES APLICADOS AOS ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

USINA	X'd (p.u.)	Xq (p.u.)	Xd (p.u.)	XL (p.u.)	H (MW.seg MVA)	A g	B g	T' do (seg)	POTÊNCIA (MW)
O. Preto	0,0218	0,0500	0,0600	0,0150	61,5	0,02	8	5	1300
Congonhas	0,0850	0,1725	0,2600	0,0500	14,0	0,02	8	5	395
Sabará	0,0136	0,0314	0,0364	0,0091	80,3	0,02	8	5	1913

NOTAS:

- 1) Base 100 MVA
- 2) A reatância equivalente dos transformadores elevadores foi considerado separadamente
- 3) Os valores atribuídos às máquinas de O.Preto são valores típicos.

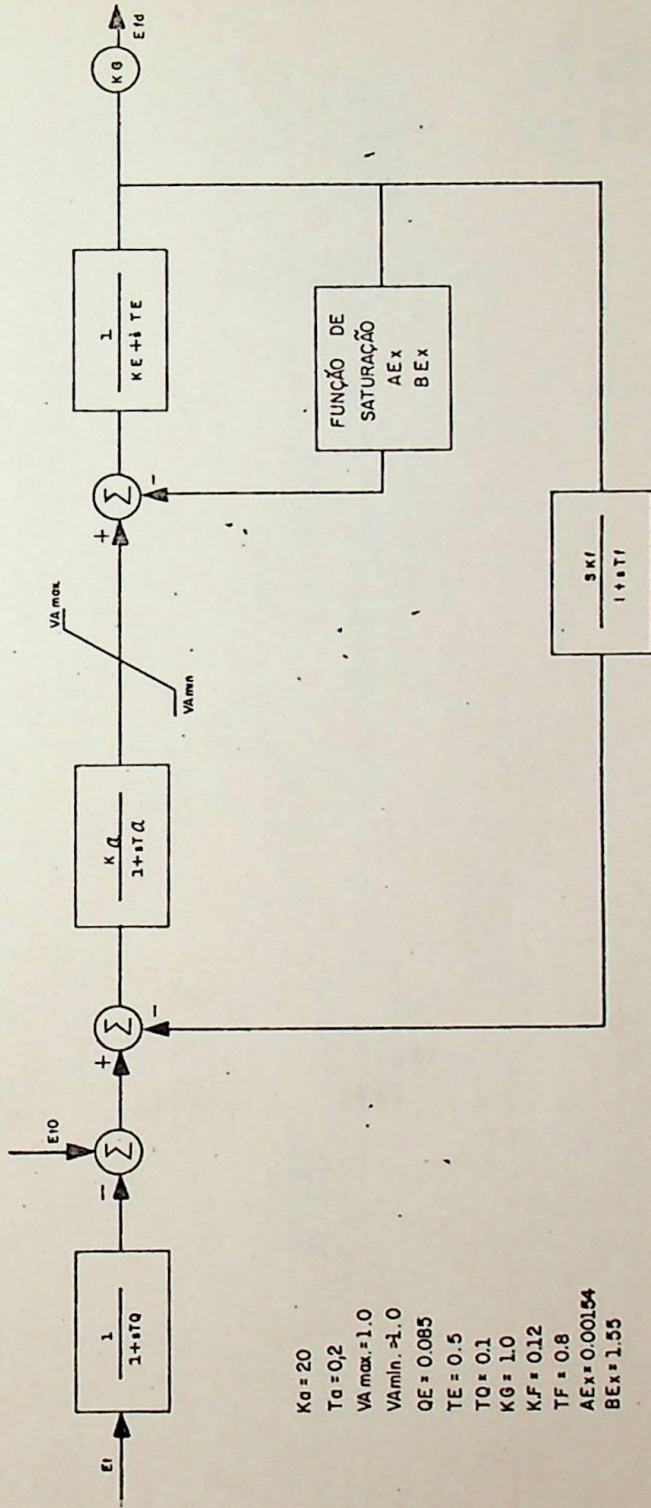
SISTEMA DE EXCITAÇÃO UTILIZADO NO PROGRAMA PJM PARA AS MÁQUINAS DE OURO PRETO E SABARA
 (IEEE TIPO 1-S CONTROLLED RECTIFIER EXCITATION SYSTEM)



$K_0 = 200$
 $T_0 = 0,02$
 $K_f = 0,01$
 $T_f = 1$
 $\left\{ \begin{array}{l} V_{A \text{ max.}} = 4 \text{ Pu} \\ V_{A \text{ min.}} = -3,2 \end{array} \right.$
 $K_G = 1$

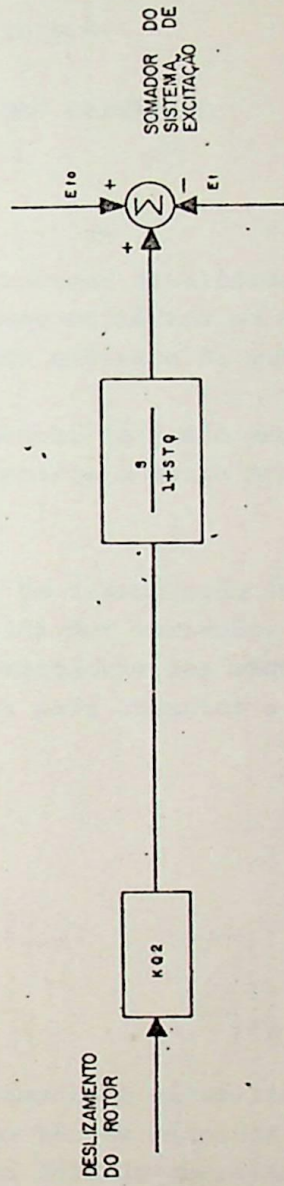
(*) Valores típicos atribuídos às máquinas de O. Preto

SISTEMA DE EXCITAÇÃO UTILIZADO NO PROGRAMA PJM PARA AS MÁQUINAS DE CONGONHAS
 (AMPLIDYNE VOLTAGE REGULATOR EXCITATION SYSTEM)



$K_d = 20$
 $T_0 = 0,2$
 $V_{A \max} = 1,0$
 $V_{A \min} = -1,0$
 $OE = 0,085$
 $TE = 0,5$
 $T_0 = 0,1$
 $KG = 1,0$
 $KF = 0,12$
 $TF = 0,8$
 $A_{EX} = 0,00154$
 $B_{EX} = 1,55$

SISTEMA ESTABILIZADOR DE VELOCIDADE DO PROGRAMA P-JM UTILIZADO
NAS MÁQUINAS DE OURO PRETO E SABARÁ



K02 = 80
T0 = 2.5seg
K02 = 40
T0 = 1.5seg

CAPÍTULO 5

INFLUÊNCIA DOS CRITÉRIOS

5.1 - OBJETIVO

Como indicado no sumário, a principal finalidade deste trabalho é analisar a influência de alguns critérios no estudo da estabilidade transitória de um sistema elétrico de potência.

Dos três critérios aqui utilizados, dois são empregados por companhias de reconhecida experiência e o outro aparece como tentativa.

Procurando-se manter o sistema de transmissão inalterável, a estabilidade transitória foi obtida por variações de inércia, reatância transitória e teto da excitatriz das máquinas, conforme indicado anteriormente em meios para aumentar a estabilidade transitória.

5.2 - INTRODUÇÃO

Sob o ponto de vista de planejamento a estabilidade de um grande sistema de potência, envolvendo várias máquinas, deve ser avaliado para cada adição de uma nova unidade geradora de porte.

É bom lembrar que estes mesmos estudos podem ser executados com outras finalidades, se julgar necessário, a fim de assegurar o cumprimento dos critérios de planejamento. Entre elas:

- a.) determinar a efetividade das alternativas de transmissão planejadas;

- b.) determinar as restrições operativas de uma determinada configuração de transmissão;
- c.) determinar os tempos de eliminação de defeitos por ação de relés de primeira linha e retaguarda;
- d.) se há necessidade de algum equipamento ou alguma precaução adicional.

É impossível antecipar ou testar o sistema de potência para todas as contingências que podem ocorrer. No entanto, certos testes de contingências anormais são executados para medir a habilidade do sistema em suportar defeitos, além daqueles que podem realmente ser esperados.

Como exemplo destas contingências anormais tem-se:

- A. Perda repentina de toda capacidade de geração de uma estação.
- B. Perda simultânea de duas linhas de transmissão críticas.
- C. Perda repentina de todas as linhas que deixam uma única subestação de manobra.
- D. Perda repentina de todas as linhas em uma dada faixa de serviço.
- E. Ocorrência de uma falta 3Ø com eliminação retardada.

Ao testar o sistema para estes tipos de contingências, somente uma contingência de cada vez deve ser considerada. O custo para evitar a perda de carga, durante um distúrbio anormal, deve ser avaliada para ajudar na decisão. Os três fatores seguintes, inter-relacionáveis, devem ser considerados:

- 1. Consequência do defeito.
- 2. Probabilidade de ocorrência do defeito.
- 3. Custo.



5.3 CRITÉRIOS

CRITÉRIO A (BPA)

- Sistema com todas as linhas em serviço.

a) Suposição normal:

O sistema deve ser estável para um defeito 3Ø com abertura permanente de um circuito de 345 kV em 6 ciclos.

b) Suposição opcional:

O sistema deve ser estável para um defeito 2Ø-terra no mesmo local, como em (a), ou em defeito 3Ø a 1,5 km do barramento principal da subestação, após a abertura permanente de um circuito de 345 kV em 6 ciclos.

c) Barra principal de carga ou geração:

O sistema deve ser estável para perda de uma seção de barra por disjuntor preso, após um defeito 3Ø, durante 10 ciclos.

- Comportamento do Sistema.

O sistema será considerado estável, desde que satisfaça as seguintes condições:

- Amortecimento positivo das oscilações;
- Ausência de oscilações de potência nas máquinas que acarretem motorização;
- As tensões não podem permanecer abaixo de 90% da tensão de regime por mais de 1 segundo.

CRITÉRIO B (PP&L)

- Sistema com todas as linhas em serviço.

a) O sistema deve ser estável para um defeito 3Ø com abertura permanente de um circuito de 345 kV em 6 ciclos.

b) O sistema deve ser estável para um defeito 1Ø com disjuntor preso com abertura permanente de um circuito de 345 kV em 15 ciclos.

c) O sistema deve ser estável para um defeito 3Ø na subestação mais próxima, com abertura permanente de um circuito de 345 kV em 10 ciclos.

- Comportamento do Sistema.

O sistema será considerado estável, desde que satisfaça as seguintes condições:

- Amortecimento positivo das oscilações;
- Ausência de oscilações de potência nas máquinas que acarretem motorização;
- As tensões não podem permanecer abaixo de 90% da tensão de regime por mais de 1 segundo.

CRITÉRIO C (tentativa)

- Sistema com todas as linhas em serviço.

a) O sistema deve ser estável para um defeito 3Ø com abertura permanente de um circuito de 345 kV em 6 ciclos.

b) O sistema deve ser estável para um defeito 1Ø com um disjuntor preso com a abertura permanente de um ou dois circuitos de 345 kV em 15 ciclos.

- Sistema com uma seção de linha em manutenção.

O sistema deve ser estável para um defeito 1Ø com abertura em 6 ciclos de um circuito de 345 kV e com religamento tripolar do mesmo com sucesso.

- Comportamento do Sistema.

O sistema será considerado estável, desde que satisfaça as seguintes condições:

- Amortecimento positivo das oscilações;
- Ausência de oscilações de potência nas máquinas que acarretem motorização;
- As tensões não podem permanecer abaixo de 90% da tensão de regime por mais de 1 segundo.

ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA
Carga Pesada em Ouro Preto 345KV

TAB. 1

DEFEITO	LOCAL (345 KV)	LINHA ISOLADA 1LT de 345KV	TEMPO DE ABERTURA (ciclos)	MAQUINAS DE O. PRETO			ANGULO MÁXIMO ENTRE O PRETO E SABARA	COMPORTAMENTO SISTEMA	DO
				H KWh/seg/KVA	X'd (%)	TEITO (p.u)			
3ø	O. PRETO	O. PRETO-MARIANA	6	3,65	30	4,0	-	INSTÁVEL	
			4	3,65	30	4,0	100	ESTÁVEL	
			6	3,65	30	5,5	-	INSTÁVEL	
			6	4,00	30	5,5	-	INSTÁVEL	
			6	4,00	30	7,5	-	INSTÁVEL	
			6	4,00	25	4,0	-	INSTÁVEL	
			6	4,50	30	5,5	109	ESTÁVEL	
			6	4,50	30	7,5	90	ESTÁVEL	
			6	5,00	30	4,0	107	ESTÁVEL (só até 1 seg)	
			6	6,00	30	4,0	92	ESTÁVEL	

ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA
Carga Pesada
Defeito Trifásico em Ouro Preto 345KV

TAB. 2

DEFEITO	LOCAL (345 KV)	LINHA ISOLADA ILT de 345KV	TEMPO DE ABERTURA (ciclos)	MÁQUINAS DE O. PRETO			ANGULO MÁXIMO ENTRE O. PRETO E SABARA	COMPORTEMENTO SISTEMA	DO
				H kW _{avg} /KV _{LN}	X _d (%)	TETO (P.U)			
3Ø	O. PRETO	O. PRETO-MARIANA	10	4,5	30	5,5	-	INSTÁVEL	
			10	5,0	30	5,5	-	INSTÁVEL	
			10	6,0	30	5,5	-	INSTÁVEL	
			10	6,0	30	7,5	118,6°	ESTÁVEL	
			10	7,5	30	7,5	96,9°	ESTÁVEL	

ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA
Carga Pesada em Mariana 345KV
Defeito Trifásico em Mariana 345KV

TAB. 3

DEFEITO	LOCAL (345 KV)	LINHA ISOLADA 1LT de 345KV	TEMPO DE ABERTURA (ciclos)	MÁQUINAS DE O. PRETO			ÂNGULO MÁXIMO ENTRE O. PRETO E SABARÁ	COMPORTAMENTO SISTEMA	DO
				H kVAseg/KVA	X _d (%)	TETO (p.u)			
3Ø	MARIANA	O. PRETO-MARIANA	10	7,5	30	7,5	84,5°	ESTÁVEL	
			10	6,0	30	7,5	97,5°	ESTÁVEL	
			10	6,0	30	5,5	122°	ESTÁVEL	
			10	5,0	30	5,5	-	INSTÁVEL	
			10	5,0	30	7,5	119,9°	ESTÁVEL	
			10	4,5	30	7,5	-	INSTÁVEL	

ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA
Carga Pesada
Defeito Monofasico (Stuck - Breaker)

TAB. 4

DEFEITO	LOCAL (345 KV)	LINHA ISOLADA 1 LT de 345 KV	TEMPO DE ABERTURA (ciclos)	MÁQUINAS DE O. PRETO			ANGULO MÁXIMO ENTRE O. PRETO E SABARÁ	COMPORTAMENTO SISTEMA	DO
				H KW ₅₀₀ /KV ²	X _d (%)	TETO (p.u)			
1Ø	O. PRETO	O. PRETO-MARIANA	10	4,5	30	5,5	86,2°	ESTÁVEL	
1Ø	MARIANA (no disjuntor do meio)	O. PRETO-MARIANA MARIANA-S. J REI	10	4,5	30	5,5	73,1°	ESTÁVEL	
1Ø	O. PRETO	O. PRETO-MARIANA	6	4,5	30	5,5	-	INSTÁVEL c/ religamento em 30 ciclos após o isolamento do defeito	
1Ø	O. PRETO	O. PRETO-MARIANA	6	5,0	30	5,5	110,1	ESTÁVEL c/ religamento em 30 ci clos após o isolamento do defeito	
(*)									

ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA
Carga Pesada
Defeito Monofásico (Stuck - Breaker)

TAB. 5

DEFEITO	LOCAL (345 KV)	LINHA ISOLADA 1 LT de 345KV	TEMPO DE ABERTURA (ciclos)	MÁQUINAS DE O. PRETO			ANGULO MÁXIMO ENTRE O. PRETO E SABARA	COMPORTAMENTO SISTEMA	DO
				H KVAeq/KVA	X'd (%)	TETO (p,u)			
1Ø	O. PRETO	O. PRETO-MARIANA	15	4,5	30	7,5	102,5°	ESTÁVEL	
1Ø	MARIANA (no disjuntor do meio)	O. PRETO-MARIANA MARIANA-DIAMANT.	15	4,5	30	7,5	64,3°	ESTÁVEL	
1Ø	MARIANA (no disjuntor do meio)	O. PRETO-MARIANA MARIANA-S.J.REI	15	4,5	30	7,5	68,9°	ESTÁVEL	
1Ø	MARIANA	MARIANA-DIAMANT.	15	4,5	30	7,5	61°	ESTÁVEL	c/ religamento em 30 ciclos após o isolamento do defei- to
(*)									

ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Carga Pesada em Terra em Ouro Preto 345KV TAB-6

DEFEITO	LOCAL (345KV)	LINHA ISOLADA 1LT de 345KV	TEMPO DE ABERTURA (ciclos)	MÁQUINAS DE O. PRETO			ANGULO MÁXIMO ENTRE O. PRETO E SABARA	COMPORTAMENTO SISTEMA	DO
				H KWseg./kVA	X _d (%)	TETO (p.u)			
2Ø-T	O. PRETO	O. PRETO-MARIANA	6	4,5	30	5,0	93,0°	ESTÁVEL	
			6	4,0	30	5,0	103,6°	ESTÁVEL	
			6	4,0	30	4,0	-	INSTÁVEL	

5.4 - CONCLUSÕES PARCIAIS

5.4.1 - Critério A

Os estudos de estabilidade, segundo o critério A, revelam que a adoção para as máquinas de Ouro Preto, de uma inércia de 6,0 kW.seg/kVA, reatância transitória de 30% e teto na excitatriz de 7,5 p.u., seria um bom compromisso, tendo em vista os requisitos de estabilidade transitória e controle de tensão.

- a) O defeito mais severo foi aquele localizado no barramento de 345 kV de Ouro Preto-Mariana.
- b) O tipo de defeito mais severo foi o trifásico "stuck-breaker" 10 ciclos, que governou a seleção dos parâmetros das máquinas e controles de Ouro Preto.

Este tipo de defeito, com tempo de exposição mais elevado, num outro tipo de arranjo, poderia ser mais suave; no entanto, para o caso presente, foi o mais severo, porque ocasionou a perda de um circuito, além da barra defeituosa.

- c) Para a simulação de defeitos bifásicos com terra, a adoção de uma inércia de 4,00 kW.seg/kVA, com uma reatância transitória de 30% e um teto na excitatriz de 5,0 p.u., revelou-se suficiente.
- d) Para a simulação de defeitos trifásicos, a adoção de uma inércia de 4,5 kW.seg/kVA, com uma reatância transitória de 30% e um teto na excitatriz de 5,5 p.u., revelou-se dinamicamente estável.

- e) A aplicação de defeitos trifásicos "stuck-breaker" 10 ciclos exigiu a elevação da inércia até 6,00 kW.seg/kVA e o teto da excitatriz até 7,5 p.u., com reatância transitória de 30%, de forma a manter a estabilidade do sistema.

5.4.2 - Critério B

Os estudos de estabilidade, segundo o critério B, revelam que a adoção para as máquinas de Ouro Preto, de uma inércia de 5,0 kW.seg/kVA, reatância transitória de 30% e teto na excitatriz de 7,5 p.u., seria um bom compromisso, tendo em vista os requisitos de estabilidade transitória e controle de tensão.

- a) O defeito mais severo foi aquele localizado no barramento de 345 kV de Mariana, com abertura de um circuito Ouro Preto-Mariana.
- b) O tipo de defeito mais severo foi o trifásico 10 ciclos, que governou a seleção dos parâmetros das máquinas e controles de Ouro Preto.
- c) Para a simulação de defeitos trifásicos, a adoção de uma inércia de 4,5 kW.seg/kVA com uma reatância transitória de 30% e um teto na excitatriz de 5,5 p.u., revelou-se dinamicamente estável.
- d) A aplicação de defeitos monofásicos "stuck breaker" 15 ciclos, exigiu a elevação do teto da excitação de Ouro Preto de 5,5 para 7,5 p.u., de forma a manter a estabilidade do sistema.
- e) A aplicação de defeitos trifásicos, na SE mais próxima de Mariana, durante 10 ciclos, exigiu a elevação da inércia para 5,0 p.u., de forma a manter a estabilidade do sistema.

5.4.3 - Critério C

Os estudos de estabilidade, segundo o critério C, revelam que a adoção para as máquinas de Ouro Preto, de uma inércia de 4,5 kW.seg/kVA, reatância transitória de 30% e teto na excitatriz de 7,5 p.u., seria um bom compromisso, tendo em vista os requisitos de estabilidade transitória e controle de tensão.

- a) O defeito mais severo foi aquele localizado no barramento de 345 kV de Ouro Preto, com abertura de um circuito Ouro Preto-Mariana.
- b) O tipo de defeito mais severo foi o monofásico "stuck-breaker" 15 ciclos, que governou a seleção dos parâmetros das máquinas e controles de Ouro Preto.
- c) Para um relaxamento no tempo de abertura do defeito monofásico de 15 para 10 ciclos, conseguiu-se reduzir o "ceiling" da excitatriz para 5,5 p.u., porém, houve a necessidade de aumentar a inércia de 4,5 para 5,0, a fim de garantir a estabilidade do sistema para um defeito em um circuito, estando o outro em manutenção, com religamento com sucesso.
- d) Para a simulação de defeitos trifásicos, a adoção de uma inércia de 4,5 kW.seg/kVA, com uma reatância transitória de 30% e um teto na excitatriz de 5,5 p.u., revelou-se dinamicamente estável.
- e) A aplicação de defeitos monofásicos "stuck-breaker" 15 ciclos, exigiu a elevação do teto da excitatriz de Ouro Preto de 5,5 para 7,5 p.u., de forma a manter a estabilidade do sistema.

TABELA 7

RELAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS E OS ESTUDOS

345 KV

CRITÉRIO	DESCRIÇÃO	TABELA	MÁQUINAS DE O. PRETO		
			H	X'd	TETO
A (BPA)	- Suposição normal Estável para um defeito 3 ϕ , abertura permanente de um circuito em 6 ciclos	1	4,50	30	5,5
	- Suposição opcional Estável para um defeito 2 ϕ -T, abertura permanente de um circuito em 6 ciclos	6	4,00	30	5,0
	- Estável para um defeito 3 ϕ para perda de uma seção de barra por disjuntor preso, 10 ciclos	2	6,00	30	7,5
B (PP&L)	Estável para um defeito 3 ϕ , abertura permanente de um circuito em 6 ciclos	1	4,50	30	5,5
	Estável para um defeito 1 ϕ , com disjuntor preso, abertura permanente de um circuito em: 15 ciclos 10 ciclos	5 4	4,50 5,00	30 30	7,5 5,5
	Estável para um defeito 3 ϕ na SE mais próxima, abertura permanente de um circuito em 10 ciclos	3	5,00	30	7,5
C (tentativa)	Estável para um defeito 3 ϕ abertura permanente de um circuito em 6 ciclos	1	4,50	30	5,5
	Estável para um defeito 1 ϕ com disjuntor preso abertura permanente de um circuito em: 15 ciclos 10 ciclos	5 4	4,5 5,0	30 30	7,5 5,5

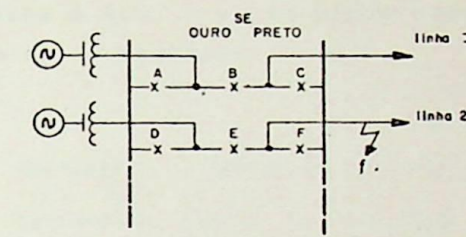
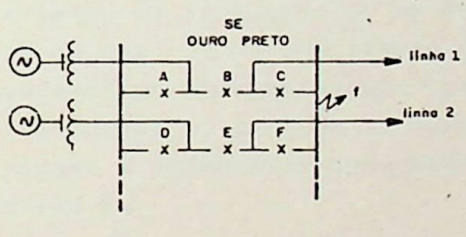
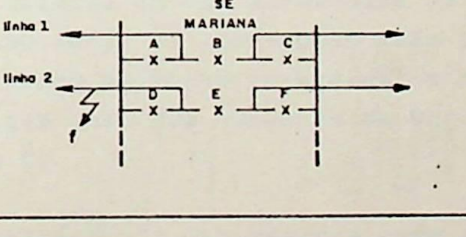
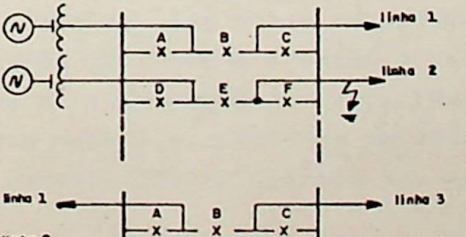
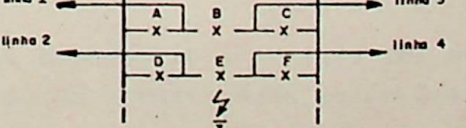
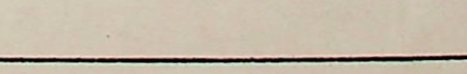
BPA - Bonneville Power Administration

PP&L - Pennsylvania Power and Light

Des: Luiz C. S.

FIGURA 14

CARACTERIZAÇÃO DOS DEFEITOS

TABELA	SITUAÇÃO	CARACTERÍSTICA
1		<p>Defeito 3Ø em f, abertura da linha 2 em 6 ciclos.</p>
6		<p>Defeito 2Ø-T em f, abertura da linha 2 em 6 ciclos.</p>
2		<p>Defeito 3Ø em f, disjuntor C preso, abertura da linha 1 em 10 ciclos.</p>
3		<p>Defeito 3Ø em f, abertura da linha 2 em 10 ciclos.</p>
4 e 5		<p>Defeito 1Ø-T em f, abertura da linha 2 em 6 e 10 ciclos.</p>
4 e 5		<p>Defeito 1Ø-T em f, disjuntor E preso, abertura das linhas 2 e 4 em 10 e 15 ciclos.</p>

5.5 - CONCLUSÕES FINAIS

- a) Os critérios em discussão, para a estabelecida confiuração do sistema, mostram-se comparáveis, conforme mostra a tab. 7 e, em ordem crescente de severidade, tem-se o seguinte:

	H	X'd	Teto
1º Critério C (tentativa)	4,5	30	7,5
2º Critério B (PP & L)	5,0	30	7,5
3º Critério A (BPA)	6,0	30	7,5

- b) O critério A (BPA) mostra-se o mais severo de todos para um defeito numa seção de barra com disjuntor preso e tempo de exposição de 10 ciclos. Como pode ser visto na Fig. 14, a ocorrência deste defeito provoca a abertura permanente de uma linha; daí concluir-se que uma alteração no arranjo da subestação da usina poderá tornar a severidade do critério A comparável com o critério B.
- c) Um defeito 3Ø com eliminação retardada de 10 ciclos, mesmo sendo na subestação mais próxima, é ainda uma condição bastante severa; daí o porquê do critério exigir mais das máquinas de Ouro Preto do que o critério C.
- d) O critério C, que aparece como tentativa, não admite defeitos 3Ø, com tempo retardado de eliminação, na subestação da usina e próximo à usina. Com tempo retardado de eliminação são admitidas somente faltas 1Ø. Assim mesmo, a diferença em relação ao critério B é de somente 10% na inércia das máquinas de Ouro Preto.
- e) Pelo exposto em (a), (b), (c) e (d), o tempo de eliminação do defeito é da maior importância na definição

de critérios de estudos de estabilidade, estando o mesmo à frente do tipo e da localização. É bom lembrar que os tempos aqui mencionados são para 345 kV. Para outras tensões, aconselha-se usar tempos compatíveis.

- f) Numa análise geral dos critérios, podemos ainda notar que no critério A, o defeito 2Ø-T, em sua suposição opcional, representa uma menor solicitação do sistema como era de se supor e que, no critério B, o tempo retardado de abertura para defeitos 3Ø, com a atual filosofia de proteção de retaguarda local, tem pouca probabilidade de ocorrer.

- g) Em vista das observações expostas, podemos concluir que o critério C é bastante razoável aconselhando-se sua aplicação no dimensionamento das máquinas da usina de Outro Preto do sistema em estudo.

BIBLIOGRAFIA

- 1) ELGERD, Olle I. Electric Energy Systems Theory. An Introduction Bombay-New Delhi, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd. , 1971. 564 p.
- 2) KIMBARK, Edward W. Power System Stability: Synchronous Machines . New York, Dover Publications, Inc., 1968. 322 p.
- 3) SAUER, Rudolf Trabalho sobre máquinas síncronas e sua aplicação em sistemas elétricos. Instituto Militar de Engenharia, 1969. 42 p.
- 4) ELETROBRÁS - DECS-ET-002/74 Análise do Programa de Estabilidade da Philadelphia Electric Co. Departamento de Coordenação de Sistemas, 1974. 22 p.
- 5) BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION Reliability Criteria and Standards, 1971
- 6) PENNSYLVANIA POWER AND LIGHT Bulk Power System Planning Principles & Practices.