



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Grupo de Sistemas Elétricos



---

## Trabalho de Conclusão de Curso

Avaliação da Estabilidade Transitória Considerando os  
Efeitos de Acoplamento e Transposição entre Linhas de  
Transmissão no Cálculo do TCE

Wilker Victor da Silva Azevêdo

Orientador: Washington L. A. Neves, Ph.D

Campina Grande – PB  
Março de 2008.



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

---

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Grupo de Sistemas Elétricos

---

Avaliação da Estabilidade Transitória Considerando os Efeitos de  
Acoplamento e Transposição entre Linhas de Transmissão no  
Cálculo do TCE

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em  
cumprimento parcial às exigências para obtenção do Grau de Engenheiro  
Eletricista.*

*Wilker Victor da Silva Azevêdo*

Wilker Victor da Silva Azevêdo (Aluno)

---

Washington L. A. Neves, Ph.D (Orientador)

Campina Grande – PB  
Março de 2008.

## Agradecimentos

Agradeço a DEUS pela presença constante em minha vida.

Aos meus pais, Cláudio Antônio e Dulce, ao meu irmão Cláudio Jr e às minhas irmãs Monelly Sonally e Mirelly Renally, pelo apoio incessante que se faz base da minha motivação e formação pessoal.

Ao Prof. Washington Luiz de Araújo Neves, pela orientação, encaminhamento dos estudos, confiança na realização deste trabalho e pela experiência que me foi concedida como monitor.

Ao Prof. Damásio Fernandes Júnior, pelo incentivo, discussões e colaboração no compartilhamento de conhecimentos.

À Adail e Rosilda, pela paciência, bons conselhos e pela solução de algumas dificuldades de ordem acadêmica.

Aos meus tios, tias e demais familiares, pela compreensão dos momentos de ausência e pelo constante apoio.

Aos amigos e colegas que convivi, em especial à Cícero, Célio, Nelson, Joelma Ítalo, Josenildo, Cláudio, André, Jairo, Karolie, Valentina e Thiago, pelos agradáveis diálogos, companheirismo e amizade.

Aos professores e funcionários do Laboratório de Alta Tensão.

## Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para análise da estabilidade transitória angular em sistemas elétricos que apresentam linhas de transmissão com forte acoplamento eletromagnético. O estudo de fluxo de carga contempla a inclusão dos parâmetros mútuos de seqüência positiva das linhas e a forma como os circuitos são transpostos. Uma rotina que contempla a obtenção da matriz expandida da rede e a utilização do método de Kron foi desenvolvida para aplicação do critério das áreas na análise de um transitório eletromecânico e obtenção do tempo crítico de extinção (TCE) para uma perturbação severa. Os resultados mostram que a potência reativa da rede é fortemente afetada quando da inclusão dos efeitos do acoplamento entre as linhas de transmissão no estudo de fluxo de potência. Além disso, esse fator incide na alteração da margem de estabilidade esperada para o gerador síncrono avaliado. As discrepâncias obtidas são afetadas diretamente pela constante de inércia e reatância transitória da máquina síncrona e estes podem atenuar as diferenças esperadas quando se levam em consideração os efeitos de acoplamento na obtenção do TCE.

## Abstract

This work presents a methodology for analysis of transient stability in power systems which have transmission lines with strongly electromagnetic coupling. The power flow study includes the mutual positive sequence parameters of the lines and the transposition schemes. A routine which includes the network expanded matrix and its reduction by the Kron's method has been developed for application of the equal area criterion (EAC) in the electromechanical transient analysis and calculus of the critical clearing time (CCT). The results show that the reactive power is strongly affected when the coupling effects between transmission lines are computed in power flow study. Furthermore, this factor change the stability margin expected for the synchronous generator evaluated. The discrepancies are directly affected by the inertia constant and transient reactance of synchronous machine and they can attenuate the differences when the coupling effects into account to obtain the CCT.

---

---

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
1.1 Considerações Iniciais.....	01
1.2 Motivação.....	02
1.3 Revisão Bibliográfica.....	02
1.4 Objetivo.....	03
<b>2. ESTABILIDADE TRANSITÓRIA.....</b>	<b>04</b>
2.1 Estabilidade Transitória Angular.....	04
2.1.1 Relação entre Potência e Ângulo de Torque.....	04
2.1.2 Equação de Oscilação da Máquina Síncrona.....	06
2.1.3 Análise Qualitativa de um Sistema Tipo Máquina Síncrona Conectada a um Barramento Infinito.....	08
2.2 Critério das Áreas Iguais.....	09
2.2.1 Hipóteses do Critério.....	12
2.2.2 Tempo Crítico de Extinção (TCE).....	13
<b>3. MODELAGEM DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO.....</b>	<b>16</b>
3.1 Representação das Linhas de Transmissão de Circuitos Paralelos.....	16
3.1.1 Circuito $\pi$ Equivalente para uma Linha de Transmissão.....	16
3.1.2 Assimetria entre Condutores.....	17
3.2 Linhas de Transmissão Equilibradas.....	18
3.3 Componentes Simétricas para Linhas de Transmissão Transpostas de Circuito Duplo.....	20
3.3.1 Esquema de Transposição de Três Seções de Circuitos Paralelos.....	20

---

---

3.1.1.1 Transposição em Sentido Contrário.....	21
3.3.1.2 Esquema de Transposição de Nove Seções de Circuitos Paralelos.....	23
3.4 Linhas de Transmissão de Feixe Expandido.....	25
3.4 Método de Kron – Redução de Matrizes de Redes.....	26
3.5.1 Sistema com Três Barras.....	27
3.5.2 Generalização do Método.....	27
3.5.2 Matriz Expandida.....	28
<b>4. PLATAFORMAS DE SIMULAÇÃO.....</b>	<b>29</b>
4.1 Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão.....	29
4.2 Fluxo de Carga em Regime Permanente.....	29
4.3 Simulink.....	30
4.4 Simulações Realizadas e Descrição do Sistema.....	31
<b>5. METODOLOGIA DE ANÁLISE.....</b>	<b>34</b>
5.1 Representação dos Parâmetros da Rede.....	34
5.2 Obtenção dos Parâmetros de Sequência Positiva das Linhas de Transmissão.....	35
5.3 Fluxo de Potência.....	37
5.4 Desempenho Transitório Considerando o Cálculo do TCE.....	37
5.5 Obtenção da Resolução Numérica.....	38
5.6 Fluxograma do Processo.....	39
<b>6. RESULTADOS E ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES.....</b>	<b>41</b>
6.1 Simulação em Regime Permanente.....	41
6.2 Solução Numérica na Análise da Estabilidade Contra Perda de Sincronismo.....	42
6.2.1 Avaliação Inicial.....	42



---

---

6.2.2	Análise de Comportamento Transitório.....	42
6.3	Avaliação do TCE a partir da Rotina Desenvolvida.....	44
6.4	Análise da Dependência dos Parâmetros do Circuito.....	46
6.4.1	Constante de Inércia.....	46
6.4.2	Reatância transitória.....	46
6.5	Considerações.....	47
<b>7.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>49</b>
	<b>ANEXO 1 – ROTINA PARA CÁLCULO DA TENSÃO INTERNA DO GERADOR E REDUÇÃO DA REDE PELO MÉTODO DE KRON.....</b>	<b>51</b>
	<b>ANEXO 2 – ROTINA PARA OBTENÇÃO DOS ELEMENTOS DA MATRIZ DE ADMITÂNCIA NODAL REDUZIDA E PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO NOS TRÊS ESTÁGIOS.....</b>	<b>54</b>
	<b>ANEXO 3 – ROTINA PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ABERTURA ANGULAR E CÁLCULO DO TCE.....</b>	<b>55</b>

# 1. INTRODUÇÃO

A representação dos elementos de um sistema de potência é um fator de grande importância na simulação e caracterização dos efeitos transitórios em estudos de estabilidade. Considerando que a rede está frequentemente sujeita à perturbações de diversos gêneros, torna-se fundamental a determinação da influência destes fenômenos nas respostas esperadas pelas máquinas síncronas e nos tempos estimados para atuação de relés e disjuntores na detecção de possíveis perdas de sincronismo.

A análise da representação dos efeitos de acoplamento e transposição na modelagem das linhas de transmissão na mesma faixa de servidão pode indicar variação na obtenção, por simulação, dos tempos de resposta esperados para atuação da proteção contra perda de sincronismo. A investigação deste fato permitirá avaliar a sensibilidade do Tempo Crítico de Extinção (TCE) de um defeito face à consideração dos acoplamentos elétrico e magnético entre circuitos de transmissão fisicamente próximos.

## 1.1 Considerações Iniciais

Como a análise de transitórios eletromecânicos está associada ao comportamento do sistema nos primeiros instantes que sucedem a ocorrência de distúrbios de natureza severa, o interesse do problema tem foco nas mudanças de ângulo de carga das máquinas síncronas, desvios de frequência, no fluxo de potência entre barras da rede e na atuação dos esquemas de proteção de modo a propiciar fornecimento ininterrupto da demanda solicitada pelos consumidores ou evitar-se colapso de suprimento em casos mais extremos.

As técnicas analíticas que fundamentam o estudo de estabilidade podem ser implementadas computacionalmente para análise do fluxo de carga, das características entre potência e ângulo de torque e para avaliação da ocorrência de faltas, de modo a proporcionar a análise de simulação do funcionamento dos sistemas elétricos nestas situações.

## **1.2 Motivação**

O cálculo do TCE de uma falta é influenciado pela modelagem dos parâmetros que compõem os sistemas elétricos. Desta forma, modelos mais precisos na representação dos elementos podem indicar mudanças nos resultados de simulações, decorrendo em alterações nas respostas esperadas pelas máquinas síncronas e, conseqüentemente, na previsão da margem de estabilidade.

O presente trabalho visa avaliar a sensibilidade relativa às diferenças esperadas na obtenção do TCE em face da representação precisa dos parâmetros de linhas de transmissão fisicamente próximas, investigando as discrepâncias na margem de segurança esperada para a atuação dos dispositivos de proteção da linha.

## **1.3 Revisão Bibliográfica**

Diversos livros e artigos se tornaram leitura clássica e servem como base para estudos específicos de estabilidade. Dentre as referências utilizadas no desenvolvimento deste trabalho merecem destaque especial os autores e textos descritos a seguir.

Na referência (KUNDUR et al, 2004) é exposta a definição de estabilidade para sistemas de potência, destacando-se detalhadamente as categorias de estudo para o fenômeno e suas principais características.

Em (VENIKOV, 1980) e (KUNDUR, 1994) são apresentadas definições do fenômeno transitório, equações e modelagem de parâmetros e o comportamento dos geradores síncronos associados a pequenas e grandes perturbações. Destacam-se também as descrições matemáticas por meio de equações não-lineares envolvendo grandezas elétricas e mecânicas.

A referência (KIMBARK, 1948) apresenta métodos de integração numérica para resolução de equações do problema de estabilidade, analisa casos típicos de ocorrência de faltas e seus efeitos no comportamento transitório das principais variáveis do sistema, além de destacar assim como (ANDERSON E FOUAD, 1977), (MELLO, 1977) e (KUNDUR,

1994) modelos clássicos para estudo de grandes perturbações e um método puramente algébrico para cálculo do TCE de faltas, o critério das áreas, visando a análise do limite de estabilidade transitória angular de redes elétricas. Este método só pode ser aplicado para o caso de duas máquinas interconectadas ou na situação máquina-barra infinita.

O cálculo de parâmetros de linhas de transmissão para estudo de fluxo de potência considerando o efeito de acoplamento e transposição foi recentemente abordado na dissertação de mestrado de [MONTEIRO, 2004] frente à análise de compatibilidade entre medições de campo e simulações em programas EMTP para linhas do sistema CHESF fortemente acopladas.

#### **1.4 Objetivo**

O efeito dos esquemas de transposição e do acoplamento magnético em linhas de transmissão fisicamente próximas pode indicar alterações no cálculo do TCE durante a avaliação preventiva dos limites de estabilidade transitória angular de um sistema elétrico.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da modelagem precisa de linhas de transmissão com forte acoplamento magnético na obtenção do TCE, no que se refere à análise de condições severas como bloqueio ou redução considerável do fornecimento de potência. Dessa forma, são estudados curtos-circuitos trifásicos para a terra em modelos de circuitos paralelos de transmissão para um sistema do tipo máquina síncrona - barramento infinito (MSBI). Será efetuada a análise do comportamento do ângulo de torque para avaliação da segurança transitória bem como a influência da representação do acoplamento e da transposição no cálculo do TCE.

## **2. ESTABILIDADE TRANSITÓRIA**

A seguir são apresentados, de forma breve, os principais aspectos que fundamentam a análise da estabilidade transitória sob o ponto de vista da avaliação da segurança angular do sistema.

### **2.1 Estabilidade Transitória Angular**

A ocorrência de um impacto como um curto-circuito em algum ponto do sistema elétrico pode levar as máquinas a perderem o sincronismo. O estudo de transitórios eletromecânicos é de extrema relevância no contexto da análise da interrupção do suprimento de energia, visto que estes tipos de perturbações resultam em oscilações no ângulo de torque das máquinas, que podem ocasionar efeitos indesejáveis ao sistema. A presença de um modo de oscilação instável nos rotores dos geradores tem como consequência a perda de sincronismo entre os mesmos, proporcionando a instabilidade de uma ou várias máquinas da rede. Tais oscilações são provocadas pela aceleração ou desaceleração no rotor provenientes da presença de desequilíbrio entre geração e carga.

No caso de perturbações provenientes de defeitos como curtos-circuitos, admite-se tanto o estado inicial de operação do sistema (regime permanente) bem como quão severa é a perturbação. O tempo de interesse em estudos transitórios, neste caso, normalmente é de alguns milissegundos até 5 segundos após a ocorrência do distúrbio (estudo da resposta dinâmica), mas pode se estender a 10 ou até 20 segundos para a avaliação de sistemas muito grandes [KUNDUR,1994].

#### **2.1.1 Relação Entre Potência e Ângulo de Torque**

Para a caracterização do transitório, é necessária a determinação do estado e das variáveis do sistema nos momentos anterior, durante e após a ocorrência da perturbação.

Isto é realizado por meio da descrição das características do sistema em regime permanente, sob defeito e pós-defeito. Neste âmbito, é necessário obter-se a característica entre potência e abertura angular da máquina síncrona em relação a uma referência.

Em um sistema contendo  $n$  máquinas, descrevem-se  $n$  vetores (ou equações vetoriais) que contemplam tensões nas barras e admitâncias dos elementos da rede. A relação entre potência e ângulo de torque para cada um dos geradores do sistema é dada por:

$$\begin{aligned} P_1 &= \text{Re} \left[ \hat{E}_1^* \cdot \hat{Y}_{11} \cdot \hat{E}_1 + \hat{E}_1^* \cdot \hat{Y}_{12} \cdot \hat{E}_2 + \hat{E}_1^* \cdot \hat{Y}_{13} \cdot \hat{E}_3 + \dots + \hat{E}_1^* \cdot \hat{Y}_{1n} \cdot \hat{E}_n \right] \\ P_2 &= \text{Re} \left[ \hat{E}_2^* \cdot \hat{Y}_{21} \cdot \hat{E}_1 + \hat{E}_2^* \cdot \hat{Y}_{22} \cdot \hat{E}_2 + \hat{E}_2^* \cdot \hat{Y}_{23} \cdot \hat{E}_3 + \dots + \hat{E}_2^* \cdot \hat{Y}_{2n} \cdot \hat{E}_n \right] \\ &\vdots \\ P_n &= \text{Re} \left[ \hat{E}_n^* \cdot \hat{Y}_{n1} \cdot \hat{E}_1 + \hat{E}_n^* \cdot \hat{Y}_{n2} \cdot \hat{E}_2 + \hat{E}_n^* \cdot \hat{Y}_{n3} \cdot \hat{E}_3 + \dots + \hat{E}_n^* \cdot \hat{Y}_{nm} \cdot \hat{E}_n \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

Generalizando:

$$P_i = \text{Re} \left[ \hat{E}_i^* \cdot \sum_{k=1}^n \hat{Y}_{ik} \cdot \hat{E}_k \right] \quad (2.2)$$

Sendo  $\hat{E}_i$  a tensão no barramento  $i$  e  $\hat{Y}_{ik}$  o elemento entre os nós  $i$  e  $k$  da matriz admitância de barra do sistema.

Para estudo de estabilidade é preferível trabalhar com equações escalares envolvendo os ângulos de deslocamento das máquinas. Neste caso, substituindo cada um dos elementos  $\hat{E}_i = |\hat{E}_i| \angle \delta_i$  e  $\hat{Y}_{ik} = |\hat{Y}_{ik}| \angle \theta_{ik}$  na expressão (2.2), obtém-se:

$$P_i = |\hat{E}_i|^2 |\hat{Y}_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |\hat{E}_i| |\hat{E}_k| |\hat{Y}_{ik}| \cos(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k) \quad (2.3)$$

Admitindo um sistema de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito, a expressão da potência elétrica ( $P_e$ ) de saída do gerador pode ser escrita na seguinte forma:

$$P_e = |\hat{E}_f|^2 |\hat{Y}_{11}| \cos \theta_{11} + |\hat{E}_f| |\hat{V}_\infty| |\hat{Y}_{12}| \cos(\theta_{12} - \delta) \quad (2.4.1)$$

Sendo  $\hat{E}_f = |\hat{E}_f| \angle \delta$  a tensão interna da máquina,  $\hat{V}_\infty$  a tensão do barramento infinito e  $\hat{Y}_{12} = |\hat{Y}_{12}| \angle \theta_{12}$  o elemento entre o barramento da tensão interna e barra de swing da rede.

Usualmente, a Equação 2.4.1 é escrita na seguinte forma:

$$P_e = P_c + P_M \text{sen}(\delta - \lambda) \quad (2.4.2)$$

Em que  $\lambda = \theta_{12} - \pi/2$ .

### 2.1.2 Equação de Oscilação da Máquina Síncrona

Para avaliar o deslocamento angular entre duas máquinas durante o transitório, é necessário resolver a equação diferencial que descreve o movimento do rotor de cada máquina. O torque aplicado sobre o rotor é dado por:

$$T_l = \alpha \cdot I \quad (2.5)$$

Em que:

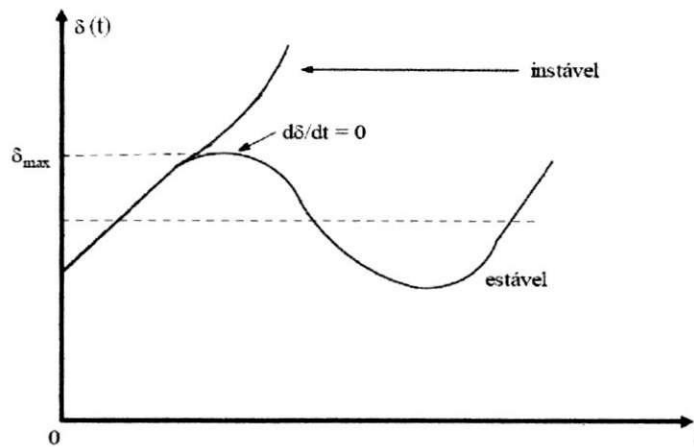
$T_l$  = soma algébrica de todos os torques (N.m);

$\alpha$  = aceleração angular mecânica (rad/s<sup>2</sup>);

$I$  = momento de inércia (kg.m<sup>2</sup>).

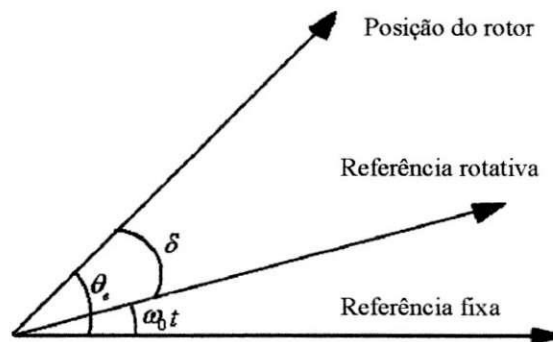
O torque líquido ( $T_l$ ) é resultado das componentes do torque mecânico de entrada, devido à ação da turbina, do torque devido às perdas rotacionais (atrito, ventilação, perdas no núcleo) e do torque eletromagnético [MOTA, 2006]. Em regime permanente, este torque é nulo, porém durante a ocorrência de perturbações, ele é responsável pela aceleração rotórica que pode levar a máquina à instabilidade.

Quando ocorre um defeito em algum elemento do sistema, a potência fornecida pela máquina síncrona afetada decai uma vez que o alternador passa a alimentar um circuito de impedância reduzida em relação à condição estática. Neste sentido, se o sistema for instável o ângulo de torque cresce indefinidamente, enquanto que se o sistema for estável, mesmo após a ocorrência de perturbações, haverá oscilação em torno de uma posição de equilíbrio. A Figura 2.2 mostra o comportamento do ângulo de torque nas duas situações.



**Figura 2.2** – Comportamento do ângulo de torque em um sistema submetido a uma perturbação.

Em estudos de estabilidade transitória é mais conveniente medir a posição angular da máquina em relação a um eixo rotativo em sincronismo (Figura 2.3) do que em relação a um eixo estacionário [ANDERSON & FOUAD, 1977].



**Figura 2.3** – Sistema de referência para obtenção da posição do rotor

Considerando a referência rotativa, as expressões para a velocidade e aceleração angulares de um gerador serão dadas, respectivamente, por:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_0 \quad (2.6)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta_e}{dt^2} \quad (2.7)$$

O ângulo elétrico ( $\theta_e$ ), medido com relação a uma referência fixa, relaciona-se com o ângulo mecânico do rotor ( $\theta_m$ ), através da expressão:



$$\theta_e = \frac{60f}{\omega_{(rpm)}} \theta_m \quad (2.8)$$

Em que:

$\omega_{(rpm)}$  = velocidade do rotor em rotações por minuto;

$f$  = frequência do sistema.

Utilizando as equações (2.5), (2.7) e (2.8), a expressão que representa o torque elétrico em função da aceleração angular será:

$$T_l = I \frac{\omega_{(rpm)}}{60f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (2.9)$$

Como o torque líquido que atua no rotor é resultado da diferença entre o torque mecânico proveniente da turbina ( $T_{mec}$ ) e o torque elétrico ( $T_e$ ) fornecido pelo gerador e, em p.u., torque e potência são iguais, considerando pequenas variações na velocidade angular é possível escrever a equação de oscilação da máquina em função da potência de aceleração resultante da diferença entre as potências mecânica e elétrica:

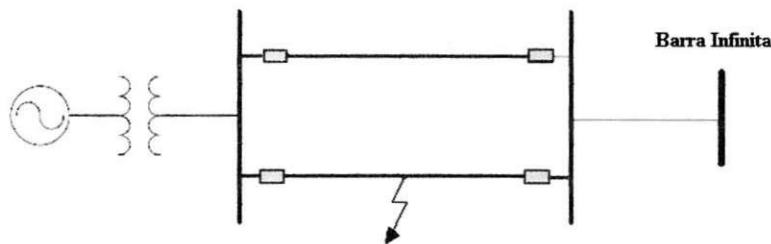
$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_{mec} - P_e) \quad (2.10)$$

Onde  $H$  é a constante de inércia característica da máquina síncrona, que indica a energia cinética, à velocidade nominal, armazenada nas partes girantes por MVA nominal.

### 2.1.3 Análise Qualitativa de um Sistema tipo Máquina Síncrona Conectada a um Barramento Infinito

O sistema da Figura 2.4 é composto de uma máquina síncrona, um transformador, um barramento infinito e duas linhas de transmissão interligando-os. Considere que a máquina pode ser modelada por uma fonte de tensão em série com uma reatância de eixo direto, e que transformador e as linhas de transmissão são modelados admitindo apenas suas reatâncias indutivas.

Para análise do problema é proposto um curto-circuito trifásico aterrado em uma das linhas de transmissão. O defeito é detectado pelos relés contra perda de sincronismo e eliminado em ambos os lados da linha em curto. Este tipo de contingência é estudado vias que representa uma situação que solicita considerável rapidez de atuação do conjunto relé-disjuntor. Durante o curto há uma redução da capacidade de transmissão da potência ativa e, conseqüentemente da amplitude da curva da potência elétrica versus ângulo de torque.



**Figura 2.4** – Sistema máquina síncrona - barramento infinito (MSBI)

O crescimento excessivo da potência de aceleração tem como conseqüência o aumento da abertura angular entre os barramentos da rede. O ângulo crítico de extinção ( $\delta_{crit}$ ) é aquele para o qual o sistema está no limite da estabilidade. Enquanto perdurar a falta, o ângulo de torque aumenta devido a um torque de aceleração positivo. A fim de que o sistema permaneça estável, deve haver a interrupção desse crescimento. Neste instante, a aceleração do rotor do gerador deve ser nula.

## 2.2 Critério das Áreas Iguais

Através deste critério estima-se o tempo de extinção de uma falta em alguma parte de um sistema de potência de modo que o mesmo permaneça estável. Além disso, em muitos casos é possível reduzir um sistema de potência complexo em um equivalente constituído por uma máquina síncrona ligada a um barramento infinito, podendo assim ser analisado utilizando o método das áreas iguais.

A Figura 2.5 representa um modelo gráfico de estudo para o *Critério das Áreas Iguais*. Este método permite a obtenção dos parâmetros necessários à avaliação do tempo de atuação do sistema de proteção contra perda de sincronismo e propicia o entendimento

de alguns fenômenos relacionados ao estudo de estabilidade transitória. Na situação adiante, considera-se para a condição pós-defeito que os disjuntores da linha em curto abrem e apenas uma das linhas se mantém como canal de transferência de potência.

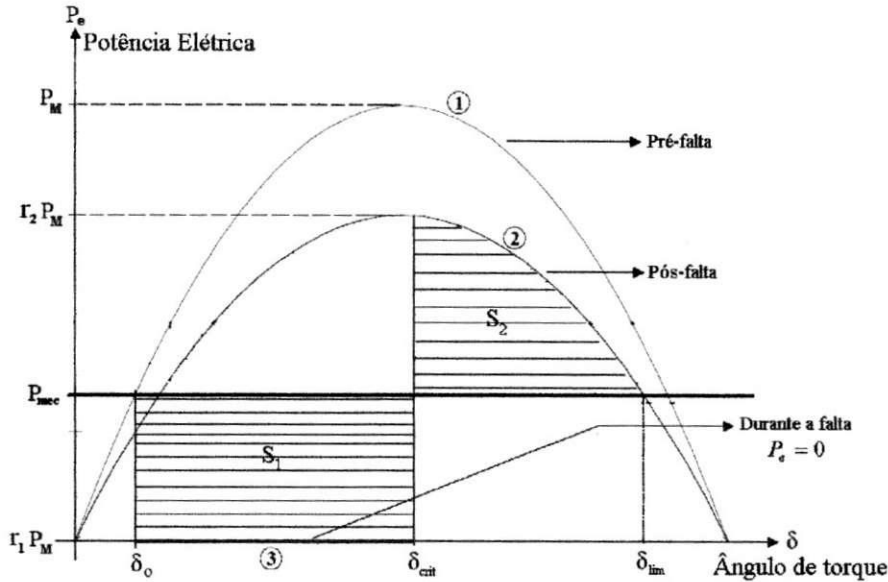


Figura 2.5 – Potência elétrica ( $P_e$ ) em função da abertura angular ( $\delta$ ) para curto-circuito trifásico franco

Considerando que o gerador parte de uma posição inicial  $\delta_0$  na velocidade síncrona, com funcionamento em regime permanente, para uma característica senoidal de amplitude  $P_M$  (curva 1), a potência de aceleração ( $P_{mec} - P_e$ ) é nula, o que indica equilíbrio entre os torques mecânico e elétrico. Neste caso, o sistema se encontra em estado estável.

Ao ocorrer um curto-circuito trifásico sólido para a terra em uma linha, próximo a uma barra, há uma redução a zero da capacidade de transmissão da potência elétrica ativa ( $r_1 P_M$ ) fornecida pela máquina (3) (neste caso  $r_1 = 0$ ). Com o decaimento da potência elétrica durante a falta, se o sistema fosse mantido nesta situação por um período acima do permitido, a máquina permaneceria acelerando até a perda de estabilidade.

Caso o sistema de proteção atue em tempo hábil para eliminação do defeito, a potência seria transmitida apenas por uma das linhas, descrevendo-se por meio da curva 2 de amplitude  $r_2 P_M$ . Com a remoção da linha em curto, eleva-se a capacidade de transmissão, tornando a potência elétrica maior que a potência mecânica. O sistema estará

desacelerando embora o ângulo de torque cresça até que a velocidade do rotor se iguale novamente à velocidade síncrona. Isto ocorre no ângulo limite, no qual a potência elétrica pós-defeito se iguala à potência mecânica da máquina primária ( $\delta_{lim}$ ). O cálculo das áreas é dado por:

**Cálculo de  $S_1$ :**

$$S_1 = P_{mec} (\delta_{crit} - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_{crit}} r_1 P_M \text{sen } \delta \, d\delta \quad (2.12)$$

que resulta em:

$$S_1 = P_{mec} (\delta_{crit} - \delta_0) + r_1 P_M (\cos \delta_{crit} - \cos \delta_0) \quad (2.13)$$

**Cálculo de  $S_2$ :**

$$S_2 = \int_{\delta_{crit}}^{\delta_{lim}} r_2 P_M \text{sen } \delta \, d\delta - P_{mec} (\delta_{lim} - \delta_{crit}) \quad (2.14)$$

Da equação (2.13) obtém-se:

$$S_2 = r_2 P_M (\cos \delta_{crit} - \cos \delta_{lim}) - P_{mec} (\delta_{lim} - \delta_{crit}) \quad (2.15)$$

O sistema será estável se existir uma área de desaceleração  $S_2$  maior ou igual à área de aceleração  $S_1$  sem que o ângulo  $\delta_{lim}$  seja ultrapassado. O valor da área  $S_1$  depende do tempo de atuação do conjunto relé-disjuntor.

Designa-se por ângulo de carga crítico o máximo valor que o ângulo pode assumir no instante em que a proteção atua, para que o sistema continue a ser estável após a retirada de serviço da linha em defeito. Se no instante de atuação da proteção o ângulo de carga for superior ao ângulo crítico ( $S_1 > S_2$ ), então o sistema deixa de ser estável. O ângulo crítico é determinado por igualdade das equações (2.13) e (2.15):

$$P_{mec} (\delta_{crit} - \delta_0) + r_1 P_M (\cos \delta_{crit} - \cos \delta_0) = r_2 P_M (\cos \delta_{crit} - \cos \delta_{lim}) - P_{mec} (\delta_{lim} - \delta_{crit})$$

Desta resulta:

$$\delta_{crit} = \cos^{-1} \left[ \frac{\left( \frac{P_{mec}}{P_M} \right) (\delta_{lim} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{lim} - r_1 \cos \delta_0}{r_2 - r_1} \right] \quad (2.16)$$

Sendo:

$$\delta_0 = \text{sen}^{-1} \left[ \frac{P_{mec}}{P_M} \right] < \frac{\pi}{2} \quad \text{e} \quad \delta_{lim} = \text{sen}^{-1} \left[ \frac{P_{mec}}{r_2 P_M} \right] > \frac{\pi}{2} \quad (2.17)$$

A Figura 2.6 (a) apresenta o comportamento estável do sistema frente a um determinado tempo de eliminação de falta. A Figura 2.6 (b) mostra o comportamento instável considerando um tempo de eliminação maior que o TCE.

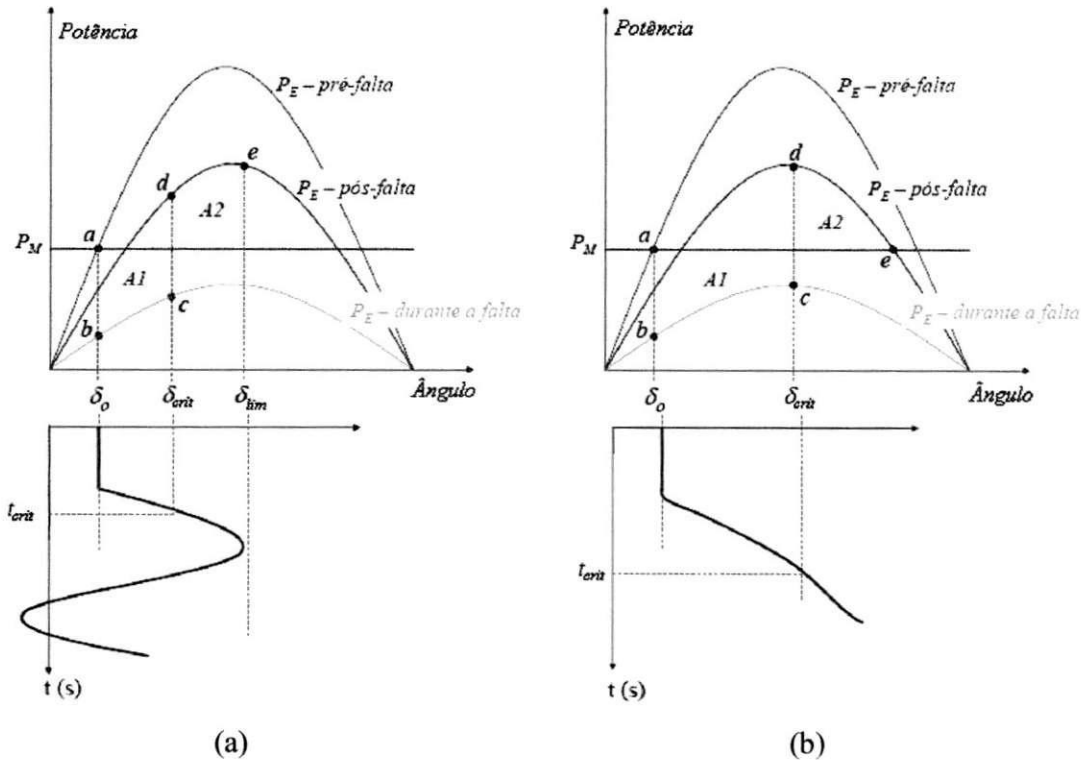


Figura 2.6 – Estabilidade X Instabilidade considerando o TCE.

### 2.2.1 Hipóteses do Critério

O critério das áreas, no que diz respeito à análise da estabilidade transitória, baseia-se nas seguintes hipóteses:

- (a) **A potência mecânica durante o transitório permanece constante:** As variações da potência mecânica são devidas às ações dos reguladores de velocidade dos geradores. Todavia, a ação destes não se faz sentir, em geral, na primeira oscilação, já que as constantes de tempo dos reguladores de velocidade e das turbinas são muito altas para permitir variação de potência em tão curto espaço de tempo [KUNDUR, 1994].

- (b) **As máquinas síncronas são representadas por tensão constante em série com uma reatância transitória:** Logo após a ocorrência de um curto-circuito, a corrente de campo do gerador aumenta, para compensar o efeito desmagnetizante da reação de armadura decorrente do curto, ou seja, de modo a garantir que os enlaces de fluxo com o enrolamento de campo permaneçam aproximadamente constantes imediatamente após a falta. Decorridos alguns instantes, o fluxo tende de fato a cair (o mesmo acontecendo com a tensão em série com a reatância transitória), mas então o regulador de tensão já estará iniciando sua atuação, em resposta à queda de tensão terminal da máquina que se segue ao curto.
- (c) **A variação da frequência de oscilação do transitório (geralmente entre 0,5 e 2 Hz) é muito pequena em relação à frequência nominal do sistema [NEDIC, 2003]:** Este fato permite que os parâmetros da rede obtidos em 60 Hz sejam utilizados durante a modelagem dos elementos indutivos e capacitivos do sistema.
- (d) **As cargas estáticas são convertidas em admitâncias constantes ( $Y_L$ ) para a terra:** Permite-se sua determinação por meio da relação entre a potência da carga e a tensão nominal no barramento ( $V_L$ ):

$$Y_L = \frac{(P_L - jQ_L)}{|V_L|^2} \quad (2.11)$$

- (e) **A matriz admitância do sistema é expandida para incluir a reatância transitória de cada gerador e as admitância das cargas em derivação:** Dessa forma, determina-se o ângulo da tensão interna do estator do gerador e a expressão da potência elétrica individual nos estágios pré, durante e após a falta.

### 2.2.2 Tempo Crítico de Extinção (TCE)

Em um sistema de potência operando em regime permanente, a potência mecânica fornecida aos geradores é exatamente igual à potência elétrica fornecida às cargas acrescida das perdas no sistema. Ocorrendo um distúrbio na rede, a mudança topológica decorrente

dele causará um desequilíbrio de potência, proporcionando um excesso ou déficit de energia nas máquinas. O desacoplamento entre a velocidade do campo do estator de uma máquina, que possui uma frequência de rotação imposta pelos outros geradores do sistema, e a velocidade do campo do seu rotor, resulta em grandes flutuações na potência de saída desta máquina, nas correntes e nas tensões, fazendo com que a proteção atue de forma a isolar a máquina do restante do sistema. Se após a eliminação do defeito o sistema encontrar um ponto de operação estável, este é dito ser estável transitoriamente. Se a eliminação do defeito ocorrer após o TCE o sistema se tornará instável.

A fim de estimar o TCE e forma algébrica no caso de uma falta trifásica em algum ponto do sistema, analisa-se a equação de oscilação da máquina:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H}(P_{mec} - P_e)$$

Como a potência de aceleração é constante durante o curto, pode-se efetuar a integração da equação anterior:

$$\frac{d\delta}{dt} = \int_0^t \frac{\omega_0}{2H}(P_{mec} - P_e) dt = \frac{\omega_0}{2H}(P_{mec} - P_e)t \quad (2.19)$$

Integrando a equação (2.19) nos limites de ocorrência da falta:

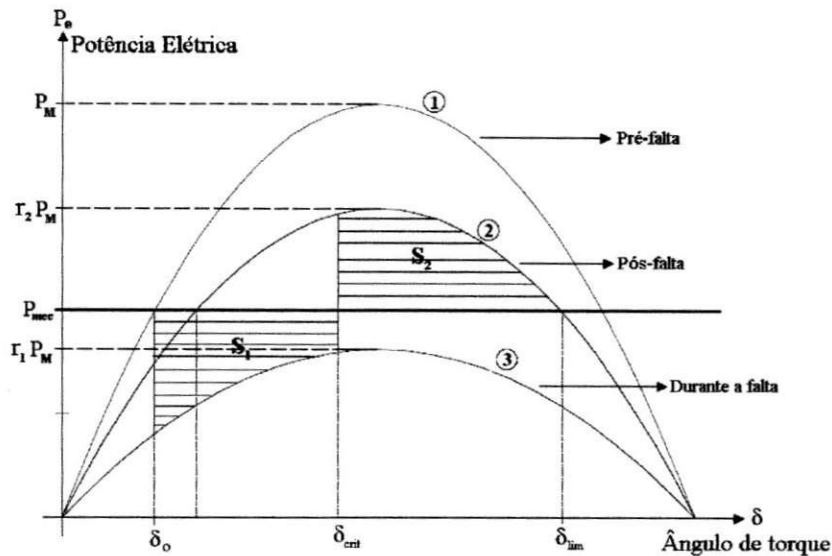
$$\int_{\delta_0}^{\delta_{crit}} \frac{d\delta}{dt} dt = \int_0^{t_{crit}} \frac{\omega_0}{2H} P_{mec} t dt \quad (2.20)$$

Daí, isolando o parâmetro  $t_{crit}$ , obtém-se:

$$t_{crit} = \sqrt{\frac{4H}{\omega_0} \frac{(\delta_{crit} - \delta_0)}{P_{mec}}} \quad (2.21)$$

No caso de um curto-circuito trifásico através de impedância de falta em algum barramento do sistema, a potência elétrica durante o distúrbio descreve uma senóide de

amplitude reduzida em relação à condição de regime permanente. Em relação ao critério das áreas, isto pode ser visualizado na Figura 2.7.



**Figura 2.7** – Potência elétrica ( $P_e$ ) em função da abertura angular ( $\delta$ ) para um curto-circuito através de impedância

Para a esta situação, procede-se com a equivalência de áreas por analogia algébrica (integração senoidal e área retangular), determinando-se um novo valor da potência mecânica, de modo que a equação o cálculo do tempo crítico é dada por [NASCIMENTO, 1995]:

$$t_{crit}' = \sqrt{\frac{4H(\delta_{crit} - \delta_0)}{\omega_0 P_{mec}'}} \quad (2.22)$$

Em que:

$$P_{mec}' = P_{mec} + \frac{r_1 P_M (\cos \delta_{crit} - \cos \delta_0)}{\delta_{crit} - \delta_0} \quad (2.23)$$

Portanto, observa-se que o critério das áreas é um método que permite o cálculo do TCE com a finalidade de calibragem do sistema de proteção contra perda de sincronismo, de modo a proporcionar que defeitos possam ser eliminados num tempo inferior àquele estimado para a perda de estabilidade transitória.



## 3. MODELAGEM DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Descreve-se neste capítulo a representação de linhas de transmissão de circuito duplo, admitindo a inclusão dos efeitos de transposição e acoplamento.

### 3.1 Representação das Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão são empregadas para transportar grandes blocos de energia entre centros geradores e consumidores. Considerando as grandes distâncias entre os parques de geração e os principais centros de consumo, a escolha do modelo para representação do circuito de transmissão deve reverter-se em uma maior precisão no cálculo do fluxo de potência em plataformas de simulação.

No caso de circuitos trifásicos paralelos fisicamente próximos, na mesma torre ou mesma faixa de passagem, há um acoplamento eletrostático e eletromagnético entre os dois circuitos. No cálculo das matrizes de impedância série e admitância em derivação, estes acoplamentos não devem ser desprezados a menos que a distância entre os circuitos seja considerável [GLOVER & SARMA, 2002]. A modelagem das linhas de transmissão influencia não somente na resolução do problema de fluxo de carga, como também, em consequência disto, na avaliação da estabilidade do sistema.

#### 3.1.1 Circuito $\pi$ Equivalente para Linha de Transmissão

A representação de um linha de transmissão através de um conjunto de circuitos  $\pi$  equivalentes propicia a inclusão dos efeitos de transposição de cada um de seus trechos. Como mostrado na Figura 3.1, um circuito de transmissão polifásico é caracterizado por uma matriz de admitâncias de transferência [  $Y_{transf}$  ] do terminal 1 para o terminal 2 e uma matriz de admitâncias em derivação [  $Y_{deriv}$  ] em ambos os terminais.

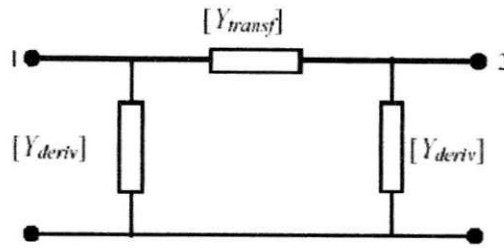


Figura 3.1 – Circuito pi equivalente de uma linha de transmissão.

Em termos de equação nodal, a forma matricial é descrita da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} [Y_{transf}] + [Y_{deriv}] & -[Y_{transf}] \\ -[Y_{transf}] & [Y_{transf}] + [Y_{deriv}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_1] \\ [V_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_1] \\ [I_2] \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Em que  $[V_1]$ ,  $[V_2]$ ,  $[I_1]$ ,  $[I_2]$  são vetores de tensão e corrente nos terminais de cada trecho representado por uma seção pi equivalente. Para uma linha de transmissão com  $m$  fases, as matrizes  $[Y_{transf}]$  e  $[Y_{deriv}]$  são da ordem  $m \times m$  e a Equação (3.1) representa um sistema de  $2m$  equações.

### 3.1.2 Assimetria entre Condutores

Em linhas de transmissão trifásicas com espaçamento assimétrico não existe equilíbrio entre os fluxos de cada fase e, conseqüentemente sua impedância por fase torna-se desequilibrada. Através da transposição da linha, restaura-se o equilíbrio entre as fases, do ponto de vista de seus terminais. A transposição consiste em alocar cada fase em uma das posições nas torres por intervalos aproximadamente regulares ao longo da linha, como apresentado na Figura 3.2.

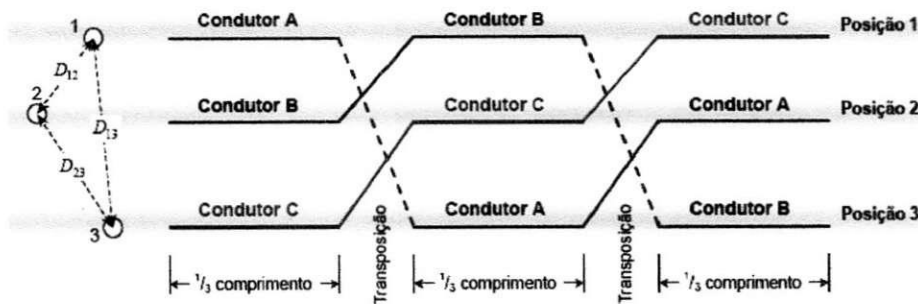


Figura 3.2 – Linha trifásica com um ciclo de transposição.

### 3.2 Linhas de Transmissão Equilibradas

Quando os elementos da diagonal principal das matrizes  $[Z'_{fase}]$  e  $[C'_{fase}]$  são todos equivalentes entre si, e os elementos fora da diagonal também apresentam esta característica, pode-se dizer que a linha de transmissão representada por tais matrizes é classificada como equilibrada. Suas formas são indicadas a seguir:

$$[Z'_{fase}] = \begin{bmatrix} Z'_s & Z'_m & \dots & Z'_m \\ Z'_m & Z'_s & \dots & Z'_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z'_m & Z'_m & \dots & Z'_s \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$[C'_{fase}] = \begin{bmatrix} C'_s & C'_m & \dots & C'_m \\ C'_m & C'_s & \dots & C'_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C'_m & C'_m & \dots & C'_s \end{bmatrix}$$

Se o comprimento de um ciclo de transposição é muito menor que um comprimento de onda da linha de transmissão, as impedâncias séries podem ser calculadas como a média das impedâncias nas três seções e as capacitâncias em derivação também podem ser calculadas como a média das três seções [DOMMEL, 1996].

Nesse caso, o cálculo para as impedâncias da linha de transmissão é dado por:

$$\begin{bmatrix} Z'_s & Z'_m & Z'_m \\ Z'_m & Z'_s & Z'_m \\ Z'_m & Z'_m & Z'_s \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \left[ \begin{bmatrix} Z'_{ii} & Z'_{ik} & Z'_{im} \\ Z'_{ki} & Z'_{kk} & Z'_{km} \\ Z'_{mi} & Z'_{mk} & Z'_{mm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z'_{mm} & Z'_{mi} & Z'_{mk} \\ Z'_{im} & Z'_{ii} & Z'_{ik} \\ Z'_{km} & Z'_{ki} & Z'_{kk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z'_{kk} & Z'_{km} & Z'_{ki} \\ Z'_{mk} & Z'_{mm} & Z'_{mi} \\ Z'_{ik} & Z'_{im} & Z'_{ii} \end{bmatrix} \right] \quad (3.3)$$

$$\text{Sendo: } Z'_s = \frac{1}{3}(Z'_{ii} + Z'_{kk} + Z'_{mm}) \quad \text{e} \quad Z'_m = \frac{1}{3}(Z'_{ik} + Z'_{km} + Z'_{mi}) \quad (3.4)$$

Em que  $Z'_s$  e  $Z'_m$  são as impedâncias própria e mútua, respectivamente.

Em componentes simétricas, as três equações acopladas no domínio de fase tornam-se três equações desacopladas, correlacionando os parâmetros de seqüência positiva (“+”) negativa (“-”) e zero (“0”) em componentes simétricas. Isto permite que um sistema trifásico seja estudado como se fossem três monofásicos. Na forma matricial, tem-se:

$$-\left[\frac{dV_{fase}}{dx}\right] = \begin{bmatrix} Z'_s & Z'_m & Z'_m \\ Z'_m & Z'_s & Z'_m \\ Z'_m & Z'_m & Z'_s \end{bmatrix} [I_{fase}] \quad (3.11)$$

Em componentes simétricas, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{-dV_0}{dx} &= Z'_0 I_0 \\ \frac{-dV_+}{dx} &= Z'_+ I_+ \\ \frac{-dV_-}{dx} &= Z'_- I_- \end{aligned} \quad (3.5)$$

A transformação linear que correlaciona as componentes simétricas e de fases pode ser obtida através de:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = [S]^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

sendo  $[S]^{-1}$  a matriz de transformação inversa de Fortescue, dada por:

$$[S]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}, \text{ com } a = e^{j120^\circ}. \quad (3.7)$$

A Equação (3.5) pode ser facilmente verificada transformando-se a Eq. (3.4) do domínio de fases para o domínio das componentes simétricas, através da seguinte transformação:

$$-\left[\frac{dV_{sim}}{dx}\right] = [S]^{-1} [Z'_{fase}] [S] [I_{sim}] = [Z'_{sim}] [I_{sim}] \quad (3.8)$$

Tendo como resultado a seguinte forma:

$$[Z'_{sim}] = \begin{bmatrix} Z'_s + 2Z'_m & 0 & 0 \\ 0 & Z'_s - Z'_m & 0 \\ 0 & 0 & Z'_s - Z'_m \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

em que os elementos da matriz são definidos como:

$Z_s'$  – impedância própria;

$Z_m'$  – impedância mútua;

$Z_0' = Z_s' + 2 Z_m'$  – componente de seqüência zero

$Z_+' = Z_-' = Z_s' - Z_m'$  – componentes de seqüência positiva e negativa

### 3.3 Componentes Simétricas para Linhas de Transmissão Transpostas de Circuito Duplo

Foi visto que para o caso trifásico as impedâncias série e as capacitâncias em derivação poderiam ser calculadas como a média das três seções. Para o caso de circuito duplo o processo da média das seções é o mesmo, exceto que as matrizes agora serão 6x6. As matrizes em componentes simétricas são obtidas a partir da expressão que segue:

$$[Z'_{sim}] = \begin{bmatrix} [S]^{-1} & 0 \\ 0 & [S]^{-1} \end{bmatrix} [Z'_{fase}] \begin{bmatrix} [S] & 0 \\ 0 & [S] \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

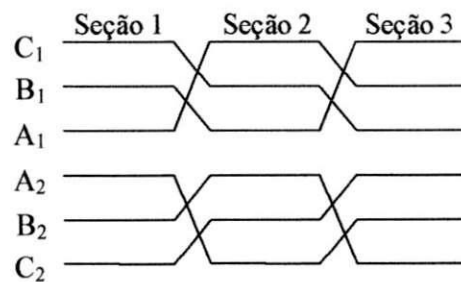
Em circuitos paralelos podem existir acoplamentos eletrostáticos e eletromagnéticos entre as linhas de transmissão. Por exemplo, correntes de seqüência positiva em um circuito podem induzir tensões de seqüência positiva ou negativa no outro circuito dependendo do esquema de transposição [DOMMEL, 1996].

#### 3.3.1 Esquema de Transposição de Três Seções para Circuitos Paralelos

Será visto posteriormente que o esquema de transposição de nove seções é o que melhor desacopla as componentes simétricas, no entanto, a um custo muito alto com oito torres de transposição. A seguir, veremos um esquema no qual são necessárias apenas duas torres de transposição, porém a um custo no desacoplamento das componentes simétricas.

### 3.3.1.1 Transposição em Sentido Contrário

Uma forma de se minimizar o acoplamento de uma seqüência com outra é aquela em que a rotação das fases do circuito 2 se dá na direção oposta a do circuito 1, como na Figura 3.3, cujo resultado é um esquema de transposição mais simples e econômico. Contudo, continua existindo o acoplamento de uma seqüência de um circuito com a mesma seqüência do outro circuito. Em outras palavras, uma corrente de seqüência positiva no circuito 2 induzirá uma queda de tensão de seqüência positiva no circuito 1, mas correntes de seqüência positiva não produzirão quedas de tensão nas componentes de seqüência zero ou negativa [MONTEIRO et al, 2005].



**Figura 3.3** – Esquema de transposição de três seções (em sentido contrário) para uma linha de circuito duplo.

A matriz equivalente referente à média das matrizes de impedância das três seções, desconsiderando o efeito capacitivo, é obtida pela seguinte expressão:

$$[Z'_{fase}] = \frac{1}{3} \left\{ \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} & Z'_{13} & Z'_{14} & Z'_{15} & Z'_{16} \\ Z'_{21} & Z'_{22} & Z'_{23} & Z'_{24} & Z'_{25} & Z'_{26} \\ Z'_{31} & Z'_{32} & Z'_{33} & Z'_{34} & Z'_{35} & Z'_{36} \\ Z'_{41} & Z'_{42} & Z'_{43} & Z'_{44} & Z'_{45} & Z'_{46} \\ Z'_{51} & Z'_{52} & Z'_{53} & Z'_{54} & Z'_{55} & Z'_{56} \\ Z'_{61} & Z'_{62} & Z'_{63} & Z'_{64} & Z'_{65} & Z'_{66} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z'_{33} & Z'_{31} & Z'_{32} & Z'_{36} & Z'_{34} & Z'_{35} \\ Z'_{13} & Z'_{11} & Z'_{12} & Z'_{16} & Z'_{14} & Z'_{15} \\ Z'_{23} & Z'_{21} & Z'_{22} & Z'_{26} & Z'_{24} & Z'_{25} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z'_{22} & Z'_{23} & Z'_{21} & Z'_{25} & Z'_{26} & Z'_{24} \\ Z'_{32} & Z'_{33} & Z'_{31} & Z'_{35} & Z'_{36} & Z'_{34} \\ Z'_{12} & Z'_{13} & Z'_{11} & Z'_{15} & Z'_{16} & Z'_{14} \\ Z'_{52} & Z'_{53} & Z'_{51} & Z'_{55} & Z'_{56} & Z'_{54} \\ Z'_{62} & Z'_{63} & Z'_{61} & Z'_{65} & Z'_{66} & Z'_{64} \\ Z'_{42} & Z'_{43} & Z'_{41} & Z'_{45} & Z'_{46} & Z'_{44} \end{bmatrix} \right\} \quad (3.11)$$

A média da matriz de impedância das três seções é dada por:

$$[Z'_{fase}] = \begin{bmatrix} Z'_{p1} & Z'_{m1} & Z'_{m1} & Z'_k & Z'_l & Z'_m \\ Z'_{m1} & Z'_{p1} & Z'_{m1} & Z'_m & Z'_k & Z'_l \\ Z'_{m1} & Z'_{m1} & Z'_{p1} & Z'_l & Z'_m & Z'_k \\ \hline Z'_k & Z'_m & Z'_l & Z'_{p2} & Z'_{m2} & Z'_{m2} \\ Z'_l & Z'_k & Z'_m & Z'_{m2} & Z'_{p2} & Z'_{m2} \\ Z'_m & Z'_l & Z'_k & Z'_{m2} & Z'_{m2} & Z'_{p2} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

em que os elementos de  $[Z'_{fase}]$  foram calculados como:

$$\begin{aligned} Z'_{p1} &= \frac{1}{3} [Z'_{11} + Z'_{22} + Z'_{33}] & Z'_{m1} &= \frac{1}{3} [Z'_{12} + Z'_{23} + Z'_{31}] \\ Z'_{p2} &= \frac{1}{3} [Z'_{44} + Z'_{55} + Z'_{66}] & Z'_{m2} &= \frac{1}{3} [Z'_{45} + Z'_{56} + Z'_{64}] \end{aligned} \quad (3.13)$$

e

$$\begin{aligned} Z'_k &= \frac{1}{3} [Z'_{14} + Z'_{25} + Z'_{36}] \\ Z'_l &= \frac{1}{3} [Z'_{15} + Z'_{26} + Z'_{34}] \\ Z'_m &= \frac{1}{3} [Z'_{16} + Z'_{24} + Z'_{35}] \end{aligned} \quad (3.14)$$

com as seguintes definições:

$Z'_{p1}$ : impedância própria do circuito 1

$Z'_{p2}$ : impedância própria do circuito 2

$Z'_{m1}$ : impedância mútua do circuito 1

$Z'_{m2}$ : impedância mútua do circuito 2

Transformando a expressão (3.12) para componentes simétricas, obtém-se:

$$[Z'_{sym}] = \begin{bmatrix} Z'_{p1} + 2Z'_{m1} & 0 & 0 & Z'_k + Z'_l + Z'_m & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{p1} - Z'_{m1} & 0 & 0 & Z'_k + a^2 Z'_l + a Z'_m & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{p1} - Z'_{m1} & 0 & 0 & Z'_k + a Z'_l + a^2 Z'_m \\ \hline Z'_k + Z'_l + Z'_m & 0 & 0 & Z'_{p2} + 2Z'_{m2} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_k + a Z'_l + a^2 Z'_m & 0 & 0 & Z'_{p2} - Z'_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_k + a^2 Z'_l + a Z'_m & 0 & 0 & Z'_{p2} - Z'_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

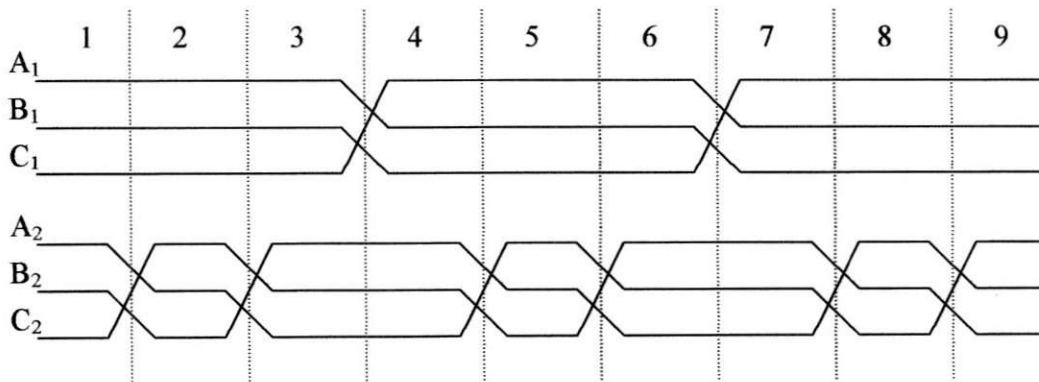
A Equação (3.15) pode ser escrita na forma:

$$[Z'_{sim}] = \begin{bmatrix} Z'_{oop1} & 0 & 0 & Z'_{oo12} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++p1} & 0 & 0 & Z'_{++12} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--p1} & 0 & 0 & Z'_{--12} \\ \hline Z'_{oo21} & 0 & 0 & Z'_{oop2} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++21} & 0 & 0 & Z'_{++p2} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--21} & 0 & 0 & Z'_{--p2} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

A Equação (3.16) indica que existe um acoplamento para cada seqüência entre os circuitos 1 e 2.

### 3.3.1.2 Esquema de Transposição de Nove Seções para Circuitos Paralelos

Como dito anteriormente, o esquema de transposição de nove seções da Figura 3.5 reduz de forma considerável o acoplamento de uma seqüência com outra. Será visto que este tipo de configuração evita quedas de tensão de seqüência positiva e negativa em relação à correntes de seqüência positiva e negativa.



**Figura 3.5** – Esquema de transposição de nove seções para uma linha de circuito duplo.

A média das impedâncias das nove seções é dada por:

$$[Z'_{fase}] = \frac{1}{9} \{ [Z'_{fasedaprimeiraseção}] + [Z'_{fasedasegundaseção}] + \dots + [Z'_{fasedanonaseção}] \} \quad (3.17)$$

ou, na forma matricial,



$$\left[ Z'_{fase} \right] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 3Z'_{p1} & 3Z'_{m1} & 3Z'_{m1} & Z'_m & Z'_m & Z'_m \\ 3Z'_{m1} & 3Z'_{p1} & 3Z'_{m1} & Z'_m & Z'_m & Z'_m \\ 3Z'_{m1} & 3Z'_{m1} & 3Z'_{p1} & Z'_m & Z'_m & Z'_m \\ \hline Z'_m & Z'_m & Z'_m & 3Z'_{p2} & 3Z'_{m2} & 3Z'_{m2} \\ Z'_m & Z'_m & Z'_m & 3Z'_{m2} & 3Z'_{p2} & 3Z'_{m2} \\ Z'_m & Z'_m & Z'_m & 3Z'_{m2} & 3Z'_{m2} & 3Z'_{p2} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

em que os elementos de  $[Z'_{fase}]$  foram calculados como:

$$\begin{aligned} Z'_{p1} &= Z'_{11} + Z'_{22} + Z'_{33} & Z'_{m1} &= Z'_{12} + Z'_{23} + Z'_{31} \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} Z'_{p2} &= Z'_{44} + Z'_{55} + Z'_{66} & Z'_{m2} &= Z'_{45} + Z'_{56} + Z'_{64} \end{aligned}$$

$$Z'_m = Z'_{14} + Z'_{15} + Z'_{16} + Z'_{24} + Z'_{25} + Z'_{26} + Z'_{34} + Z'_{35} + Z'_{36} \quad (3.20)$$

com as seguintes definições:

$Z'_{p1}$ : impedância própria do circuito 1

$Z'_{p2}$ : impedância própria do circuito 2

$Z'_m$ : impedância mútua entre os circuitos, sabendo-se que  $Z'_{ik} = Z'_{ki}$ .

Transformando em componentes simétricas através da transformação (3.10):

$$\left[ Z'_{sim} \right] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z'_{p1} + 2Z'_{m1} & 0 & 0 & Z'_m & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{p1} - Z'_{m1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{p1} - Z'_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ \hline Z'_m & 0 & 0 & Z'_{p2} + 2Z'_{m2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z'_{p2} - Z'_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z'_{p2} - Z'_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

A Equação (3.21) pode ser escrita na forma:

$$[Z'_{sim}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z'_{oop1} & 0 & 0 & | & Z'_{oo12} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++p1} & 0 & | & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--p1} & | & 0 & 0 & 0 \\ \hline Z'_{oo21} & 0 & 0 & | & Z'_{oop2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 & Z'_{++p2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & Z'_{--p2} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Verifica-se que o esquema de transposição de 9 seções apresentado desacopla perfeitamente as quantidades de seqüência positiva e negativa em cada circuito trifásico e também entre os circuitos, exceto para a seqüência zero.

### 3.4 Linha de Transmissão de Feixe Expandido

A expansão do feixe em linhas de transmissão convencionais é uma das técnicas normalmente utilizadas para elevação da potência natural das mesmas. Para linhas dispostas em paralelo em circuitos de transmissão fisicamente próximos, os efeitos de acoplamento magnético não devem ser desprezados nos estudos de fluxo de potência. Como existe uma assimetria considerável entre as fases das linhas de feixe expandido (FEX), a inclusão dos parâmetros de seqüência dos circuitos acoplados será admitida, para avaliar os efeitos no cálculo do TCE na análise da estabilidade transitória.

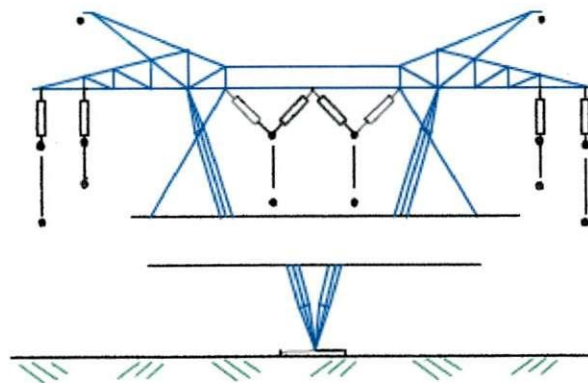


Figura 3.6 – Arranjo típico de uma LT transformável com feixe expandido.

### 3.5 Método de Kron – Redução de matrizes de redes

A redução de nós ou barras consiste em eliminar, convenientemente, linhas e colunas da matriz admitância de barra ( $Y_{bar}$ ) ou da matriz de impedância ( $Z_{bar}$ ). A matriz modificada pode ser obtida a partir de uma redução de circuito de Kron, ou simplesmente redução de Kron, como é conhecida em estudos de sistemas de potência.

Para aplicação do critério das áreas considera-se a utilização de um sistema de uma máquina ligada ao um barramento infinito. Neste caso, o método de Kron pode ser aplicado para efeitos de estudo de estabilidade, seja no âmbito de equivalência de máquinas conectadas a um mesmo barramento ou redução nodal.

Considere um sistema com n barras descrito pelas equações que seguem:

$$\begin{cases} Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + \dots Y_{1n}V_n = I'_1 \\ Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + \dots Y_{2n}V_n = I'_2 \\ \dots \\ Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + Y_{k3}V_3 + \dots Y_{kn}V_n = I'_k \\ \dots \\ Y_{n1}V_1 + Y_{n2}V_2 + Y_{n3}V_3 + \dots Y_{nn}V_n = I'_n \end{cases} \quad (3.23)$$

Em que  $Y_{ii}$  é a admitância própria do nó i,  $Y_{ij}$  a admitância entre os nós i e j,  $V_i$  e  $I'_i$  são a tensão e a corrente injetada, respectivamente, no barramento i.

Escrevendo na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ \vdots \\ I'_k \\ \vdots \\ I'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & Y_{k3} & \dots & Y_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_k \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

### 3.5.1 Sistema Com Quatro Barras

Procedendo de maneira semelhante ao caso com 3 barras, seja a matriz 4x4 apresentada abaixo. Neste caso, serão eliminados os nós 3 e 4:

$$[Y_{BAR}] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}$$

A matriz é dividida em quadrantes, tal que:

$$[Y_{BAR}] = \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix}$$

Sendo:

$$[Y_A] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}, [Y_B] = \begin{bmatrix} Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{23} & Y_{24} \end{bmatrix}, [Y_C] = \begin{bmatrix} Y_{31} & Y_{32} \\ Y_{41} & Y_{42} \end{bmatrix} = [Y_B]^T \text{ e } [Y_D] = \begin{bmatrix} Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}$$

Nesta situação, a aplicação do método de Kron resulta em:

$$[Y_{BAR}^{NEW}] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{23} & Y_{24} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} Y_{31} & Y_{32} \\ Y_{41} & Y_{42} \end{bmatrix}$$

### 3.5.2 Generalização do Método

Considere-se agora uma matriz admitância de uma rede de ordem nxn. A expressão que rege a obtenção da nova matriz é dada por:

$$[Y_{kj}^{NEW}] = [Y_{kj}] - [Y_{kn}] \times [Y_{nn}]^{-1} \times [Y_{nj}] \quad (3.25)$$

em que k e j podem variar de 1 até (n-1).

### 3.5.3 Matriz Expandida

Na utilização do critério das áreas, pressupõe-se do conhecimento das condições de regime permanente pré-falta, ou seja, antes de ocorrer o defeito. A fim de estimar o ângulo de torque inicial de alguma máquina, admite-se a inclusão de um barramento adicional referente à tensão interna da máquina síncrona. Neste caso, a matriz resultante  $[Y_{kj}^{NEW}]$  é modificada, adicionando-se os efeitos da reatância transitória de eixo direto de cada máquina. A representação matricial para o sistema equivalente, admitindo a inclusão das reatâncias de eixo, na forma expandida seria:

$$\begin{bmatrix} I'_{M1} \\ I'_1 \\ I'_2 \\ \vdots \\ I'_n \\ I'_{M2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{M1} & -Y_{M1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -Y_{M1} & Y_{11}^{NEW} + Y_{M1} & Y_{12}^{NEW} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{21}^{NEW} & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & Y_{n-1n-1}^{NEW} & Y_{n-1n}^{NEW} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_{nn-1}^{NEW} & Y_{nn}^{NEW} + Y_{M2} & -Y_{M2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_{M2} & Y_{M2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_f^{M1} \\ V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ E_f^{M2} \end{bmatrix}$$

Sendo  $I'_{Mi}$  e  $E_f^{Mi}$  a corrente de armadura e a tensão interna da máquina  $i$ , respectivamente. Os parâmetros  $Y_{M1}$  e  $Y_{M2}$  são os elementos que contemplam a indicação das reatâncias transitórias de eixo direto de cada máquina. Neste mesmo sentido, também podem ser adicionadas as admitâncias correspondentes às cargas da rede. A matriz reduzida ( $Y_{RED}$ ) a dois nós pelo método de Kron seria da forma:

$$Y_{RED} = \begin{bmatrix} y_{RED}^{11} & y_{RED}^{12} \\ y_{RED}^{21} & y_{RED}^{22} \end{bmatrix}$$

A partir disso, simplifica-se a obtenção dos elementos da equação de oscilação nos três estágios (pré, durante e após o distúrbio), com posterior análise da estabilidade do sistema através de integração numérica ou de forma algébrica pelo critério das áreas.

## 4. PLATAFORMAS DE SIMULAÇÃO

### 4.1 Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão

Simulações em estudos destinados à análise de sistemas de potência, sob diversos aspectos, requerem a obtenção dos parâmetros das linhas de transmissão. O programa ATP apresenta uma rotina - “*Line Constants*” - para cálculo destes parâmetros, admitindo configurações arbitrárias de redes polifásicas. Essa rotina calcula as matrizes em componentes simétricas ou de fase para circuitos de transmissão simples ou paralelos.

Por meio da simulação de cada trecho entre torres de transposição, permite-se incluir efeitos de acoplamento na representação de linhas fisicamente próximas, obtendo-se o circuito  $\pi$  equivalente, em termos de suas matrizes de transferência e derivação.

Um programa para cálculo dos parâmetros de sequência positiva [GSE – Linhas de Transmissão, 2004], desenvolvido em Fortran [PRESS et al, 1992], será utilizado para a obtenção do circuito equivalente para linhas de transmissão paralelas na mesma torre, admitindo o acoplamento magnético entre os circuitos. O programa GSE tem como entrada de dados um arquivo do tipo “.dat”, que apresenta as matrizes de transferência e derivação em sequência de cada trecho dos circuitos  $\pi$  equivalente da rede.

### 4.2 Fluxo de Carga em Regime Permanente

A plataforma de simulação Power World<sup>®</sup> é uma importante ferramenta para estudo de fluxo de carga em sistemas elétricos, apresentando diversos recursos de simulação sem exigir alta capacidade de processamento ou memória.

Alterações dos parâmetros de diversos componentes podem ser efetuadas de forma simples e ágil, com visualização instantânea dos demais fatores afetados por tais mudanças, como tensão e fluxo de potência. Diversos métodos para resolução de fluxo de

carga são disponibilizados tais como Newton-Raphson completo e desacoplado e o método de Gauss-Seidel. Um exemplo de implementação do programa é apresentado a seguir:

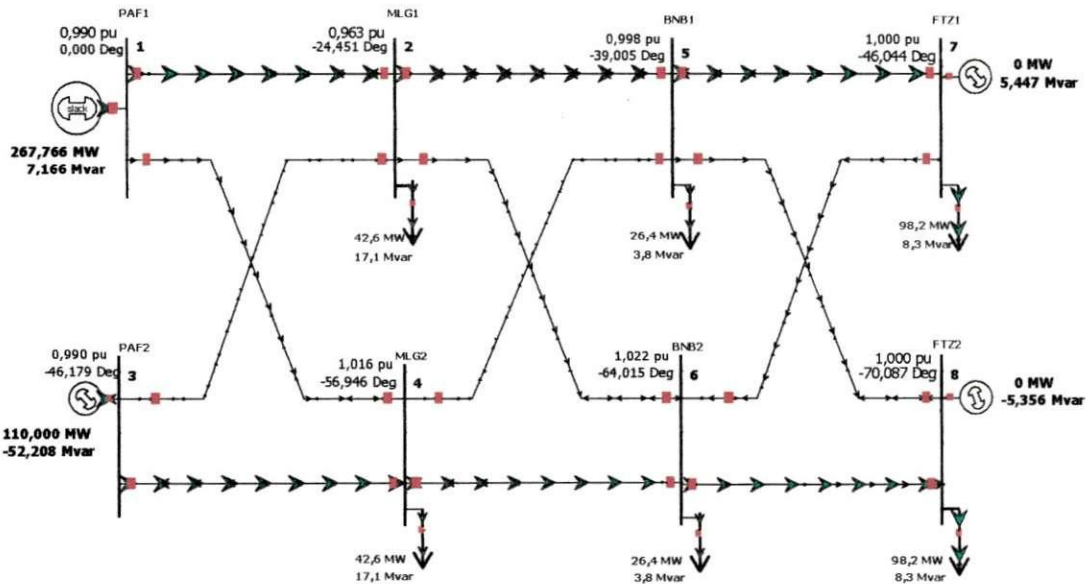


Figura 4.1 – Exemplo de fluxo de carga resolvido pelo Power World®.

### 4.3 SIMULINK

O SIMULINK é um programa utilizado para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. O programa se aplica a sistemas lineares e não lineares, contínuos e/ou discretos no tempo. Utiliza uma interface gráfica com o usuário para construção dos modelos a partir de diagramas de blocos (“.mdl”). Inclui bibliotecas de blocos contendo fontes, visualizadores, componentes lineares, não lineares e conectores, com a opção de criação ou personalização de sistemas. A programação segue uma interface gráfica intuitiva (GUI), de fácil uso, com bibliotecas destinadas à implementação de modelos em diversos campos de estudo.

A representação dos sistemas físicos por meio de equações nem sempre deixa clara a relação entre as funções de entrada e de saída desses sistemas. Portanto, é conveniente e desejável sistematizar a descrição matemática de um sistema, de tal forma que aquela relação seja expressa claramente. Uma forma de apresentação das equações

diferenciais de um sistema consiste no emprego dos diagramas de bloco, em que cada bloco representa uma operação matemática, associando pares entrada-saída.

#### 4.4 Simulações Realizadas e Descrição do Sistema

Foram realizados, neste trabalho, cinco tipos de simulações: cálculo dos parâmetros por fase das linhas de transmissão utilizando o ATP, obtenção dos parâmetros de sequência positiva próprios e mútuos com o software GSE, fluxo de carga através da plataforma Power World<sup>®</sup> e cálculo do tempo crítico de extinção (TCE) por meio de método numérico utilizando o SIMULINK bem como mediante rotina desenvolvida no MATLAB<sup>®</sup> com base no critério de áreas (ANEXOS).

A configuração da LT FEX utilizada na obtenção dos parâmetros por fase e posteriormente de sequência positiva, é apresentada na Figura 4.4. Este é um modelo real de linha de transmissão de feixe expandido que operou no sistema CHESF.

Line Conductors:  $R_{dc} = 0.0972 \Omega/\text{km}$  ; Diameter: 2.5146 cm  
 Ground Wires:  $R_{dc} = 4.0957 \Omega/\text{km}$  ; Diameter: 0.9144 cm  
 Line Length: 678.90 km ; Earth Resistivity: 1000  $\Omega\cdot\text{m}$

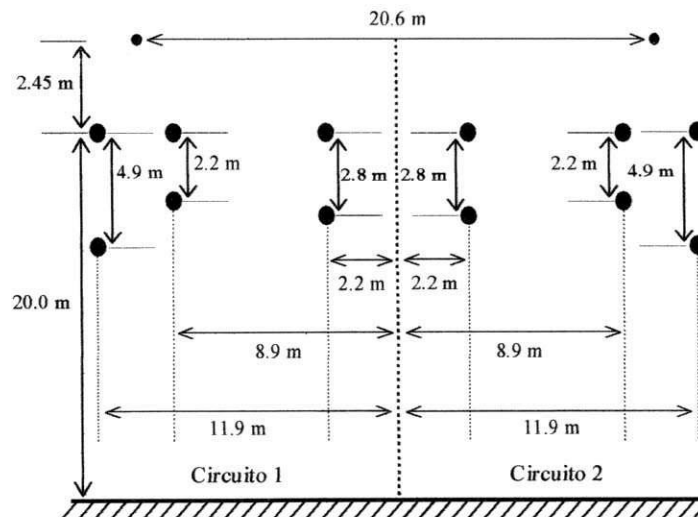


Figura 4.3 – Geometria da Linha de Transmissão FEX.

Os esquemas de transposição da linha de transmissão ao longo de suas onze seções são apresentados na Figura 4.5.



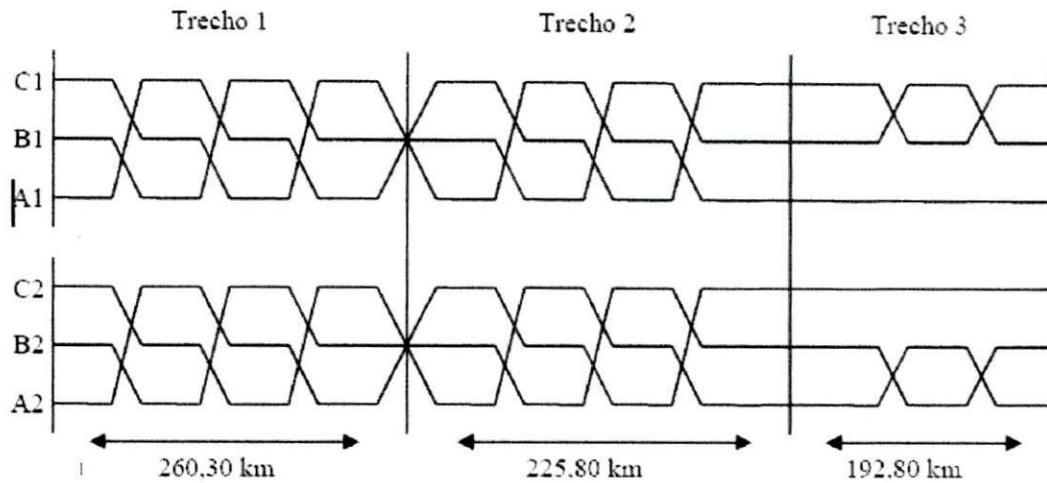


Figura 4.4 – Esquema de transposição do trecho completo.

Considerou-se para análise da estabilidade um sistema radial hipotético do tipo máquina síncrona – barramento infinito, com diagrama apresentado na Figura 4.6.

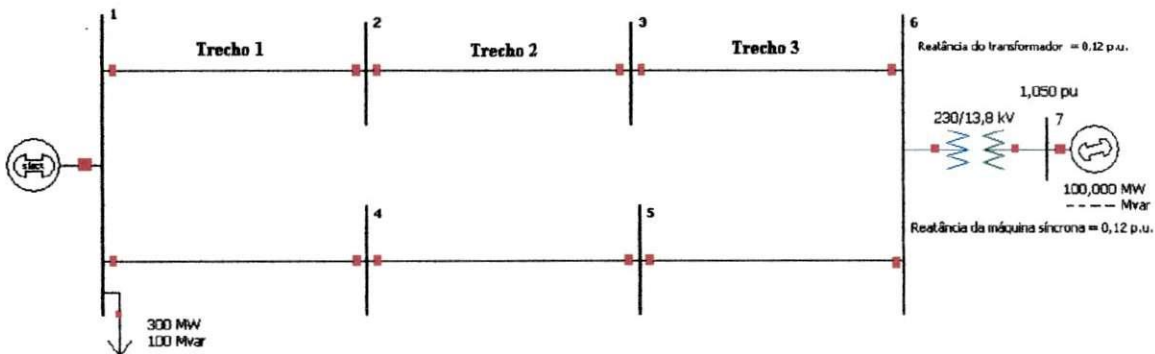


Figura 4.5 – Diagrama representativo do sistema em estudo.

A máquina síncrona é conectada ao sistema através de um transformador elevador de 13,8 / 230 kV com reatância 0,12 p.u. na base 100 MVA / 230 kV, fornecendo uma potência ativa de 100 MW à rede. O gerador apresenta uma reatância transitória de eixo direto ( $X'_d$ ) de 0,12 p.u. na mesma base referida acima e constante de inércia (H) de 5 segundos. A carga consome 300 MW de ativos e 100 Mvar de reativos.

Admitiu-se a ocorrência de um curto-circuito trifásico sólido aterrado (franco) próximo ao barramento 6, onde toda a potência mecânica é convertida em potência acelerante, eliminado posteriormente pela abertura da LT 1-6 em defeito. Através de rotina desenvolvida, foram obtidos os parâmetros característicos da equação da potência em função do ângulo de carga (Equação 2.4.2) além do ajuste das curvas nas situações antes, durante e após a ocorrência do distúrbio. A partir disso, obtém-se o TCE para os casos com e sem acoplamento entre as linhas de transmissão efetuando-se a devida comparação com o modelo de resolução numérica.

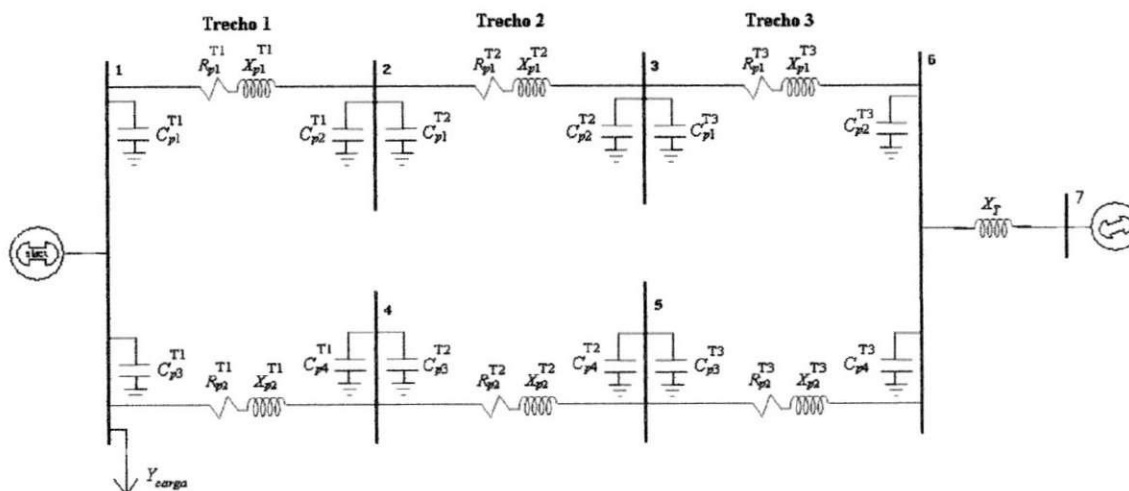
## 5. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Os procedimentos relativos à análise de sensibilidade do Tempo Crítico de Extinção frente aos efeitos de acoplamento e transposição serão apresentados a seguir.

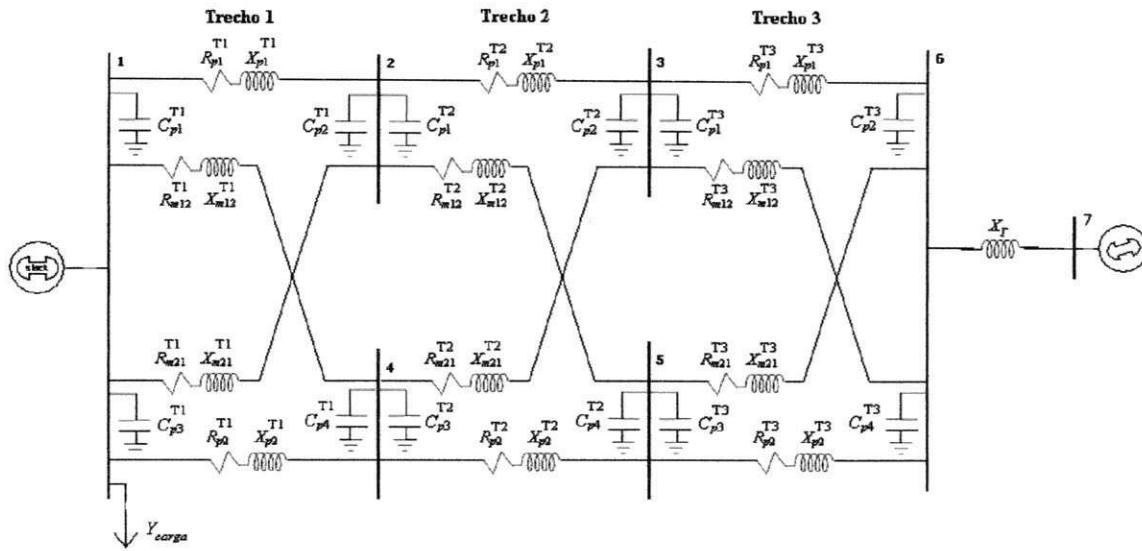
### 5.1 Representação dos Parâmetros da Rede

Para estudo de fluxo de potência, procede-se com a representação das máquinas síncronas através do equivalente de Thévenin visto dos terminais da armadura. No âmbito da avaliação da estabilidade transitória, a máquina será representada por sua reatância transitória em série com uma fonte de tensão interna referida à armadura.

O circuito equivalente, desprezando-se o acoplamento, é apresentado na Figura 5.1. Os parâmetros próprios e mútuos das linhas de circuito duplo são incluídos para avaliação do fluxo de potência segundo apresentado na Figura 5.2. No caso transitório, após a ocorrência da falta, os parâmetros mútuos de sequência positiva da linha de transmissão serão desprezados em vias que uma das linhas se encontrará fora de operação.



**Figura 5.1** – Configuração do sistema elétrico considerando apenas os parâmetros próprios de sequência positiva para estudo de fluxo de potência.

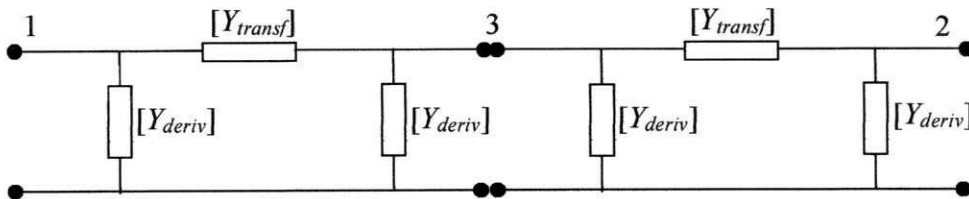


**Figura 5.2** – Configuração do sistema elétrico com a representação dos parâmetros próprios e mútuos de sequência positiva para estudo de fluxo de potência.

O transformador será representado por sua reatância série e as cargas serão representadas por modelo de potência constante no estudo de regime permanente e de impedância constante na avaliação transitória, convertidas em admitâncias constantes para a terra para posterior aplicação do critério das áreas.

## 5.2 Obtenção dos Parâmetros de Sequência Positiva das Linhas de Transmissão

Uma linha de transmissão polifásica pode ser representada através de uma cascata de circuitos pi, representados por suas matrizes de derivação e transferência. Cada circuito pi equivalente toma referência a uma seção da linha entre torres de transposição. A Figura 5.3 mostra uma conexão de dois circuitos pi em cascata.



**Figura 5.3** – Conexão em cascata de dois circuitos pi representando uma linha de transmissão com duas seções.

A metodologia desenvolvida no trabalho de [MONTEIRO, 2004] e aperfeiçoada em trabalhos posteriores, utiliza uma rotina suporte com o objetivo de obter o circuito pi equivalente de uma cascata de  $n$  circuitos pi entre dois nós, além de calcular os parâmetros de uma linha de transmissão considerando os efeitos de acoplamento e transposição. O algoritmo da plataforma utilizada é baseado no processo de redução de matrizes de admitância dos elementos por fase provenientes do ATP. Obtém-se como saída do programa os parâmetros próprios e mútuos de sequência positiva dos circuitos.

No caso de linhas de transmissão de circuito duplo, a impedância própria de sequência positiva dos circuitos 1 e 2 é obtida através do segundo e o quinto elementos, respectivamente, da diagonal principal da matriz de impedância de transferência em componentes simétricas. A impedância mútua de sequência positiva entre o circuito 1 e o circuito 2 é determinada a partir do elemento localizado na 2ª linha e 5ª coluna da matriz de admitâncias de transferência em componentes simétricas. Para a determinação da impedância mútua de sequência positiva entre o circuito 2 e o circuito 1, utiliza-se o elemento da 5ª linha e 2ª coluna [MONTEIRO et al, 2006].

Os parâmetros próprios e mútuos de sequência positiva obtidos a partir da utilização do programa referenciado acima são apresentados nas Tabela 5.1 e 5.2. A inclusão dos parâmetros mútuos é aquela estabelecida na Figura 5.2.

**Tabela 5.1** – Parâmetros próprios de sequência positiva.

	<b>Circuito 1</b>				<b>Circuito 2</b>			
	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu F)$ esquerda	$B(\mu F)$ direita	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu F)$ esquerda	$B(\mu F)$ direita
<b>Trecho 1</b>	11,924	69,425	740,582	727,064	11,853	67,457	840,285	860,734
<b>Trecho 2</b>	10,479	59,484	761,393	774,617	10,505	59,744	681,871	648,129
<b>Trecho 3</b>	9,215	46,335	645,296	642,592	9,476	56,286	541,788	542,089

**Tabela 5.2** – Parâmetros mútuos de sequência positiva.

	<b>Entre os circuitos 1 e 2</b>		<b>Entre os circuitos 2 e 1</b>	
	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$
<b>Trecho 1</b>	633,778	1709,389	655,955	1753,631
<b>Trecho 2</b>	609,674	1593,477	626,958	1628,572
<b>Trecho 3</b>	380,264	1002,502	378,893	1001,828

### 5.3 Fluxo de Potência

A análise do fluxo de potência é realizada com o objetivo de obtenção das tensões nos barramentos da rede e da matriz de admitância nodal. Isto é feito para as situações com e sem acoplamento entre os circuitos de transmissão. Para a condição de falta, como apresentado anteriormente, considera-se a aplicação de um curto franco na linha 1-6, próximo ao barramento 6. Na situação pós-alta, admite-se a retirada de serviço da linha defeituosa. O resultado do fluxo de potência é apresentado nas Figuras 5.4 e 5.5.

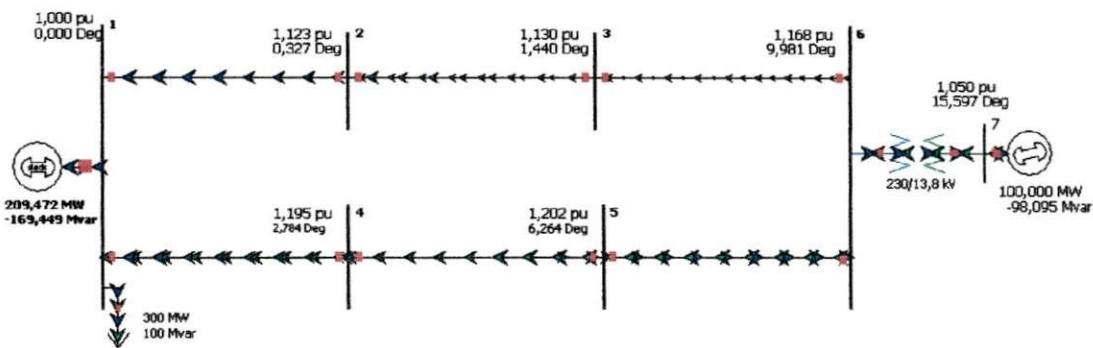


Figura 5.4 – Resolução do fluxo de potência desconsiderando o acoplamento entre as linhas.

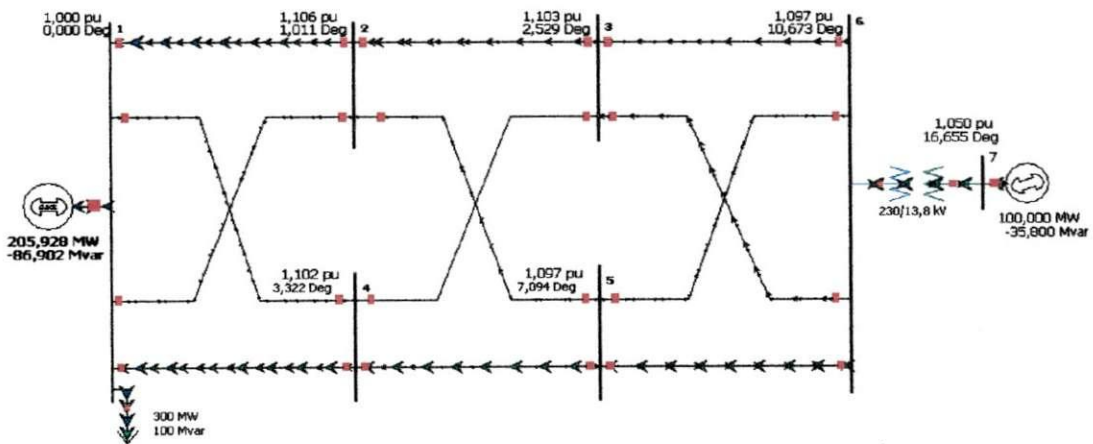


Figura 5.5 – Resolução do fluxo de potência admitindo o acoplamento entre as linhas.

### 5.4 Desempenho Transitório Considerando o Cálculo do TCE

O Power World<sup>®</sup> fornece a matriz de admitância no formato “.m” de arquivos do MATLAB<sup>®</sup> para sistemas simulados na execução do fluxo de potência. As matrizes de rede

nas situações pré-falta, durante e após o distúrbio são computadas, sendo a entrada da rotina desenvolvida (ANEXO 1). O algoritmo da rotina completa é apresentado a seguir:

1. São fornecidas como entrada as matrizes de admitância da rede nas condições pré, durante e após a falta, a reatância transitória da máquina síncrona, a constante de inércia e a potência referida à carga;
2. Calculam-se a corrente de armadura e a tensão interna do gerador;
3. Obtém-se a matriz expandida, incluindo-se na matriz admitância nodal da rede a reatância transitória da máquina e a admitância da carga;
4. Trocam-se as posições das linhas correspondentes aos barramentos do gerador e *swing*, dispondo-as nas duas primeiras linhas da matriz expandida;
5. Aplica-se o método de redução de Kron, conforme a Equação (3.25), para obtenção da matriz de admitância nodal reduzida;
6. São calculados os elementos da equação da potência de oscilação (ANEXO 2) segundo descrito na Equação (2.4.2), para os três estágios abaixo:
  - a. Antes da perturbação (regime permanente) – Pré-defeito;
  - b. Durante a perturbação – Sistema em defeito;
  - c. Após a remoção do defeito – Sistema Pós-defeito.
7. Efetuam-se os ajustes das curvas com posterior cálculo dos parâmetros inicial, crítico e limite necessários à obtenção do TCE (ANEXO 3), segundo estabelecido no critério de áreas e apresentado no Capítulo 2.

## 5.5 Obtenção da Resolução Numérica

A resolução da equação completa para obtenção do tempo crítico de extinção é realizada considerando um modelo construído utilizando o SIMULINK. A configuração apresentada a seguir permite além da obtenção do TCE, a avaliação de frequência, ângulo de torque e potência elétrica admitindo variações do tempo de chaveamento (switch).

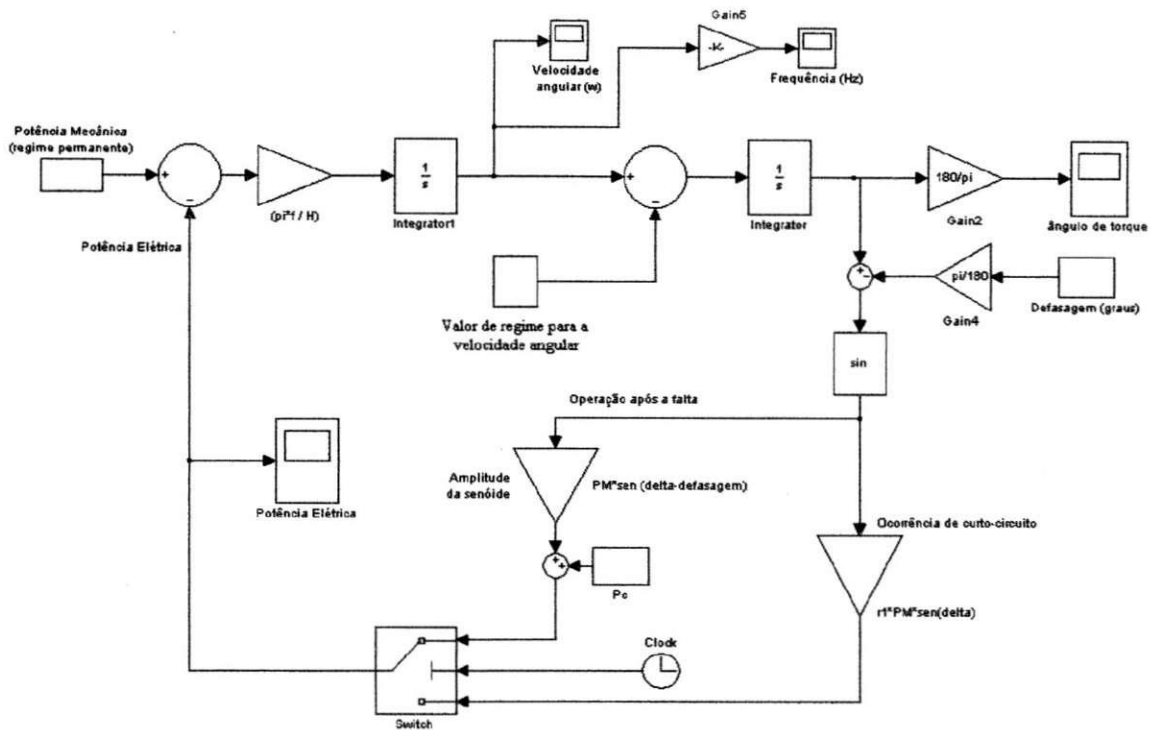


Figura 5.6 – Modelo para resolução numérica do TCE construído no simulink do MATLAB® (MOTA,2006).

A simulação de modelos de sistemas dinâmicos envolve a integração numérica dos sinais ao longo do tempo, a qual é executada por um conjunto de equações diferenciais ordinárias (ODE: *Ordinary Differential Equations*). Para a simulação apresentada anteriormente foi utilizado o método ODE 23s, que é baseado nos métodos de Bogacki-Shampine e Runge-Kutta de ordem fixa com passo simples.

## 5.6 Fluxograma do Processo

O diagrama de blocos apresentado a seguir permite verificar-se entrada e saída dos softwares utilizados, analisando o processo de obtenção do TCE com e sem a inclusão dos parâmetros mútuos de sequência positiva, referentes ao acoplamento entre os circuitos de transmissão da linha de configuração de feixe expandido.

As cinco etapas do processo são descritas, contemplando desde a obtenção dos parâmetros das linhas de transmissão, o estudo de fluxo de carga e a avaliação da sensibilidade da inclusão dos efeitos de acoplamento na obtenção do tempo crítico de eliminação do defeito analisado.



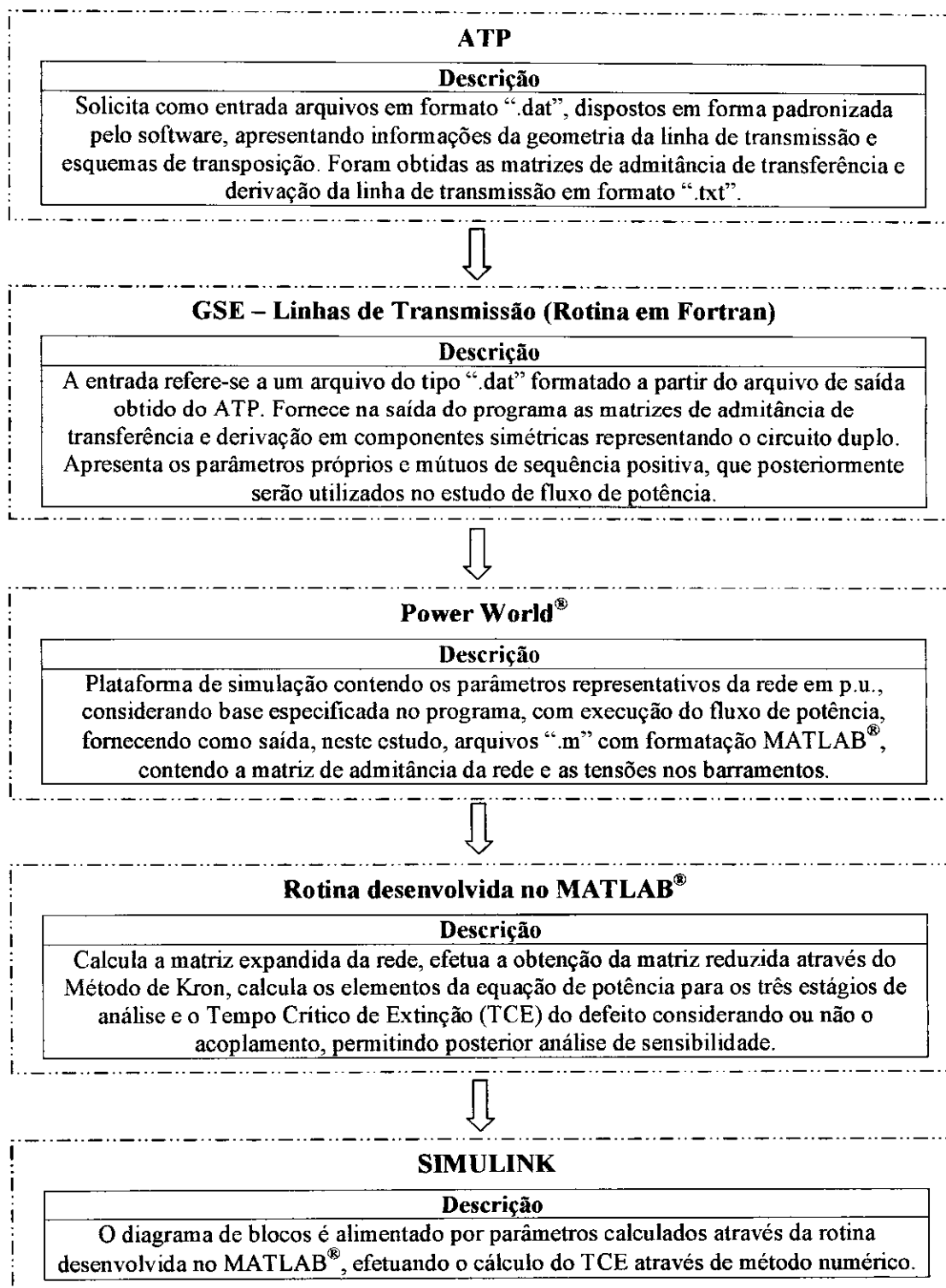


Figura 5.7 – Fluxograma do processo.

## 6. RESULTADOS E ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

Previamente foram obtidos os parâmetros de sequência positiva, considerando um modelo típico de configuração de torre de transmissão da CHESF tipo feixe expandido, admitindo o sistema descrito no Capítulo 4, utilizando-o na avaliação do cálculo do TCE. A análise é realizada de forma comparativa a fim de indicar os efeitos de transposição e acoplamento no cálculo do máximo período estimado para abertura do sistema de proteção a fim de evitar-se perda de sincronismo.

### 6.1 Simulação em Regime Permanente

No capítulo anterior foram apresentados os resultados da solução do fluxo de potência na plataforma Power World<sup>®</sup>. O barramento 1 foi considerado como barra de balanço do sistema. A Tabela 6.1 mostra a potência reativa fornecida pelo gerador na condição de regime permanente considerando e desprezando o acoplamento.

**Tabela 6.1** – Simulações de fluxo de potência considerando e desprezando o acoplamento para a linha transmissão de feixe expandido.

<b>Acoplamento</b>	<b>Q (Mvar)</b>
Desprezado	- 98,10
Incluído	- 35,80

A inclusão do acoplamento na linha de feixe expandido no estudo de fluxo de carga mostra que a potência reativa tende a diminuir em valores absolutos. Portanto, verifica-se que há uma capacidade de transmissão superior ao esperado. Esta informação denota a devida consonância em relação aos estudos de fluxo de potência observados no trabalho de [MONTEIRO, 2004], quando foi detectada maior compatibilidade nos valores de potência reativa encontrados por simulação em relação às medições de campo.

## 6.2 Solução Numérica na Análise da Estabilidade Contra Perda de Sincronismo

### 6.2.1 Avaliação Inicial

Na Tabela 6.2 são apresentados os parâmetros obtidos com a rotina desenvolvida, e que são necessários à aplicação do diagrama de blocos, de acordo com o modelo para resolução numérica apresentado na Figura 5.6. Durante a perturbação, a potência gerada é totalmente convertida em energia cinética através de aceleração rotórica tornando interrompido o fornecimento à rede (amplitude nula da componente de falta).

**Tabela 6.2** – Parâmetros característicos da equação de potência em função da abertura angular.

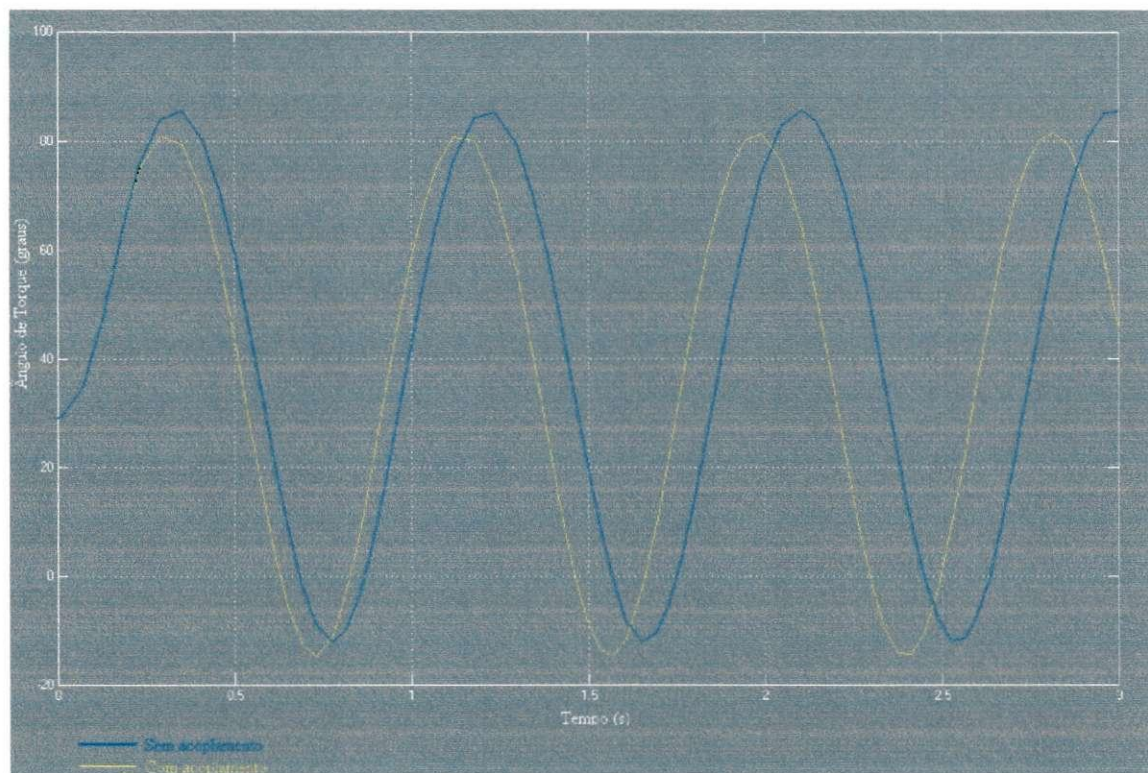
Acoplamento	Tensão Interna ( $E_f$ )		Potência			
	Módulo (kV)	Fase ( $^\circ$ )	Componente de Perdas (p.u.)	Amp. Senóide (p.u.)		Defasagem ( $^\circ$ )
				Regime permanente	Pós-defeito	
<b>Desprezado</b>	13,04	22,55	0,176	2,401	1,779	2,48
<b>Incluído</b>	14,01	23,12	0,205	2,407	1,912	3,82

Da Tabela anterior observa-se que a representação dos parâmetros mútuos de sequência positiva no estudo de fluxo de carga resulta em uma tensão interna maior que a esperada quando os efeitos do acoplamento são desprezados. Verifica-se também que a amplitude da componente senoidal pós-defeito que relaciona potência e ângulo de carga apresenta valor superior ao esperado. Como consequência, obtém-se uma área de desaceleração maior para a situação ao qual se incluem os parâmetros mútuos, ocasionando uma margem de estabilidade transitória superior ao caso em que estes efeitos são desprezados.

### 6.2.2 Análise de Comportamento Transitório

Inicialmente verificou-se o comportamento do ângulo de torque do gerador síncrono com uma simulação referida a um curto circuito trifásico sólido (franco) próximo ao barramento 6, eliminado após 0,15 segundos (9 ciclos da frequência fundamental) através da abertura permanente da linha em defeito (1-6) conectada ao barramento sob falta.

O gráfico da Figura 6.1 ilustra o comportamento transitório angular da máquina síncrona para os casos em que o acoplamento é desprezado e incluído.



**Figura 6.1** – Comportamento do ângulo de torque em função do tempo para um curto de duração de 9 ciclos com posterior retirada da linha em defeito.

Comparando ambos os casos, é possível verificar que a inclusão dos efeitos de acoplamento na linha de transmissão de feixe expandido resultou em uma menor variação do ângulo de torque e, conseqüentemente, da frequência da rede durante o transitório eletromecânico. Desta forma, a representação dos parâmetros mútuos de sequência positiva dispostos no estudo de fluxo de potência incide em um amortecimento das oscilações acima do esperado quando estes parâmetros não são representados. Em termos das variações de frequência, foram verificados valores em torno de 1 Hz, que justifica a modelagem dos parâmetros dependentes da frequência segundo hipótese apresentada do critério das áreas.

A Tabela 6.3 indica os valores obtidos para o TCE nas condições ao qual o efeito do acoplamento é considerado e desprezado, com base no diagrama de blocos construído no SIMULINK.

**Tabela 6.3** – Tempo Crítico de Extinção (TCE) obtido por resolução numérica no SIMULINK.

Acoplamento	TCE (s)
Desprezado	0,2048
Incluído	0,2085

Os valores do TCE obtidos através do SIMULINK mostram que a representação do acoplamento resulta em um tempo de atuação contra perda de sincronismo superior ao esperado. Logo, a margem de estabilidade transitória do gerador é superior à estimada pelo modelo típico, da mesma forma que o ângulo crítico de extinção da falta. A diferença entre os valores obtidos foi aproximadamente de 0,22 ciclos da frequência fundamental.

### 6.3 Avaliação do TCE a partir da Rotina Desenvolvida

O processo de cálculo da rotina se inicia com a matriz de admitância nodal da rede na condição de regime permanente, inclusão da reatância transitória de eixo direto e da admitância da carga, prossegue com o método de redução de Kron, análise dos três estágios necessários para aplicação do critério de áreas (pré, durante e após o defeito), finalizando com o ajuste de curvas e obtenção do TCE. São indicados na Tabela 6.4 os valores obtidos para o TCE através da aplicação deste método, segundo a rotina implementada.

**Tabela 6.4** – Tempo Crítico de Extinção (TCE) obtido por rotina no MATLAB<sup>®</sup> utilizando o critério de áreas.

Acoplamento	TCE (s)
Desprezado	0,2022
Incluído	0,2131

Pode-se observar na Tabela 6.4 que os valores obtidos para o TCE em ambos os casos apresentam concordância no que se refere a uma maior segurança na estabilidade transitória quando da inclusão dos parâmetros mútuos no estudo de fluxo de carga. O maior erro encontrado em comparação à resolução numérica para o cálculo TCE, nesta situação, foi de apenas 2,2%.

Nas Figuras 6.2 e 6.3 são apresentados os gráficos referentes ao critério das áreas para ambas as situações.

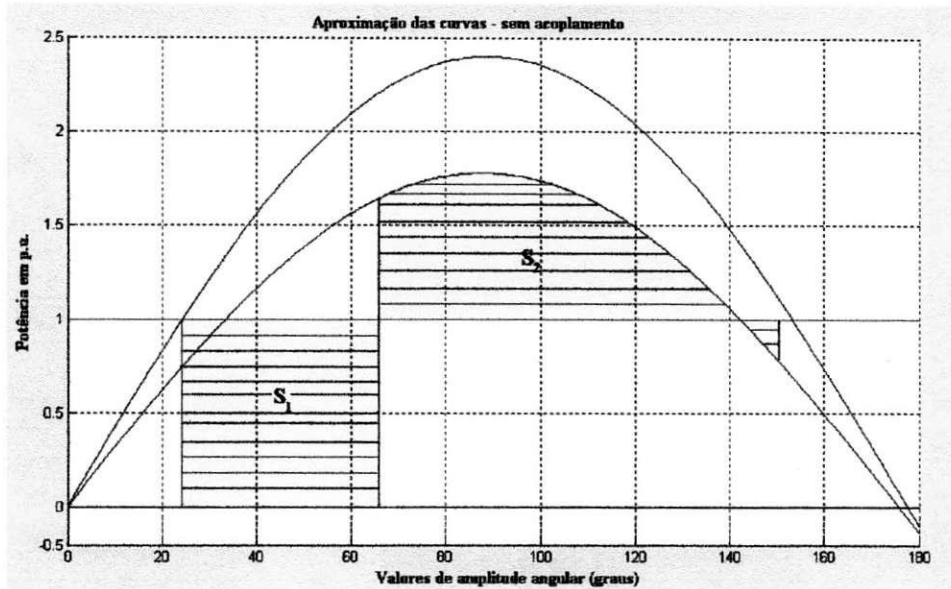


Figura 6.2 – Representação do critério das áreas com os efeitos de acoplamento desprezados.

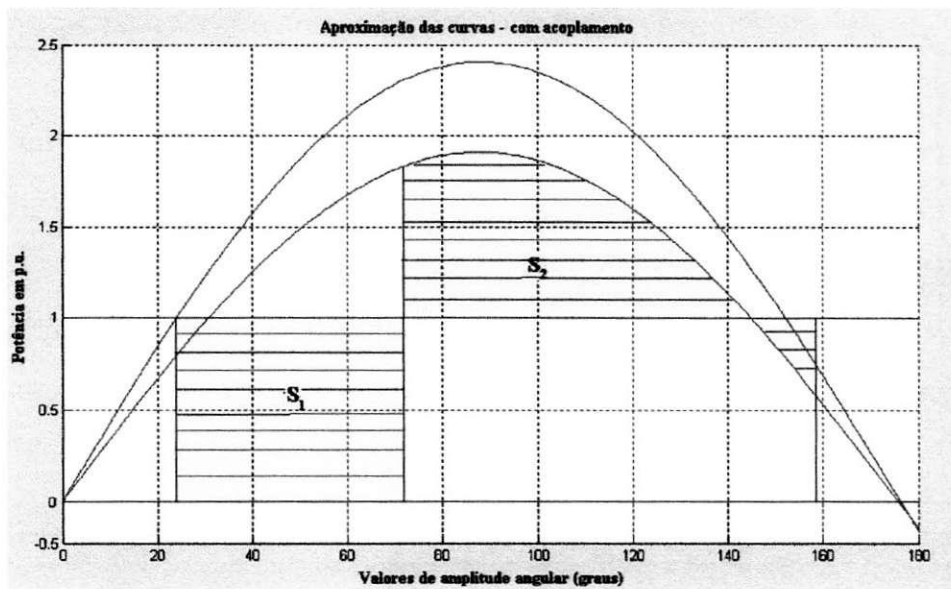


Figura 6.3 – Representação do critério das áreas incluindo o acoplamento.

Das Figuras anteriores, observa-se que uma maior amplitude da curva pós- defeito para o caso em que o acoplamento magnético foi incluído (Figura 6.3). Isto reflete uma área de desaceleração maior com decorrente aumento da margem de estabilidade e do ângulo crítico.

## 6.4 Análise da Dependência dos Parâmetros do Circuito

### 6.4.1 Constante de Inércia

A diferença entre os valores do tempo crítico de extinção se acentua quanto maior for a constante de inércia da máquina síncrona. Na Tabela 6.5 são apresentados os valores do TCE obtidos para as duas situações em análise, considerando a elevação da constante de inércia do gerador em 60%, ou seja, passando de 5 para 8 segundos.

**Tabela 6.5** – Valores obtidos para o TCE com a elevação da constante de inércia.

Acoplamento	Tempo Crítico de Extinção (TCE) em segundos	
	SIMULINK	Rotina no MATLAB®
Desprezado	0,2480	0,2557
Incluído	0,2680	0,2859

### 6.4.2 Reatância Transitória

Além da premissa considerada no tópico anterior, também foi considerada a situação em que a máquina possui um valor de reatância diferente do nominal, no intuito de avaliar como a variação desse parâmetro influencia na estabilidade do sistema.

Foi analisada a transição entre os valores das áreas acelerante e desacelerante, em relação à variação da impedância transitória do gerador. Os valores do TCE observados considerando uma elevação da reatância transitória para 0,24 p.u. assim como os ângulos críticos calculados com a rotina desenvolvida são apresentados na Tabela 6.6.

**Tabela 6.6** – Valores obtidos para o TCE e  $\delta_{crit}$  com a elevação da reatância transitória da máquina.

Acoplamento	Ângulo crítico (graus)	Tempo Crítico de Extinção (TCE) em segundos
Desprezado	71,82	0,1942
Incluído	75,86	0,2062

Da Tabela 6.6, percebe-se que o aumento da reatância transitória do gerador diminui o limite de carregamento que assegura a estabilidade, ou seja, deixa o sistema com mais vulnerável à instabilidade.

## **6.5 Considerações**

Os resultados obtidos com as simulações realizadas permitiram avaliar a influência da inclusão dos parâmetros mútuos de seqüência positiva no cálculo do tempo crítico de extinção de um distúrbio severo, analisando a estabilidade transitória e a sensibilidade do TCE ao acoplamento magnético entre circuitos paralelos de uma linha de transmissão de feixe expandido (FEX). Além disso, o estudo realizado indicou variações no fluxo de carga em regime permanente e tanto a análise numérica quanto os resultados da rotina desenvolvida forneceram como resultado a elevação da margem de estabilidade transitória a um distúrbio severo quando da representação dos efeitos do acoplamento entre as linhas de transmissão paralelas.



## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Efetou-se a análise da estabilidade transitória angular, sob a ótica do cálculo do tempo de eliminação de defeitos contra perda de sincronismo, considerando os efeitos de acoplamento e transposição entre linhas de transmissão fisicamente próximas. Os procedimentos realizados contemplaram a análise do fluxo de carga e as discrepâncias referidas aos modelos com e sem a inclusão dos parâmetros mútuos de seqüência positiva entre circuitos de transmissão paralelos. A partir disso, destaca-se a implementação do método de redução de redes e aplicação do critério das áreas, visando redução de incertezas e aproximações na comparação com o método usual de representação das linhas.

As simulações realizadas indicaram a redução da potência reativa gerada quando da representação do acoplamento no estudo de fluxo de carga. Devido a isto, as variações verificadas na matriz de admitância nodal da rede e nas tensões dos barramentos resultaram na indicação de uma margem de estabilidade transitória superior à estimada com modelos usuais, reflexo do aumento dos valores obtidos no cálculo do TCE.

A análise da dependência do TCE com parâmetros do circuito como a constante de inércia e a reatância transitória da máquina mostrou que pode ocorrer maior ou menor sensibilidade do tempo crítico de extinção com o acoplamento, dependendo de características próprias da rede a avaliar-se.

Tendo em vista os resultados obtidos, constata-se que o estudo realizado neste trabalho permitiu obter discrepâncias na análise da margem de estabilidade em comparação com modelos típicos de representação das linhas de transmissão. Deste modo, o conteúdo abordado denota uma contribuição para estudos de estabilidade transitória angular em sistemas elétricos que apresentam linhas de transmissão fisicamente próximas ou na mesma faixa de servidão, resultando em uma maior precisão nos valores obtidos para o Tempo Crítico de Extinção de faltas em avaliações de distúrbios transitórios eletromecânicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, P. M., FOUAD, A. A. “*Power System Control and Stability*”. Iowa, USA: Science Press, Ephrata, Pa. 17522, 1977.
- DOMMEL, H. W. *EMTP Theory Book*. Microtran Power System Analysis Corporation, Second Edition, Vancouver B. C., Canada, April 1996.
- FERNANDES Jr. D., MONTEIRO J. S., NEVES W. L. A., SOUZA B. A., FERNANDES A. B., “*Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão Mutuamente Acopladas para Estudos de Fluxo de Potência*”, XVI Congresso Brasileiro de Automática, 2006.
- GLOVER, J. D., SARMA, M. S., “*Power System Analysis and Design*” – Third Edition, Brooks/Cole Wadsworth Group., 2002.
- KIMBARK, E. W., “*Power System Stability*” – Volume I: Elements of Stability Calculations. New York / London / Sydney: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- KUNDUR P., PASERBA J., AJJARAPU V., G., BOSE A., CANIZARES C., HATZIARGYRIOU N., D., STANKOVIC A., TAYLOR C., VAN Cutsem T., VITTAL V., “*Definition and Classification of Power System Stability*”, IEEE/CIGRE, VOL 19 - N° 2, 2004.
- KUNDUR, P., “*Power System Stability and Control*”. New York, USA: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- LEUVEN EMTP CENTER. *ATP – Alternative Transients Program – Rule Book*, Heverlee, Belgium, July 1987.

- MELLO, F. P. de. “*Dinâmica das Máquinas Elétricas - IF*”. Trad. Elvio Rabenschlag, Almoraci S. Algarve e João M. Soares. 2. ed. Santa Maria, Edições UFSM, 1983. 109p.
- MONTEIRO, J. S., “*Cálculo dos Parâmetros de Linhas de Transmissão para Estudos de Fluxo de Potência Considerando o Efeito de Outras Linhas Fisicamente Próximas*”, Dissertação de Mestrado, UFCG, julho de 2004.
- MONTEIRO J. S., FERNANDES Jr. D., NEVES W. L. A., SOUZA B. A., FERNANDES A. B., “*Linhas de Transmissão Acopladas: Cálculo de Parâmetros para Estudos de Fluxo de Potência*”, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2006.
- MOTA, W. S. “*Simulação de transitórios eletromecânicos em Sistemas de potência*”, Campina Grande – PB: EPGRAF, pp. 2-3, 2006.
- NASCIMENTO, J. A., “*Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas de Energia Elétrica pelo Critério de Igualdade de Áreas Estendido*”, Dissertação de Mestrado, UFPB – Campus II, outubro de 1995.
- NEDIC, D. P. “*Simulation of Large System Disturbances*”, A thesis submitted for degree of Doctor of Philosophy, University of Manchester Institute for Science and Technology (UMIST), December of 2003.
- POWER WORLD CORPORATION. “*Power World Simulator 12.0*”, Tutorial.
- VENIKOV, V. A., “*Transients in Electrical Power Systems*”, MIR Publisher, 1980.

# ANEXO 1 – ROTINA PARA CÁLCULO DA TENSÃO INTERNA DO GERADOR E REDUÇÃO DA REDE PELO MÉTODO DE KRON

Esta rotina foi desenvolvida no MATLAB<sup>®</sup> com o intuito de manipular a matriz de admitância fornecida pela plataforma de simulação do fluxo de carga, incluindo a reatância transitória da máquina síncrona e admitância da carga, com posterior utilização do método de Kron para redução da rede.

```
clear all
close all
clc

% Matriz de admitância e resultado do fluxo de carga
% Condição pré-falta
%*****
j = sqrt(-1);
Ybus = sparse(7); % Especificação da característica de esparsidade da matriz
% Elementos não nulos da matriz nodal – dados do arquivo proveniente do Power World®
Ybus( 1, 1) = 2.6080 + j*( -14.6165);
Ybus( 1, 2) = -1.2711 + j*( 7.4013);
Ybus( 1, 4) = -1.3368 + j*( 7.6070);
Ybus( 2, 1) = -1.2711 + j*( 7.4013);
Ybus( 2, 2) = 2.7906 + j*( -15.2391);
Ybus( 2, 3) = -1.5195 + j*( 8.6252);
Ybus( 3, 2) = -1.5195 + j*( 8.6252);
Ybus( 3, 3) = 1.5422 + j*( -9.7664);
Ybus( 3, 6) = -0.0227 + j*( 1.1412);
Ybus( 4, 1) = -1.3368 + j*( 7.6070);
Ybus( 4, 4) = 2.8471 + j*( -14.9351);
Ybus( 4, 5) = -1.5103 + j*( 8.5887);
Ybus( 5, 4) = -1.5103 + j*( 8.5887);
Ybus( 5, 5) = 3.0487 + j*( -17.3854);
Ybus( 5, 6) = -1.5384 + j*( 9.1395);
Ybus( 6, 3) = -0.0227 + j*( 1.1412);
Ybus( 6, 5) = -1.5384 + j*( 9.1395);
Ybus( 6, 6) = 1.5611 + j*( -18.0407);
Ybus( 6, 7) = -0.0000 + j*( 8.3333);
Ybus( 7, 6) = -0.0000 + j*( 8.3333);
Ybus( 7, 7) = 0.0000 + j*( -8.3333);

% Tensões nos barramentos (obtidas do Power World®)
V( 1) = 1.000000 + j*( 0.000000);
V( 2) = 1.123248 + j*( 0.006409);
V( 3) = 1.129396 + j*( 0.028405);
V( 4) = 1.194068 + j*( 0.058083);
V( 5) = 1.194506 + j*( 0.131131);
V( 6) = 1.150036 + j*( 0.202416);
V( 7) = 1.011326 + j*( 0.282347);
```

```

%*****
% Impedância do transformador
zt = 1/(Ybus( 7, 6));
% Impedância da máquina síncrona (especificada pelo usuário)
zd = input('Impedância transitória de eixo direto da máquina síncrona (forma: j*Xd ->em p.u.): ');

% Especificação da potência da carga – representação no transitório por modelo de impedância constante
Sc = 300000000 + j*100000000;
Vbase = 230000;
yc = (conj(Sc))/( Vbase ^2);

%Corrente de armadura
ia = (V( 7) - V( 6))/zt;
modulo_corrente = abs(ia)
angulo_defasagem = (180/pi)*angle(ia)

%Tensao interna do gerador
Ef = V( 7) + zd*ia;
modulo_tensao_interna = abs(ef)
angulo_de_carga = (180/pi)*angle(ef)

% Matriz expandida contemplando a reatância transitória de eixo direto e a admitância da carga
Ybarra = sparse(8);
Ybarra( 1, 1) = Ybus( 1, 1) + yc;
Ybarra( 1, 2) = Ybus( 1, 2);
Ybarra( 1, 4) = Ybus( 1, 4);
Ybarra( 2, 1) = Ybus( 2, 1);
Ybarra( 2, 2) = Ybus( 2, 2);
Ybarra( 2, 3) = Ybus( 2, 3);
Ybarra( 2, 5) = Ybus( 2, 5);
Ybarra( 3, 2) = Ybus( 3, 2);
Ybarra( 3, 3) = Ybus( 3, 3);
Ybarra( 3, 4) = Ybus( 3, 4);
Ybarra( 3, 6) = Ybus( 3, 6);
Ybarra( 4, 1) = Ybus( 4, 1);
Ybarra( 4, 3) = Ybus( 4, 3);
Ybarra( 4, 4) = Ybus( 4, 4);
Ybarra( 4, 5) = Ybus( 4, 5);
Ybarra( 5, 2) = Ybus( 5, 2);
Ybarra( 5, 4) = Ybus( 5, 4);
Ybarra( 5, 5) = Ybus( 5, 5);
Ybarra( 5, 6) = Ybus( 5, 6);
Ybarra( 6, 3) = Ybus( 6, 3);
Ybarra( 6, 5) = Ybus( 6, 5);
Ybarra( 6, 6) = Ybus( 6, 6);
Ybarra( 6, 7) = Ybus( 6, 7);
Ybarra( 7, 6) = Ybus( 7, 6);
Ybarra( 7, 7) = Ybus( 7, 7) + (1/zd);
Ybarra( 7, 8) = -(1/zd);
Ybarra( 8, 7) = -(1/zd);
Ybarra( 8, 8) = (1/zd);

```

%Troca de posição entre a segunda e a última linhas – realocação dos barramentos na matriz

```
Ybar_ex = sparse(8);
Ybar_ex( 1, 1) = Ybarra( 1, 1);
Ybar_ex( 1, 8) = Ybarra( 1, 2);
Ybar_ex( 1, 4) = Ybarra( 1, 4);
Ybar_ex( 2, 1) = Ybarra( 8, 1);
Ybar_ex( 2, 2) = Ybarra( 8, 8);
Ybar_ex( 2, 3) = Ybarra( 8, 3);
Ybar_ex( 2, 3) = Ybarra( 8, 4);
Ybar_ex( 2, 5) = Ybarra( 8, 5);
Ybar_ex( 2, 6) = Ybarra( 8, 6);
Ybar_ex( 2, 7) = Ybarra( 8, 7);
Ybar_ex( 2, 8) = Ybarra( 8, 2);
Ybar_ex( 3, 2) = Ybarra( 3, 8);
Ybar_ex( 3, 8) = Ybarra( 3, 2);
Ybar_ex( 3, 3) = Ybarra( 3, 3);
Ybar_ex( 3, 4) = Ybarra( 3, 4);
Ybar_ex( 3, 6) = Ybarra( 3, 6);
Ybar_ex( 4, 1) = Ybarra( 4, 1);
Ybar_ex( 4, 3) = Ybarra( 4, 3);
Ybar_ex( 4, 4) = Ybarra( 4, 4);
Ybar_ex( 4, 5) = Ybarra( 4, 5);
Ybar_ex( 5, 8) = Ybarra( 5, 2);
Ybar_ex( 5, 4) = Ybarra( 5, 4);
Ybar_ex( 5, 5) = Ybarra( 5, 5);
Ybar_ex( 5, 6) = Ybarra( 5, 6);
Ybar_ex( 6, 3) = Ybarra( 6, 3);
Ybar_ex( 6, 5) = Ybarra( 6, 5);
Ybar_ex( 6, 6) = Ybarra( 6, 6);
Ybar_ex( 6, 7) = Ybarra( 6, 7);
Ybar_ex( 7, 6) = Ybarra( 7, 6);
Ybar_ex( 7, 7) = Ybarra( 7, 7);
Ybar_ex( 7, 2) = Ybarra( 7, 8);
Ybar_ex( 8, 1) = Ybarra( 2, 1);
Ybar_ex( 8, 2) = Ybarra( 2, 8);
Ybar_ex( 8, 3) = Ybarra( 2, 3);
Ybar_ex( 8, 4) = Ybarra( 2, 4);
Ybar_ex( 8, 5) = Ybarra( 2, 5);
Ybar_ex( 8, 6) = Ybarra( 2, 6);
Ybar_ex( 8, 7) = Ybarra( 2, 7);
Ybar_ex( 8, 8) = Ybarra( 2, 2);
```

% Metodo de Kron para redução da rede

```
Sy = size(Ybar_ex);
```

```
Ng = 2;
```

```
Ynn = Ybar_ex(1:Ng,1:Ng);
```

```
Ynr = Ybar_ex(1:Ng,(Ng+1):Sy(1));
```

```
Ym = Ybar_ex((Ng+1):Sy(1),1:Ng);
```

```
Yrr = Ybar_ex((Ng+1):Sy(1),(Ng+1):Sy(1));
```

```
YRED = Ynn-Ynr*(inv(Yrr))*Yrn
```

% identificação da ordem da matriz

% ordem da matriz reduzida

% matriz reduzida

## ANEXO 2 – ROTINA PARA OBTENÇÃO DOS ELEMENTOS DA MATRIZ DE ADMITÂNCIA NODAL REDUZIDA E PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO NOS TRÊS ESTÁGIOS

Esta rotina foi desenvolvida no MATLAB<sup>®</sup> com a finalidade de obter os parâmetros da equação de swing do sistema avaliado.

% Elementos da matriz admitância

Y11 = abs(YRED(2,2))

TETA11 = angle(YRED(2,2))

Y12 = abs(YRED(2,1))

TETA12 = angle(YRED(2,1))

% Elementos da expressão da potencia em função do ângulo de carga

% Condição pré-falta

Vinf = V( 1);

% tensão no barramento infinito

Pcpref = (modulo\_tensao\_interna^2)\*Y11\*cos(TETA11)

% Componente de perdas

PMpref = (modulo\_tensao\_interna)\*Vinf\*Y12

% Amplitude da componente senoidal

lambdapref = (180/pi)\*(TETA12 - pi/2)

% Defasagem

% Condição pré-falta

% Curto trifásico franco

Pcdur = 0;

% Componente de perdas

PMdur = 0;

% Amplitude da componente senoidal

lambdadur = 0;

% Defasagem

% Condição pós-falta

% A rotina 1 é executada para a situação pós-falta

% Os elementos a seguir foram obtidos da execução da rotina 1 considerando a matriz pós-defeito

Pcpos = 0.1792

PMpos = 1.9120

lambdapos = 4.3198

## ANEXO 3 – ROTINA PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA ABERTURA ANGULAR E CÁLCULO DO TCE

Esta rotina foi desenvolvida no MATLAB® tendo como principal objetivo a obtenção dos ângulos inicial, limite e crítico para cálculo do TCE.

```
% Curvas Potência - ângulo
delta = linspace(0,pi,200);
graus = (180/pi)*delta;

Pmec = ones(1,length(delta))*1.000;           % Especificação do comprimento do vetor para a
                                              % potência mecânica – admitida constante;

% Expressões da potência elétrica nas três situações de análise
pre = Pcpre + PMpre*(sin(delta)*cos((pi/180)*lambdapre) + cos(delta)*sin((pi/180)*lambdapre));
dur = 0;
pos = Pcpos + PMpos*(sin(delta)*cos((pi/180)*lambdapos) + cos(delta)*sin((pi/180)*lambdapos));

figure(1)
grid
hold on
plot(graus, Pmec,'b')
plot(graus, pre, 'r')
plot(graus, dur, 'g')
plot(graus, pos, 'k')
title(['Análise pelo critério das áreas - sem acoplamento']);
xlabel(['Valores de amplitude angular (graus)']);
ylabel(['Valores de potência (p.u.)']);

% Ângulo inicial
deltazero = asin((Pmec(1) - Pcpre)/PMpre) + (pi/180)*lambdapre;
deltazero_graus = (180/pi)*deltazero           % Condição inicial

% Ângulo de limite
deltalim = (pi - asin((Pmec(1) - Pcpos)/PMpos)) + (pi/180)*lambdapos;
deltalim_graus = (180/pi)*deltalim           % Condição limite de deslocamento
```



```

% Aproximação das curvas por seno
% Ajuste de ângulo
preang = - (pi/180)*lambdapre + pi;
prefatorang = pi/preang;
durang = - (pi/180)*lambdadur + pi;
durfatorang = pi/durang;
posang = - (pi/180)*lambdapos + pi;
posfatorang = pi/posang;

figure(2)
grid
hold on
plot(graus,PMpre*sin(prefatorang*delta),'b')
plot(graus,PMdur*sin(durfatorang*delta),'b')
plot(graus,PMpos*sin(posfatorang*delta),'b')
plot(graus, Pmec,'b')
title(['Aproximação das curvas: critério das áreas - com acoplamento']);
xlabel(['Valores de amplitude angular (graus)']);
ylabel(['Valores de potência (p.u.)']);

% Obtenção do ângulo crítico e TCE
r1 = PMdur/PMpre;
r2 = PMpos/PMpre;

angcrit = acos(((Pmec(1)/PMpre)*(deltalim - deltazero) + r2*(cos(deltalim)) - r1*cos(deltazero))/(r2 - r1));
angcrit_graus = (180/pi)*angcrit

H = input('Constante de inércia da máquina síncrona (em segundos): ');
f = input('Frequência da rede segundo a modelagem no estudo de fluxo de potência (em Hz): ');
w0 = 2*pi*f;

TCE = sqrt((4*H)*(angcrit - deltazero)/(w0*Pmec(1)))

```