



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TRABALHO INDIVIDUAL

**ANÁLISE DINÂMICA DO MERCADO
DE SISTEMAS DE ENERGIA**

Fernando Porrua

Orientador: Prof. Dr. Alexandre S. Bazanella

Porto Alegre, Outubro de 2003

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 O Autoprodutor e o Produtor Independente de Energia Elétrica | 1 |
| 1.2 A Estabilidade do Mercado de Energia Elétrica | 1 |
| 1.3 Objetivo do Trabalho Individual | 2 |
| 2 A DINÂMICA DE SISTEMAS ECONÔMICOS SIMPLES | 3 |
| 3 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MERCADOS DE ENERGIA ELÉTRICA EM NÍVEL DE TRANSMISSÃO | 4 |
| 3.1 Caso de um Gerador e um Consumidor com Demanda Elástica | 4 |
| 3.2 Caso de Demanda Inelástica | 7 |
| 3.3 Caso de Demanda Variável | 10 |
| 3.4 Consideração do Desequilíbrio entre a Carga e a Geração | 12 |
| 4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICABILIDADE DO MÉTODO PARA OS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO | 20 |
| 5 CONCLUSÕES | 21 |
| 6 REFERÊNCIAS | 22 |

1 INTRODUÇÃO

O processo de reforma do setor elétrico, pelo qual ainda passam alguns países, busca o aumento de eficiência econômica através da competição entre os agentes que formam a indústria de energia elétrica (IEE). Para que esse ambiente de competição seja eficiente é necessária a participação de muitos agentes de compra e de venda, o qual está sustentado no conceito de mercado.

Com esta idéia, o que se busca é um ambiente de livre formação do preço da energia, através do equilíbrio entre a oferta e a demanda, como acontece com qualquer outra mercadoria.

Neste processo, surgiram, entre outras Figuras de destaque, o produtor independente e o autoprodutor de energia elétrica, que passam a desempenhar um papel cada vez mais importante, principalmente por se tratar de produtores descentralizados, com estratégias diferentes às das grandes geradoras estatais que tinham como foco principal a construção de grandes centrais, longe dos centros de consumo. As empresas descentralizadas podem adotar como estratégias a construção de centrais de menor porte e próximas dos centros de consumo, como é o caso da geração distribuída [19].

1.1 O Autoprodutor e o Produtor Independente de Energia Elétrica

Antes do movimento de reestruturação do setor elétrico essas duas atividades não eram relevantes por sua reduzida participação e por não estarem conectadas diretamente às redes de transmissão e distribuição. No Brasil, por exemplo, algumas poucas cooperativas produziam energia para atender suas cargas locais.

No Brasil, a regulamentação das atividades do autoprodutor e produtor independente de energia elétrica (PIEE) ocorreu com o Decreto nº 2.003 de 10 de Setembro de 1996 [1].

De acordo com esse Decreto, o PIEE é a pessoa física, jurídica ou empresas reunidas em consórcio, que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida por sua conta e risco. O mesmo documento define que o autoprodutor é a pessoa física, jurídica ou empresas reunidas em consórcio, que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de novas tecnologias têm facilitado o aumento do número de PIEEs e autoprodutores e as novas regras de funcionamento dos mercados de energia possibilitam esses produtores a competir com outros geradores em busca do mercado.

Com o aumento gradual do número desses pequenos produtores, e sua conexão às redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, muitas questões passaram a ser analisadas do ponto de vista técnico e econômico, avaliando as vantagens e desvantagens de sua participação no sistema [5], [6], [18], [19].

1.2 A Estabilidade do Mercado de Energia Elétrica

O processo de reestruturação da IEE, em particular o aumento da competição na geração, está afastando o setor da sua estrutura convencional verticalmente integrada, para um ambiente de crescente exposição às forças de mercado. Desta forma, os agentes estarão inseridos em um ambiente competitivo, onde seus objetivos serão obter maiores lucros individualmente.

O funcionamento de um mercado, em qualquer atividade, é tal que o preço de determinada mercadoria funciona como um sinal do equilíbrio entre a oferta e a demanda. De acordo com este sinal, o lado da oferta (os produtores) irá adequar sua produção, de forma a obter o maior lucro. Analogamente, o lado da demanda (os consumidores) responde à esse sinal, buscando maximizar seu benefício. Este comportamento observado entre a oferta e demanda, em resposta ao sinal (que é o preço), levará o mercado à oscilar, até que atinja um ponto de equilíbrio.

Com a desregulamentação dos sistemas de energia elétrica, espera-se um comportamento análogo ao citado no parágrafo anterior e com respostas (por parte dos geradores e/ou consumidores) numa escala de tempo que pode chegar à poucos minutos.

Conforme alguns estudos realizados [3], [4], [7], [8], [9], [12], [15], [16] e [17], o uso de mecanismos de mercado para determinar o nível de produção dos geradores pode levar o sistema à instabilidade, se não for considerado o comportamento dinâmico do mercado ao serem definidas as políticas de funcionamento.

1.3 Objetivo do Trabalho Individual

Alvarado [3] apresenta uma forma de equacionamento do comportamento do mercado de energia no nível de transmissão, baseada na dinâmica de sistemas econômicos simples (conceito este introduzido pelo autor), através de equações diferenciais de primeira ordem.

O presente trabalho tem por objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre o assunto abordado em Alvarado [3], dando ênfase à possibilidade de aplicar essa metodologia aos sistemas de distribuição de energia, com um enfoque na atuação do PIEEE em um ambiente competitivo.

2 A DINÂMICA DE SISTEMAS ECONÔMICOS SIMPLES

A análise feita por Alvarado [3] está baseada no comportamento dinâmico de sistemas econômicos. De acordo com o comportamento econômico de um mercado, um determinado produtor de uma mercadoria irá aumentar sua produção enquanto o seu custo marginal for menor do que o preço. Esta variação de produção é ditada por uma constante de tempo, cujo valor depende das características do produtor.

Para o caso do consumidor, este irá aumentar seu consumo até o ponto em que o preço do produto se iguala ao seu benefício marginal. A velocidade com a qual ocorre essa expansão de consumo depende de cada consumidor.

De acordo com a teoria microeconômica, os consumidores e produtores de energia elétrica exibem o mesmo comportamento, ou seja, aumentam sua produção/consumo até o ponto no qual o custo/benefício marginal iguala o preço da energia.

Em termos matemáticos, o comportamento citado acima pode ser representado por:

$$\tau_{gi} \dot{P}_{gi} = \lambda - b_{gi} - c_{gi} P_{gi} \quad (2.1)$$

Onde o termo $b_{gi} + c_{gi} P_{gi}$ representa o custo marginal λ_{gi} do gerador i .
No caso do consumidor, a representação é a seguinte:

$$\tau_{dj} \dot{P}_{dj} = b_{dj} + c_{dj} P_{dj} - \lambda \quad (2.2)$$

Onde o termo $b_{dj} + c_{dj} P_{dj}$ representa o benefício marginal λ_{dj} do consumidor j .

Uma condição necessária para caracterizar um ambiente de mercado é que exista um equilíbrio entre a demanda e a oferta. Em termos de energia elétrica, existindo o equilíbrio entre a carga e a geração, tal condição pode ser descrita por:

$$\sum_{i=1}^m P_{gi} = \sum_{j=1}^n P_{dj} \quad (2.3)$$

Em sistemas de energia reais, sempre existirá um desequilíbrio entre a carga e a geração, o que faz com que uma quantidade de energia seja armazenada no sistema por um determinado tempo (em regime permanente essa energia acumulada deve ser reduzida a zero). Para incluir a dinâmica da energia armazenada, a equação (2.3) sofre uma pequena alteração:

$$\dot{E} = \sum_{i=1}^m P_{gi} - \sum_{j=1}^n P_{dj} \quad (2.4)$$

A energia armazenada no sistema é a integral da equação (2.4).

3 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MERCADOS DE ENERGIA ELÉTRICA EM NÍVEL DE TRANSMISSÃO

Em mercados de energia elétrica competitivos, onde os geradores (e alguns consumidores) têm a capacidade de responder às variações do preço da energia no curto e no longo prazos¹, ao serem definidas as estratégias de operação pelo Operador do Sistema (ou qualquer outra política definida por outro agente), deve-se levar em consideração se o mercado que está sujeito à estes modos de operação apresentará um comportamento estável.

Para mostrar como a dinâmica do mercado é afetada pelo comportamento da geração e/ou da carga, foram simulados quatro casos com o programa Matlab[®], definidos como [4]:

- Caso de um gerador e um consumidor com demanda elástica (variável);
- Caso de geradores atendendo uma demanda inelástica (fixa);
- Caso de m geradores atendendo n consumidores com demanda elástica;
- Caso de m geradores atendendo n consumidores com demanda variável, considerando o desequilíbrio entre a carga e a geração.

Para realizar os estudos mencionados anteriormente, foram feitas algumas considerações com o objetivo de auxiliar no entendimento dos conceitos. Estas considerações foram [16]:

- O custo marginal² λ_g dos geradores é uma função linear da potência gerada P_g ;
- O benefício marginal³ λ_d dos consumidores é uma função linear da potência consumida P_d e possui uma inclinação negativa;
- A resposta às variações de preço, por parte do gerador ou consumidor, não será instantânea. Ela será ditada por uma constante de tempo em uma equação diferencial de primeira ordem;
- As perdas no sistema de transmissão são desconsideradas;
- Qualquer gerador/consumidor é considerado como uma injeção/extração fixa no mercado;
- As restrições provenientes de congestionamento na rede não são consideradas;
- A menos que se diga o contrário, não há desequilíbrio entre a carga e a geração.

Os resultados de algumas simulações são apresentados em cada caso, para esclarecer as condições sob as quais estes mercados apresentam comportamento estável ou instável.

3.1 Caso de um Gerador e um Consumidor com Demanda Elástica

As equações que descrevem essa situação, de um único gerador alimentando um consumidor com uma demanda elástica, são as seguintes:

$$\tau_g \dot{P}_g = \lambda - b_g - c_g P_g \quad (3.1.1)$$

¹ No longo prazo é mais comum, como, por exemplo, a redução de consumo que ocorreu no Brasil em virtude do racionamento de 2001, quando o governo anunciou multas (em algumas regiões do país) para quem não cumprisse uma meta de redução de consumo.

² O custo marginal representa o quanto o produtor irá gastar para aumentar a sua produção de uma unidade.

³ Valor limite no qual o benefício obtido ao consumir determinado produto se iguala ao preço do produto.

$$\tau_d \dot{P}_d = b_d + c_d P_d - \lambda \quad (3.1.2)$$

$$P_g = P_d \quad (3.1.3)$$

Onde o subscrito g identifica o gerador e o subscrito d identifica o consumidor (demanda).

As equações (3.1.1) e (3.1.2) descrevem o comportamento dinâmico da potência gerada P_g e da potência consumida P_d . Na equação (3.1.1), percebe-se que o gerador aumenta sua geração enquanto o preço da energia for maior do que o seu custo marginal. De forma similar, na equação (3.1.2) percebe-se que o consumidor aumenta seu consumo enquanto seu benefício marginal for maior do que o preço. A terceira equação indica que o equilíbrio carga/geração é mantido a todo instante. Na prática, esse equilíbrio não pode ser mantido a todo instante e isso tem conseqüências para o comportamento dinâmico do sistema, como será demonstrado mais adiante neste trabalho.

Algumas considerações podem ser feitas, levando-se em conta o que já se conhece sobre o comportamento do custo marginal de um gerador e o benefício marginal de um consumidor [4]:

- ⇒ O coeficiente c_d será sempre negativo, indicando que não é possível que o benefício marginal de um consumidor aumente com o aumento do consumo;
- ⇒ Assume-se que $b_d > b_g$, o que significa que o benefício marginal inicial do consumidor é maior que o custo marginal inicial do gerador;
- ⇒ O custo marginal inicial do gerador não pode ser menor ou igual a zero ($b_g > 0$);
- ⇒ Nem sempre se pode desconsiderar possíveis economias de escala por parte do gerador, portanto, ambos os casos são analisados: $c_g > 0$ e $c_g \leq 0$ (com economia de escala).

O ponto de equilíbrio do sistema apresentado nas equações acima é obtido fazendo-se as derivadas iguais a zero nas equações (3.1.1) e (3.1.2):

$$\lambda - b_g - c_g P_g = 0 \quad (3.1.4)$$

$$b_d + c_d P_d - \lambda = 0 \quad (3.1.5)$$

$$P_g - P_d = 0 \quad (3.1.6)$$

Este sistema pode ser apresentado na seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} -c_g & 0 & 1 \\ 0 & c_d & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_g \\ P_d \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_g \\ -b_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1.7)$$

A solução para este sistema é a seguinte:

$$P_g = \frac{b_d - b_g}{c_g - c_d} \quad (3.1.8)$$

$$P_g = P_d \quad (3.1.9)$$

$$\lambda = \frac{c_g b_d - c_d b_g}{c_g - c_d} \quad (3.1.10)$$

Observando-se a solução apresentada nas equações acima e levando-se em conta as considerações feitas anteriormente, pode-se concluir o seguinte:

- ⇒ A solução de regime permanente ocorre quando o custo marginal de geração iguala o benefício marginal de consumo;
- ⇒ O ponto de equilíbrio resulta em um valor positivo para o preço da energia ($\lambda > 0$), bem como para os montantes de potência gerada/consumida ($P_g = P_d > 0$). Isto pode ser observado nas equações (3.1.8) até (3.1.10), tendo em conta as considerações feitas anteriormente sobre os coeficientes;
- ⇒ Os coeficientes b_g , b_d , c_g e c_d influenciam de forma direta no valor da solução de regime permanente (ou no ponto de equilíbrio);
- ⇒ As constantes de tempo não têm influência na solução de regime permanente.

Para efetuar uma análise do comportamento dinâmico do sistema, somam-se as equações (3.1.1) e (3.1.2), eliminando o preço λ . Substituindo a equação (3.1.3) na soma de (3.1.1) e (3.1.2), obtém-se o seguinte resultado:

$$\dot{P}_g (\tau_g + \tau_d) = -P_g (c_g - c_d) + b_d - b_g \quad (3.1.11)$$

Tomando somente a parte homogênea da equação (3.1.11):

$$\dot{P}_g (\tau_g + \tau_d) = -P_g (c_g - c_d) \quad (3.1.12)$$

A solução da equação (3.1.12) pode ser obtida facilmente e é expressa por:

$$P_g = K \cdot e^{-\frac{(c_g - c_d)t}{\tau_g + \tau_d}} \quad (3.1.13)$$

Onde K é uma constante proveniente da integração da equação (3.1.12).

A partir da equação (3.1.13) pode-se obter a condição para a estabilidade do sistema representado pelas equações (3.1.1), (3.1.2) e (3.1.3), ou seja:

$$\frac{c_g - c_d}{\tau_g + \tau_d} > 0 \quad (3.1.14)$$

Sobre a condição dada pela equação (3.1.14), podem ser feitos os seguintes comentários:

- ⇒ Os coeficientes b_g e b_d não têm influência na estabilidade do sistema;
- ⇒ As constantes de tempo e os coeficientes c_g e c_d têm influência direta na estabilidade;
- ⇒ Como as constantes de tempo τ_g e τ_d são sempre positivas, basta ter $c_g > c_d$ para que o sistema seja estável. Essa última condição será sempre atendida, uma vez que $c_d < 0$, como já foi citado nas considerações anteriores.

Com base nestes resultados, pode-se concluir que este tipo de mercado é estável e uma análise estática é suficiente para concluir sobre seu comportamento econômico.

3.2 Caso de Demanda Inelástica

O termo *demanda inelástica* é usado quando o consumidor não responde às variações do preço da energia.

Para ilustrar o caso, serão desenvolvidas as equações para dois geradores atendendo uma demanda fixa P_D . As equações que descrevem o comportamento dinâmico deste sistema são:

$$\tau_{g1} \dot{P}_{g1} = \lambda - b_{g1} - c_{g1} P_{g1} \quad (3.2.1)$$

$$\tau_{g2} \dot{P}_{g2} = \lambda - b_{g2} - c_{g2} P_{g2} \quad (3.2.2)$$

$$P_{g1} + P_{g2} = P_D \quad (3.2.3)$$

De forma análoga ao que foi feito no Item 2, o ponto de equilíbrio é obtido analisando-se o seguinte sistema de equações lineares:

$$\begin{bmatrix} -c_{g1} & 0 & 1 \\ 0 & -c_{g2} & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{g1} \\ b_{g2} \\ P_D \end{bmatrix} \quad (3.2.4)$$

Para este sistema de equações tem-se a seguinte solução:

$$P_{g1} = \frac{c_{g2} P_D + b_{g2} - b_{g1}}{c_{g2} + c_{g1}} \quad (3.2.5)$$

$$P_{g2} = \frac{c_{g1} P_D + b_{g1} - b_{g2}}{c_{g2} + c_{g1}} \quad (3.2.6)$$

$$\lambda = \frac{c_{g2} c_{g1} P_D + c_{g1} b_{g2} + c_{g2} b_{g1}}{c_{g2} + c_{g1}} \quad (3.2.7)$$

Desta solução pode-se concluir que:

- ⇒ O equilíbrio é obtido quando os geradores (que não atingirem seus limites mínimo ou máximo) operam com os mesmos custos marginais. Isto pode ser verificado

igualando-se os custos marginais dos geradores 1 e 2 ($b_{g1} + c_{g1}P_{g1} = b_{g2} + c_{g2}P_{g2}$), o que resultará, após algumas manipulações, na equação (3.2.5) ou (3.2.6);

- ⇒ Da mesma forma que o caso do Item 3.1, os coeficientes b_g , b_d , c_g e c_d influenciam de forma direta no valor da solução de regime permanente (ou no ponto de equilíbrio) enquanto as constantes de tempo não têm influência nenhuma;
- ⇒ Uma variação da carga também provoca variação do ponto de equilíbrio;
- ⇒ Teoricamente pode acontecer de algum gerador apresentar um valor de geração negativo na solução do sistema (3.2.4). Isto significa que este gerador não deve participar do mercado.

A análise dinâmica deste sistema pode ser feita subtraindo a equação (3.2.1) da equação (3.2.2) e substituindo o valor de P_{g1} da equação (3.2.3). O resultado obtido dessa manipulação é o seguinte:

$$\dot{P}_{g2}(\tau_{g1} + \tau_{g2}) = -P_{g2}(c_{g2} + c_{g1}) + b_{g2} - b_{g1} - c_{g1}P_D \quad (3.2.8)$$

A parte homogênea da equação (3.2.8) é:

$$\dot{P}_{g2}(\tau_{g1} + \tau_{g2}) = -P_{g2}(c_{g2} + c_{g1}) \quad (3.2.9)$$

A solução da equação (3.2.9) é obtida, após algumas manipulações, através da integração de ambos os termos, resultando na seguinte expressão:

$$P_{g2} = K \cdot e^{\frac{-(c_{g2} + c_{g1})}{\tau_{g2} + \tau_{g1}} t} \quad (3.2.10)$$

A condição para que este sistema seja estável é:

$$\frac{c_{g2} + c_{g1}}{\tau_{g2} + \tau_{g1}} > 0 \quad (3.2.11)$$

Pode-se chegar em algumas conclusões sobre a condição de estabilidade da equação (3.2.11):

- ⇒ Os coeficientes lineares de custo b_{g1} e b_{g2} não influenciam na estabilidade da solução;
- ⇒ Se ambos c_{g1} e c_{g2} forem positivos, a estabilidade é garantida;
- ⇒ É possível que c_{g1} ou c_{g2} seja negativo sem que isso torne o sistema instável, desde que o coeficiente negativo seja menor em módulo do que o coeficiente positivo;
- ⇒ As constantes de tempo têm influência no comportamento dinâmico do sistema.

A análise pode ser generalizada para o caso de m geradores, o que leva à seguinte equação homogênea, na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \tau_{g1} + \tau_{g2} & \tau_{g1} & \cdots & \tau_{g1} \\ \tau_{g1} & \tau_{g1} + \tau_{g3} & \cdots & \tau_{g1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{g1} & \tau_{g1} & \cdots & \tau_{g1} + \tau_{gm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{P}_{g2} \\ \dot{P}_{g3} \\ \vdots \\ \dot{P}_{gm} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} c_{g1} + c_{g2} & c_{g1} & \cdots & c_{g1} \\ c_{g1} & c_{g1} + c_{g3} & \cdots & c_{g1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{g1} & c_{g1} & \cdots & c_{g1} + c_{gm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{g2} \\ P_{g3} \\ \vdots \\ P_{gm} \end{bmatrix} \quad (3.2.12)$$

O comportamento dinâmico do mercado é ditado pelos autovalores do sistema da equação (3.2.12).

Para uma análise das condições necessárias e suficientes para um comportamento estável deste sistema, será apresentado um caso de 3 geradores e demanda fixa.

Após pré-multiplicarmos a matriz do lado direito de (3.2.12) pela inversa da matriz do lado esquerdo, chega-se ao seguinte sistema:

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_{g2} \\ \dot{P}_{g3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{g2} \cdot (-\tau_{g1} - \tau_{g3}) - c_{g1} \cdot \tau_{g3} / DEN & -c_{g1} \cdot \tau_{g3} + c_{g3} \cdot \tau_{g1} / DEN \\ -c_{g1} \cdot \tau_{g2} + c_{g2} \cdot \tau_{g1} / DEN & c_{g3} \cdot (-\tau_{g1} - \tau_{g2}) - c_{g1} \cdot \tau_{g2} / DEN \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{g2} \\ P_{g3} \end{bmatrix} \quad (3.2.13)$$

Onde:

$$\triangleright DEN = \tau_{g1} \cdot \tau_{g2} + \tau_{g1} \cdot \tau_{g3} + \tau_{g2} \cdot \tau_{g3}$$

A equação característica deste sistema, cujas raízes são os autovalores, é:

$$\lambda^2 + \left[\frac{\tau_{g1}(c_{g2} + c_{g3}) + \tau_{g2}(c_{g1} + c_{g3}) + \tau_{g3}(c_{g1} + c_{g2})}{DEN} \right] \lambda + \left(\frac{c_{g2} \cdot c_{g3} + c_{g1} \cdot c_{g2} + c_{g1} \cdot c_{g3}}{DEN} \right) \quad (3.2.14)$$

Aplicando o critério de estabilidade de *Routh-Hurwitz*⁴ na equação (3.2.14), obtém-se o seguinte arranjo:

| | |
|--|---|
| 1 | $c_{g1} \cdot c_{g2} + c_{g1} \cdot c_{g3} + c_{g2} \cdot c_{g3} / DEN$ |
| $\tau_{g1}(c_{g2} + c_{g3}) + \tau_{g2}(c_{g1} + c_{g3}) + \tau_{g3}(c_{g1} + c_{g2}) / DEN$ | 0 |
| $c_{g1} \cdot c_{g2} + c_{g1} \cdot c_{g3} + c_{g2} \cdot c_{g3} / DEN$ | 0 |

(3.2.15)

⁴ A referência [14] apresenta maiores detalhes sobre a técnica de *Routh-Hurwitz*.

A solução de regime permanente é obtida resolvendo-se o sistema de equações lineares que resulta de (3.3.4), igualando-se o vetor de derivadas a zero. Da mesma forma que no Item Z.1, a solução será aquela na qual os custos marginais dos geradores forem iguais aos benefícios marginais dos consumidores.

As condições para a estabilidade dinâmica deste sistema podem ser obtidas pela análise dos autovalores do seguinte problema:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \tau_{g1} + \tau_{g2} & \cdots & \tau_{g1} & -\tau_{g1} & \cdots & -\tau_{g1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \tau_{g1} & \cdots & \tau_{g1} + \tau_{gm} & -\tau_{g1} & \cdots & -\tau_{g1} \\ -\tau_{g1} & \cdots & -\tau_{g1} & \tau_{g1} + \tau_{d1} & \cdots & \tau_{g1} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\tau_{g1} & \cdots & -\tau_{g1} & \tau_{g1} & \cdots & \tau_{g1} + \tau_{dn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{P}_{g2} \\ \vdots \\ P_{gm} \\ \dot{P}_{d1} \\ \vdots \\ P_{dn} \end{bmatrix} = \\
 & - \begin{bmatrix} c_{g1} + c_{g2} & \cdots & c_{g1} & -c_{g1} & \cdots & -c_{g1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{g1} & \cdots & c_{g1} + c_{gm} & -c_{g1} & \cdots & -c_{g1} \\ -c_{g1} & \cdots & -c_{g1} & c_{g1} - c_{d1} & \cdots & c_{g1} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c_{g1} & \cdots & -c_{g1} & c_{g1} & \cdots & c_{g1} - c_{dn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{g2} \\ \vdots \\ P_{gm} \\ P_{d1} \\ \vdots \\ P_{dn} \end{bmatrix} \quad (3.3.5)
 \end{aligned}$$

Para uma análise do comportamento dinâmico deste mercado, consideremos o caso específico de três geradores e dois consumidores. A equação (3.3.5) ficará da seguinte forma para este caso:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \tau_{g1} + \tau_{g2} & \tau_{g1} & -\tau_{g1} & -\tau_{g1} \\ \tau_{g1} & \tau_{g1} + \tau_{g3} & -\tau_{g1} & -\tau_{g1} \\ -\tau_{g1} & -\tau_{g1} & \tau_{g1} + \tau_{d1} & \tau_{g1} \\ -\tau_{g1} & -\tau_{g1} & \tau_{g1} & \tau_{g1} + \tau_{d2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{P}_{g2} \\ \dot{P}_{g3} \\ P_{d1} \\ \dot{P}_{d2} \end{bmatrix} = \\
 & - \begin{bmatrix} c_{g1} + c_{g2} & c_{g1} & -c_{g1} & -c_{g1} \\ c_{g1} & c_{g1} + c_{g3} & -c_{g1} & -c_{g1} \\ -c_{g1} & -c_{g1} & c_{g1} - c_{d1} & c_{g1} \\ -c_{g1} & -c_{g1} & c_{g1} & c_{g1} - c_{d2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{g2} \\ P_{g3} \\ P_{d1} \\ P_{d2} \end{bmatrix} \quad (3.3.6)
 \end{aligned}$$

Na Tabela 3.3.1 são apresentados os valores dos coeficientes relativos a cada gerador e consumidor, além dos autovalores obtidos a partir da equação característica do sistema (3.3.6). Também é apresentada a solução de regime permanente para cada caso.

Tabela 3.3.1 – Comportamento dinâmico e solução de regime permanente para o caso de três geradores e dois consumidores.

| Geradores | | | Consumidores | | | Regime Permanente | | | Autovalores |
|-----------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------|-------------|---------------------|-------------|
| τ_g min | c_g \$/MW ² h | b_g \$/MWh | τ_d min | c_d \$/MW ² h | b_d \$/MWh | P_g MW | P_d MW | λ \$/MWh | |
| 0,3 | 0,5 | 2 | 0,2 | -0,5 | 10 | 4,82 | 11,18 | 4,41 | -2,36 |
| 0,2 | 0,4 | 1 | 0,2 | -0,4 | 8 | 8,52 | 8,98 | | -2,00 |
| 0,3 | 0,5 | 1 | | | | 6,82 | | | -1,79 |
| | | | | | | | | | -1,67 |
| 0,3 | 0,5 | 2 | 0,2 | -0,5 | 10 | 4,82 | 11,18 | 4,41 | -2,36 |
| 0,2 | 0,4 | 3 | 0,2 | -0,4 | 6 | 3,52 | 3,98 | | -2,00 |
| 0,3 | 0,5 | 1 | | | | 6,82 | | | -1,79 |
| | | | | | | | | | -1,67 |
| 0,3 | 0,5 | 2 | 0,1 | -0,5 | 10 | 4,82 | 11,18 | 4,41 | -3,98 |
| 0,2 | 0,4 | 1 | 0,2 | -0,4 | 8 | 8,52 | 8,98 | | -1,74 |
| 0,1 | 0,5 | 1 | | | | 6,82 | | | -2,34 |
| | | | | | | | | | -2,00 |
| 0,3 | -0,05 | 4 | 0,2 | -0,5 | 10 | 15,45 | 13,55 | 3,23 | -0,17 |
| 0,2 | 0,4 | 1 | 0,2 | -0,4 | 8 | 5,57 | 11,93 | | -2,35 |
| 0,3 | 0,5 | 1 | | | | 4,45 | | | -2,00 |
| | | | | | | | | | -1,74 |
| 0,3 | -0,05 | 4 | 0,2 | -0,5 | 10 | - | - | - | 0,20 |
| 0,2 | -0,05 | 1 | 0,2 | -0,4 | 8 | - | - | | -0,64 |
| 0,3 | 0,5 | 1 | | | | - | | | -2,30 |
| | | | | | | | | | -1,79 |
| 0,3 | 0,5 | 2 | 0,2 | 0,05 | 10 | - | - | - | -1,87 |
| 0,2 | 0,4 | 1 | 0,2 | 0,05 | 8 | - | - | | -0,69 |
| 0,3 | 0,5 | 1 | | | | - | | | -1,67 |
| | | | | | | | | | 0,25 |

Uma análise da Tabela 3.3.1 permite chegar às seguintes conclusões sobre a influência dos parâmetros do mercado, sobre seu ponto de equilíbrio e seu comportamento dinâmico:

- ⇒ O primeiro caso é o de referência, definido como caso base;
- ⇒ No segundo caso ocorrem variações dos valores de b_g e b_d , reforçando o que já havia sido dito que os coeficientes lineares de custo afetam somente o ponto de equilíbrio, não tendo influência na estabilidade do sistema;
- ⇒ O terceiro caso confirma que as constantes de tempo exercem influência somente no comportamento dinâmico do sistema;
- ⇒ O sistema pode ser estável mesmo com um gerador apresentando economia de escala, desde que não seja muito significativa⁵, como mostra o quarto caso da Tabela;
- ⇒ Se dois ou mais geradores apresentarem economia de escala, o sistema será instável, conforme o quinto caso;
- ⇒ O último caso da Tabela, análogo ao quinto caso, ilustra a instabilidade do sistema se dois ou mais consumidores apresentarem aumento de benefício marginal enquanto aumentam seu consumo;
- ⇒ Em resumo, pode-se garantir que o sistema será estável somente se $c_{g_i} > 0$, $\forall i \in m$, e se $c_{d_j} < 0 \forall j \in n$.

3.4 Consideração do Desequilíbrio entre a Carga e a Geração

⁵ No quarto caso, se c_{g_i} fosse $-0,11$ já tornaria o sistema instável.

Ao contrário do que foi considerado até o momento, em sistemas de potência reais sempre existem diferenças momentâneas entre a potência gerada e a potência consumida. Este desequilíbrio de potência pode ser levado em conta pela seguinte equação:

$$\dot{E} = \sum_{i=1}^m P_{gi} - \sum_{j=1}^n P_{dj} \quad (3.4.1)$$

Onde:

- \dot{E} = desequilíbrio de potência (derivada da energia);
- $\sum_{i=1}^m P_{gi}$ = soma das potências geradas pelos m geradores;
- $\sum_{j=1}^n P_{dj}$ = soma das potências consumidas pelos n consumidores.

Esta diferença de potência resulta em desvios na frequência e que, por motivos técnicos, não pode permanecer indefinidamente. Tradicionalmente, para eliminar ou reduzir estes desvios existe o Controle Automático de Geração, que atua de forma a levar a frequência para o seu valor nominal, sempre que há pequenas variações.

No caso de um ambiente conduzido por regras de mercado, espera-se que o *preço da energia* reflita o grau de desequilíbrio entre a carga e a geração [3]. É possível entender esse raciocínio se pensarmos na energia como uma mercadoria qualquer, que quando há um excesso no mercado, ocorre uma redução do seu valor para os consumidores e, conseqüentemente, uma redução do seu preço.

De acordo com Alvarado [3], a variação do preço de acordo com o desequilíbrio de energia do sistema é chamado *preço de regulação da frequência* ou *preço do ECA (Erro de Controle de Área)*.

As equações que descrevem o comportamento dinâmico deste sistema, para o caso genérico de m geradores e n consumidores, são:

$$\tau_{gi} \dot{P}_{gi} = \lambda - b_{gi} - c_{gi} P_{gi} - kE \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.4.2)$$

$$\tau_{dj} \dot{P}_{dj} = b_{dj} + c_{dj} P_{dj} - \lambda \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.4.3)$$

$$\dot{E} = \sum_{i=1}^m P_g - \sum_{j=1}^n P_d \quad (3.4.4)$$

$$\tau_\lambda \dot{\lambda} = -E \quad (3.4.5)$$

A equação (3.4.2) mostra que enquanto o custo marginal de um gerador for menor do que o preço da energia, ele continuará aumentando sua potência gerada. Na equação (3.4.3), o consumidor irá aumentar seu consumo enquanto seu benefício marginal for maior que o preço. Qualquer diferença entre as potências gerada e consumida é acumulada como um erro de energia no sistema, expresso pela equação (3.4.4). A equação (3.4.5) expressa o que foi comentado no início desta seção, sobre o preço da energia refletir o grau de desequilíbrio do sistema. Observa-se desta equação que um excesso de energia ($\int P_g > \int P_d$) acarretará numa

redução do preço. Essa redução do preço leva a uma redução da geração, de acordo com a equação (3.4.2), e um aumento no consumo, conforme a equação (3.4.3), reduzindo assim o excesso de energia do sistema.

Para garantir a estabilidade do mercado, é necessário um sinal de realimentação do desequilíbrio da energia para os geradores, ou para os consumidores. Esta função de sinal estabilizador é desempenhada pelo termo kE , na equação (3.4.2). Sem este sinal ($k = 0$), o sistema é instável, como será demonstrado adiante.

Para analisar o comportamento do mercado com o efeito do desequilíbrio entre a carga e a geração, serão desenvolvidas as equações para um sistema com três geradores ($m=3$) e dois consumidores ($n=2$). As equações (3.4.2) até (3.4.5) ficam na seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \tau_{g1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_{g2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{g3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tau_{d1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{d2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{\lambda} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{P}_{g1} \\ \dot{P}_{g2} \\ \dot{P}_{g3} \\ \dot{P}_{d1} \\ \dot{P}_{d2} \\ \dot{E} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_{g1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -k & 1 \\ 0 & -c_{g2} & 0 & 0 & 0 & -k & 1 \\ 0 & 0 & -c_{g3} & 0 & 0 & -k & 1 \\ 0 & 0 & 0 & c_{d1} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{d2} & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ P_{g3} \\ P_{d1} \\ P_{d2} \\ E \\ \lambda \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -b_{g1} \\ -b_{g2} \\ -b_{g3} \\ b_{d1} \\ b_{d2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4.6)$$

Para obter a solução de regime permanente basta zerar o vetor de derivadas e resolver o sistema de equações lineares resultante (lado direito da equação (3.4.6)), representado na equação (3.4.7).

$$\begin{bmatrix} -c_{g1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -k & 1 \\ 0 & -c_{g2} & 0 & 0 & 0 & -k & 1 \\ 0 & 0 & -c_{g3} & 0 & 0 & -k & 1 \\ 0 & 0 & 0 & c_{d1} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{d2} & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ P_{g3} \\ P_{d1} \\ P_{d2} \\ E \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{g1} \\ b_{g2} \\ b_{g3} \\ -b_{d1} \\ -b_{d2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4.7)$$

Para estudar o comportamento dinâmico do sistema pode-se colocar (3.4.6) (somente a parte homogênea) na seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_{g1} \\ \dot{P}_{g2} \\ \dot{P}_{g3} \\ \dot{P}_{d1} \\ \dot{P}_{d2} \\ \dot{E} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/\tau_{g1} * c_{g1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\tau_{g1} * k & 1/\tau_{g1} \\ 0 & -1/\tau_{g2} * c_{g2} & 0 & 0 & 0 & -1/\tau_{g2} * k & 1/\tau_{g2} \\ 0 & 0 & -1/\tau_{g3} * c_{g3} & 0 & 0 & -1/\tau_{g3} * k & 1/\tau_{g3} \\ 0 & 0 & 0 & 1/\tau_{d1} * c_{d1} & 0 & 0 & -1/\tau_{d1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\tau_{d2} * c_{d2} & 0 & -1/\tau_{d2} \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\tau_{\lambda} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ P_{g3} \\ P_{d1} \\ P_{d2} \\ E \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (3.4.8)$$

A análise dos autovalores da matriz em (3.4.8) é que permite concluir sobre a estabilidade do sistema.

Na Tabela 3.4.1 são apresentados os resultados referentes à solução dos sistemas (3.4.7) e (3.4.8), para algumas combinações de parâmetros dos geradores e consumidores.

Tabela 3.4.1 – Comportamento dinâmico e solução de regime permanente para o caso de três geradores e dois consumidores, considerando o desequilíbrio de energia.

| Geradores | | | Consumidores | | | Outros | | Regime Permanente | | | Autovalores |
|-----------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|-----------------------|-------|-------------------|-------------|---------------------|---------------------|
| τ_g min | c_g \$/MWh ² h | b_g \$/MWh | τ_d min | c_d \$/MWh ² h | b_d \$/MWh | τ_{λ} s | k^* | P_g MW | P_d MW | λ \$/MWh | |
| 0,3 | 0,5 | 2 | 0,2 | -0,5 | 10 | 100 | 0,1 | 2,52 | 13,47 | 3,26 | -0,645±j0,834 |
| 0,2 | 0,2 | 1 | 0,25 | -0,6 | 8 | | 0,1 | 11,31 | 7,90 | | -1,501 |
| 0,1 | 0,3 | 1 | | | | | 0,1 | 7,54 | | | -2,694 |
| | | | | | | | | | | | -0,154 |
| | | | | | | | | | | | -2,409 |
| | | | | | | | | | | | -2,518 |
| 0,3 | 0,5 | 2 | 0,2 | -0,5 | 10 | 100 | 0,1 | 4,67 | 11,33 | 4,33 | -0,026±j0,672 |
| 0,2 | -0,1 | 4,5 | 0,25 | -0,6 | 8 | | 0,1 | 1,67 | 6,11 | | -0,015 |
| 0,1 | 0,3 | 1 | | | | | 0,1 | 11,10 | | | -2,678 |
| | | | | | | | | | | | -2,522 |
| | | | | | | | | | | | -2,410 |
| | | | | | | | | | | | -1,391 |
| 0,3 | 0,5 | 2 | 0,2 | -0,1 | 10 | 100 | 0,1 | 7,42 | 42,88 | 5,71 | -0,651±j0,791 |
| 0,2 | 0,2 | 1 | 0,25 | -0,6 | 8 | | 0,1 | 23,56 | 3,81 | | -0,328±j0,147 |
| 0,1 | 0,3 | 1 | | | | | 0,1 | 15,71 | | | -2,703 |
| | | | | | | | | | | | -2,411 |
| | | | | | | | | | | | -1,495 |
| 0,3 | 0,5 | 2 | 0,2 | -0,5 | 10 | 100 | 0,1 | - | - | - | -2,506 |
| 0,2 | -0,1 | 1 | 0,25 | -0,6 | 8 | | 0,1 | | | | -2,405 |
| 0,1 | -0,05 | 1 | | | | | 0,1 | | | | -1,530 |
| | | | | | | | | | | | -0,081 |
| | | | | | | | | | | | 0,228±j1,254 |
| | | | | | | | | | | | 0,500 |

* A unidade do parâmetro k é \Rightarrow \$.min/MWh

Os casos da Tabela 3.4.1 são identificados da seguinte forma, na ordem em que aparecem: caso base; gerador 2 com economia de escala; aumento de benefício marginal do consumidor 1 e o caso instável. Os parâmetros que sofrem alteração com relação ao caso base estão em negrito.

A Figura 3.4.1 mostra o lugar das raízes para o caso base, ilustrando o comportamento dos pólos em malha fechada do sistema (3.4.8), quando é variado o parâmetro k .

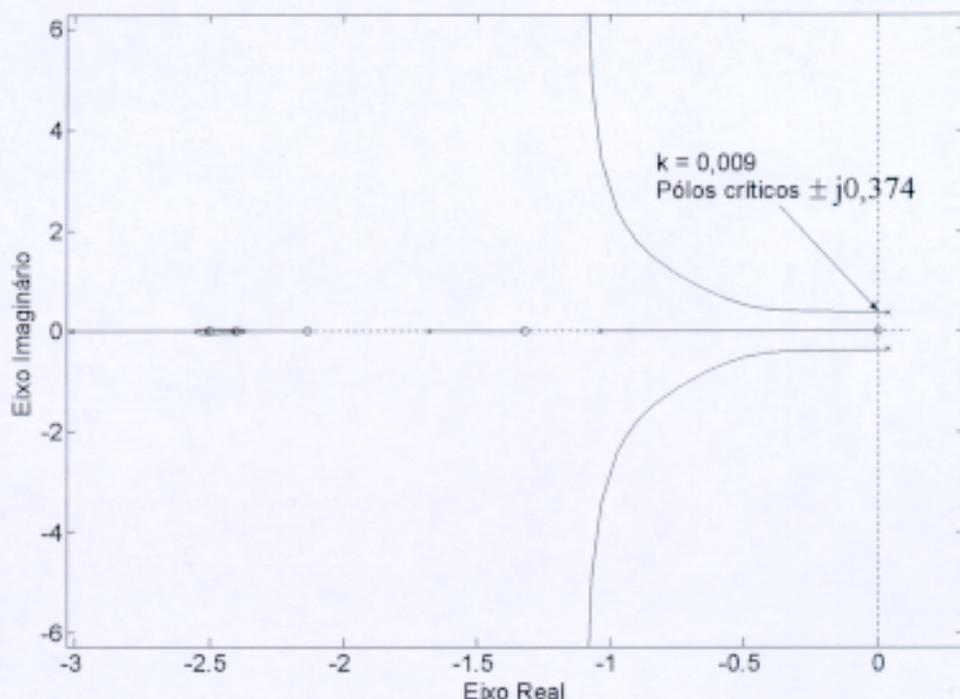


Figura 3.4.1 – Lugar das raízes para o caso base

Pode-se observar que para $k = 0$, há um par de pólos complexos conjugados com parte real positiva. Isto confirma a afirmação feita anteriormente de que o sistema é instável para $k = 0$.

Quando há um gerador com economia de escala, que é o segundo caso, o sistema continua estável (dependendo dos outros parâmetros do sistema e da significância da economia de escala), mas apresenta maior oscilação antes de atingir o regime permanente. Na Figura 3.4.2 é apresentado o lugar das raízes para este caso. Pode-se notar que, como o gerador 2 apresenta economia de escala, o valor limite de k para a estabilidade é cerca de dez vezes maior do que para o caso base, indicando que o segundo caso está mais próximo da instabilidade.

O terceiro caso, onde o consumidor 1 tem um aumento no seu benefício marginal, é estável. Os valores da solução de regime permanente são consideravelmente maiores comparados aos dois casos anteriores, principalmente no valor da carga do consumidor 1. A Figura 3.4.3 mostra o lugar das raízes para este caso, que está mais próximo da instabilidade do que o caso base. Esta última afirmação pode ser confirmada pelo valor limite de k , que é maior do que o limite para o caso base.

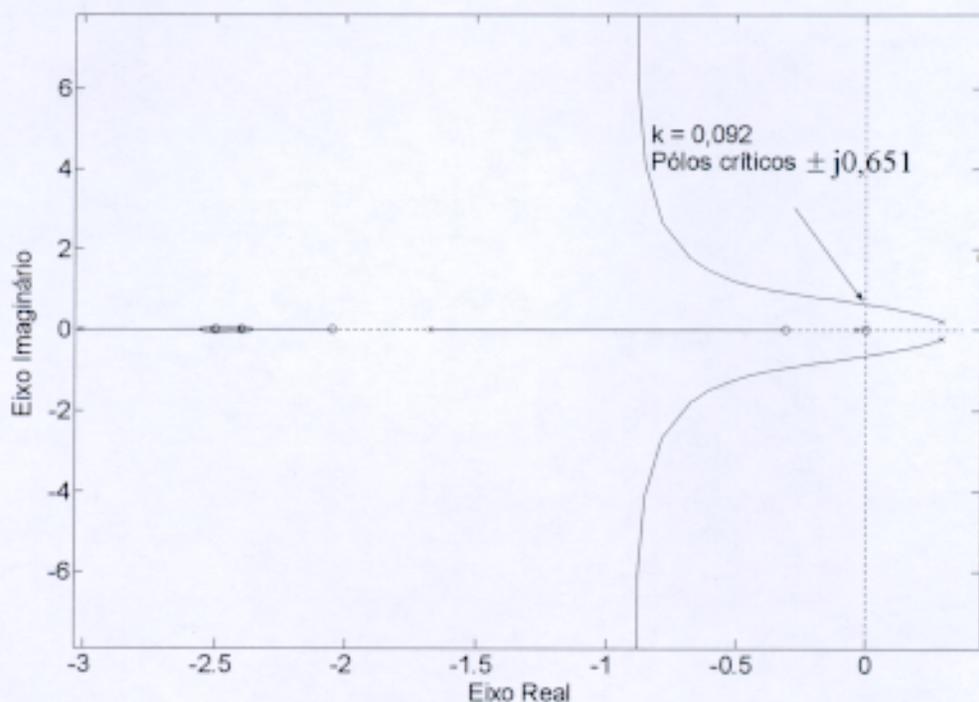


Figura 3.4.2 – Lugar das raízes para o caso do gerador 1 com economia de escala

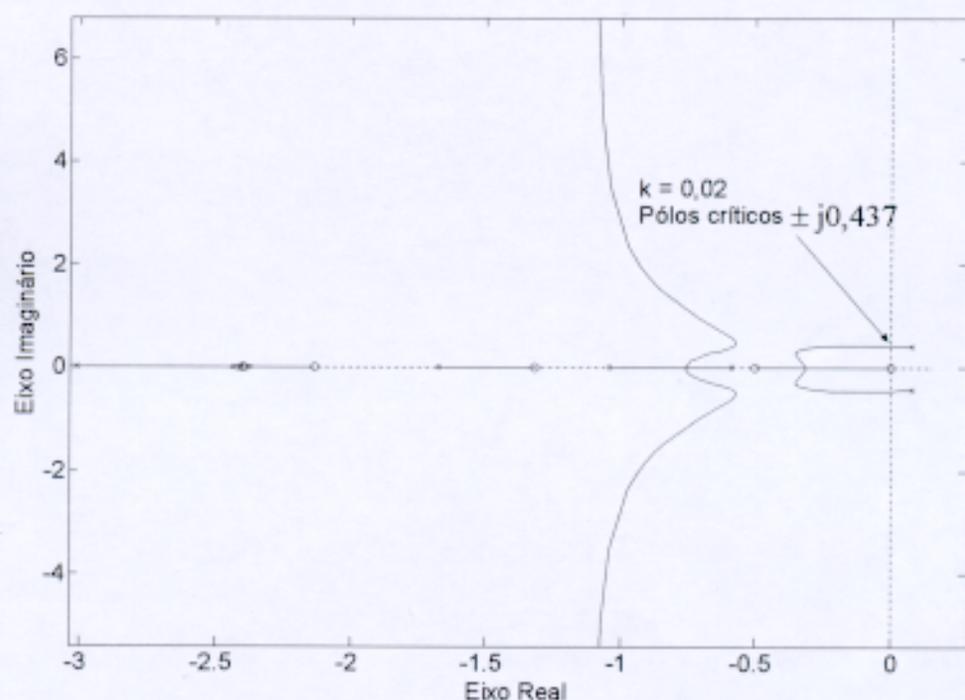


Figura 3.4.3 – Lugar das raízes para o caso de aumento do benefício marginal do consumidor 1

As Figuras 3.4.4 e 3.4.5 apresentam o comportamento do erro de energia do sistema e do preço, respectivamente, para os três primeiros casos analisados. Na Figura 3.4.4 observa-se que o erro de energia leva um tempo maior (cerca de 200 s) para atingir o regime permanente no caso do gerador 2 com economia de escala, apresentando um comportamento oscilatório.

Da mesma forma, na Figura 3.4.5 o preço da energia no segundo caso leva mais tempo para se estabilizar (cerca de 300 s) e também apresenta oscilações.

Como no terceiro caso houve aumento do benefício do consumidor 1, este apresentará um aumento significativo no consumo, como se observa na Tabela 3.4.1, o que resultará em um valor maior do erro de energia do sistema, antes de atingir o regime permanente, conforme a Figura 3.4.4. Esse aumento considerável do consumo também resultará num maior preço para a energia, como mostra a Figura 3.4.5.

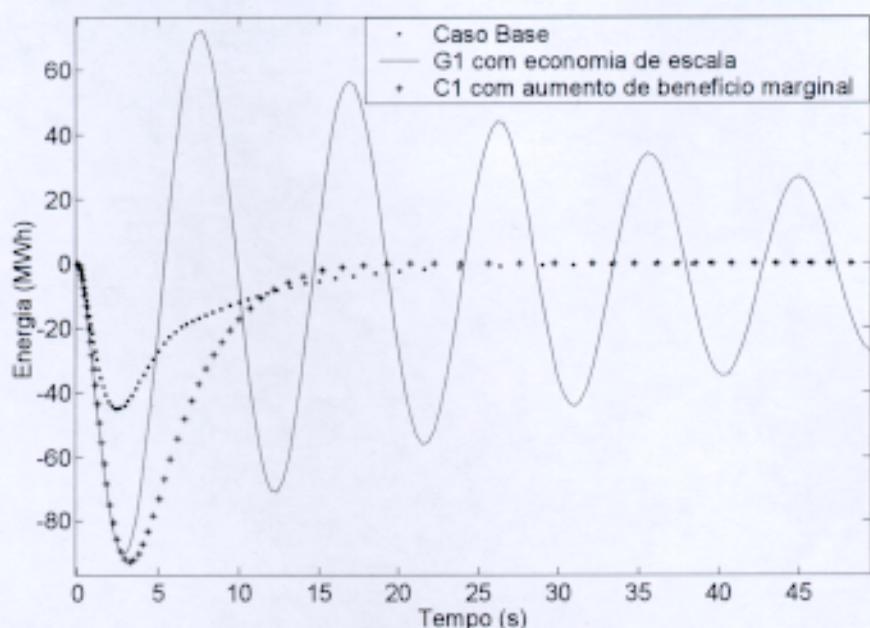


Figura 3.4.4 – Variação do erro de energia do sistema

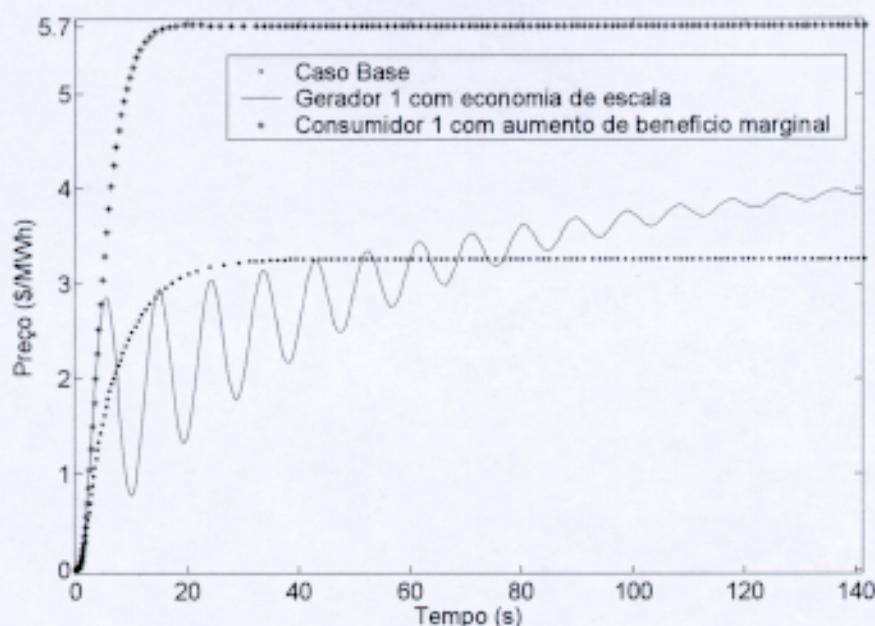


Figura 3.4.5 – Variação do preço da energia

O quarto caso apresentado na Tabela 3.4.1 é instável, como se pode observar nos autovalores do sistema. A Figura 3.4.6 ilustra a variação do preço e a Figura 3.4.7, a da

potência do gerador 1 e da carga do consumidor 1. Os outros geradores e o consumidor 2 apresentam o mesmo comportamento.

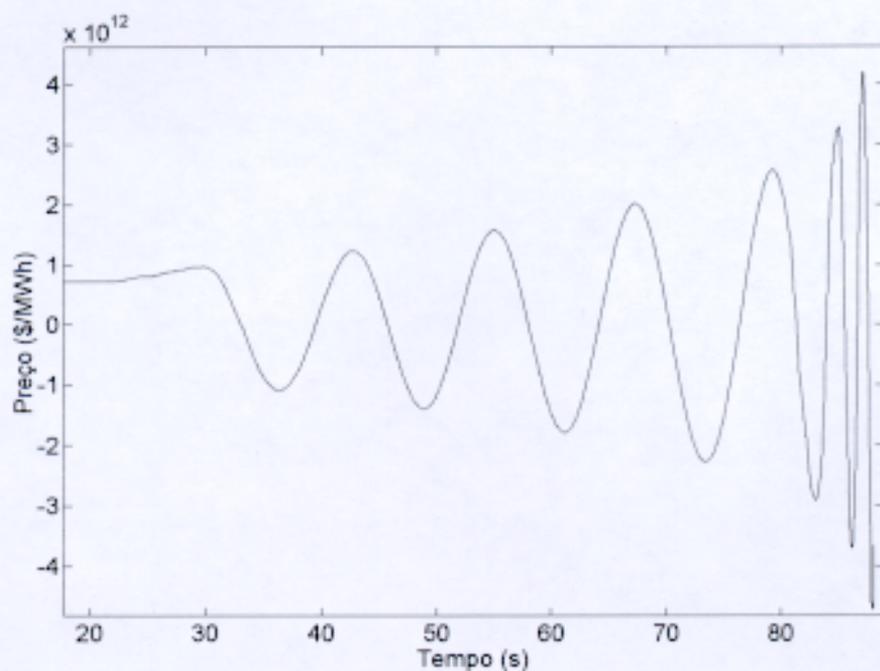


Figura 3.4.6 – Variação do preço da energia

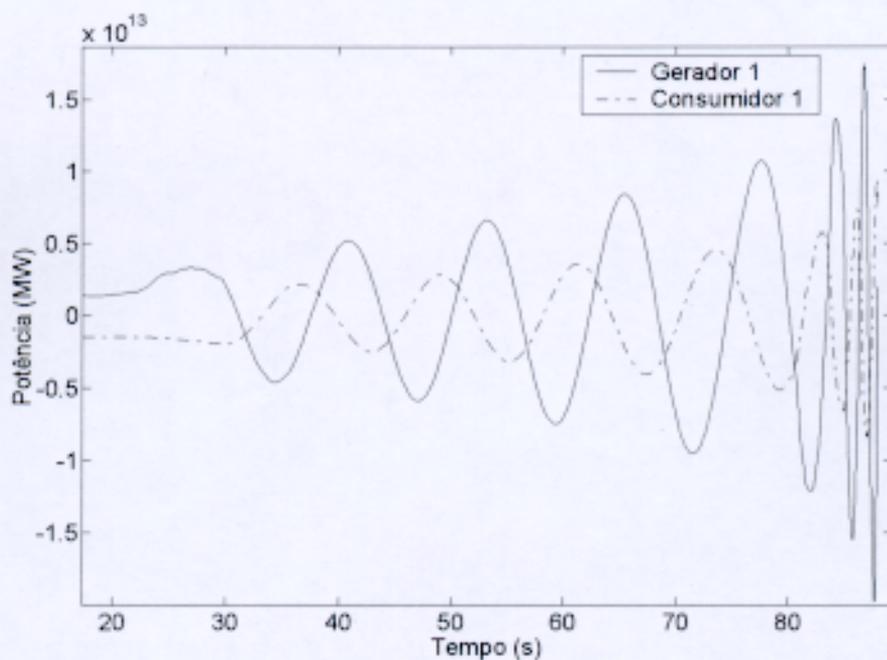


Figura 3.4.7 – Variação da potência do gerador 1 e da carga do consumidor 1

4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICABILIDADE DO MÉTODO PARA OS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Conforme já citado anteriormente, o estudo realizado por Alvarado [3] é válido para sistemas de transmissão de energia elétrica. A abordagem usada neste estudo pode ser aplicada em nível de distribuição, porém algumas observações devem ser feitas:

- ⇒ O efeito das perdas não pode ser desprezado, pois, na distribuição, a relação entre a resistência e a reatância dos cabos (r/x) é grande;
- ⇒ Nas referências [8], [16] e [17], os autores analisam o comportamento dinâmico do mercado acoplado ao sistema de potência, levando em conta também o efeito do congestionamento na transmissão. Eles concluem que o congestionamento pode estabilizar um sistema que apresente comportamento instável, por reduzir as possibilidades de livre interação entre alguns geradores. No nível de distribuição, o congestionamento ainda não apresenta um efeito considerável, uma vez que, geralmente, trata-se de sistemas radiais e com poucos geradores. Talvez, com o aumento de PIEEs os sistemas passem a apresentar uma topologia mais complexa que a de sistemas radiais [19], com vários geradores, fazendo com que seja importante considerar o efeito do congestionamento;
- ⇒ A consideração da elasticidade da demanda (alguns autores questionam se realmente existe elasticidade de preço pelo lado da demanda [13]) só é considerável para os grandes consumidores, pois, em geral, são os únicos que têm capacidade de pagar por uma estrutura suficiente e necessária para o monitoramento do preço da energia no curto prazo. No nível da distribuição, onde a grande maioria dos consumidores não apresenta essa elasticidade (e nem a capacidade de arcar com os custos de um monitoramento do preço), a modelagem que melhor se aplica parece ser a de alguns geradores atendendo a uma demanda fixa.

A partir destas considerações, pode-se concluir que a aplicação da técnica desenvolvida em [3] para sistemas de distribuição deve incluir o efeito das perdas e, inicialmente, modelar um número reduzido de geradores atendendo a uma demanda fixa.

5 CONCLUSÕES

A estabilidade do Mercado de Sistemas de Potência depende basicamente da forma como são definidas as políticas para o setor e os modos de operação aos quais estará sujeito este mercado, além do comportamento dos geradores e, em alguns casos, dos consumidores. Se um gerador mostrar uma pequena economia de escala, o mercado ainda pode ser estável. Se esta economia for grande o suficiente, de forma que o gerador tenha poder de mercado, ou seja, possa manipular os sinais de preço ou deter grande porção da capacidade de geração em pontos estratégicos da rede, dificultando a entrada de novos competidores, o mercado se tornará instável.

Este trabalho não apresentou os resultados da interação dinâmica entre os mercados e o sistema de potência. Em alguns casos, o acoplamento entre os dois sistemas pode resultar em instabilidade, mesmo que eles sejam individualmente estáveis.

Para a distribuição, no estágio atual do grau de competição existente nos mercados de energia de vários países, pode-se usar a modelagem apresentada no Item 3.2, onde a demanda é inelástica. À medida que a IEE evolui para uma estrutura de competição em todos os níveis (onde até os consumidores residenciais possam optar por um fornecedor) e aumente a participação dos PIEEs, a modelagem mais adequada passa a incluir a elasticidade da demanda, além do desequilíbrio entre a carga e a geração (Item 3.4), considerando ainda o efeito das perdas.

O que se pode observar deste estudo é que, tanto para o nível de transmissão quanto de distribuição, o requisito principal para a validade da modelagem é a existência de um mercado competitivo, onde os preços são calculados e ajustados muito rapidamente e os geradores (e alguns consumidores) possam responder às essas variações.

Este trabalho vem sendo desenvolvido desde Março do ano corrente, porém, a matrícula na disciplina de Trabalho Individual foi efetuada em Junho deste ano. Em princípio, tinha-se em mente que o SEB continuaria a funcionar de forma competitiva e que seria dado seqüência aos procedimentos para a implantação completa do modelo vigente. Porém, em Agosto deste ano o Ministério de Minas e Energia (MME) divulgou uma nova proposta de modelo institucional, com a qual deixará de existir uma competição no mercado. De acordo com esta proposta, passará a existir um *pool* de geradores e distribuidores, onde serão definidas tarifas reguladas e uniformes para a energia. Desta forma, a metodologia apresentada deixa de ser diretamente aplicável para análise do mercado .

6 REFERÊNCIAS

- [1] Decreto nº 2.003 de 10 de Setembro de 1996. "Regulamentação da produção de energia elétrica por Produtor Independente e Autoprodutor e outras providências". *Diário Oficial da União, páginas(s): 17917-17925, 1996.*
- [2] Ministério de Minas e Energia. "Proposta de Modelo Institucional do Setor Elétrico". *Governo Federal, Julho 2003.*
- [3] F. L. Alvarado. "The Dynamics of Power System Markets". *University of Wisconsin-Madison, PSerc Research Report, January 1997.*
- [4] F. L. Alvarado. "The Stability of Power System Markets". *IEEE Transactions on Power Systems, volume 14, no. 2, pages: 509-511, May 1999.*
- [5] J. B. Cardell, M. Ilic. "Power Systems Restructuring: Engineering and Economics". *Kluwer Academic Publishers, June 1998.*
- [6] E. van Sambeek. "Distributed Generation in Competitive Electricity Markets". *Center for Energy and Environmental Policy. Working Paper no. 00-S4, June 2000.*
- [7] W. S. Mota, F. L. Alvarado. "Dynamic Coupling Between Power Markets and Power Systems". *Revista Controle e Automação, volume 12, nº 01, Janeiro-Abril 2001.*
- [8] W. S. Mota, F. L. Alvarado. "Dynamic Coupling Between Power Markets and Power Systems with Congestion Constraints". *IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, September 2001.*
- [9] F. L. Alvarado. "Dynamics Interactions of Markets and Power Systems". *IEEE/PES Winter Meeting, New York, 1999.*
- [10] K. Bhattacharya, J. Zhong. "Frequency Linked Pricing as an Instrument for Frequency Regulation in Deregulated Electricity Markets". *IEEE/PES General Meeting, Ontario, Canada, July 2003.*
- [11] F. L. Alvarado. "Is System Control Entirely by Price Feasible?". *Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences, 2001.*
- [12] F. L. Alvarado. "Converting System Limits to Market Signals". *IEEE Transactions on Power Systems, volume 18, no. 2, pages: 422-427, May 2003.*
- [13] D. S. Kirschen. "Demand-Side View of Electricity Markets". *IEEE Transactions on Power Systems, volume 18, no. 2, pages: 520-527, May 2003.*
- [14] K. Ogata. "Engenharia de Controle Moderno". *Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1998.*

[15] W. S. Mota, F. L. Alvarado. "Power Markets Stability Considering Energy Imbalance". *IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Geneva, Switzerland, May 2000.*

[16] F. L. Alvarado, J. Meng, C. L. DeMarco, W. S. Mota. "Stability Analysis of Interconnected Power Systems Coupled With Market Dynamics". *IEEE Transactions on Power Systems, volume 16, no. 4, pages: 695-701, November 2001.*

[17] F. L. Alvarado, W. S. Mota. "The Role of Energy Imbalance Management on Power Market Stability". *Proceedings of HICSS-31, Big Island of Hawaii, January 1998.*

[18] E. B. Spier, F. A. B. Lemos, A. S. Bazanella, M. A. da Rosa. "Avaliação da Conexão de Produtores Independentes em Alimentadores Radiais de Sistemas de Distribuição". *VIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Brasília, Distrito Federal, Maio 2002.*

[19] C. L. da Conceição. "Impactos da Geração Distribuída no Sistema de Potência". *Trabalho Individual apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFRGS, Julho 2003.*