

7.4 Precificação dos Serviços de Transmissão em Ambiente Desregulamentado

A re-estruturação da indústria de energia elétrica que ocorreu nos últimos anos em muitos países trouxe consigo a necessidade da separação dos segmentos de geração, transmissão e distribuição. Para permitir a existência de competição no setor de geração, uma premissa básica é permitir o acesso à transmissão a todos os agentes geradores. Em conseqüência, torna-se imprescindível a adoção de metodologias apropriadas de precificação dos serviços de transmissão. Alguns dos métodos existentes para esta finalidade são abordados na sequência.

7.4.1 Selo postal

Neste caso, os preços de utilização dos serviços de transmissão são baseados no valor da potência transportada, em MW (e na duração da transação), independentemente dos pontos de suprimento e entrega da potência e da distribuição de fluxos imposta sobre diferentes circuitos de transmissão pela transação. Trata-se de um método muito simples de ser aplicado, porém ignora completamente as condições reais de operação do sistema, podendo enviar sinais econômicos incorretos para os agentes envolvidos. Por exemplo, um gerador que faz um uso relativamente pequeno do sistema de transmissão ao alimentar uma carga eletricamente próxima estará subsidiando outros agentes que usam o sistema mais intensamente.

7.4.2 Trajetória contratada

Trata-se de um arranjo utilizado para facilitar transações entre agentes geradores e consumidores localizados em regiões diferentes. Consiste em se determinar uma “trajetória estimada” para o fluxo de potência relativo à transação. Os agentes envolvidos na transação remunerariam então apenas o uso dos ativos de transmissão que compõem aquela trajetória. Verifica-se portanto que, como no caso anterior, as condições reais de operação do sistema não são levadas em conta neste processo. Em particular, é ignorada a possibilidade de fluxos de potência paralelos ou circulantes envolvendo ativos de transmissão de outras empresas, como ilustra o exemplo a seguir.

Exemplo 7.3 *Considere o sistema de potência mostrado na Figura 7.3, que é formado por seis áreas de controle interconectadas. Suponha que as áreas A e C estão envolvidas em uma transação de 100 MW, diretamente de A para C. Para tal, a área A aumentaria seu intercâmbio líquido de 100 MW, enquanto que a área C reduziria seu intercâmbio líquido do mesmo valor. A trajetória contratada é A-C. Entretanto, como ilustra a figura, as variações resultantes dos fluxos de potência poderiam ser muito diferentes do previamente estimado. Verifica-se no exemplo que outros sistemas de transmissão que não os que ligam diretamente A e C sofrem carregamento adicional devido à transação, pelo surgimento de fluxos paralelos.*

A existência de fluxos paralelos devidos a transações bilaterais que não sejam claramente revelados não é em geral admitida em ambientes de mercado, pois:

- Fluxos paralelos provocam perdas adicionais na transmissão;
- Há a possibilidade de congestionamentos de sistemas de transmissão de terceiros como resultado da ocorrência de fluxos paralelos.

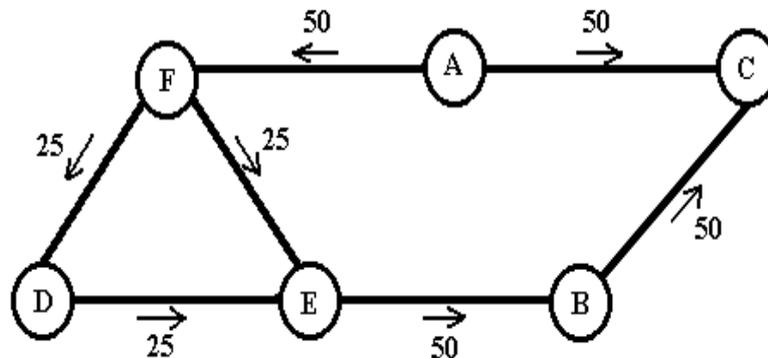


Figura 7.3: Sistema para o exemplo 7.3

7.4.3 MW-Milha

O método denominado MW-milha é uma tentativa de compensar as deficiências dos métodos anteriores. O conceito básico é que o carregamento de cada circuito de transmissão devido a cada transação deve ser determinado separadamente. O valor obtido deve ser multiplicado pelo custo unitário do circuito (que em geral depende do comprimento do mesmo) e, quando somado sobre todas as linhas da rede, deve fornecer uma medida de quanto cada transação usa a rede elétrica. Transações distintas pagam encargos de transmissão na proporção de sua utilização da rede.

Diversas variantes têm sido propostas para o método MW-milha, como será visto abaixo¹.

Método MW-Milha Clássico (*MWM*)

A primeira variante, que chamaremos *MWM*, calcula o encargo de transmissão C_{T_i} a ser cobrado pela realização da transação T_i como:

$$C_{T_i} = \sum_{\forall j} \left[\frac{C_j \times P_{j,T_i}}{\bar{P}_j} \right] \quad (7.1)$$

onde

¹O material desta seção é baseado na referência *J. W. Marangon Lima, "Allocation of Transmission Fixed Charges: An Overview", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 3, Agosto 1996, pp. 1409-1418.*

P_{j,T_i} : carregamento do circuito j devido à transação i ;
 \bar{P}_j : capacidade do circuito j ;
 C_j : Custo do circuito j , dado por

$$C_j = L_j \times f_j$$

onde

L_j : comprimento do circuito j ;

f_j : pedágio cobrado por milha para a classe de circuito à qual o circuito j pertence.

Como em geral os fluxos de potência estão abaixo da capacidade dos respectivos circuitos, o método *MWM* não recupera adequadamente os custos envolvidos. Em outras palavras, nada se cobra pela reserva de transmissão, dada pela diferença entre capacidade do circuito e fluxo de potência efetivamente produzido.

Método do Módulo (*MM*)

Uma variante que supre a deficiência acima apontada é o chamado Método do Módulo (*MM*), segundo o qual o rateio dos encargos de transmissão por transação é calculado através da fórmula

$$C_{T_i}^M = \sum_{\forall j} \left[\frac{C_j \times |P_{j,T_i}|}{\sum_{\forall i} |P_{j,T_i}|} \right] \quad (7.2)$$

onde o índice j refere-se aos circuitos e o índice i refere-se às transações. Este método considera que todos os agentes devem pagar pela capacidade efetivamente utilizada, bem como pela reserva de transmissão. Contudo, não oferece incentivo a agentes que aliviam o carregamento de circuitos de forma a melhorar as condições de operação e postergar investimentos de transmissão.

Método do Contrafluxo Zero (*MCZ*)

A variante chamada de Método do Contrafluxo Zero (*MCZ*) busca corrigir a falta de incentivo do *MM* ao contrafluxo através da isenção de cobrança para os agentes cujo fluxo de potência tem sentido oposto ao do fluxo líquido. Neste caso, o sentido positivo para o fluxo em um dado circuito k é definido como o sentido do *fluxo líquido (resultante)* naquele circuito, e o encargo de transmissão para a transação T_i é calculado como

$$C_{T_i}^Z = \sum_{\forall j} C_{T_i;j}^Z, \text{ e } C_{T_i;j}^Z = \begin{cases} \frac{C_j \times P_{j,T_i}}{\sum_{\forall i \in \Omega_{j+}} P_{j,T_i}}, & \text{para } P_{j,T_i} > 0 \\ 0, & \text{para } P_{j,T_i} \leq 0 \end{cases} \quad (7.3)$$

onde Ω_{j+} é o conjunto de transações para as quais os fluxos no circuito k é positivo, de acordo com a convenção definida acima.

O *MCZ* parte do pressuposto que reduções do fluxo líquido são benéficas, *mesmo se já há excesso de capacidade instalada*. Além disso, será mostrado na seqüência que há uma descontinuidade no valor do encargo quando o fluxo dominante muda de sentido, o que pode ocorrer sem controle nem conhecimento dos agentes responsáveis pela transação.

Método do Fluxo Dominante (MFD)

Esta variante é uma combinação do *MM* com o *MCZ* visando corrigir as deficiências mencionadas em conexão com ambos. Neste caso, o encargo de transmissão é decomposto em duas parcelas, que chamaremos $C_{T_i}^{Db}$ e $C_{T_i}^{Da}$, assim discriminadas:

- A parcela $C_{T_i}^{Db}$ está relacionada à capacidade do circuito efetivamente usada, denominada *capacidade-base*. Esta corresponde ao fluxo líquido resultante em cada circuito de transmissão, sendo seu custo associado alocado somente àqueles agentes com fluxo positivo, isto é, cujo sentido é o mesmo do fluxo líquido resultante no circuito. Portanto, o critério de alocação desta parcela é basicamente o mesmo do *MCZ*, porém com a diferença de que o custo total do circuito j , C_j , é substituído pelo *custo da capacidade-base* C_j^b , dado por

$$C_j^b = \frac{C_j \times P_j}{\bar{P}_j} \quad (7.4)$$

onde P_k denota o *fluxo líquido resultante no circuito k* . Utilizando as Eqs. (7.3) e (7.4), podemos definir a parcela de capacidade-base como

$$C_{T_i}^{Db} = \sum_{\forall j} C_{T_i;j}^{Db}, \text{ e } C_{T_i;j}^{Db} = \begin{cases} \frac{C_j^b \times P_{j;T_i}}{\sum_{\forall i \in \Omega_{j+}} P_{j;T_i}}, & \text{para } P_{j;T_i} > 0 \\ 0, & \text{para } P_{j;T_i} \leq 0 \end{cases} \quad (7.5)$$

- A parcela $C_{T_i}^{Da}$ relaciona-se à diferença $\bar{P}_j - P_j$, chamada *capacidade adicional*, que corresponde à capacidade de reserva do circuito. Como todos os participantes se beneficiam da segurança e confiabilidade proporcionada por esta reserva, esta fração do custo total é alocada a todos. A expressão dos encargos correspondentes é obtida da Eq. (7.2) substituindo-se C_j por C_j^A , onde

$$C_j^a = C_j \times \frac{\bar{P}_j - P_j}{\bar{P}_j} \quad (7.6)$$

Resulta portanto que

$$C_{T_i}^{Da} = \sum_{\forall j} \left[\frac{C_j^a \times |P_{j;T_i}|}{\sum_{\forall i} |P_{j;T_i}|} \right] \quad (7.7)$$

Finalmente, o encargo de transmissão pago por uma transação T_i segundo o *MFD* é dado por

$$C_{T_i}^D = C_{T_i}^{Db} + C_{T_i}^{Da} \quad (7.8)$$

Exemplo 7.4 *Suponha que a capacidade nominal de um dado circuito k é de 1,0 pu, e que seu custo C_k é também igual a 1,0. Suponha ainda que há apenas duas transações sendo efetuadas sobre a rede, denominadas A e B , e que a transação B já utiliza plenamente a capacidade do circuito k , de modo que $P_{k,B} = 1,0$. A transação A , por outro lado, causa um fluxo em sentido contrário ao provocado por B , sendo sua magnitude igual a x , $0 \leq x \leq 2,0$ pu. A figura 7.4 ilustra esta situação.*

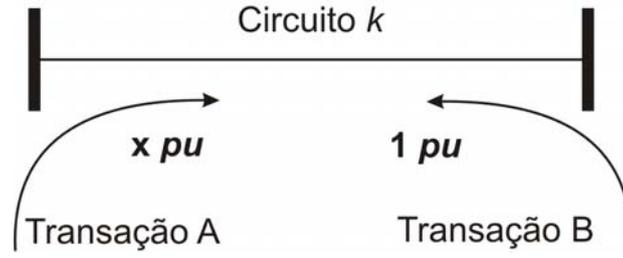


Figura 7.4: Diferentes transações utilizando o circuito k .

Calcule os encargos de transmissão relativos ao uso do circuito k pela transação A utilizando as quatro variantes da metodologia MW-milha, a saber, MWM, MM, MCZ e MFD. Represente graficamente a evolução dos respectivos encargos em função de x , $0 \leq x \leq 2$, em um mesmo par de eixos e comente sobre a evolução dos encargos a serem pagos por A pelos diversos métodos quando x varia no intervalo considerado.

Solução: A solução do problema para cada uma das variantes do método *MW-milha* é examinada nos itens abaixo.

1. **MWM**

Usando a Eq. (7.1) com $P_{j,A} = x$, é fácil concluir que

$$C_A = x$$

2. **MM**

Considerando que $P_{j,A} = x$ e $P_{j,B} = 1$, temos da Eq. (7.2) que

$$C_A^M = \frac{x}{1+x}$$

3. **MCZ**

Neste caso, há somente um agente que paga o custo integral do uso do circuito, já que os fluxos de A e B estão em sentidos opostos. No caso da transação A , temos:

$$C_A^Z = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 < x < 1 \\ 1, & \text{para } 1 < x < 2 \end{cases}$$

4. **MFD**

Através desta metodologia, é necessário se calcular os dois componentes $C_{T_i}^{Db}$ e $C_{T_i}^{Da}$, cujos valores dependerão do carregamento líquido do circuito, f_k . Quando a transação A está em sentido oposto ao fluxo dominante, isto é, $0 < x < 1$, temos que $f_k = 1 - x$ e portanto

$$C_k^a = \frac{1 - (1 - x)}{1} = x$$

e portanto

$$\begin{aligned} C_A^{Db} &= 0 \\ C_A^{Da} &= x \frac{x}{1+x} = \frac{x^2}{1+x} \end{aligned}$$

Conseqüentemente

$$C_A^D = C_A^{Db} + C_A^{Da} = \frac{x^2}{1+x}$$

Já no caso em que os fluxos das duas transações estão no mesmo sentido, teremos que $f_k = (x - 1)$; logo

$$C_k^b = \frac{1 - (x - 1)}{1} = 2 - x$$

e

$$\begin{aligned} C_A^{Db} &= x - 1 \\ C_A^{Da} &= (2 - x) \times \frac{x}{1+x} \end{aligned}$$

Portanto

$$C_A^D = C_A^{Db} + C_A^{Da} = \frac{2x - 1}{1+x}$$

A Fig. 7.5 compara graficamente a evolução dos custos calculados pelas diversas metodologias. Verifica-se que o MWM apresenta um custo unitário constante, não importando o que esteja ocorrendo com o circuito. Portanto, esta metodologia não oferece nenhum incentivo para agentes que provocam contrafluxos. No MM o encargo médio decresce à medida que a quantidade transacionada aumenta. Isto parece correto do ponto de vista do agente, mas não do ponto de vista da operação e expansão do sistema de transmissão. O MFZ fornece incentivo ao agente A enquanto seu fluxo tem sentido contrário ao fluxo líquido. Porém, quando o fluxo de A torna-se dominante, o agente A arca com todos os encargos. Nota-se portanto uma grande descontinuidade quando x se iguala à capacidade do circuito, o que pode levar a uma grande variação do valor do encargo para uma pequena variação de x . Finalmente, no MFD o agente A tem incentivo apenas quando x é de pequena magnitude, isto é, quando A de fato alivia o carregamento do circuito. Quando x se aproxima de 1 e torna-se próximo ao fluxo da transação B, o incentivo decresce. ■

7.4.4 Custos Marginais de Barra

A precificação dos serviços de transmissão baseada na teoria marginalista é uma extensão da teoria dos preços instantâneos (“spot prices”). Sejam:

λ_v : custo marginal no instante considerado na barra do vendedor de energia;

λ_c : custo marginal no instante considerado na barra do comprador de energia;

Então o preço marginal de transmissão é definido como

$$\text{preço marginal de transmissão} = \lambda_c - \lambda_v \quad (7.9)$$

Considerando a ausência de congestionamento no sistema de transmissão, o preço marginal de transmissão é interpretado como o custo incremental que o sistema que “hospeda” a transação, operando economicamente, incorreria em seus próprios geradores para recuperar a perda incremental de transmissão que um incremento unitário de potência devido à transação daria origem.

Além de compensar as perdas de transmissão, o método baseado em custos marginais permite se levar em conta os custos adicionais que advêm quando um limite (de

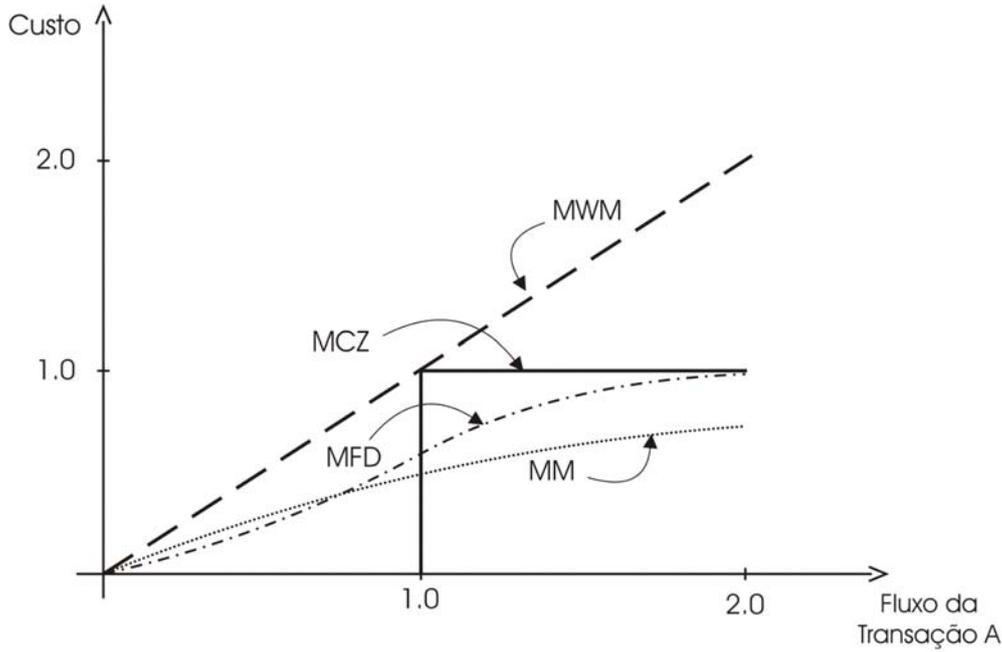


Figura 7.5: Variação de custos dos encargos de transmissão para as diversas variantes do método MW-milha.

fluxo, de transmissão, de geração) é atingido e força um redespacho de geração que obriga o despacho de geradores fora do mérito.

O desenvolvimento que segue tem por objetivo justificar a expressão dos Custos Marginais de Curto Prazo de Transmissão (pedágio) em termos dos custos marginais das barras envolvidas na transação dada pela Eq. (7.9).

Considere a Figura 7.6, que mostra os sistemas A, B e C, onde A vende P_w MW a C através do sistema B, ao qual deverá ser pago pedágio. Suponha que nenhum limite de transmissão é atingido.

Os operadores de B podem determinar os CMB's das barras 1 e 2 usando um FPO. Se estes operadores fossem comprar o bloco de potência P_w na barra 1 a um preço igual a $(CMB)_1$ e vendê-lo a C a um preço igual a $(CMB)_2$, eles recuperariam o seu custo de transmissão (no caso, basicamente devido às perdas).

Assim, o custo marginal da transação é:

$$\Delta F = \frac{\partial F}{\partial P_w} \times \Delta P_w = \left(\frac{\partial F}{\partial P_{L_1}} \times \frac{\partial P_{L_1}}{\partial P_w} + \frac{\partial F}{\partial P_{L_2}} \times \frac{\partial P_{L_2}}{\partial P_w} \right) \times \Delta P_w$$

como:

$P_{L_1} = -P_w$ e $P_{L_2} = P_w$ tem-se a seguinte expressão:

$$\Delta F = \left(\frac{\partial F}{\partial P_{L_2}} - \frac{\partial F}{\partial P_{L_1}} \right) \times \Delta P_w = (\lambda_2 - \lambda_1) \times \Delta P_w$$

onde F é a função-custo dos geradores do sistema B.

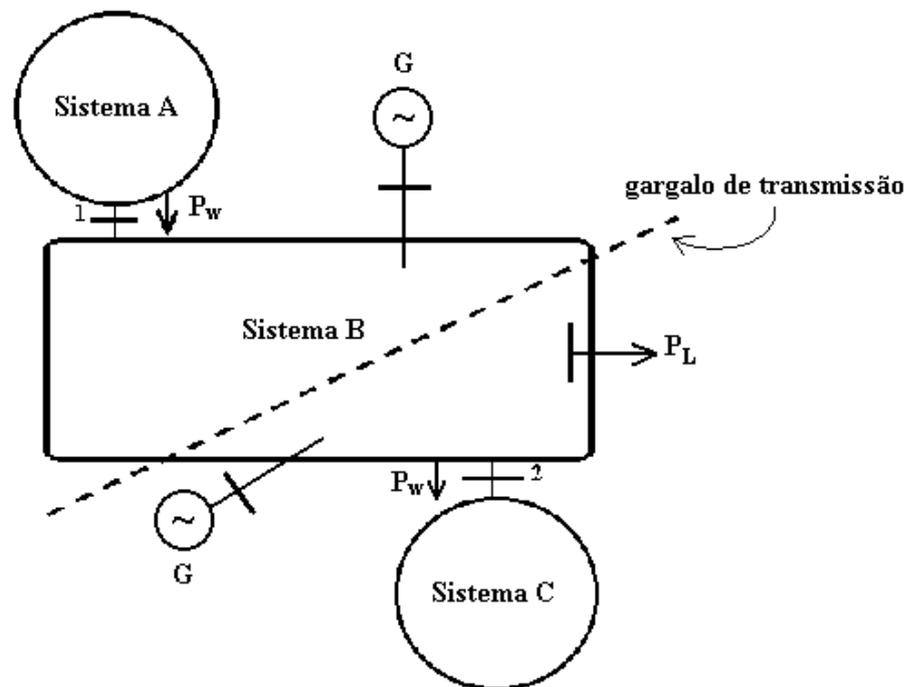


Figura 7.6:

Suponha agora que há uma restrição de transmissão em B tal que, antes que P_w seja injetada no sistema, não é possível mais transmitir potência desde a vizinhança da barra 1 até a vizinhança da barra 2.

Para “transmitir” P_w , o despacho em B tem que ser alterado de forma a absorver a potência entregue próxima à barra 1, e gerar P_w nos geradores próximos à barra 2. A diferença entre os CMB 's agora aumentará, de modo a refletir o custo marginal da restrição que se tornou ativa. Portanto, este esquema de precificação compensa os efeitos econômicos dos congestionamentos de transmissão.

Sem violações de restrições de transmissão, os custos marginais de transmissão aumentam gradualmente com o aumento do montante da transação em MW, refletindo o aumento resultante nas perdas de transmissão. Quando restrições de transmissão são atingidas, os custos marginais tendem a variar mais rapidamente e com maior intensidade.

Este método se aplica para estabelecer preços de curto-prazo que não consideram o ressarcimento dos custos de investimento na rede elétrica. Para isto, seria necessário se considerar custos marginais de longo prazo.

Exemplo 7.5 Considere o sistema de potência apresentado na Fig 7.7. Uma transação bilateral ocorre entre um gerador localizado na barra V e um grande consumidor instalado próximo à barra C. A tabela abaixo apresenta a evolução dos custos marginais das barras V e C para diferentes valores de magnitude da transação, em MW. Calcule o valor do pedágio a ser pago à empresa de transmissão nos diversos casos.

Transação (MW)	50	100	150	200
CMB_C (\$/MWh)	24,1	24,7	25,5	27,2
CMB_V (\$/MWh)	21,8	21,3	21,1	20,3

Solução: Utilizando a Eq. (7.9), podemos calcular os encargos de transmissão para cada valor da transação, os quais são dados na tabela abaixo.

Transação (MW)	50	100	150	200
Pedágio (\$/MWh)	2,30	3,40	4,40	6,90

Verifique que os preços aumentam com o aumento do valor da transação, devido à natureza quadrática entre fluxos nas linhas e perdas. Contudo, o aumento agudo na última coluna é devido a outras causas. Algumas barras atingiram limites de tensão e o programa de FPO foi obrigado a reprogramar a geração de modo a despachar geradores fora da ordem de mérito, mas que por sua localização permitir a obtenção de um perfil de tensão admissível. ■

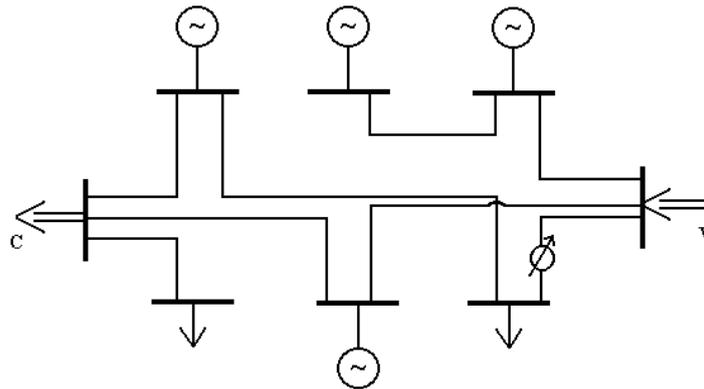


Figura 7.7: Rede elétrica para Exemplo 7.5.

7.5 Transações Envolvendo Produtores Independentes

Distinguiremos dois tipos de transações: quando uma empresa de energia elétrica adquire energia de um produtor independente, diremos que este tipo de transação é uma transação de *mercado Atacadista*. Por outro lado, quando as vendas são feitas diretamente de produtores independentes aos consumidores teremos uma transação de *Mercado Varejista*.

Os problemas técnicos envolvidos na implementação deste tipo de transação envolvem coordenação e despacho. O despacho de um gerador independente que realiza transações bilaterais utilizando a rede de uma empresa de transmissão pode ser feito das seguintes formas: