



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

### Contribuição de Geradores no Carregamento de Sistemas de Distribuição

<b>Edgardo G.C.Palomino</b>	<b>Fernando A. Moreira</b>	<b>Leroy U. Ramos</b>	<b>Niraldo R. Ferreira</b>
<b>Universidade Federal da Bahia</b>			
edgardo@ufba.br	moreiraf@ufba.br	leroy_humasi@hotmail.com	niraldo@ufba.br

#### Palavras-chave

Caminhos de Transmissão i/ou Distribuição  
Fluxo de Potência  
Participação de Geradores  
Sub-Sistemas elétricos

#### Resumo

Com a introdução da competição na indústria de fornecimento de eletricidade, agentes geradores, transmissores e distribuidores estão à procura de respostas para as seguintes questões: “O quanto do total de energia produzida por um determinado gerador chega a uma determinada carga?”; “Que geradores estão suprindo essa carga?”, “Qual o caminho percorrido pelo fluxo de potência produzido por um gerador?”. Neste trabalho descreve-se uma técnica que identifica as partes do sistema de transmissão que estão sendo utilizadas para transportar potência ativa para as barras de carga. Logo, utilizando-se uma hipótese de proporcionalidade, calcula-se a contribuição de cada gerador às cargas, fluxos e perdas do sistema. A aplicabilidade da técnica proposta é demonstrada usando um caso exemplo de 5 barras e no sistema baseado em um equivalente do sistema S/SE brasileiro de 34 barras.

#### 1. Introdução

O setor elétrico nos últimos anos tem experimentado um profundo processo de reestruturação, evoluindo para estruturas mais competitivas nas quais a energia elétrica tornou-se um produto livremente comercializado nos Mercados de Energia Elétrica (MEE).

A retrospectiva da maioria dos sistemas de energia elétrica apresenta como fato marcante a ocorrência de um extraordinário desenvolvimento em todos seus segmentos: no parque gerador mediante o aproveitamento dos diferentes recursos disponíveis e, no sistema de transmissão e distribuição, através da estruturação das atuais malhas interligadas. Esse contínuo crescimento das redes transformou a energia elétrica em um produto acessível à grande maioria da população.

A operação dos mercados de energia elétrica na atualidade também passa por uma profunda reestruturação, especialmente nas transações entre os diferentes agentes através do sistema de transmissão. Sob este ponto de vista, o serviço de transmissão neste novo esquema de funcionamento do mercado de energia elétrica deve ser provido com eficiência econômica e atendendo às restrições de segurança do sistema.

Com a competição introduzida na geração e no fornecimento de energia, concorda-se que a transmissão é um monopólio natural e deve permanecer controlada centralmente. Também é conhecido que a operação dos sistemas de transmissão e distribuição tem um impacto enorme em um mercado competitivo.

A competição funcionará somente se todos os participantes do mercado atual e potencial estiverem convencidos que o mercado está sendo operado razoavelmente. Neste respeito, Os agentes geradores, transmissores e distribuidores estão à procura de respostas para as seguintes questões: “O quanto do total de energia produzida por um determinado gerador chega a uma determinada carga?”; “Até onde pode chegar a energia produzida por um determinado gerador?”; “Qual o caminho percorrido pelo fluxo de potência produzido por um gerador?”, “Que geradores estão fornecendo uma determinada barra de carga?”. Antes da introdução da competição, estas perguntas eram limitadas e na maior parte ao interesse acadêmico, pois os sistemas elétricos eram integrados verticalmente.

Este artigo apresenta uma técnica para determinar quais geradores estão fornecendo a uma determinada carga, quanto uso cada gerador está fazendo do sistema de transmissão e distribuição e como está contribuindo cada gerador às perdas do sistema.

A idéia então é, uma vez que a avaliação do carregamento da rede de transmissão i/ou distribuição detectou uma barra de carga terminal em um determinado ponto de operação, a técnica identifica as partes do sistema de transmissão que estão sendo utilizadas para transportar potência ativa para essa barra de carga. Logo, utilizando-se uma hipótese de proporcionalidade, é possível calcular a contribuição de cada gerador às cargas.

A aplicabilidade da técnica proposta é demonstrada usando um caso exemplo de 5 barras e o Sistema S34 barras.

## **2. Transformação do Sistema Multi-Nó**

Para simplificar o sistema e conseqüentemente a análise proposta, o primeiro procedimento é determinar, na rede inteira, a porção da rede de realmente utilizada para transmitir potência ativa dos geradores até as barras terminais. Os seguintes passos estão envolvidos para a execução dessa idéia [1,2]:

1 - Para achar as sub-redes basta verificar o sinal dos fluxos de potência ativa. As barras  $j$  conectadas à barra de carga terminal  $i$  pertencem à sub-rede se  $P_{ij} < 0$  A barra  $k$  conectada a barra  $j$ , pertence à sub-rede se  $P_{jk} < 0$  A barra  $l$  conectada a barra  $k$ , pertence à sub-rede se  $P_{kl} < 0$ . A busca acaba em barras geradoras  $m$  de potência ativa. A sub-rede está determinada.

2 – Para determinar a contribuição de geradores no carregamento de potência ativa do sistema, basta isolar a sub-rede do resto da rede ignorando os fluxos de potência ativa que deixam a sub-rede a partir dos nós intermediários, assim como os fluxos de potência reativa que deixam e que chegam à sub-rede nos nós intermediários. (Por definição da sub-rede, não há fluxos de potência ativa chegando nela).

Tem-se agora um sistema de dimensões reduzidas, composto de uma barra de carga ligada por uma rede de transmissão, com vários nós intermediários, a um ou mais geradores [3].

## **3. Identificação dos Geradores no Sistema**

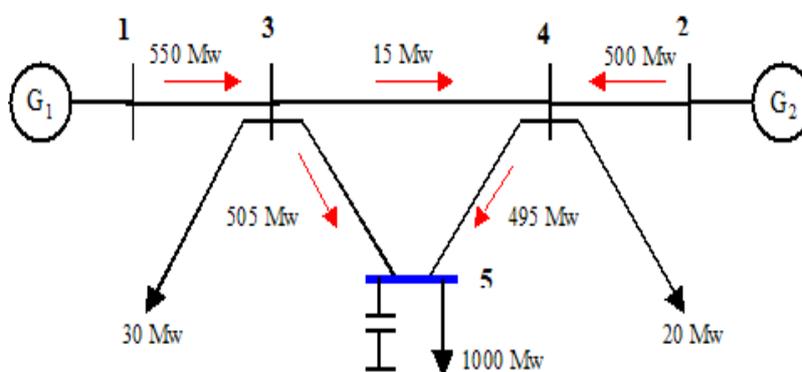
A partir da solução do fluxo de potência de um sistema, o modelo identifica as barras que são alimentadas por cada gerador do sistema. Em seguida verificam-se quais são as barras alimentadas pelo mesmo gerador, isto é, o caminho percorrido pelo fluxo de potência desta barra geradora. Conseqüentemente, o cálculo da contribuição de potência de cada barra geradora às barras de cargas e fluxos de cada ramo do caminho que liga esta barra geradora às barras de carga. Este algoritmo pode ser aplicado tanto para fluxos de potência ativa quanto para fluxos de potência reativa.

### 3.1. Domínio de um determinado gerador

O domínio de uma barra geradora é definido como o conjunto de barras e fluxos dos ramos de transmissão que são alimentadas pela potência produzida por um determinado gerador. Este domínio somente é possível determinar se forem conhecidos os caminhos que o fluxo de potência, que deixa esta barra geradora, percorre até chegar as barras de carga [4]. Isto é feito através de um programa de fluxo de potência.

Como exemplo, é usado o sistema mostrado na Figura 1, indicando a direção e valor do fluxo de potência ativa nos ramos de distribuição (não há perdas ativas). Observa-se facilmente que o domínio do gerador G1 envolve todas as barras e fluxos do sistema (neste caso o sistema somente tem uma sub-rede) menos a barra 2 e o fluxo 2-4, enquanto que o domínio do gerador G2 inclui as barras 2, 4, 5 e os fluxos 2-4 e 4-5.

Este modelo também permite o caminho inverso, ou seja, a partir de uma barra de carga pode-se chegar às barras de geração. Para este caso, observa-se no exemplo da Figura 1 que a barra 5 é alimentada pelas barras 3 e 4, conseqüentemente pelos geradores G1 e G2.



**Figura1.** Sistema – Teste de 5 Barras

### 3.2. Identificação de Geradores

Os resultados obtidos até o momento apresentaram uma visão qualitativa do algoritmo. Para a análise quantitativa serão necessárias novas definições e a introdução de uma hipótese fundamental.

Os fluxos que entram em uma determinada barra são definidos como a soma das potências injetadas por geradores pertencentes à sub-rede. No caso da raiz, sabe-se que o fluxo injetado é proveniente somente do gerador pertencente a essa barra. A soma dos fluxos que entram em uma determinada barra terá sempre sinal positivo. O fluxo que deixa uma determinada barra é a diferença entre os fluxos que entram nessa barra e a carga, este fluxo é exportado por meio de ramos para ramos de níveis maiores.

Os resultados futuros dependerão da seguinte suposição:

“Para uma determinada barra, se a participação do fluxo que entra proveniente de um gerador  $i$  for  $x_i$  então a participação na carga, nos fluxos em ramos que deixam essa barra e conseqüentemente nas perdas também será  $x_i$ ” [5]. Esta hipótese é a base para o cálculo da participação de cada gerador no atendimento às barras de carga. Utilizando-se as seguintes notações:

- $C_{ij}$  – índice de participação do gerador  $i$  na carga e no fluxo que deixa uma determinada barra  $j$ ;
- $C_{ik}$  – índice de participação do gerador  $i$  na carga e no fluxo que deixa uma determinada barra  $k$ ;
- $F_{jk}$  – fluxo no ramo entre as barras  $j$  e  $k$ ;
- $F_{ijk}$  – contribuição absoluta ou fluxo no ramo entre as barras  $j$  e  $k$ , provenientes do gerador  $i$ ;
- $I_k$  – fluxo que entra na barra  $k$ .

Então, 
$$F_{ijk} = C_{ij} * F_{jk} \quad (1)$$

$$I_k = \sum_j F_{jk} \quad (2)$$

$$C_{ik} = \frac{\sum_j F_{ijk}}{I_k} \quad (3)$$

As equações (1), (2) e (3) podem ser utilizadas para determinar a participação de cada gerador em cada barra e nos ramos do sistema. Pela análise da Figura 1, os fluxos que entram na raiz são provenientes dos geradores correspondentes. Portanto, a participação destes geradores nos fluxos que deixam a raiz pode ser calculada por (1), (2) e (3), e com isso pode-se determinar a participação dos demais geradores nos conjuntos de nível superior.

A Tabela 1 apresenta a participação dos geradores nos fluxos dos ramos indicando o nível dos fluxos de acordo ao número de geradores participantes.

**Tabela 1.** Participação de Geradores nos Ramos do Sistema - Teste de 5 Barras

Fluxo no ramo	Participação de geradores	Nível
1 – 3	G1	1
3 – 4	G1	1
2 – 4	G2	1
3 – 5	G1	1
4 - 5	G1 e G2	2

Considerando a Barra 1 e 2 como barras de geração, então:

A contribuição absoluta na entrada da Barra 1 é:

G1: 550 MW

A contribuição relativa na saída da Barra 1:

$$C_{G1} = \frac{550 \text{ MW}}{550 \text{ MW}} = 1 \text{ pu}$$

Contribuição absoluta na entrada da Barra 2:

G2: 500 MW

Índice de participação na saída da Barra 2:

$$C_{G2} = \frac{500 \text{ MW}}{500 \text{ MW}} = 1 \text{ pu}$$

Contribuição absoluta na entrada da Barra 3:

FG1: 550 x 1 = 550

Índice de participação na saída da Barra 3:

$$C_{G1} = \frac{550 \text{ MW}}{550 \text{ MW}} = 1 \text{ pu}$$

Contribuição absoluta na entrada da Barra 4:

$$\text{FG1: } 15 \times 1 = 15$$

$$\text{FG2: } 500 \times 1 = 500$$

Índice de participação na saída da Barra 4:

$$C_{G1} = \frac{15 \text{ MW}}{515 \text{ MW}} = 0,029 \text{ pu}$$

$$C_{G2} = \frac{500 \text{ MW}}{515 \text{ MW}} = 0,971 \text{ pu}$$

Contribuição absoluta na entrada da Barra 5:

$$\text{FG1: } 505 \times 1 = 505$$

$$\text{FG1: } 495 \times 0,029 = 14,355$$

$$\text{FG2: } 495 \times 0,971 = 480,645$$

Índice de participação na saída da Barra 5:

$$C_{G1} = \frac{519,355 \text{ MW}}{1000 \text{ MW}} = 0,52 \text{ pu}$$

$$C_{G2} = \frac{480,645 \text{ MW}}{1000 \text{ MW}} = 0,48 \text{ pu}$$

Os resultados encontrados indicam que a participação dos geradores é fornecida pelo índice de participação na saída das barras. Desta forma: a carga nessas barras, os fluxos nos ramos de transmissão que deixam essas barras e conseqüentemente as perdas estarão afetados pelos índices determinados.

**Tabela 2.** Participação de Geradores nos Ramos do Sistema - Teste de 5 Barras

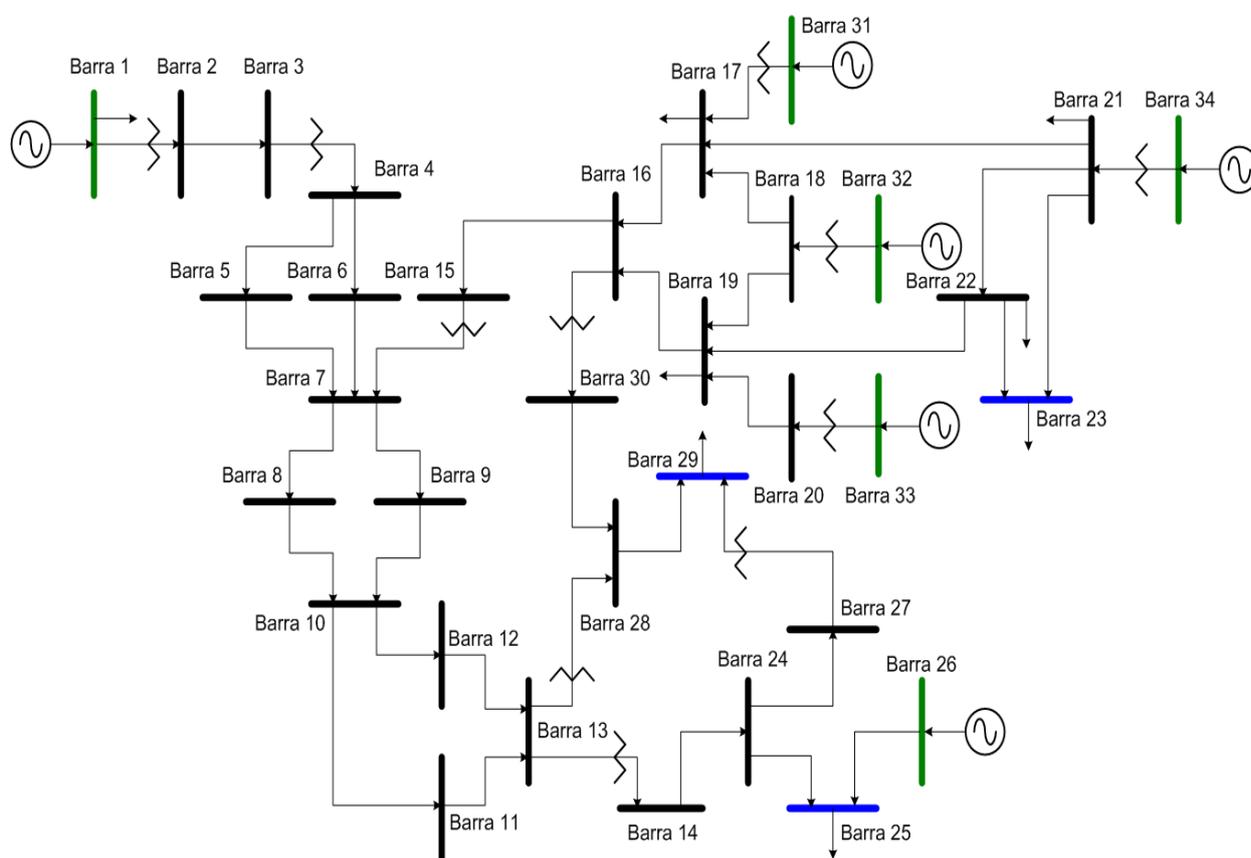
Item		% de Participação		Sub-Sistema
		G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	
Barras	1	100	0	01
	2	0	100	01
	3	100	0	01
	4	2,9	97,1	01
	5	52	48	01
Fluxos	1 - 3	100	0	01
	2 - 4	0	100	01
	3 - 4	100	0	01
	3 - 5	100	0	01
	4 - 5	2,9	97,1	01

Observando-se a Tabela 2, percebe-se que o sistema teste de 5 barras da Figura 1 somente compreende 1 subsistema; Analisando o índice de participação na saída da barra 3 nota-se que: a carga, o fluxo 3-4, e o fluxo 3-5 terão 100% de participação do gerador 1 (não há perdas). O índice de participação na saída da barra 4 indica que tanto a carga nessa barra e o fluxo 4-5 terão participação de 2,9 % do gerador 1 e 97,1 % do gerador 2 e o índice de participação na saída da barra 5 indica que a carga nessa barra tem participação de 52 % do gerador 1 e 48 % do gerador 2.

#### 4. Aplicação no Sistema de S34 Barras

Como no caso do sistema - teste de 5 barras, o sistema de 34 barras ilustrado na Figura 2, baseado em um equivalente do sistema S/SE brasileiro, é usado para mostrar a participação de geradores: nas cargas, nos fluxos em ramos de transmissão e distribuição e conseqüentemente nas perdas.

A Figura 2 mostra o diagrama unifilar deste sistema composto por 6 barras de geração e 53 ramos de transmissão indicando a direção dos fluxos de potência ativa nos ramos de transmissão que correspondem a um determinado ponto de operação.



**Figura 2.** Sistema S34 Barras

Observando a Figura 2 e aplicando o procedimento descrito no item 2 para determinar, na rede inteira, a porção da rede realmente utilizada para transmitir potência ativa dos geradores até as 3 barras terminais: 23, 25, e 29. Portanto, determina-se 3 subsistemas, associados um para cada barra terminal mostrados nas figuras 3, 4 e 5:



Na Tabela 3 observa-se que para as barras terminais (23,25 e 29) tem-se a participação de todos os geradores do sistema e portanto várias possibilidades de solução de problemas, isto é, caso existam, visando a qualidade e/o economia de serviço. Por exemplo: problemas de tensão, problemas de ampliação do sistema a partir dessa barra, etc.

A participação de geradores nos fluxos nos ramos e conseqüentemente nas perdas ativas nas linhas, tem a mesma distribuição de índices que à das barras da qual saem os fluxos.

O método é interessante por que a alocação das perdas é independente da escolha das barras.

**Tabela 3.** Porcentagem de Participação de Geradores no Sistema S34 barras

Item	Porcentagem de Participação de Geradores em Barras						Sub-Sistema
	G <sub>1</sub>	G <sub>26</sub>	G <sub>31</sub>	G <sub>32</sub>	G <sub>33</sub>	G <sub>34</sub>	
<b>Barras</b>							
1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3
2	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3
3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3
4	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3
5	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3
6	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3
7	59,1	0,0	18,0	10,1	4,9	7,9	2,3
8	59,1	0,0	18,0	10,1	4,9	7,9	2,3
9	59,1	0,0	18,0	10,1	4,9	7,9	2,3
10	59,1	0,0	18,0	10,1	4,9	7,9	2,3
11	59,1	0,0	18,0	10,1	4,9	7,9	2,3
12	59,1	0,0	18,0	10,1	4,9	7,9	2,3
13	59,1	0,0	18,0	10,1	4,9	7,9	2,3
14	59,1	0,0	18,0	10,1	4,9	7,9	2,3
15	0,0	0,0	44,1	24,8	12,0	19,3	2,3
16	0,0	0,0	44,1	24,8	12,0	19,3	2,3
17	0,0	0,0	74,7	5,6	0,0	19,7	2,3
18	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	2,3
19	0,0	0,0	0,0	52,3	29,2	18,6	2,3
20	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	2,3
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	1,2,3
22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	1,2,3
23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	1
24	59,1	0,0	18,0	10,1	4,9	7,9	2,3
25	21,9	63,0	6,7	3,8	1,8	2,9	2
26	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2
27	59,1	0,0	18,0	10,1	4,9	7,9	3
28	49,3	0,0	22,3	12,6	6,1	9,8	2,3
29	49,6	0,0	22,2	12,5	6,0	9,7	3
30	0,0	0,0	44,1	24,8	12,0	19,3	2,3
31	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	2,3
32	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	2,3
33	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	2,3
34	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	1,2,3

## 5. Conclusões

Foi descrito e demonstrado um método simples para identificar a contribuição de cada gerador no carregamento de barras do sistema, fluxos em ramos de transmissão e distribuição e nas perdas. Também pode ser aplicável independentemente aos fluxos de potência ativa e/o reativa (com o devido cuidado).

O exemplo numérico demonstra que esta aproximação pode objetivamente avaliar as contribuições feitas por cada gerador no sistema e pode responder às perguntas registradas na introdução.

Assim, este método poderia ser usado na tarifação dos serviços da transmissão e distribuição ou outras questões importantes que se levantam na introdução da competição na indústria da eletricidade e assegurar a transparência na operação do sistema da transmissão.

## 6. Agradecimentos

A CNPq, o primeiro e terceiro autores do artigo, recebem suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

## 7. Referências bibliográficas e/ou bibliografia

[1] Prada, R.B., Palomino, E.G.C., Pilotto, L.A.S., Bianco, A., “Weakest Bus, Most Loaded Transmission Path and Critical Branch Identification for Voltage Security Reinforcement”, Electric Power System Re-search, Vol. 73, pp. 217-226, 2005.

[2] Palomino, E.G.C. -“Reforço das Condições de Estabilidade de Tensão na Operação do Sistema Elétrico”, Tese de Doutorado, DEE PUC/Rio, 9 de maio de 2002.

[3] Palomino E.G.C., Prada R.B. ”Localização das Linhas de Transmissão Sobrecarregadas do Ponto de Vista de Estabilidade de Tensão”, IV Seminário Nacional de Controle e Automação Industrial - SNCA, Salvador, Julho 2005.

[4] L. Wang, Y. Liu, Z. Luan: “Power Transmission Paths Based Voltage Stability Assessment”, 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China.

[5] D. Kirschen, R. Allan, G. Strbac: “Contributions of Individual Generators to Loads and Flows”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No.1, February 1997.