



SPOLM 2007

ISSN 2175-6295

Rio de Janeiro- Brasil, 08 e 09 novembro de 2007.

OTIMIZAÇÃO DA REMUNERAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO NO MERCADO COMPETITIVO DE GERAÇÃO ELÉTRICA

Carlos Eduardo Varejão Marinho
eduardovarejao@yahoo.com.br

Francisco José V. Marinho
Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói.RJ - CEP 24210-240
varejaomarinho@yahoo.com.br

Renato de Campos
Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho
Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Bauru/SP - CEP 17033-360
renato.campos@gmail.com

Geraldo Galdino de Paula Júnior
Universidade Estadual do Norte Fluminense – Darcy Ribeiro
Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes – CEP 28013-602
Galdino@uenf.br

Resumo

A desverticalização do setor elétrico introduziu a competitividade na indústria de geração o que ocasionou uma nova organização industrial do setor, para garantir a sua eficiência operacional e ganho para toda a sociedade. Duas atividades foram criadas com objetivo de operacionalizar o setor: o mercado spot (MSPOT) com a missão de internalizar o preço da energia colocada nesse mercado e o operador do sistema (OSIST) com a finalidade de gerenciar o fluxo elétrico, integrando a demanda e a oferta. Neste trabalho estuda-se um método acíclico, de complexidade $O(n^2)$, para modelar o fluxo de energia elétrica para permitir: primeiro, contribuir para eficiência do operador do sistema e, segundo, fortalecer a dinâmica operacional do mercado spot, na aquisição de energia de geradores espacialmente dispersos, pelo critério de menor preço.

Palavras chaves: matriz de peso, operador do sistema, mercado spot, método acíclico.

Abstract

The Electric Sector restructured introduced the competitiveness in the generation industry and created a new industrial organization of the sector, to guarantee its operational efficiency and social gain. Two activities had been created with objective to lead the sector: the spot market (MSPOT) with the mission itself the price of the energy placed in the market, and the operator system (OSIST) with the purpose to manage the flow electric integrating the demand and supplies. This work presents a acyclic method of complexity $O(n^2)$ to shape the flow of electric energy to allow: first to contribute for efficiency of the OSIST; and second, to brace

the operational dynamics of the MSPO, in the acquisition of energy of generators, space dispersed, by lesser price criterion.

Key words: matrix of weight, operator system, spot market, acyclic method

1. INTRODUÇÃO

A reestruturação do setor elétrico, entre outros fatores, teve no fator tecnológico um grande facilitador, segundo Pistonesi (2001), para a introdução da competitividade na indústria de geração elétrica; com a transmissão e a distribuição constituindo monopólios naturais (regulados). Assim, surgiram o mercado *spot* com a missão de *internalizar* o preço da competição entre plantas, e o operador do sistema com a finalidade de *gerenciar* (YONG e LASSETER, 1999) o fluxo elétrico, integrando a curva de oferta e demanda desse mercado.

A incompatibilização tecnológica entre o mercado de geração elétrica (competitivo) e a transmissão (monopólio natural) torna ineficaz a dinâmica operacional das atividades inerentes ao operador do sistema e ao mercado spot de energia elétrica. Este fato citado por Kristiansen (2003), relatado no Relatório de Progresso No. 2, Documento de Progresso de Apoio M – Congestionamento de Transmissão, preparado pelo Comitê de Revitalização do Modelo do Setor Elétrico (2002), está associado ao fluxo de energia elétrica (f_{uv}) sujeito as restrições $0 \leq f_{uv} \leq f_{uv}^{\max}$, conduzir a limitações no processo decisório da curva de produção e, conseqüentemente, nos estoques de energia de curto prazo. Essa inconveniência apontada por Kristiansen *op. cit.*, relatada no Relatório de Progresso No. 2, como conseqüência da Segunda Lei de Kirchhoff (SLK), torna ineficaz o MSPOT na sua missão de “estocar” a energia elétrica pelo critério do menor preço, regional, devido a SKL bloquear a energia mais barata. E, com isso, privilegiar a energia mais cara por estar mais “próxima” do consumidor, além de tornar desnecessária a *rede incremental* (ancilar). Essas limitações do modelo de fluxo implicam numa remuneração insuficiente para o OSIST, que passa a depender do “subsídio” para cobrir a sua demanda de longo prazo. Percebe-se, diante do problema, que para tornar eficaz o MSPOT é necessária uma maior integração entre as informações geradas nesse mercado e as ações do OSIST. E, entre essas ações, uma maior flexibilidade da rede elétrica que permita o OSIST aproveitar a dinâmica de preços desse mercado.

Neste trabalho é apresentada uma parte de um estudo que propõe um novo modelo de fluxo e foca a eficiência operacional do OSIST diante do modelo competitivo entre geradores. O método permite: 1) a escolha de geradores, espacialmente dispersos, pelo critério de menor preço, e 2) delinear o fluxo do gerador escolhido até os mercados consumidores.

Em decorrência do método ser uma heurística, a relaxação de algumas restrições de fluxos em redes é permitida, para que se possa delinear o fluxo elétrico de cada gerador introduzido na rede, e a sua contribuição econômica para o MSPOT, até que seja alcançado o equilíbrio entre a oferta e demanda. Um exemplo de aplicação do método também é apresentado.

A descrição inicia-se na próxima seção com a proposição de um modelo para o fluxo elétrico que permite sua gestão pelo OSIST, em função das informações oferecidas pelo MSPOT.

2. A PROPOSIÇÃO DE FLUXO DE ENERGIA ELÉTRICA

O modelo de fluxo, neste estudo, tem a sua viabilidade ótima na restrição $0 < f_{uv} < f_{uv}^{\max}$ gerenciado a partir de uma matriz de peso P . Com a rede elétrica no seu *steady-state* representada na forma de grafo $G(\Phi, \pi, P)$, misto, e a imposição de direcionamento para o fluxo do gerador para as demandas adjacentes. Com Φ e π como informações nos vértices $u \in V$ de G , e $p_{uv} \in P$ estabelecidos nos arcos $(u, v) \in A$ de G . O direcionamento para o fluxo proposto decorre da linearização da potência elétrica, que permite construir as restrições de segurança limitadas pelas capacidades térmicas das linhas e trabalhar com os “estoques” de energia elétrica. Com esses estoques representados pelos recursos de produção e combustível disponibilizados para o mercado spot e, desse modo,

particioná-lo nos diversos pontos de demanda.

A matriz de peso proposta neste trabalho pode ser construída sob várias conotações, entre elas, aquelas que identificam e internalizam os aspectos qualitativos e quantitativos do consumidor, nas suas demandas por segurança e confiabilidade, e de eficiência de projeto. No sistema de transmissão, a eficiência do projeto esta atrelada ao rendimento da linha, representada no parâmetro ($0 < \eta < 1$), isto é, a eficiência de cada linha calculada pela fórmula: $\eta_{uv} = 1 - \Phi_v / \Phi_u$, (O'MALLEY, 1983), onde: (Φ_u) corresponde ao fluxo elétrico injetado, em um ponto específico da rede (origem do fluxo), e, (Φ_v) o fluxo elétrico retirado no destino. Com esse parâmetro de eficiência η escalonando os elementos da matriz P ($p_{uv} \geq 0, p_{uv} \in P$).

A internalização da matriz P no processo decisório do OSIST permitirá que seja identificado, a priori, o modelo de fluxo ótimo do gerador escolhido pelo critério de menor preço e, conseqüentemente, a eficácia do MSPOT. Ressalta-se neste trabalho a eficiência econômica no transporte de energia elétrica, quando o método escolhe caminhos de melhor rendimento para o escoamento da energia elétrica produzida (MARINHO, 2007). Com isto significando numa minimização de custos de alocação de recursos (bens de produção e combustível) para a produção de energia elétrica a ser consumida no meio de transporte.

A remuneração da atividade do OSIST decorre da dinâmica do mercado *spot* em comprar a energia regional, mais barata, e revendê-la numa região *premium*. Esse esquema de remuneração é fundamental por permitir uma avaliação da eficiência na transação econômica, de forma clara.

Deixando π_u ser o preço nodal de venda da energia na região u , e π_v o preço de revenda na região *premium* v , a diferença $\pi_v - \pi_u$ sinaliza um *surplus*_{uv} (BOUCHER e SMEERS, 2001; SCHWEPPE *et al.* 1988) entre as regiões u e v que, em princípio, deve induzir a uma remuneração eficiente para o OSIST. Neste trabalho considera-se como região *premium* aquela com melhor propensão a pagar por uma unidade de fluxo elétrico a ser consumido.

3. A GESTÃO DO OPERADOR DO SISTEMA

Encontrar um modelo que integre as ações de um operador do sistema elétrico, responsável pela repartição de geração/carga às informações do mercado spot de energia elétrica não é uma tarefa fácil no modelo de fluxo atual. Alguma implementação, ou recondicionamento de projeto, conforme proposto por Gomes *et al.* (1999), precisa ser realizada para flexibilizar a rede. Percebe-se no modelo de fluxo sujeito às restrições $0 \leq f_{uv} \leq f_{uv}^{\max}$, portanto concentrando toda a atividade nos arcos (SYSLO, 1983, p. 269-295), como o responsável pela ineficácia operacional do MSPOT citada por Kristiansen (2003) e relatada no Relatório de Progresso No. 2.

A modelagem matemática para o fluxo de energia elétrica, ótimo, proposto neste trabalho, leva em conta a alocação da potência ativa com restrições de geração e transmissão, com o modelo do fluxo linearizado, isto é, o fluxo de carga em corrente contínua, com limites de carga ativo. Considerando-se presente no modelo, basicamente, os geradores e demandas e a matriz de peso P . Além dos geradores representados pelos estoques de energia disponibilizados, em (W), o seu preço unitário, e as demandas pelo fluxo elétrico (Wh) a ser consumido e o seu pagamento unitário.

Para facilitar a exposição e o entendimento da análise toma-se como verdadeira a restrição de segurança $\sum_u g_u \leq \min \{ f_{uv}^{\max} \}$, $g_u \leq g_u^{\max}$, com g_u correspondendo aos estoques de energia elétrica disponibilizados, na rede, a qual implementa a restrição de não negatividade ao modelo de fluxo estudado, isto é, $\phi_{uv} \geq 0$ (MARINHO, 2007).

A atividade do OSIST corresponde ao transporte da energia elétrica disponibilizada, numa região, para outras regiões com déficit de energia, respeitando as restrições do meio. Essa atividade além das restrições de segurança é regida, também, pela lei de “conservação do

fluxo” (AHUJA et al 1993 p. 39-46) expressa nas restrições $\sum_{\{v:(u,v) \in A\}} \phi_{uv} - \sum_{\{v:(v,u) \in A\}} \phi_{uv} = \Phi(u)$. Onde

$\Phi(u)$ assume ser uma região exportadora ou importadora de energia elétrica. Na condição $\Phi(u) > 0$, a região caracteriza-se pela oferta de energia (região exportadora), enquanto, na condição $\Phi(u) < 0$, a região caracteriza-se como importadora de energia. Na condição $\Phi(u) = 0$, a região apresenta uma neutralidade ou pode se encontrar em um equilíbrio temporal de oferta e demanda de energia elétrica. Esse ponto onde $\Phi(u) = 0$, Rocha (1988), caracteriza como ponto de passagem. As duas primeiras condições são visíveis nos modelos de fluxos elétricos clássicos; já a condição $\Phi(u) = 0$, embute uma armadilha nos métodos cíclicos de otimização, que pode conduzir a uma inviabilidade para o fluxo, mesmo quando o problema é viável. A degeneração de fluxo é um assunto bem estudado na programação linear, onde se destaca o trabalho Cunningham (1976^a e 1976^b) sobre soluções de problemas de redes com fraca conectividade.

4. MODELAGEM DA GESTÃO INTEGRANDO AS ATIVIDADES DO OSIST E DO MSPOT

A função objetivo do modelo que integra as atividades do OSIST e do MSPOT consiste em delinear o fluxo ótimo do gerador ativo, demandas atendidas e as suas contribuições para o ganho monetário do MSPOT. Portanto, a função objetivo do MSPOT, a qual maximiza o *surplus*, subordina-se às condições de contorno do fluxo elétrico em função de **P. E**, cuja representação matemática é a seguinte:

$$OSIST = \min \sum_{(u,v) \in A} p_{u,v} \phi_{u,v} \quad (1)$$

s. a:

$$\sum_{\{v:(u,v) \in A\}} \phi_{uv} - \sum_{\{v:(v,u) \in A\}} \phi_{uv} = \Phi(u) \quad (1.a)$$

$$\sum_u \Phi_u = \sum_v \Phi_v \quad (1.b)$$

$$\phi_{uv} \geq 0 \quad (1.c)$$

Considerando-se na restrição de equilíbrio (1.b) entre a oferta e a demanda, a contabilização das perdas de potência elétrica, em corrente contínua, no meio de transmissão.

A matriz originária das restrições (1.a) constitui-se numa matriz de incidência nó-arco, unimodular, de posto incompleto, caracteriza a rede de fluxo nas suas propriedades específicas. O artifício utilizado para torná-la uma base para busca da solução ótima, constitui-se na escolha de um nó como referência; com esse nó representado na sua conexão a um pseudo-arco com fluxo zero. Tornando-se, assim, uma referência para o cálculo das variáveis duais. Esse artifício torna-se num ponto crucial, para a resolução do modelo pelos métodos cíclicos de otimização.

A seguir é apresentado o método heurístico que integra MSPOT/OSIST de energia elétrica e resolve o modelo proposto.

5. O MÉTODO HEURÍSTICO

O método apresentado neste trabalho constitui-se de uma adequação do método de correção de Dijkstra apresentado por Hochbaum (2003 p. 39-41). A dinâmica do algoritmo de Hochbaum (*op. cit.*) constitui-se no particionamento dos vértices em dois conjuntos: o conjunto dos vértices permanentes e, o conjunto dos vértices temporários. Os elementos pertencentes a cada conjunto apresentam as propriedades:

- Cada vértice u do conjunto permanente corresponde a “menor distância” desse vértice, ao vértice 1 (considerado como raiz);
- O rótulo de cada vértice do conjunto temporário corresponde a menor distância ao vértice 1, tal que, todos os vértices “internos” dos caminhos estão no conjunto

permanente; isto é, seria o caminho mais curto quando são retirados todos os arcos, com ambos terminais, no conjunto temporário.

A adequação proposta neste trabalho constitui-se numa heurística para resolver o “problema de fluxo” apresentado no item 4, complementado com as informações geradas no mercado de energia elétrica, de curto prazo, como ilustra a figura 1, do exemplo.

Grosso modo, o projeto de reestruturação do setor elétrico visou a competitividade nas empresas de geração. O método busca tornar eficaz essa dinâmica, e, ao mesmo tempo, propiciar um ganho econômico para o operador do sistema; em decorrência do método permitir a esse operador gerenciar os fluxos elétricos, a partir de uma escolha do caminho para esse fluxo, até a demanda. Com essa escolha do caminho calculada no melhor rendimento para o fluxo, isto é, o caminho que implementa menores perdas para o fluxo elétrico.

O método para delinear o fluxo elétrico, propiciado pelo gerador escolhido pelo critério de menor preço, é constituído de duas sub-rotinas. A primeira rotina ativa o gerador mais barato, segundo um critério de preço; enquanto que a segunda rotina mapeia a rede *incremental* do gerador escolhido, e calcula a contribuição para o ganho do operador do sistema em cada ponto de demanda alcançado.

A rotina inicial para encontrar o gerador mais barato é a seguinte:

Deixe $GER_u, u \in TEMP$, ser o gerador no qual $\pi_u := \min\{\pi_u, u \in TEMP\}$,

$TEMP := TEMP \setminus \{u\}$, $PERM := PERM \cup \{u\}$

A rotina para modelar o fluxo incremental é a seguinte:

{ escolha do vértice v com melhor rendimento até u }

Deixe $DEM_v, v \in TEMP$ ser a demanda do vértice v para a qual

$\pi_v^o := \min\{\pi_v^o : v \in TEMP\}$ $PERM := PERM \cup \{v\}$; $TEMP := TEMP \setminus \{v\}$

each $v \in DEM_v, v \in TEMP$

if $\pi_v^o > \pi_v + p_{uv}$ **then**

$\pi_v^o := \pi_v + p_{uv}$ e $pred(v) := u$

O método funciona dentro de um critério de complementariedade entre dois conjuntos: o conjunto temporal $TEMP$ e um conjunto $PERM$ e são responsáveis pela dinâmica do método na locação do fluxo elétrico nos vértices de demanda e inibição dos geradores remanescente no conjunto GER . O conjunto $TEMP$ é iniciado com todos os vértices do grafo, enquanto, o conjunto $PERM$ é iniciado com $\{\mathbf{0}\}$.

A rotina inicial de otimização acontece com a escolha do gerador, pelo critério de menor preço π_u , (essa escolha constituiria para os métodos cíclicos de otimização na identificação do nó de referência, para o cálculo das variáveis duais), sendo a variável u adicionada ao conjunto $TEMP$ e retirada dos conjuntos $TEMP$ e GER .

A variável incremental nodal (π_v^o), do vértice escolhido para pertencer ao conjunto $PERM$ recebe o fluxo elétrico remanescente do gerador G_u , o qual contribui para a otimização da variável MSPOT.

Ressalta-se, entretanto, que a rotina da potência elétrica incremental, quando $GER_u < |DEM_u|$, com DEM_u constituindo-se em uma variável auxiliar que recebe DEM_v , implica na entrada do próximo gerador para atender a demanda remanescente de v , representada na variável DEM_u^{inc} . Neste caso, o vértice v retorna ao conjunto dos vértices temporários (rede incremental) com a demanda igual DEM_u^{inc} .

As variáveis GER e DEM substituem Φ nas condições de oferta e demanda, mantidos o sinal de + (mais) no caso de geração e – (menos) no caso de demanda. Ao ser utilizado esse método no modelo de fluxo de fluxo apresentado em (1), são violadas as restrições (1.a) e (1.b).

O pseudocódigo completo do método é o seguinte:

Programa <Calcula receita liquida do MSPOT>

Begin

```

GER{u};  $\pi\{u\}$ ; DEM{v};  $\pi\{v\}$ ; MSPOT := 0; VER := {u, v}; TEMP := VER; P;
PERM := {0};  $\pi^o := \{0\}$ ; vaux := 0
while GER{u}  $\neq$  {0} do
begin
{Escolha do gerador pelo critério do menor preço}
Deixe GERu, u  $\in$  TEMP, ser o gerador para o qual  $\pi_u := \min\{\pi_u, u \in TEMP\}$ ;
GERu+ := {v/(u, v)  $\in$  A};  $\pi_u^o := 0$  e pred(u) := 0;  $\pi_v^o := p_{uv}$ , puv  $\in$  P, e pred(v) := u para
todo v  $\in$  Adj(u), caso contrário,  $\pi_v^o = \infty$ 
GER := GER \ {u}; PERM  $\cup$  {u}; TEMP \ {u};
while GERu  $\neq$  0 and PERM  $\neq$  VER do begin
{escolha do vértice v com melhor rendimento até u }
deixe DEMv, v  $\in$  TEMP ser a demanda do vértice v para o qual
 $\pi_v^o := \min\{\pi_v^o : v \in TEMP\}$ ; TEMP := TEMP \ {v};
DEMu := DEMv;
if vaux  $\neq$  0 then begin
vaux := v; vaux := 0
if GERu  $\geq$  |DEMu| then
begin
GERu := DEMu + GERu;
DEMv := 0; pv, pred(v) :=  $\infty$ ;
else
if 0 < GERu < |DEMu| then
begin
DEMuinc := DEMu + GERu;
GERu := 0; vaux := v; pred(vaux) := pred(v); DEMv := DEMuinc; DEMuinc := 0;
pv, pred(v) :=  $\infty$ 
else
if |DEMu| > 0 then
DEMv := DEMu; pred(v) := 0; DEMu := 0
end;
if (- $\pi_u$  +  $\pi_v$ ) < 0 then
MSPOT := MSPOT else
MSPOT := MSPOT + (- $\pi_u$  +  $\pi_v$ )DEMu
end;
DEMu := 0; PERM  $\cup$  {v};
each v  $\in$  DEMv+, v  $\in$  TEMP
if  $\pi_v^o > \pi_v^o + p_{uv}$  then
 $\pi_v^o := \pi_v^o + p_{uv}$  e pred(v) := u
end;
end;
PERM := {}; TEMP := VER;  $\pi^o := \{0\}$ 
end;

```

|MSPOT|

End.

|DEM| e |MSPOT| correspondem aos seus valores absolutos.

Para se fazer uma análise de complexidade do método, observa-se três grandes operações:

- escolha do gerador G_u pelo critério de menor preço: $O(n)$;
- para encontrar o vértice com melhor rendimento até u , π_v^o : $O(n^2)$ e
- para a atualização da rede incremental π_v^o : $O(m)$. Portanto a complexidade do algoritmo é $O(n + n^2 + m) \cong n^2$.

Onde, n e m correspondem ao número de vértices (geradores ou demandas) e arcos (linhas) na rede elétrica, respectivamente.

6. UMA APLICAÇÃO DO MÉTODO

Inicia-se este exemplo de aplicação apresentando o esquema econômico ideal da rede ilustrada na figura 1.

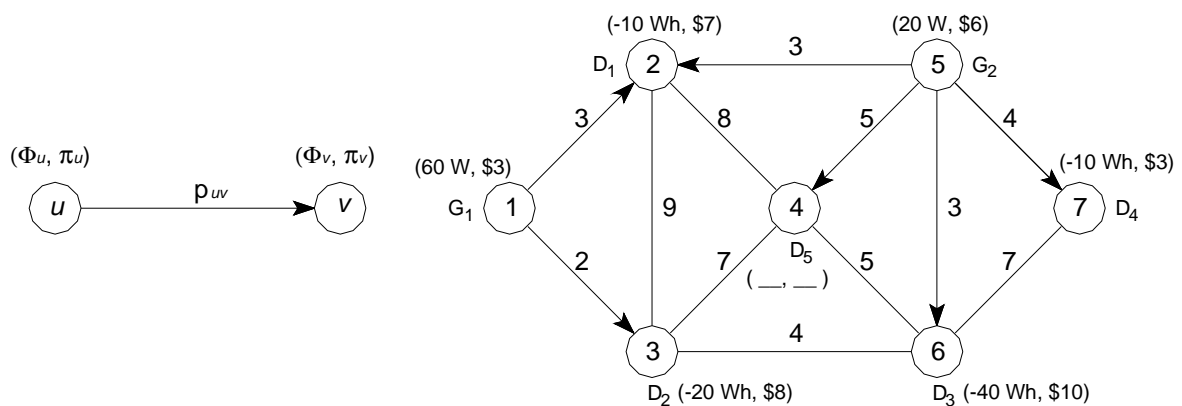


Figura 1 – Representação de uma rede integrada MSPOT/OSIST na forma de grafo $G(V, A)$.

O esquema econômico ideal para o modelo de rede representado, na figura 1, não leva em consideração as restrições da rede. A despesa do MSPOT na compra de energia está apresentada na tabela 1.

Tabela 1- Despesa Operacional Nodal do MSPOT na compra de energia

Gerador	Estoques (W)	Preço Nodal π_u (\$)	Despesa Operacional (\$)
1	60	3	180
2	20	6	120
Despesa operacional nodal do MSPOT			300

O esquema de revenda propicia uma receita nodal. A tabela 2 apresenta a receita de revenda nodal, ideal, propiciada pelo gerador G1.

Tabela 2: Receita de revenda ideal da energia disponibilizada pelo gerador G1

Demanda Nodal	Quantidade (Wh)	Pagamento Nodal π_v (\$)	Receita Nodal (\$)
D1(2)	-	-	-
D2(3)	20	8	160
D3(6)	40	10	400
D4(7)	-	-	-
D5(4)	-	-	-
Receita nodal ideal propiciada por G1			560

A tabela 3 apresenta a receita nodal ideal, propiciada pelo gerador G2.

Tabela 3- Receita de revenda ideal da energia disponibilizada pelo gerador G2.

Demanda Nodal	Quantidade (Wh)	Pagamento Nodal π_j (\$)	Receita Nodal (\$)
D1(2)	10	7	70
D2(3)	-	-	-
D3(6)	-	-	-
D4(7)	10	3	30
D5(4)	-	-	-
Receita nodal ideal propiciada por G2			100

Verifica-se que a contribuição do G1 gera uma receita nodal ideal de \$560 e a do G2 uma receita nodal ideal de \$100 para o MSPOT.

Na tabela 4 são apresentados os ganhos, ideais, líquidos, proporcionados G1 e G2.

Tabela 4- Ganho líquido ideal do MSPOT

GER/ DEM	D3(\$10)	D2(\$8)	D1(\$7)	D4(\$3)	Total
G1(\$3)	280	100	-	-	380
G2(\$6)	-	-	10	0	10

Na tabela 4 observa-se que a contribuição proporcionada por G₁ corresponde a um ganho de \$380, e do G₂ corresponde a uma contribuição de \$10.

Inicia-se a resolução do modelo, apresentado na figura 1, com a escolha do gerador (G₁). O fluxo elétrico delineado ao se aplicar o método de otimização está apresentado na figura 2 e a análise econômica na Tabela 5. Para delinear o fluxo de G₁ na rede, foram realizadas 6 iterações.

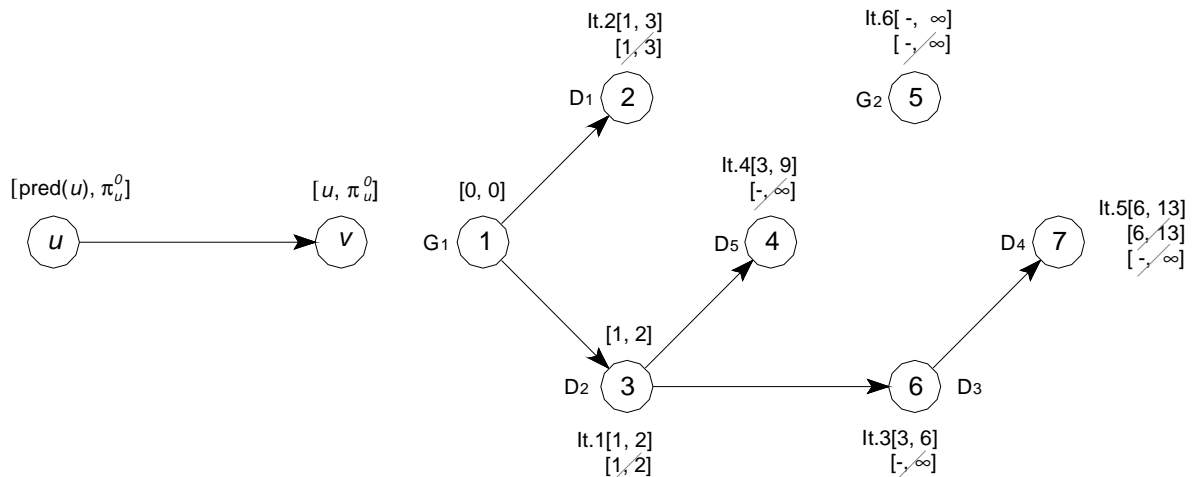


Figura 2 - Demandas atendidas pelo fluxo elétrico produzido por G1.

Tabela 5- Contribuição de G1 na receita ótima do MSPOT*

Demanda	Fluxo (W)	Ganho (\$)	Receita (\$)
D1(2)	10	3	40
D2(3)	20	5	100
D3(6)	30*	7	210
D4(7)	0	0	0
D5(4)	0	0	0
Contribuição de G1			350

*O incremento de fluxo será atendido pelo segundo gerador mais barato.

Em decorrência do estoque disponibilizado pelo gerador G₁ ser insuficiente para atender a

demanda total solicitada na rede, incorre na construção da rede incremental apresentada na figura 3, e, cuja demanda será atendida pelo gerador G_2 . Neste contexto serão incrementais a demanda D_3 em 10 Wh e D_4 , também, com 10 Wh.

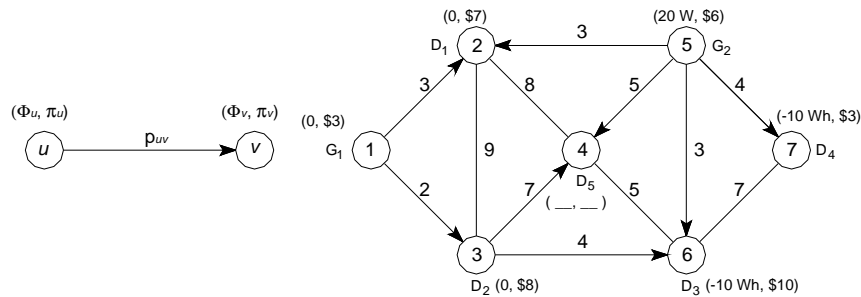


Figura 3 - Rede incremental.

Aplicando o método de otimização na rede incremental da figura 3, a solução do fluxo ótimo do gerador G_2 é apresentada na figura 4. Para delinear o fluxo do gerador G_2 foram realizadas seis iterações.

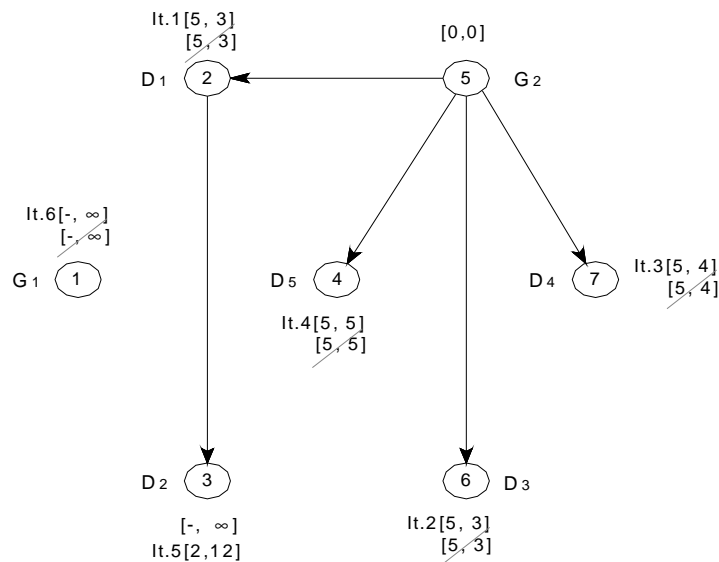


Figura 4. Demandas atendidas pelo fluxo elétrico do gerador G_2 .

A tabela 6 apresenta o ganho do MSPOT, calculado pela sua função objetivo apresentada em (1), propiciado em cada vértice de demanda alcançado pelo fluxo G_2 .

Tabela 6- Contribuição de G_2 na receita ótima do MSPOT

Demanda	Fluxo (Wh)	Ganho (\$)	Receita (\$)
D1(2)			
D2(3)			
D3(6)	10	4	40
D4(7)	10	0*	0
D5(4)	0	0	0
Contribuição de G_2			40

* A contribuição negativa propiciada pela demanda foi negligenciada.

A figura 5 é apresentada a configuração ótima do sistema elétrico esquematizado na Figura 1 no seu *steady-state*, permite um ganho de 390\$ por cada unidade de tempo dos geradores ativos.

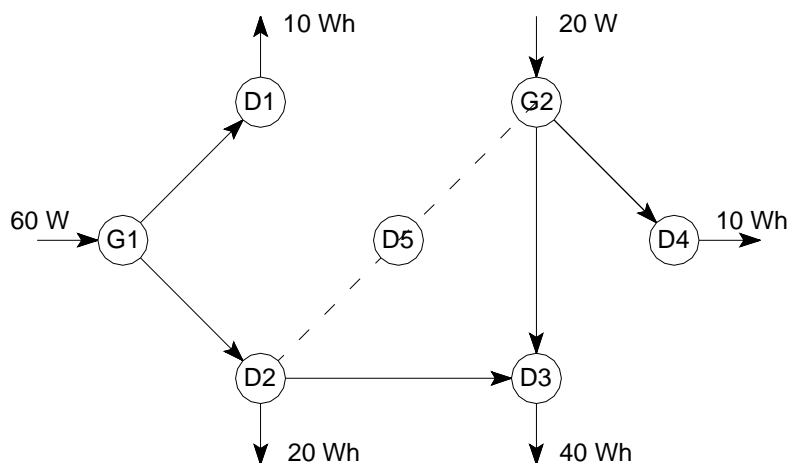


Figura 5 – Configuração da rede elétrica no *steady-state*

A resolução analítica do modelo, iteração a iteração, está apresentada no APÊNDICE.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicia-se esta seção de considerações finais, ressaltando que a heurística proposta para a integração operacional do operador do sistema e do mercado spot de energia elétrica não resolve o Problema de Fluxo em Rede; com o espaço de restrições da formulação matemática, apresentada na seção 4, sendo viável somente quando o sub-grafo de $G(\Phi, \pi, P)$ for sempre uma árvore geradora. Com o sistema de transmissão sendo visto como uma entidade distinta de planejamento que busca a sua eficiência econômica, a partir das transações no mercado de energia elétrica

A viabilização do mercado spot de energia elétrica é fundamental para consolidar a competitividade no mercado geração elétrica. Mas, para que essa consolidação ocorra é necessário que o operador do sistema passe a ter um maior controle sobre a rede (fluxo elétrico). O modelo de fluxo atual baseado no problema do fluxo máximo é apontado, neste trabalho, como o responsável pela ineficácia do mercado spot na sua política de escolha de gerador pelo critério de menor preço e inviabilizar a rede incremental. A heurística apresentada tem como principal contribuição contornar essa inconveniência e fortalecer a dinâmica competitiva da indústria de geração elétrica. Além de identificar a procedência da energia consumida em cada ponto de retirada e, conseqüentemente, a confiabilidade do gerador.

A introdução da matriz P ao modelo proposto tem como objetivo flexibilizar o gerenciamento da rede, em função do melhor rendimento para o fluxo (isto é, o gerenciamento passa a ser uma atividade no vértice, portanto, uma atividade econômica). Além do gerenciamento do fluxo, essa matriz permite se fazer uma análise de sensibilidade da rede, a partir da perturbação de determinados elementos dessa matriz (contingências), como, também, nos vetores de oferta e demanda. Desse modo, auxiliando para uma tomada de decisão de longo prazo.

Na construção da matriz P foi considerado o parâmetro de eficiência η de cada linha para se estabelecerem os elementos da matriz. Com a determinação dos pesos da matriz P , baseada na forte relação inversa a essa eficiência. Isto é, quanto maior rendimento menor o peso. Com a leitura da função objetivo (1) do modelo matemático apresentado na seção 4 sendo: – O método aloca o fluxo elétrico do gerador ativo nos vértices de demanda que apresentam o melhor “rendimento” até esse gerador.

No estudo de otimização do sistema elétrico as Leis de Kirchhoff devem ser mais bem compreendidas para não gerarem barreiras que venham a comprometer a eficiência e a eficácia do modelo competitivo na indústria de geração elétrica.

8. REFERÊNCIAS

- AHUJA R. K. *et al.* **Network Flows, Theory, Algorithms and Applications.** Prentice-Hall, Inc., 1993.
- BOUCHER J. SMEERS Y. **Alternative Models of Restructured Electricity Systems Part 1; No Market Power.** Operations Research Vol. 49, No. 6, p. 821-838, 2001.
- CUNNINGHAM V. H. **A network Simplex Method.** Math. Prog. 11, No. 2, p. 105-116, 1976 a.
- CUNNINGHAM V. H. **Theoretical Properties of the Network Simplex Method.** Math. Prog. Of Operations Research 4 , No. 2, p. 196-208, 1976 b.
- GOMES P. Et al. **Geração Distribuída: Vantagens, Problemas e Perspectivas.** XV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu, 1999.
- KRISTIANSEN T. **Utilizing MATPOWER in Optimal Power Flow,” Modeling, Identification and Control (MIC), Special Issue on Application of Numerical Software.** Volume 24, Number 1, 2003.
- MARINHO, C.E.V. **Uma Proposta de Remuneração Eficiente para o Transporte de Energia Elétrica no Mercado Competitivo de Geração Elétrica.** Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), 154 p. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia de Produção. Campos do Goytacazes, 2007.
- PISTONESI H. **Elementos de Teoria Económica de la Regulación. Aplicación a las Industrias Energéticas.** Instituto de Economía Energética - São Carlos de Bariloche. (minuta), 2001.
- RELATÓRIO DE PROGRESSO NO. 2. **Documento de Progresso de Apoio M-Congestionamento de Transmissão.** Comitê de Revitalização do Modelo do Setor Elétrico, 2002.
- ROCHA P. G. **Uma Abordagem sobre a Determinação de Preços no Sistema de Transmissão de Energia Elétrica.** DEPE-UFPe, Brazilian Electronic Journal of Economics, 1998.
- SCHWEPPE F.C *et al.* **Spot Pricing of Electricity.** Kluwer Academic Publishers, Boston, 1988.
- YONG T; LASSETER R. **Optimal power flow formulation in market of retail wheeling.Power.** Engineering Society Winter Meeting, IEEE. Volume: 1, p. 394-398, 1999.
- SYSLO M. M. **Discrete Optimization Algorithms.** Prentice Hall, Inc Englewood Cliffs. 1983.
- KREYS Z. **Introductory Function Analysis with Application.** Canada: John Wiley & Sons, 1978.
- O’ MALLEY J. **Análise de Circuito.** Mc Graw-Hill, São Paulo, 1983.

