



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GPL/05
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

**ALGORITMOS PARA DETERMINAÇÃO DO FLUXO ENERGÉTICO DIRETO ENTRE SUBSISTEMAS E PARA
ALOCÇÃO ENERGÉTICA DA ENERGIA GERADA**

Pedro A. M-S. David (*)
EPE

Thiago Correa César (*)
EPE

RESUMO

Para valorar e custear corretamente a produção de energia em um sistema com vários subsistemas interligados, como o brasileiro, é necessário saber a contribuição de cada gerador para o atendimento à carga nos diversos subsistemas.

Contudo, os programas utilizados no planejamento energético não fazem esta decomposição da energia “fornecida” por cada gerador para cada centro de carga.

Este trabalho apresenta um algoritmo que decompõe o fluxo de intercâmbio entre subsistemas e outro algoritmo que utiliza este resultado para determinar qual é a contribuição de cada gerador para o suprimento da carga de cada subsistema, de forma consistente com os valores de geração, intercâmbio e custo marginal de operação, que foram calculados pelos programas de planejamento energético da operação, como o NEWAVE¹.

PALAVRAS-CHAVE

Planejamento Energético, Alocação de Produção Energética, Intercâmbio entre Subsistemas.

1.0 - INTRODUÇÃO

O despacho econômico da geração é feito de modo a minimizar o custo de operação do sistema, ou seja, de modo a utilizar os recursos mais econômicos disponíveis para alimentar as cargas. Assim, é possível que a carga em um subsistema seja alimentado a partir da geração em outros onde o custo de geração seja menor do que o do subsistema local da carga e que haja capacidade de intercâmbio entre os subsistemas exportadores e o subsistema importador.

Portanto, o despacho busca atender a carga de cada subsistema, com os recursos mais econômicos. Assim, o despacho ótimo prioriza o atendimento das cargas nos subsistemas de maior custo marginal, com os geradores de menor custo de operação, maximizando o benefício econômico da geração (produto da geração pela diferença entre o valor do custo marginal do subsistema da carga e do custo marginal da geração).

2.0 - ALOCAÇÃO DA GERAÇÃO

Os sistemas elétricos de grande porte são formados por subsistemas, caracterizados por regiões geoeletricas interligadas internamente que não existe restrição de transmissão para que as cargas locais sejam supridas pela geração local. Por outro lado, a capacidade da transmissão entre os subsistemas pode não ser suficiente para que toda a carga em um subsistema seja atendida pela geração em outro, mesmo que este outro tivesse capacidade para tal.

¹ O NEWAVE foi desenvolvido e é distribuído pelo CEPEL (Centro de Pesquisas em Energia Elétrica) - ELETROBRÁS

O despacho da geração é feito pela ordem de mérito econômico, isto é, em ordem crescente de custo de operação. Portanto, a princípio, as cargas em todos os subsistemas são atendidas pelos geradores de menor custo, mesmo que estejam em outros subsistemas, desde que haja capacidade de transmissão.

A questão estudada neste trabalho é determinar a alocação da geração, isto é, quanto da produção de cada gerador é alocada em cada subsistema.

A lógica econômica do despacho da geração que é a de minimização do custo de produção equivale à de maximização do benefício econômico da produção, dado pela diferença entre o preço da energia no subsistema em que ela é consumida (p) e o custo da respectiva produção (c).

Assim, a alocação da geração em cada subsistema é resolvido pela solução do seguinte problema de programação linear:

$$\max \sum_{i \in s} [(p_s - c_i) + (1 - \varepsilon) \sum_r (p_r - c_i) \cdot g_{i,r}]$$

sujeito à:

$$\sum_{i \in s} [g_{i,s} + \sum_r g_{i,r}] = g_i$$

$$\sum_{i \in s} g_{i,r} = t_{s,r}$$

$$g_{i,s} \geq 0$$

$$g_{i,r} \geq 0$$

Onde:

g_i : despacho por mérito econômico do gerador “i” que pertence ao subsistema “s”

$g_{i,s}$: produção do gerador “i” alocada no próprio subsistema “s”

$g_{i,r}$: produção do gerador “i” alocado em outro subsistema (“r”)

$t_{s,r}$: intercâmbio do subsistema “s” para o subsistema “r”

p_s : preço da energia (CMO) no subsistema “s”

p_r : preço da energia (CMO) no subsistema “r”

c_i : custo de produção do gerador “i” (= p_s no caso da geração hidro)

no caso da geração termelétrica “ c_i ” é o respectivo custo variável (CVU);

no caso da geração hidrelétrica “ c_i ” é o preço da energia no subsistema em que ela é gerada (p_s);

no caso da geração não despachada por mérito econômico, “ c_i ” é considerado nulo.

ε : fator de perdas ($0 \leq \varepsilon < 1$), tipicamente = 3%

O problema da alocação da energia é resolvido para cada subsistema “s” e a sua solução requer o conhecimento do intercâmbio de energia ($t_{s,r}$) entre aquele subsistema e os demais.

3.0 – INTERCÂMBIO DE ENERGIA ENTRE OS PARES DE SUBSISTEMAS

O valor do intercâmbio de energia entre cada par de subsistemas ($t_{s,r}$) não corresponde ao fluxo de energia ($f_{s,r}$) entre os subsistemas mesmo que eles sejam diretamente interligados, pois os troncos de interligação carregam intercâmbios entre diversos subsistemas e não apenas dos respectivos subsistemas terminais, como ilustrado na figura 1 abaixo, onde o fluxo no tronco A-B “ $f_{a,b}$ ”, carrega os intercâmbios $t_{a,b}$; $t_{a,c}$; $t_{b,a}$ e $t_{c,a}$.

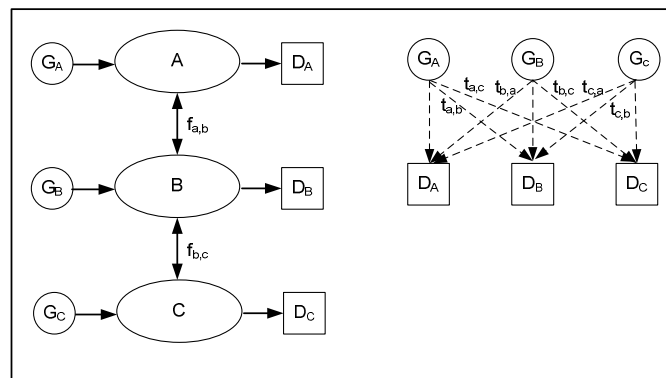


FIGURA 1 – Intercâmbios (t) e Fluxos (f) entre Subsistemas

Portanto, a solução da alocação da geração requer que seja previamente determinado o intercâmbio de energia entre cada par de subsistemas

Os intercâmbios de energia entre os diversos pares de subsistemas ($t_{s,r}$) passam por diversos circuitos (*paths*) formados pelos troncos de interligação, como mostrado na figura 2 abaixo, que exemplifica os intercâmbios de energia entre subsistemas de um sistema hipotético.

- O intercâmbio entre os subsistemas A e B ($t_{A,B}$) passa pelos circuitos formados respectivamente pelos troncos (i) AX e BX e/ou (ii) AX, CX e BC
- O intercâmbio entre os sistemas A e C ($t_{A,C}$) passa pelos circuitos formados respectivamente pelos troncos (i) AX e CX e/ou (ii) AX, BX e BC
- O intercâmbio entre os subsistemas B e C ($t_{B,C}$) passa pelos circuitos formados respectivamente pelos troncos (i) BC e/ou (ii) BX e CX.

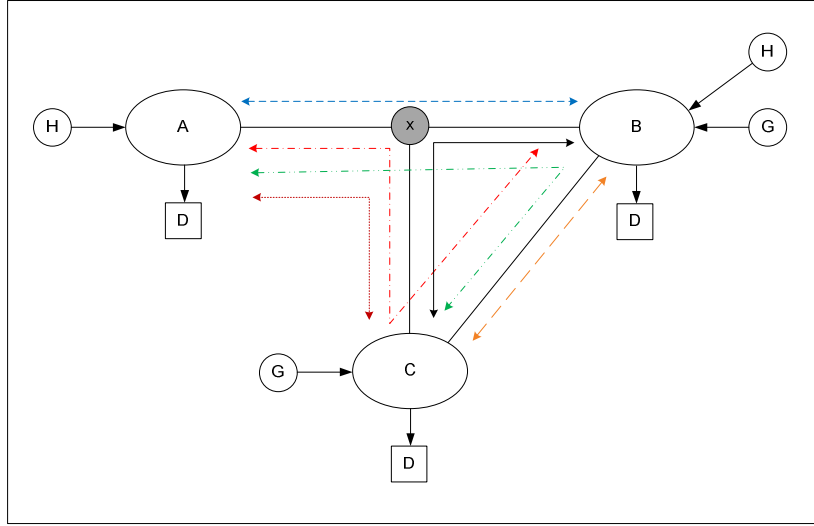


FIGURA 2 – Circuitos de Intercâmbio

A solução do intercâmbio de energia entre cada par de subsistemas ($t_{s,r}$) deve atender a diversas condições:

- A energia exportada / importada (E_s^+ / E_s^-) por um subsistema (s) é igual ao somatório dos intercâmbios de energia dele para todos os demais subsistemas ($t_{s,r}$) e vice-versa ($t_{r,s}$):

$$\sum_r t_{s,r} = E_s^+$$

$$\sum_s t_{r,s} = E_s^-$$

Por exemplo: a energia exportada pelo subsistema A é igual ao somatório dos intercâmbios dele para os demais subsistemas e vice-versa $\rightarrow E_A^+ = t_{A,B} + t_{A,C}$ $E_A^- = t_{B,A} + t_{C,A}$

- O intercâmbio de energia entre cada par de subsistemas passa por diversos circuitos “k”, formados pelos troncos que ligam aqueles subsistemas:

$$t_{s,r} = \sum_k t_{s,r,k} \rightarrow t_{s,r} - \sum_k t_{s,r,k} = 0$$

Por exemplo: o intercâmbio entre os subsistemas A e B passa por dois possíveis circuitos (AX, BX; AX, CX, BC) $\rightarrow t_{A,B} = t_{A,B,1} + t_{A,B,2}$

- O intercâmbio de energia entre cada par de subsistemas em cada percurso é unidirecional:

$$t_{s,r,k} \geq 0$$

- A parcela do intercâmbio de energia ($t_{s,r,k}$) em cada circuito que interliga cada par de subsistemas é limitada ao menor fluxo nos troncos de interligação ($f_{i,j}$) que compõem aquele circuito:

$$t_{s,r,k} \leq f_{i,j}$$

Por exemplo: o intercâmbio no circuito AB1 é limitado aos fluxos nos troncos AX e BX $\rightarrow t_{A,B,1} \leq f_{A,X}$ $t_{A,B,1} \leq f_{X,B}$

Os intercâmbios de energia devem maximizar o benefício econômico, isto é, o produto deles pela diferença de preços entre o subsistema importador e exportador:

$$\max \sum_s [\sum_r t_{s,r} (p_r - p_s)]$$

A solução deste problema de programação linear determina o intercâmbio de energia entre cada par de subsistemas ($t_{s,r}$).

4.0 - ESTUDO DE CASOS HIPOTÉTICOS

Para ilustrar a solução foi considerado um sistema hipotético, com três subsistemas interligados entre si, mostrado na figura 3, abaixo.

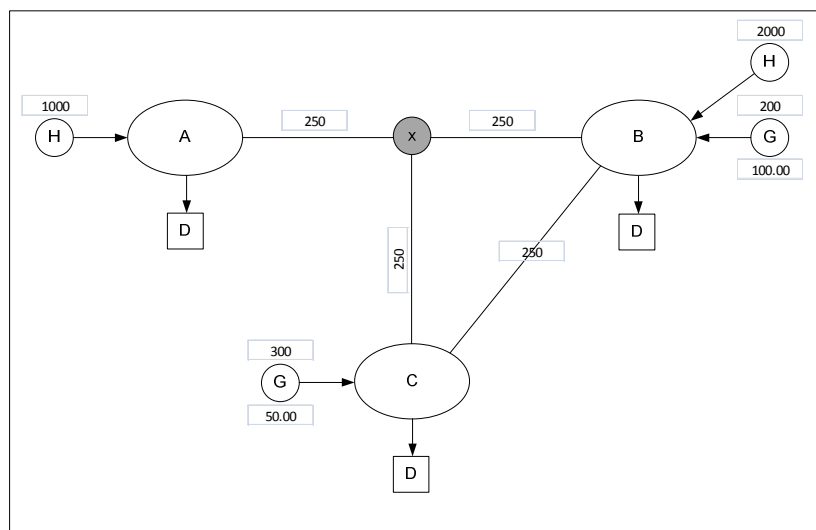


FIGURA 3 – Sistema Hipotético para Estudo de Caso

Caso 1: os subsistemas A e B exportam para o subsistema C (figura 4)

Neste caso, pode-se observar que:

- O gerador H_A alimenta a demanda de 900 MW do próprio subsistema e exporta 100 MW para o subsistema C, através dos troncos AX e CX;
- O gerador H_B alimenta a demanda de 1900 MW do próprio subsistema e exporta 100 MW para o subsistema C, através do tronco BC

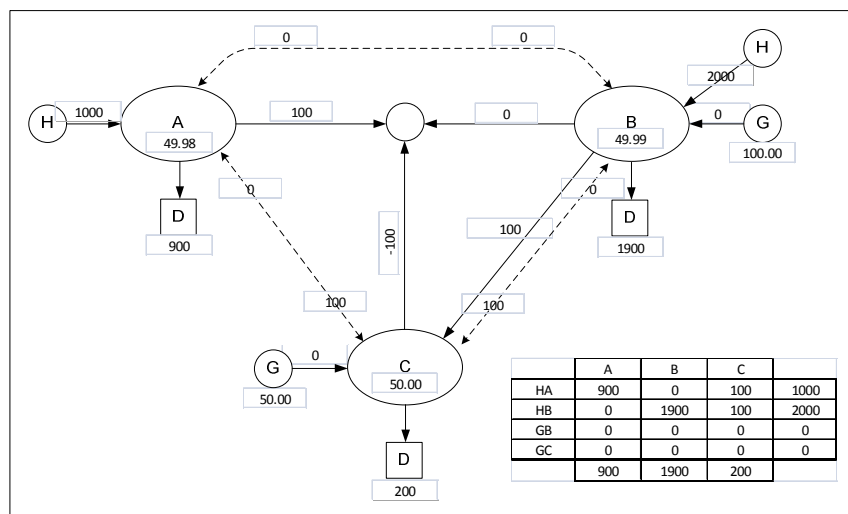


FIGURA 4 – Caso 1

Caso 2: o subsistema B exporta para os subsistemas A e C (figura 5)

Neste caso pode-se observar que:

- O gerador H_A alimenta somente parte (1000 MW) da demanda (1250 MW) do próprio subsistema;
- O gerador H_B alimenta a demanda (1000 MW) do próprio subsistema, exporta 250 MW para o subsistema A através dos troncos AX e BX e exporta 200 MW para o subsistema C através do tronco BC

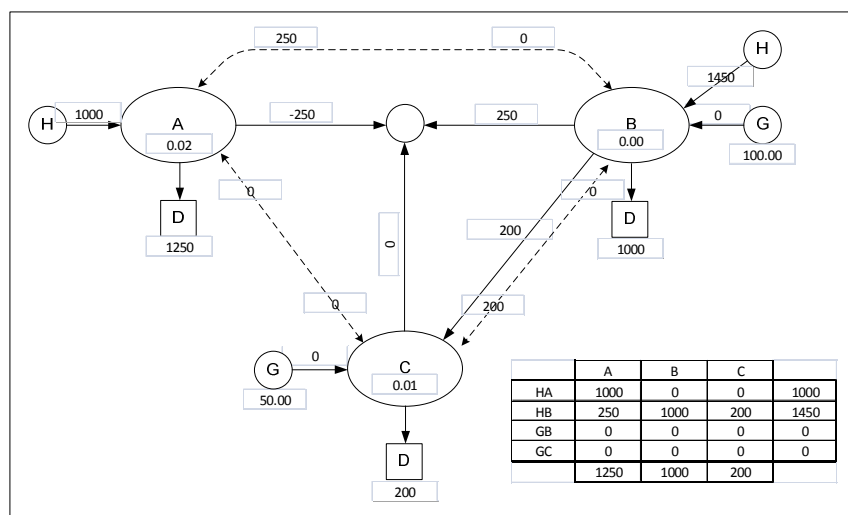


FIGURA 5 – Caso 2

5.0 - ESTUDO DE CASOS REAIS

Os algoritmos apresentados também foram testados em estudos de planejamento do sistema brasileiro em dois casos:

Caso 1: todos os subsistemas BM (Belo Monte), N, SE e NE exportam para o subsistema S (figura 6a e a tabela 1a)

Caso 2: o subsistema SE recebe energia do S e do NE e o N recebe de BM (figura 6b e tabela 1b)

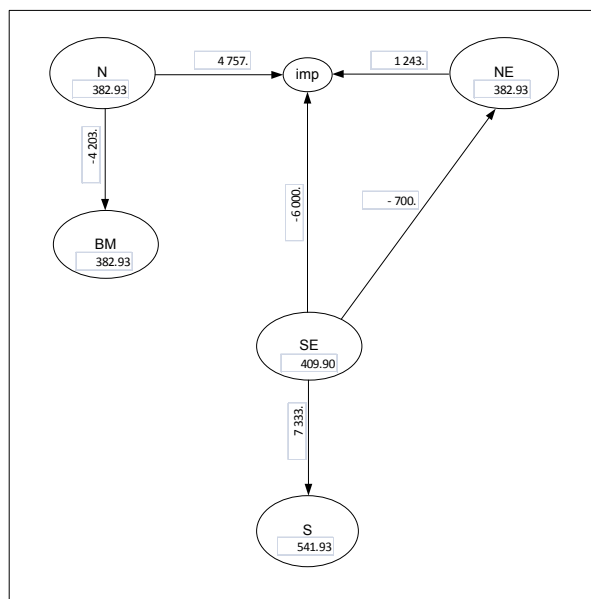


FIGURA 6a – Caso 1 – Fluxo nos Troncos

		SE	S	NE	N	BM	Total
SE	H	29 538	-	-	-	-	29 538
	G	10 929	634	-	-	-	11 563
S	H	-	1 092	-	-	-	1 092
	G	-	1 951	-	-	-	1 951
NE	H	-	1 450	4 735	-	-	6 185
	G	-	494	8 653	-	-	9 146
N	H	-	-	-	7 795	-	7 795
	G	-	555	-	604	-	1 159
BM	H	-	4 202	-	-	1	4 203
Total		40 466	10 378	13 388	8 399	1	72 631

TABELA 1a – Caso 1 - Alocação da Geração

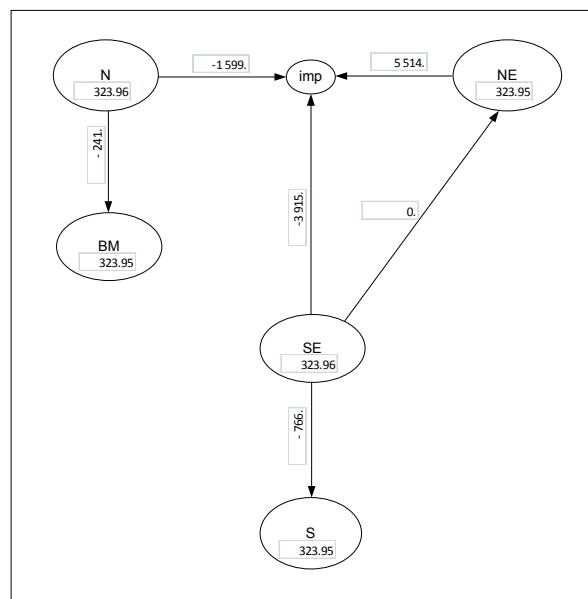


FIGURA 6b – Caso 2 – Fluxo nos Troncos

		SE	S	NE	N	BM	Total
SE	H	24 345	-	-	-	-	24 345
	G	11 441	-	-	-	-	11 441
S	H	290	9 005	-	-	-	9 295
	G	476	1 371	-	-	-	1 847
NE	H	2 456	-	7 588	-	-	10 044
	G	1 459	-	5 799	1 600	-	8 859
N	H	-	-	-	5 405	-	5 405
	G	-	-	-	1 155	-	1 155
BM	H	-	-	-	241	-	241
Total		40 468	10 376	13 388	8 400	-	72 631

TABELA 1b – Caso 2 - Alocação da Geração

6.0 - CONCLUSÃO

A decomposição dos intercâmbios nos trocos de interligação e a alocação da geração nos subsistemas de

consumo permite avaliar e alocar corretamente os custos e benefícios da expansão da geração em um sistema interligado como o brasileiro.

7.0 – BIBLIOGRAFIA

Bezerra, B. V.; Ávila, P. L.; Barroso, L. A.; Azevedo, F. R.; Domingues, D. M.; Rosenblatt, J. - O papel da energia não suprida e da remuneração do intercâmbio no Cálculo de Certificados de Garantia Física no Brasil: investigação quantitativa. XXII SEPOPE. Rio de Janeiro, 2012.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Pedro A. M-S. David é Doutor em Engenharia Elétrica, grau obtido pela PUC-Rio em 2004, na área de Otimização, com especialização em Planejamento Energético e Comercialização de Energia. Atualmente trabalha como Consultor Técnico na área de Planejamento da Geração da EPE, atuando em desenvolvimento de metodologias e análise regulatória. Também é professor de cursos de pós-graduação e extensão na PUC-Rio, FGV e CTEE.

Thiago Correa César é Mestrando em Engenharia elétrica na PUC-Rio, com expectativa de conclusão em 2014, na linha de pesquisa de Métodos de Apoio a Decisão. Atualmente trabalha como Analista na área de Planejamento da Geração da EPE, atuando em desenvolvimento de metodologias, estudos de viabilidade de usinas hidrelétricas, cálculo e revisões de garantia física.