



**GRUPO VII
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GPL)**

ALOCAÇÃO DE PERDAS NA TRANSMISSÃO: UMA PROPOSTA INCREMENTAL BASEADA EM ANÁLISES DE SENSIBILIDADE CONSIDERANDO OS LIMITES OPERACIONAIS DO SISTEMA

Edmarcio Antonio Belati*

Vanusa Alves de Sousa

Geraldo R. Martins da Costa

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP

RESUMO

Este artigo apresenta uma proposta para alocação de perdas ativa na transmissão que considera as restrições operacionais do sistema. A proposta está relacionada com o esquema de alocação dos métodos incrementais. O método utiliza as informações primais e duais obtidas através de um programa de Fluxo de Potência Ótimo. Estas informações são associadas a uma técnica de sensibilidade para estimar os coeficientes de alocação para as barras de geração e carga do sistema. Para a barra *slack*, que possui coeficiente de alocação nulo, é aplicada a técnica *pro-rata* para realizar a alocação. É apresentado um teste comparativo com os principais métodos presentes na literatura e estudos que mostram a influência das restrições operacionais na alocação de perdas para os agentes do sistema. Os testes foram realizados com o sistema IEEE 14 barras.

PALAVRAS-CHAVE

Alocação de perdas, análise de sensibilidade, fluxo de potência ótimo, técnica incremental, técnica *pro-rata*.

1.0 - INTRODUÇÃO

Devido à reestruturação do setor elétrico, vários problemas e desafios estão surgindo. Um destes problemas é a alocação de perdas ativa na transmissão. A alocação consiste em dividir entre os agentes do sistema (geradores e cargas) as perdas ocorridas nas linhas de transmissão. Esta alocação não deve ser arbitrária, a fim de satisfazer todos os agentes do sistema. Para tanto, é necessário utilizar uma metodologia eficiente que considere todos os parâmetros do sistema.

As perdas do sistema de transmissão estão entre 5 e 10% do total da geração, o que representa para o setor elétrico brasileiro mais de ½ bilhão de dólares por ano (1). As perdas no Brasil, antes da reestruturação ocorrida na década passada, eram tratadas como uma carga extra no sistema. Após a reestruturação, foi estabelecido que as perdas deveriam ser compartilhadas entre os agentes de maneira clara e não discriminatória (2).

Vários métodos de distribuição de perdas foram propostos recentemente na literatura, os quais buscam distribuir entre geradores e cargas a responsabilidade pelas perdas de forma equilibrada. A grande dificuldade encontrada no problema de alocação de perdas é o fato da função perda ser uma função não-linear das variáveis de estado do sistema de potência, não permitindo assim um controle direto. Esta característica dificulta a determinação precisa dos fluxos de potência nas linhas de responsabilidade de cada agente.

Os esquemas de alocação de perdas na transmissão propostos na literatura podem ser divididos, basicamente, em: *pro-rata*; compartilhamento proporcional; incremento de perdas na transmissão e teoria de circuitos.

*Av. Trabalhador Saocarlense, 400 - CEP 13566-590 – São Carlos - SP - BRASIL
Tel.: (016) 3373-9366 ramal 229 - e-mail: belati@sel.eesc.usp.br

O procedimento *pro-rata* é um dos mais comuns. As perdas são alocadas para os geradores e cargas levando em conta o nível de potência ativa – *pro-rata* (P) – ou a injeção de corrente – *pro-rata* (I) – nas barras. Nos procedimentos *pro-rata*, a localização das barras no sistema não é levada em conta, com isso geradores e cargas mal localizadas são beneficiadas. Este procedimento é utilizado em vários países, entre os quais destacam-se: Espanha (3); Inglaterra (4); e Brasil (1).

O procedimento de compartilhamento proporcional, conhecido como PS, pode ser visto nas referências (5) e (6). O procedimento é baseado na divisão proporcional das perdas entre os agentes do sistema levando em conta a parcela exigida de cada linha para transportar a potência da geração até a carga especificada. Desta forma todas as perdas são alocadas para as cargas. O procedimento contrário aloca todas as perdas para as gerações do sistema. É atribuído, portanto, 50% das perdas para as cargas e 50% para os geradores.

O método utilizando o procedimento incremental aloca as perdas do sistema para os agentes do sistema através dos coeficientes ITL (*Incremental Transmission Loss*) e ITLPOS. Os coeficientes ITL's das barras são obtidos da variação das perdas totais produzidas através da variação incremental de injeção de potência em cada barra obtidas na solução do fluxo de potência (FP). Estes coeficientes podem alocar perdas negativas para algumas barras, isto pode ser interpretado como um subsídio. O procedimento ITLPOS conhecido como ITL não subsidiado evita a alocação de perdas negativas no sistema, fazendo que todos os coeficientes ITL sejam positivos. As citações, (7), (8) e (9) tratam do procedimento incremental.

Os procedimentos baseados na teoria de circuitos exploram as equações do circuito elétrico para fazer a distribuição das perdas entre as barras do sistema. Em (10), a matriz impedância foi utilizada para obter a divisão proporcional das perdas nas barras do sistema.

Neste contexto, ainda temos a aplicação da “Teoria dos Jogos” desenvolvida por Aumann-Shapley, como em (11) e o uso de sensibilidade para alocação de perdas na transmissão (12), e a utilização do Despacho Ótimo de Potência (13) e (14) para alocação de perdas na transmissão. Apesar de haver várias propostas de alocação de perdas, até o momento não há uma que possa ser considerada exata e que seja totalmente aceita (10).

Neste trabalho propomos uma metodologia para a alocação de perdas na transmissão na mesma linha dos procedimentos incrementais. A diferença está na utilização de um programa de Fluxo de Potência Ótimo (FPO), ao invés de utilizar o FP. O FPO com função objetivo, perdas ativa na transmissão, é associado a uma técnica de sensibilidade para obter os coeficientes ITL das barras. Essa metodologia associada à técnica de sensibilidade considera as restrições do problema, a localização das barras no sistema e suas respectivas cargas em relação às perdas na transmissão como se estivesse executando o próprio FPO para os incrementos de potência nas barras. Para a barra *slack* que tem coeficientes ITL nulo é empregada a metodologia *pro-rata* (P) para alocar as perdas para esta barra.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: primeiro é apresentado o problema de FPO; em seguida a técnica de sensibilidade utilizada; logo após a metodologia proposta é descrita; na seqüência os resultados e os estudos são apresentados; e por fim as conclusões do trabalho.

2.0 - O PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

O problema de FPO pode ser representado matematicamente por:

$$\begin{aligned}
 & \min f(x) \\
 & \text{s.a } g_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, m \\
 & \quad h_j(x) \leq 0, \quad j = 1, \dots, r \\
 & \quad x^{\min} \leq x \leq x^{\max}
 \end{aligned} \tag{1}$$

O vetor $x = (\theta, V, t)$ representa as variáveis de estado e de controle do sistema e x^{\min} e x^{\max} os seus limites inferiores e superiores respectivamente, onde θ é o ângulo de fase da tensão, V a magnitude da tensão e t os taps dos transformadores. A função objetivo, $f(x)$ representa as perdas de potência ativa na transmissão. $g(x) = 0$ é o conjunto das equações de balanço do fluxo de potência e $h(x) \leq 0$ é o conjunto das restrições funcionais, que representam as injeções de potência ativa e reativa nas barras de geração e limites de fluxos nas linhas de transmissão.

Como apresentado, o FPO é uma ferramenta “poderosa”, pois otimiza o sistema considerando suas restrições operacionais. Na literatura há vários algoritmos de resolução para o problema de FPO, além de pacotes computacionais. Neste trabalho foi utilizado o algoritmo apresentado em (15).

3.0 - TÉCNICA DE SENSIBILIDADE

A técnica de sensibilidade apresentada se baseia no teorema proposto por Fiacco (16). O teorema utiliza a análise de sensibilidade de primeira ordem aplicada à solução ótima local de segunda ordem. Essa técnica pode ser utilizada para estimar a nova solução de um problema de Programação Não-Linear depois de ocorrer perturbações ao problema. As perturbações podem ser tanto nas restrições como na função objetivo. A técnica de sensibilidade apresentada nesta seção considera apenas as perturbações nas restrições de igualdade, pois o nosso interesse é a obtenção da variação na função objetivo (perdas ativa na transmissão) quando há uma variação nas restrições de igualdade (potência ativa nas barras). A formulação matemática da técnica de sensibilidade utilizada está apresentada a seguir.

Ao problema (1) são introduzida perturbações, ε , nas restrições de igualdade.

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s.a } g_i(x) + \varepsilon_i = 0, \quad i = 1, \dots, m \\ h_j(x) \leq 0, \quad j = 1, \dots, r \\ x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

em que, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_m)$ é o vetor perturbação.

Associa-se a seguinte função Lagrangiana ao problema (2):

$$L(x, \mu, \lambda, \varepsilon) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i [g_i(x) + \varepsilon_i] + \sum_{j=1}^r \mu_j h_j(x) \quad (3)$$

em que λ é o vetor dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade, e μ é o vetor dos multiplicadores de Lagrange para as restrições de desigualdade.

Para aplicar a técnica de sensibilidade, é preciso ter primeiramente a solução ótima para o problema, x^* , λ^* e μ^* , sem perturbação, ou seja, a solução para o problema (2) com $\varepsilon = 0$. Esta solução é obtida através de um FPO.

A técnica de sensibilidade considera o gradiente da função Lagrangiana, a folga complementar e as restrições de igualdade perturbadas, isto é:

$$\begin{aligned} \nabla_x L(x, \mu, \lambda, \varepsilon) &= 0 \\ \mu_j [h_j(x)] &= 0 \quad j = 1, \dots, r \\ g_i(x) + \varepsilon_i &= 0 \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (4)$$

em que, $\mu \geq 0$ e λ irrestrito. O gradiente da função Lagrangiana é representado por:

$$\nabla_x L(x, \mu, \lambda, \varepsilon) = \nabla_x f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla_x [g_i(x) + \varepsilon_i] + \sum_{j=1}^r \mu_j \nabla_x h_j(x) \quad (5)$$

As raízes do sistema não-linear (4) são determinadas linearizando o sistema no ponto ótimo (x^*, λ^*, μ^*) , o que resulta no seguinte sistema linear:

$$\begin{aligned}
& \nabla_x L(x^*, \mu^*, \lambda^*, \varepsilon) + \nabla_{xx} L(x^*, \mu^*, \lambda^*, \varepsilon) \Delta x + \nabla_{x\mu} L(x^*, \mu^*, \lambda^*, \varepsilon) \Delta \mu + \nabla_{x\lambda} L(x^*, \mu^*, \lambda^*, \varepsilon) \Delta \lambda = 0 \\
& \mu_j^* h_j(x^*) + \mu_j^* \nabla_x h_j(x^*) \Delta x + \nabla_{\mu} \mu_j^* h_j(x^*) \Delta \mu = 0 \quad (6) \\
& [g_i(x^*) + \varepsilon_i] + \nabla_x [g_i(x^*) + \varepsilon_i] \Delta x = 0
\end{aligned}$$

Eliminando os termos nulos, o conjunto das Eq. (6) pode ser representado na forma matricial por:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \mu \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_{xx} L(x^*, \lambda^*, \mu^*, \varepsilon) & \nabla_x h_j(x^*) & \nabla_x g_i(x^*) \\ \mu_j^* \nabla_x h_j(x^*) & h_j(x^*) & 0 \\ \nabla_x g_i(x^*) & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \varepsilon_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

O que resulta de forma compacta no sistema matricial como:

$$\begin{bmatrix} x(\varepsilon) - x^* \\ \mu(\varepsilon) - \mu^* \\ \lambda(\varepsilon) - \lambda^* \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla^2 L^* & H^* & G^* \\ M^* (H^*)^T & \text{diag}[h_j(x^*)] & 0 \\ (G^*)^T & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (8)$$

em que:

$$\begin{aligned}
\nabla^2 L^* &= \nabla_{xx}^2 f(x^*) + \nabla_{xx}^2 \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x^*) + \nabla_{xx}^2 \sum_{j=1}^r \mu_j h_j(x^*); \quad M^* = \begin{bmatrix} \mu_1^* & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \mu_r^* \end{bmatrix}; \quad G^* = [\nabla g_1(x^*), \dots, \nabla g_m(x^*)]; \\
H^* &= [\nabla h_1(x^*), \dots, \nabla h_r(x^*)]; \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_m \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

O sistema matricial (8) é utilizado para obter o novo estado da rede quando uma perturbação ε é imposta nas restrições de igualdade.

4.0 - METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta fundamenta-se nos procedimentos incrementais. A técnica utilizada para obter os coeficientes das perdas para as barras do sistema consiste primeiramente em obter a solução do sistema com um programa de FPO e utilizar a técnica de sensibilidade apresentada na seção 3 para obter as novas soluções após uma pequena variação nas injeções de potência ativa nas barras, obtendo desta forma os coeficientes K_i das barras. Nos procedimentos incrementais K_i é chamado de ITL da barra i , neste trabalho os coeficientes K_i são chamados de SITL pelo fato de serem obtidos via sensibilidade.

$$K_i = \frac{\partial L}{\partial P_i} \quad (9)$$

em que:

- P_i é a potência líquida da barra i ;
- K_i é o SITL (*Sensitivity to Incremental Transmission Loss*) correspondente à barra i ;
- L são as perdas de potência ativa do sistema.

O SITL da barra *slack* é zero por definição, portanto inicialmente utiliza-se a técnica *pro-rata* (P) para alocar as perdas para esta barra. Desta forma as perdas a serem alocadas pelos coeficientes K_i fica sendo L' .

$$L' = L - \text{Perdas}_{\text{slack}} \quad (10)$$

Obtido os coeficientes K_i pela técnica de sensibilidade, realiza-se a alocação de perdas para as barras restantes do sistema.

$$L_{P_i} = P_i \frac{\delta L}{\delta P_i} = P_i K_i \quad (11)$$

Porém, e como resultado da não linearidade, a soma de todas as perdas alocadas L'' não é igual as perdas L' , isto é,

$$L' \neq \sum_{i=1}^{NB-1} L_{P_i} = \sum_{i=1}^{NB-1} P_i K_i = L'' \quad (12)$$

em que, NB-1 representa todas as barras do sistema menos as barra *slack*;

Conseqüentemente, o procedimento de normalização é usado para alocar a quantia exata das perdas L' .

$$L' = \left(\sum_{i=1}^{NB-1} P_i K_i \right) \frac{L'}{L''} = \sum_{i=1}^{NB-1} P_i K_i' \quad (13)$$

onde $K_i' = K_i * (L' / L'')$ é o coeficiente SITL normalizado para barra i .

Finalmente, as perdas alocadas para todas as barras que possuem coeficientes SITL não nulos são dadas pela expressão,

$$L_{P_i}' = P_i K_i' \quad (14)$$

Enquanto o FPO é uma abordagem iterativa, o benefício na utilização da técnica de sensibilidade está na facilidade da obtenção das soluções (K_i) para o problema perturbado sem a necessidade de executar o problema de FPO várias vezes. Segundo Fiacco (16) o teorema pode ser aplicado quando há pequenas variações nas restrições do problema. Esta afirmação é obedecida pelo fato de utilizarmos incrementos de potência muito pequenos nas barras, validando, portanto o uso da técnica de sensibilidade para o problema de alocação de perdas ativa na transmissão com uso da técnica incremental.

5.0 - TESTES E RESULTADOS

Nesta seção apresentamos um teste comparativo com os principais métodos presentes na literatura e três estudos que mostram a influência das restrições operacionais no processo de alocação de perdas. O teste e os estudos foram realizados utilizando o sistema IEEE 14barras como em (10).

5.1 Teste Comparativo

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre o método proposto e os métodos: Z-bus; *pro-rata* (I); *pro-rata* (P); ITL; ITLPOS e PS. O trabalho (17) apresenta vários testes comparativos destes métodos, os quais serviram de base para o estudo. Como foi mostrado, o método SITL utiliza a solução do FPO ao contrário dos métodos a serem comparados que utilizam a solução do FP. Como as perdas obtidas através do FPO, que minimiza as perdas ativa na transmissão, são menores que as obtidas pelo FP, as comparações serão em percentagem para facilitar a visualização dos resultados. Neste teste não foi considerado os limites de injeção de potência reativa, fluxo ativo nas linhas e *taps*.

As colunas 2 e 3 da Tabela 1 trazem as injeções de potência ativa e reativa das barras em módulo, obtidas pelo FP, e a demais colunas a percentagem das perdas alocadas para as barras utilizando os vários métodos descritos.

Os métodos comparados inclusive o método SITL aloca perdas iguais a zero para as barras que não possuem carga. O método SITL da mesma forma que os métodos Z-Bus e ITL podem alocar perdas negativas para algumas barras, o que pode ser interpretado com um subsídio para estas barras.

TABELA 1 – TESTE COMPARATIVO

Barras	Potência (líquida)		Métodos						
			Z-BUS %	Pro-rata		ITL %	ITLPOS %	PS %	SITL %
	(I)	(P)							
	%	%							
1	233,65	22,31	56,36	40,52	47,66	45,88	50,03	47,78	47,55
2	18,30	20,29	1,17	4,764	3,74	5,94	0,00	2,21	1,74
3	94,20	1,37	20,58	17,14	19,29	21,63	6,47	21,26	22,35
4	47,80	3,90	6,26	8,61	9,79	8,80	4,44	9,34	9,24
5	7,60	1,80	0,52	1,39	1,55	1,16	2,97	1,16	1,23
6	11,20	42,56	3,52	7,54	2,24	1,70	3,02	1,72	1,83
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,00	28,65	0,17	4,81	0,02	0,01	4,18	0,02	0,19
9	29,50	16,60	3,80	6,06	6,04	5,36	4,33	5,76	5,70
10	9,00	5,80	1,28	1,91	1,84	1,69	4,62	2,12	1,80
11	3,50	1,80	0,37	0,69	0,71	0,61	4,11	0,76	0,67
12	6,10	1,60	0,72	1,10	1,25	1,12	4,42	1,17	1,22
13	13,50	5,80	1,88	2,58	2,76	2,62	4,89	2,82	2,83
14	14,90	5,00	3,31	2,84	3,05	3,42	6,46	3,80	3,66

As perdas de potência ativa obtida para o sistema utilizando o FP foram de 13,65 MW. Utilizando o FPO com somente a tensão limitada entre 0,95 a 1,1 p.u. obtiveram-se perdas de 12,46 MW. Neste teste as tensões das barras 1, 6 e 8 ficaram no limite superior.

5.2 Variação do fator de participação das barras considerando os limites operacionais

A Tabela 2 apresenta um estudo com vários testes considerando os limites operacionais do sistema. Em cada teste foi acrescentada uma restrição operacional. No teste 1 foi considerado apenas o limite de tensão, no teste 2 foram considerados os limites de tensão e de *taps*, no teste 3 os limites de tensão, *taps* e de potência reativa das barras de injeção de reativos e finalmente no teste 4 foram considerados os limites de tensão, *taps*, injeção de potência reativa e limite de fluxo de potência ativa na linha 5-6. No teste 1 as tensões das barras 1, 6 e 8 ficaram no limite superior. No teste 2 as tensões na barra 1 e 8 ficaram no limite superior e o *tap* da linha 49 ficou no limite inferior. No teste 3 as tensões das barras 1 e 8 ficaram no limite superior, o *tap* da linha 49 ficou no limite inferior e a injeção de potência reativa da barra 6 ficou no limite superior que era de 31 MVar. No teste 4 as tensões das barras 1 e 8 ficaram no limite superior, o *taps* das linha 49 e 74 ficaram no limite inferior e o fluxo de potência ativa na linha 5-6 em 43,5 MW. No teste 4 os limites de injeção de potência reativa não foram alcançados. Como era de se esperar, as perdas de potência ativa foram aumentando com a introdução dos limites operacionais. Como

TABELA 2 – LIMITES OPERACIONAIS

Barras	Limites					
	0,95 ≤ v ≤ 1,10	0,95 ≤ v ≤ 1,10 0,98 ≤ t ≤ 1,02	0,95 ≤ v ≤ 1,10 0,98 ≤ t ≤ 1,02 Q ^{min} ≤ Q ≤ Q ^{max}	0,95 ≤ v ≤ 1,10 0,98 ≤ t ≤ 1,02 Q ^{min} ≤ Q ≤ Q ^{max} Fluxo _{p₅₆} ≤ 43,5 MW		
				Teste 1	Teste 2	Teste 3
				%	%	%
1	47,55	47,55	47,55	47,55		
2	1,74	1,74	3,92	1,65		
3	22,35	22,39	20,12	21,14		
4	9,24	9,25	10,08	8,79		
5	1,23	1,23	1,61	1,16		
6	1,83	1,82	2,53	2,28		
7	0,00	0,00	0,00	0,00		
8	0,19	0,19	0,20	0,19		
9	5,70	5,70	5,64	5,90		
10	1,80	1,80	1,68	1,91		
11	0,67	0,66	0,71	0,75		
12	1,22	1,21	1,20	1,45		
13	2,83	2,82	2,56	3,31		
14	3,66	3,63	2,20	3,90		
Perdas (MW)	12,46	12,48	12,52	12,54		

TABELA 3 – VARIAÇÃO DO LIMITE SUPERIOR DA TENSÃO

Barra	Limite superior da tensão (p.u.)									
	1,10	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	47,54	47,57	47,60	47,63	47,66	47,69	47,72	47,75	47,79	47,83
2	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,78	1,77	1,77
3	22,25	22,25	22,24	22,25	22,23	22,21	22,19	22,17	22,09	22,00
4	9,24	9,24	9,24	9,24	9,23	9,22	9,21	9,20	9,18	9,16
5	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,23	1,23	1,23
6	1,86	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,86	1,86
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
9	5,71	5,71	5,71	5,70	5,70	5,70	5,70	5,69	5,70	5,70
10	1,81	1,81	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
11	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66
12	1,22	1,22	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
13	2,83	2,82	2,82	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,82	2,82
14	3,64	3,63	3,62	3,60	3,60	3,61	3,61	3,62	3,69	3,74
Perdas (MW)	12,53	12,79	13,07	13,36	13,65	13,93	14,23	14,55	14,88	15,53

podemos observar nas colunas de 2 a 4 pelos valores em percentagem, as restrições operacionais influenciam consideravelmente na alocação de perdas.

5.3 Variação do fator de participação das barras em relação ao limite superior da tensão

Na Tabela 3 temos um estudo que relaciona a variação do limite da tensão em relação à alocação de perdas para os agentes do sistema. O limite superior da tensão variou de 1,10 a 1,01 p.u. As colunas apresentam a alocação de perdas para os agentes do sistema, para cada variação do limite das tensões. A última linha apresenta as perdas de potência ativa na transmissão do sistema para cada condição do limite da tensão. Neste teste, além do limite da tensão, também foi considerado o limite das injeções de potência reativa das barras de injeção. Apesar do acoplamento da tensão em relação às perdas ativas ser pequeno, pode ser observada uma mudança no fator de participação das barras quando os limites das tensões variam.

5.4 Variação do fator de participação das barras em relação ao limite de fluxo na linha 5-6

Neste teste realizou-se uma variação no limite da linha 5-6 considerando o limite de tensão 0,9 a 1,1 p.u. e o limite de taps também de 0,9 a 1,1 p.u. A Tabela 4 apresenta a alocação para vários casos de limite nas linhas. A coluna 2 apresenta a alocação de perdas quando a linha 5-6 está ilimitada. Para as colunas de 3 a 11 é apresentada a alocação a partir de um limite de fluxo de 43 MW a 36 MW, variando de 1 MW. Podemos observar na Tabela que há uma grande variação na alocação de perdas quando o limite de fluxo na linha 5-6 diminui. Neste caso as barras que dependem da linha 5-6 tendem a ter um coeficiente de alocação maior do que as das barras que não dependem desta linha. A diminuição do limite de fluxo de potência ativa na linha 5-6 provocou um aumento das

TABELA 4 – VARIAÇÃO NO FLUXO DA LINHAS 5-6

Barra	Limite de fluxo na linha 5-6 (MW)									
	livre	43	42	41	40	39	38	37	37	36
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	47,55	47,56	47,58	47,61	47,65	47,71	47,77	47,85	48,05	47,55
2	1,84	1,43	1,25	1,11	1,00	0,99	0,94	0,57	0,80	0,80
3	23,56	18,54	16,29	14,55	13,27	13,04	12,45	7,67	10,26	10,36
4	6,91	7,79	6,96	6,32	5,88	5,86	5,65	3,72	4,85	4,90
5	1,30	0,98	0,87	0,71	0,62	0,62	0,57	0,29	0,41	0,42
6	1,90	3,32	3,98	4,62	4,99	5,03	5,35	7,20	5,89	5,95
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,21	0,22
9	6,04	6,06	6,94	7,29	7,66	7,76	7,58	8,40	7,93	8,00
10	1,91	2,19	2,40	2,57	2,71	2,72	2,73	3,21	2,93	2,95
11	0,70	0,97	1,10	1,25	1,33	1,33	1,38	1,73	1,62	1,63
12	1,28	1,99	2,33	2,66	2,85	2,87	3,04	4,03	3,26	3,29
13	2,97	4,42	5,12	5,75	6,20	6,23	6,59	8,45	7,48	7,55
14	3,85	4,54	4,98	5,36	5,63	5,63	5,75	6,69	6,32	6,38
Perdas (MW)	12,46	12,52	12,70	12,99	13,42	13,95	14,53	15,22	17,12	17,12

perdas do sistema como pode ser observado na última linha da Tabela. Este teste mostra claramente a importância de se considerar os limites de fluxos nas linhas do sistema, visto que há grande influência no fator de participação das barras quando estes limites são considerados.

6.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada uma abordagem para alocação de perdas ativa na transmissão que considera as restrições operacionais do sistema. O teste comparativo com o sistema IEEE 14 barras mostrou que o procedimento SITL pode ser utilizado na alocação de perdas ativa. Para evidenciar a relação das restrições ativas com as perdas do sistema foi apresentado um estudo que mostrou a variação do fator de participação dos agentes em relação às restrições e o quanto o sistema é influenciado com a variação destes limites. Os estudos realizados neste trabalho evidenciam a necessidade de considerar as restrições do sistema.

Como pode ser observado, para termos uma alocação de perda justa é preciso considerar todos os parâmetros do sistema, e por tanto faz se necessária a utilização abordagem de FPO. O esforço computacional apresentado pelos programas de FPO é contornado através da técnica de sensibilidade proposta.

O problema de alocação de perdas ainda continua em estudo. Estamos buscando aperfeiçoar a proposta, visando suprimir as possíveis arbitrariedades, como o caso da alocação de perdas para a barra *slack* pelo método *pro-rata*.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a FAPESP e CT-Energy-CNPq pelo apoio financeiro.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Silva, A. M. L e Costa, J. G. C. (2003). "Transmission Loss Allocation: Part I – Single Energy Market", IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, pp. 1389-1394, November.
- (2) Coutinho, L. H. S. A.; Berer, R.; Chiganer, L and Castrillon, J. L. (2001). "A Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro – Uma Análise Prospectiva" XVI SNPTEE, 211 A 26 DE Outubro, Campinas – São Paulo – Brasil.
- (3) Gonzalez, J. J. and Basagoiti, P. (1999). "Spanish power exchange market and information system. Design concepts, and operating experience," in Proceeding of the 1999 IEEE Power Industry Computer Applications Conference, Santa Clara, USA, May, pp. 245–252.
- (4) Bialek, J. W.; Ziemianek, S. and Abi-Samra, N. (1999). "Tracking-based loss allocation and economic dispatch," in Proceedings of the 13th Power Systems Computation Conference, Trondheim, Norway, July, pp. 375–381.
- (5) Bialek, J. W. (1996). "Tracing the flow of electricity," IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, vol. 143, no. 4, pp. 313–320, July.
- (6) Kirschen, D.; Allan, R.; and Strbac, G. (1997). "Contributions of individual generators to loads and flows," IEEE Trans. on Power Syst., vol. 12, no.1, pp. 52–60, Feb.
- (7) Franco, P. C. and Galiana, F. D. (2000). "Transmission loss allocation under combined pool and bilateral operation," in Proc. CBA—Brazilian Conf. Automat. Contr., Florianópolis, Brazil, Sept., pp. 181–186.
- (8) Moon, Y. H.; Jung, J. S.; Ryu, H. S. and Choi, B. K. (2000). "Buswise loss evaluation algorithm for local spot pricing," in Proc. Power Eng. Soc. Summer Meet., vol. 4, pp. 2127–2131.
- (9) Galiana, F. D.; Conejo, A. J. and Kockar, I. (2002). "Incremental Transmission Loss allocation Under Pool Dispatch," IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, pp. 26-33, Feb.
- (10) Conejo, A. J., Galiana, F. D. and Kockar, I. (2001). "Z-Bus Loss Allocation," IEEE Transaction on Power Syst., vol. 16, no. 1, February, pp. 105-110.
- (11) Tan, X. H. and Lie, T. T. (2001) "Allocation of Transmission Loss Cost Using Cooperative Game Theory in the Context of Open Transmission Access," Power Engineering Society Winter Meeting. IEEE, Vo. 3 ,28 Jan.-1 Feb.
- (12) Yu C. W and David A. K. (1997). "Pricing transmission services in the context of industry deregulation," IEEE Trans Power Syst;12(1):539–48 Feb.
- (13) Fernandes, T. S. P. and Almeida, K. C. (2002) "Methodologies for Loss and Line Flow Allocation under a Poll-Bilateral Market," Proc. 14th PSCC, Power Systems Computation Conference, Sevilha, Espanha, Junho 2002.
- (14) Belati, E. A; Souza, A. M e da Costa, G. R. M. (2004). "Alocação de Perdas Ativas na transmissão via Sensibilidade," CBA - XV Congresso Brasileiro de Automática, Gramado – Brasil.
- (15) Belati, E. A; Nunes, L. C. T; Sousa, V. A e da Costa, G. R. M. (2003). "Newton's method associated to the interior point method for optimal reactive dispatch problem," IEEE Bologna Powertech pp 1-6.
- (16) Fiacco, A. V. (1976). Sensitivity Analysis for Nonlinear Programming Using Penalty Methods. Mathematical Programming 10(3), p. 278-311.
- (17) Padilha, A.; Lima, D. A. e Macedo, W. (2003). "Alocação de Perdas na Transmissão: Uma comparação de propostas," XVII SNPTEE, pp. 1-6 Outubro.