



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPL/26
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

APERFEIÇOAMENTO DA METODOLOGIA NODAL DE ALOCAÇÃO DE CUSTOS PELO USO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO PARA A NOVA REALIDADE DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

**Érica Telles Carlos(*)
PUC-Rio**

**Delberis Araujo Lima
PUC-Rio**

**Alexandre Street
PUC-Rio**

RESUMO

Este trabalho propõe um novo método de alocação de custos pelo uso do sistema de transmissão adequado à atual vertente para a expansão da geração, que passa a se dar através de fontes renováveis, localizadas no Norte e Nordeste, que estão distantes dos centros de demanda do sistema. Neste cenário, as tarifas obtidas pelo método Nodal podem atingir um patamar no qual desestimulam ou inviabilizam novos investimentos em geração renovável. Assim, o método proposto neste artigo se destina a simultaneamente definir tarifas menos dispersas e manter sinalizações econômicas coerentes, considerando ainda um despacho de estresse do sistema com a particularização de geradores por tipo de fonte.

PALAVRAS-CHAVE

Tarifação pelo uso da transmissão, despacho de estresse, otimização binível.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os atuais estudos de análise e planejamento de expansão do sistema brasileiro evidenciam uma acentuada expansão da capacidade geradora na rede elétrica, planejada para ser majoritariamente formada por fontes renováveis como a geração hidrelétrica de grande porte, a eólica, etc [1]. Estas fontes, disponíveis principalmente nas regiões Norte e Nordeste do país, têm a característica comum de estarem distantes dos grandes centros de demanda do sistema, obrigando estes novos empreendimentos de geração a se instalarem em pontos mais isolados da rede. Este cenário impacta, entre outros aspectos, no custo pago pela utilização do sistema de transmissão e, consequentemente, na tarifa de uso do sistema de transmissão (TUST) para cada agente. Atualmente, as TUSTs são calculadas pelo método Nodal [2], que é baseado no custo marginal de utilização das linhas de transmissão, transferindo para o valor da tarifa a influência da localização dos agentes no sistema. A partir da recente tendência de expansão de geração, este sinal locacional passou a ser muito elevado para os novos empreendimentos renováveis, gerando TUSTs que não incentivam (ou inviabilizam) o investimento em fontes renováveis no sistema. Principalmente no caso de hidrelétricas de grande porte, a TUST produzida pelo método Nodal contribui para um preço de energia não-atrativo, sendo necessários ajustes artificiais no método para viabilidade do investimento. Se a nossa política energética visa atrair investimentos para a geração renovável, geralmente longe dos centros de carga, a concepção do método de alocação de custos deve considerar esse fato e não desestimular a ação do investidor.

Partindo do princípio que o cálculo das TUST considerando o uso e a topologia do sistema é uma metodologia bem aceita e necessária em casos onde a sinalização econômica das tarifas é importante para as indicações de expansão de geração, entram em cena métodos que reduzem a dispersão tarifária, sem deixar de considerar o uso da rede. No geral, estes métodos fazem uso de modelos de otimização para minimizar as tarifas mais elevadas através de diferentes metodologias [3]-[6]. Um ponto em comum nesta classe de métodos é a utilização das folgas existentes no sistema, seja no traçado de fluxo de potência pela rede ou na capacidade ociosa das linhas de

(*) Rua Marquês de São Vicente, 225, Prédio Cardeal Leme –sala 447– CEP 22451-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil

transmissão, para limitar o conjunto viável dentro do qual a solução ótima é definida.

Neste contexto, este trabalho propõe um novo método de alocação de custos pelo uso do sistema de transmissão, baseado no conceito de custos marginais de longo prazo, assim como o método Nodal, onde a dispersão tarifária entre os agentes do sistema é minimizada. Como consequência, há uma redução nas elevadas tarifas alocadas pelo método Nodal para os novos investimentos em geração renovável, sem, no entanto, deixar de considerar os limites e características do sistema. O resultado são tarifas ótimas que incentivam o plano ótimo de expansão de geração da rede e estão compreendidas entre dois extremos: o método Nodal com elevados picos de tarifas e alta dispersão entre as mesmas; e o método Pro rata com tarifas iguais para todos os agentes, ausência de sinal locacional e dispersão nula. Na concepção do método proposto são utilizadas as premissas do método Nodal em conjunto com um conceito do método *Equivalent Bilateral Exchanges* (EBE) [7] que determina a existência de trocas de potência entre geradores e demandas no sistema. Para garantir ainda que a recuperação do custo da rede de transmissão estará associada à situação de máximo estresse da mesma, o que é desejável para que as tarifas sejam calculadas para a situação mais extrema de necessidade de investimentos no sistema, a otimização das tarifas terá como restrição um despacho de geração de máximo estresse. Neste despacho, o tipo de fonte energética de cada gerador (renovável ou térmica) é considerado na definição do conjunto viável de geração.

Combinando os aspectos apresentados, o método proposto consiste em um modelo binível de otimização que minimiza a dispersão tarifária, sujeito a um despacho de estresse da rede. As restrições adotadas garantem que a solução ótima encontrada não viola os limites físicos do sistema. Muito embora a motivação para o desenvolvimento do trabalho seja o sistema brasileiro, destaca-se que o método proposto se aplica em qualquer sistema onde sinalizações econômicas das tarifas são necessárias, e a dispersão tarifária no sistema compromete o incentivo ao uso de fontes renováveis que estão distantes dos centros de carga.

O restante do trabalho está organizado conforme a seguir: na seção 2 é apresentado o método de Tarifação Ótima sujeita ao Despacho de Máximo Estresse que consiste no modelo de otimização binível proposto. Cada um dos dois níveis é apresentado separadamente, destacando seu propósito no método, seguidos do modelo binível final. Na seção 3 são apresentados e discutidos os resultados para um sistema de teste, e na seção 4 são discutidas as conclusões finais e trabalhos futuros.

2.0 - TARIFAÇÃO ÓTIMA SUJEITA AO DESPACHO DE MÁXIMO ESTRESSE

O modelo proposto neste trabalho visa atender dois objetivos principais: (i) Tarifas com mínima dispersão entre si, considerando as condições e limites do sistema; e (ii) obter tarifas condicionadas à um despacho de geração de máximo estresse do sistema. O método de Tarifação Ótima sujeita ao Despacho de Máximo Estresse consiste na união dos dois objetivos em um problema de otimização binível onde o despacho de máximo estresse da rede é uma restrição da minimização da dispersão tarifária, o que cria um modelo de otimização binível. Nesta seção, os modelos que atendem a cada um dos objetivos são apresentados separadamente, seguidos do desenvolvimento matemático para considera-los em um modelo binível.

2.1 Minimização da dispersão tarifária

A minimização da dispersão tarifária é obtida adotando a metodologia de minimizar a diferença entre a maior e menor tarifa através de variáveis auxiliares: as variáveis z_G e z_D serão minimizadas e terão como limite inferior a maior tarifa dentre os geradores e as demandas do sistema, respectivamente; já as variáveis w_G e w_D serão maximizadas tendo como limite superior a menor tarifa dentre os geradores e demandas do sistema, respectivamente. Para que não seja necessário saber *a priori* quais são as maiores e menores tarifas citadas, todas as tarifas de geradores serão limite superior de w_G e limite inferior de z_G , e todas as tarifas de demandas serão limite superior de w_D e limite inferior de z_D . Desta forma, o modelo é geral e não necessita de uma solução inicial.

Esta metodologia é aplicada sobre a expressão de cálculo das tarifas, que será formada pela união das características do método Nodal [2] com o conceito de formação do método EBE [7]. Desta forma se mantém um sinal locacional coerente para as tarifas, e a metodologia de otimização pode ser aplicada. Do método EBE é trazida a ideia de troca um montante de potência entre cada par (i, j) de gerador i e demanda j . Este montante pode ser definido como um percentual α_{Gij} da potência P_{Gi} de um gerador, ou um percentual α_{Dji} da potência P_{Dj} de uma demanda. Denominaremos estes percentuais como Fatores de Intercâmbio Nodal (NEFs, do inglês, *Nodal Exchange Factor*). É um consenso que definir fisicamente o destino final de todos os MW injetados no sistema não é possível, o que cria uma liberdade na definição dos NEFs. Assim, é proposto neste trabalho que α_{Gij} e α_{Dji} sejam as variáveis de decisão da minimização de dispersão. Desta forma, a otimização é intrínseca à expressão de definição da tarifa, o que faz com que o método forneça sinais locais coerentes ao sistema. A expressão da tarifa proposta neste trabalho considera ainda, além dos NEFs, a sensibilidade do fluxo das linhas de transmissão ℓ em relação à troca de potência de cada par (i, j) , dada pelo fator de distribuição $\gamma_{ij\ell}$ [7]. Neste termo está contida a premissa do método Nodal de tarifas baseadas em custos marginais. Por fim, é considerado o custo unitário c_ℓ (R\$/MW) de cada linha de transmissão definido pela razão entre custo total e capacidade da linha ℓ . Esta formulação faz com que seja necessário definir parcelas selo para as tarifas, de forma que o custo da capacidade ociosa do sistema também seja recuperado pelas tarifas. A outra parcela da tarifa que analisa o uso efetivo da rede, chamamos parcela locacional.

Reunindo todos os aspectos discutidos nesta seção, a seguir é apresentado o modelo responsável pela minimização da dispersão tarifária, seguido de cálculos pós-otimização para a definição das tarifas. O modelo de minimização apresentado corresponde ao nível superior de otimização do método de Tarifação Ótima sujeita ao Despacho de Estresse.

1. Resolver

$$\underset{\substack{z_G, w_G, z_D, w_D \in \mathbb{R} \\ \alpha_{Gij}, \alpha_{Dji} \in \mathbb{R}, \forall i \in \Omega_G, \forall j \in \Omega_D}}{\text{minimizar}} (z_G - w_G) + (z_D - w_D) \quad (1)$$

sujeito a:

$$0 \leq \alpha_{Gij} \leq 1, \forall i \in \Omega_G, \forall j \in \Omega_D \quad (2)$$

$$0 \leq \alpha_{Dji} \leq 1, \forall i \in \Omega_G, \forall j \in \Omega_D \quad (3)$$

$$\sum_{j \in \Omega_D} \alpha_{Gij} = 1, \forall i \in \Omega_G \quad (4)$$

$$\sum_{i \in \Omega_G} \alpha_{Dji} = 1, \forall j \in \Omega_D \quad (5)$$

$$\alpha_{Gij} \cdot P_{Gi} = \alpha_{Dji} \cdot P_{Dj}, \forall i \in \Omega_G, \forall j \in \Omega_D \quad (6)$$

$$w_G \leq \sum_{\ell \in \Omega_L} \sum_{j \in \Omega_D} \frac{c_\ell}{2} \cdot \gamma_{ij\ell} \cdot \alpha_{Gij} \leq z_G, \forall i \in \Omega_G \quad (7)$$

$$w_D \leq \sum_{\ell \in \Omega_L} \sum_{i \in \Omega_G} \frac{c_\ell}{2} \cdot \gamma_{ij\ell} \cdot \alpha_{Dji} \leq z_D, \forall j \in \Omega_D \quad (8)$$

2. Calcular as parcelas locacionais ótimas

$$\pi_{Gi}^* = \sum_{\ell \in \Omega_L} \sum_{j \in \Omega_D} \frac{c_\ell}{2} \cdot \gamma_{ij\ell} \cdot \alpha_{Gij}^*, \forall i \in \Omega_G \quad (9)$$

$$\pi_{Dj}^* = \sum_{\ell \in \Omega_L} \sum_{i \in \Omega_G} \frac{c_\ell}{2} \cdot \gamma_{ij\ell} \cdot \alpha_{Dji}^*, \forall j \in \Omega_D \quad (10)$$

3. Calcular as parcelas selo ótimas

$$\Delta_G^* = \frac{\frac{C_{Sist}^{Total}}{2} - \sum_{i \in \Omega_G} \pi_{Gi}^* \cdot P_{Gi}}{\sum_{i \in \Omega_G} P_{Gi}} \quad (11)$$

$$\Delta_D^* = \frac{\frac{C_{Sist}^{Total}}{2} - \sum_{j \in \Omega_D} \pi_{Dj}^* \cdot P_{Dj}}{\sum_{j \in \Omega_D} P_{Dj}} \quad (12)$$

4. Calcular as tarifas ótimas finais

$$t_{Gi}^* = \pi_{Gi}^* + \Delta_G^*, \forall i \in \Omega_G \quad (13)$$

$$t_{Dj}^* = \pi_{Dj}^* + \Delta_D^*, \forall j \in \Omega_D \quad (14)$$

Sendo Ω_G e Ω_D os conjuntos das barras onde estão instalados geradores e demandas, respectivamente, e Ω_L o conjunto de todas as linhas do sistema. Em (1) é inserida a função objetivo de minimização de dispersão. Em relação às restrições utilizadas, (2) e (3) definem os NEFs como percentuais. Em (4) e (5) é garantido o balanço de potência do sistema. Para que haja coerência no resultado ótimo, em (6) assegura-se que, para toda troca de potência, o montante fornecido pelo gerador i é o mesmo recebido pela demanda j . As restrições (7) e (8) determinam os limites superior e inferior das variáveis contidas na função objetivo seguindo a metodologia proposta para minimização de dispersão. Os somatórios presentes nestas restrições definem a expressão das tarifas de geradores (em (7)) e de demandas (em (8)). Após a solução do problema de otimização, os valores ótimos α_{Gij}^* e α_{Dji}^* definem as parcelas locacionais da tarifa ((9) e (10)), e as parcelas selo da tarifa ((11) e (12)), onde C_{Sist}^{Total} representa o custo total do sistema que é dividido igualmente entre geradores e demandas. Em (13) e (14) são calculadas as tarifas ótimas finais.

2.2 Despacho de máximo estresse

Atualmente no Brasil, é utilizado o Despacho Proporcional [8] de geração para cálculo das TUST. Neste despacho as demandas são fixadas em seu valor máximo, e os geradores são despachados proporcionalmente à sua capacidade máxima, de forma que a demanda total seja atendida em cada um dos submercados do sistema. Neste procedimento, não é analisado o fluxo de potência pelas linhas de transmissão, de forma que a solução ótima de máximo estresse do sistema não é garantida. Muito embora fixar a demanda em seu valor máximo seja uma forma de incrementar o uso das linhas de transmissão, não garante o resultado ótimo desejado [9]. Assim, é proposto um novo procedimento de despacho de geração para o cálculo das TUST que maximiza o estresse da rede, através da estrutura de formação das tarifas da TUST composta por parcela locacional e parcela selo. A lógica consiste em partir do pressuposto que quanto menor é a parcela selo da tarifa, menor é a capacidade ociosa do sistema, e maior é a quantidade de pontos críticos na transmissão, o que reflete um sistema com maior necessidade de investimentos. Assim, ao minimizar a parcela selo, em função do despacho de geração é atingido o máximo

estresse da rede. O modelo proposto para a determinação do despacho de máximo estresse via parcela selo é apresentado a seguir.

$$\underset{P_{Gn} \in \mathbb{R}, \forall n \in \Omega_B}{\text{minimizar}} \left(\frac{\frac{C_{Sist}^{Total}}{2} - \sum_{i \in \Omega_G} \pi_{Gi}^* \cdot P_{Gi}}{\sum_{j \in \Omega_D} P_{Dj}} + \frac{\frac{C_{Sist}^{Total}}{2} - \sum_{j \in \Omega_D} \pi_{Dj}^* \cdot P_{Dj}}{\sum_{j \in \Omega_D} P_{Dj}} \right) \quad (15)$$

sujeito a:

$$P_{Gn}^{MIN} \leq P_{Gn} \leq P_{Gn}^{MAX}, \forall n \in \Omega_B \quad (16)$$

$$\sum_{i \in \Omega_G} P_{Gi} = \sum_{j \in \Omega_D} P_{Dj} \quad (17)$$

$$0 \leq \sum_{n \in \Omega_B} \beta_{tn} \cdot (P_{Gn} - P_{Dn}) \leq Cap_t, \forall t \in \Omega_L \quad (18)$$

Sendo P_{Gn} o despacho de geração para uma barra n pertencente ao conjunto Ω_B que contem todas as barras do sistema, e β_{tn} um elemento da matriz de sensibilidade dos fluxos do sistema [2]. Em (15) é representada a função objetivo da otimização que corresponde à soma das parcelas selo para geradores e demandas conforme (11) e (12). Neste ponto destaca-se que os termos π_{Gi}^* e π_{Dj}^* dependem dos NEFs ótimos (ver (9) e (10)). Para evitar uma não-linearidade no problema proposto, o somatório de potência gerada presente originalmente na expressão de Δ_G é substituída pelo somatório da potência demandada com base na restrição (17) onde é garantido o balanço de potência do sistema. Em relação às demais restrições, em (16) são garantidos os limites máximo P_{Gn}^{MAX} e mínimo P_{Gn}^{MIN} de geração e em (18) são preservados os limites de transmissão das linhas, bem como seus sentidos de fluxo que geralmente são bem definidos em sistemas de transmissão.

2.3 Modelo binível

O modelo final do método de Tarificação Ótima Sujeita ao Despacho de Máximo Estresse consiste na união dos modelos (1)-(8) e (15)-(18) em um problema binível. Conforme mencionado anteriormente, o despacho de máximo estresse via parcela selo será restrição da minimização de dispersão tarifária conforme a estrutura da Figura 1.

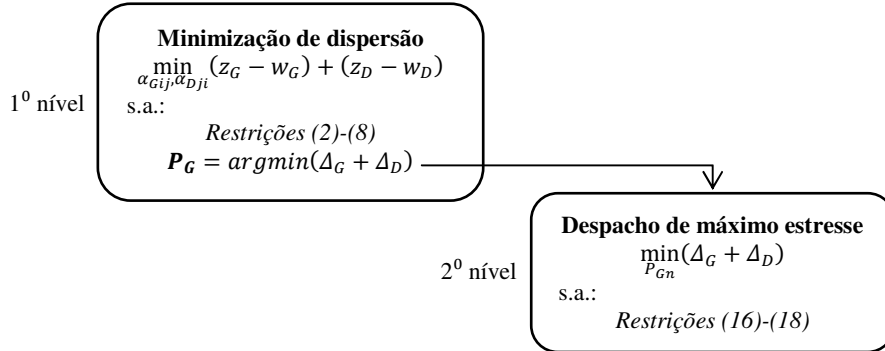


Figura 1 – Estrutura do modelo binível do método Tarificação Ótima sujeita ao Despacho de Máximo Estresse.

Por isso, o despacho de máximo estresse será representado pelo sistema de restrições que recupera seu valor ótimo composto por suas restrições originais, ou restrições primais (16)-(18), restrições do problema dual correspondente (22), e o teorema da dualidade forte (23) [10]. Estas restrições serão inseridas no problema (1)-(8) formando um problema único. Os passos pós-otimização (9)-(14) são mantidos no cálculo das tarifas finais do método. As variáveis duais possuem o domínio adequado conforme (19)-(21), sendo a variável λ corresponde a (17); σ_t^U e σ_t^L , $\forall t \in \Omega_L$ aos limites superior e inferior de (18), respectivamente; e ρ_n^U e ρ_n^L , $\forall n \in \Omega_B$ aos limites superior e inferior de (16), respectivamente.

$$\lambda \in \mathbb{R} \quad (19)$$

$$\sigma_t^U \text{ e } \sigma_t^L \in \mathbb{R}^+, \forall t \in \Omega_L \quad (20)$$

$$\rho_n^U \text{ e } \rho_n^L \in \mathbb{R}^+, \forall n \in \Omega_B \quad (21)$$

$$\sum_{t \in \Omega_L} \beta_{tn} \cdot (\sigma_t^U - \sigma_t^L) + \sum_{n \in \Omega_B} (\rho_n^U - \rho_n^L) + \lambda \leq \frac{1}{\sum_{j \in \Omega_D} P_{Dj}} \cdot \sum_{j \in \Omega_D} \sum_{t \in \Omega_L} \frac{c_t}{2} \cdot \gamma_{njt} \cdot \alpha_{Gnj}, \forall n \in \Omega_B \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
& \left(C_{Sist}^{Total} - \sum_{\ell \in \Omega_L, i \in \Omega_G, j \in \Omega_D} P_{Gi} \cdot \frac{c_\ell}{2} \cdot \gamma_{ij\ell} \cdot \alpha_{Gij} + \sum_{\ell \in \Omega_L, i \in \Omega_G, j \in \Omega_D} P_{Dj} \cdot \frac{c_\ell}{2} \cdot \gamma_{ij\ell} \cdot \alpha_{Dji} \right) \cdot \frac{1}{\sum_{j \in \Omega_D} P_{Dj}} \\
& = \lambda \cdot \sum_{j \in \Omega_D} P_{Dj} + \sum_{\ell \in \Omega_L} \left[\sigma_\ell^U \cdot \left(Cap_\ell + \sum_{n \in \Omega_B} \beta_{tn} \cdot P_{Dn} \right) - \sigma_\ell^L \cdot \left(\sum_{n \in \Omega_B} \beta_{tn} \cdot P_{Dn} \right) \right] \\
& + \sum_{n \in \Omega_B} [\rho_n^U \cdot P_{Gn}^{MAX} - \rho_n^L \cdot P_{Gn}^{MIN}]
\end{aligned} \tag{23}$$

Conhecidas todas as variáveis e restrições do modelo final, é verificada uma não-linearidade dada pelo produto das variáveis de decisão reais P_{Gn} e α_{Gij} , presente nas restrições (6) e (23). Este produto de variáveis é tratado através da expansão binária [11] da variável P_{Gn} que define o despacho de geração. Seu domínio contínuo é transformado em um domínio discreto representado em função de variáveis binárias. Assim, o modelo passa a ser do tipo Linear Inteiro Misto (LIM). Cada variável P_{Gn} será representada por um conjunto $\{P_{Gn}^\varepsilon, \varepsilon = 0, 1, \dots, M_n\}$, sendo δ o intervalo entre seus valores, e $M_n = 2^{K_n}$ para um número K_n inteiro e não-negativo. Maiores detalhes sobre a aplicação deste método podem ser encontrados em [11].

A flexibilidade oferecida pela expansão binária na determinação de valores viáveis de geração dentro do conjunto $\{P_{Gn}^\varepsilon, \varepsilon = 0, 1, \dots, M_n\}$ será utilizada para particularizar os geradores por tipo de fonte de energia, térmica ou renovável. A geração das térmicas será considerada em patamares, e a das renováveis em um intervalo limitado pelos valores máximo e mínimo verificado no perfil de geração da usina. No caso de uma usina térmica, o conjunto de valores viáveis conterá 3 patamares, um máximo, um mínimo e um intermediário, sendo $P_{Gn} \in \{P_{Gn}^{MIN}, P_{Gn}^{INTER}, P_{Gn}^{MAX}\}$. Para tanto, é determinado $K_n = 1$, $M_n = 2$. Já para uma renovável, o conjunto de valores buscará se aproximar de um intervalo contínuo considerando a precisão de aproximadamente 1MW. Assim, de acordo com os limites de geração mínimo e máximo (P_{Gn}^{MIN} e P_{Gn}^{MAX}), os parâmetros K_n e M_n devem ser tais que $\delta_{Gn} \cong 1$.

3.0 - RESULTADOS

O método Tarifação Ótima Sujeita ao Despacho de Estresse é aplicado ao sistema teste de 39 barras [12] apresentado na Figura 2. São explicitados os valores de demanda do sistema, a capacidade máxima de cada gerador, bem como o tipo dos geradores (renovável ou térmica) adotados.

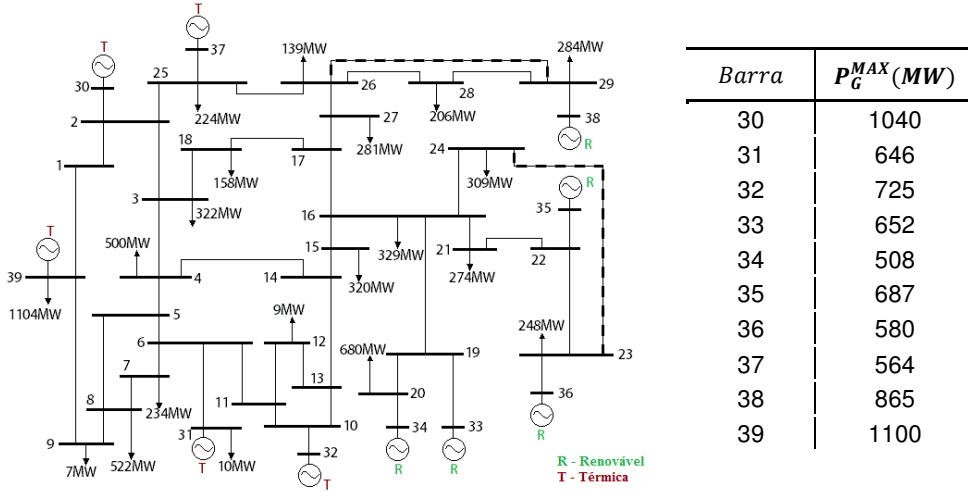


Figura 2 – Sistema de 39 barras.

Tal sistema é escolhido por apresentar características que compõe o quadro do sistema brasileiro descrito na seção 1, em um sistema reduzido de mais fácil análise. Nas barras 35, 36 e 38 estão representados os geradores renováveis de grande porte afastados do centro de demanda do sistema. Conforme será observado nos resultados, estes geradores tendem a receber tarifas elevadas devido ao seu sinal locacional na rede.

A análise de resultados é composta por três pontos: (i) maximização do estresse do sistema; (ii) efeito da minimização de dispersão tarifária; e (iii) adequação de sinal locacional. O sistema original completo apresentado na Figura 2 é utilizado para avaliar os pontos (i) e (ii). Para (iii), as linhas de transmissão tracejadas são retiradas de forma a diminuir rotas de escoamento de potência dos geradores nas barras 36 e 38. Os testes apresentados nesta seção foram realizados utilizando o software MATLAB [13] em conjunto com o software de otimização Gurobi [14]. As simulações tiveram duração de 4 minutos em média, em um computador com processador Intel Core i7 e 8GB de RAM.

3.1 Maximização do estresse do sistema

Nesta seção, é avaliado se a metodologia de despacho de geração de máximo estresse é eficaz. Para tanto, o resultado ótimo de despacho de geração (oriundo da solução do método de Tarificação Ótima sujeita ao Despacho de Máximo Estresse) é comparado ao Despacho Proporcional [8]. Para uma comparação coerente, os resultados do Despacho Proporcional são ajustados para respeitar o mesmo conjunto viável de geração definido para o método proposto. Dado seu resultado original, para cada gerador o despacho é substituído pelo valor mais próximo contido no conjunto viável de geração. Eventuais diferenças entre o total de geração e o total de demanda são compensadas pelas renováveis proporcionalmente ao respectivo limite máximo de geração.

A avaliação do estresse da rede é feita através do seu uso percentual total dado pela razão entre o somatório de fluxos e o somatório de capacidades das linhas. Para o método proposto este uso atinge o valor de 42,6%, enquanto que para o Despacho Proporcional o valor é de 38,5%. A análise do uso percentual de cada linha do sistema (ver Figura 3) mostra que a maximização do estresse ocorre principalmente na área de concentração de demanda da rede, muito embora a metodologia proposta tenha influência no sistema como um todo.

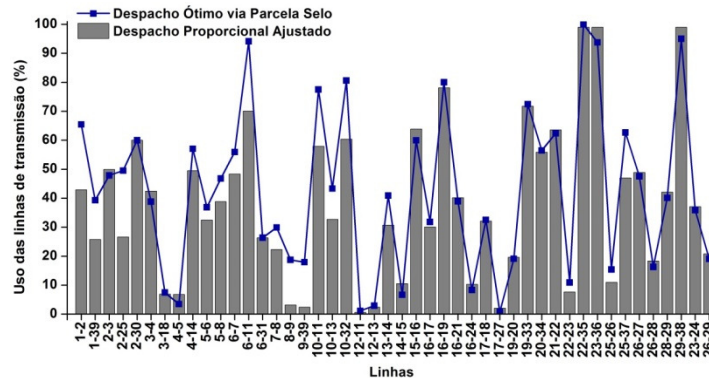


Figura 3 – Uso percentual das linhas do sistema de 39 barras.

3.2 Minimização da dispersão tarifária

Nesta simulação é avaliada a metodologia proposta e o seu efeito nas tarifas da rede. Os resultados são comparados com os métodos Nodal e Pro rata: o primeiro representa a situação de picos de tarifa muito elevados e alta dispersão, e o segundo a ausência de sinal locacional com tarifas iguais para todos os agentes e dispersão nula. Assim, espera-se que o método proposto forneça tarifas ótimas compreendidas entre o método Nodal e o método Pro rata, conciliando de maneira ótima os objetivos de minimização de dispersão e consideração do uso e topologia da rede. As tarifas de geradores e demandas são apresentadas na Figura 4. Para os resultados de tarifas dos métodos Nodal e Pro rata foi utilizado o despacho de geração ótimo oriundo do método proposto.

Primeiramente, destaca-se a dispersão tarifária nos resultados apresentados. O atendimento à expectativa do método proposto em fornecer tarifas entre os métodos Nodal e Pro rata, mostra que a lógica criada para o método, com NEFs como varável de decisão e com restrições de rede, é eficiente em conciliar dispersão reduzida e presença de sinal locacional. Em relação às tarifas dos geradores 35, 36 e 38, em foco nesta simulação (ver Figura 4-(a)), houve uma redução para o patamar de outros geradores (30, 33, 34 e 37), removendo a característica de desincentivo à expansão de geração por essas barras presente no método Nodal. Já para as demais tarifas da rede, devem ser analisados dois pontos. O primeiro é a formação de patamares de tarifas iguais, o que pode ser justificado pelas folgas existentes na rede. Conforme visto na seção 3.1, a utilização percentual da capacidade do sistema é de 42,6%, existindo um alto percentual de capacidade ociosa a ser aproveitada pela minimização da dispersão tarifária. Aliado a isso, o sistema é altamente malhado na área das demandas disponibilizando uma grande variedade de rotas para a definição do traçado de potência que minimiza a dispersão entre as tarifas. Conforme será visto na seção 3.3, sistemas com menor oferta de rotas pelas linhas de transmissão tendem a eliminar a formação de patamares no resultado ótimo do método proposto.

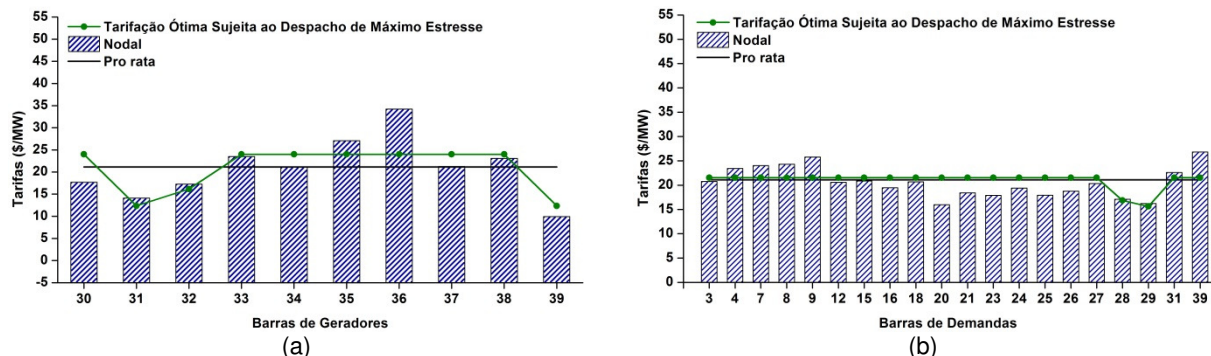


Figura 4 – Tarifas de uso do sistema de 39 barras – (a) Tarifas de geradores (b) Tarifas de demandas.

O segundo ponto diz respeito à tendência das tarifas onde há sinalização locacional mais intensa. Os geradores 31, 32 e 39, e as demandas 28 e 29 estão localizados em pontos altamente benéficos para o sistema, reduzindo a necessidade de investimentos em expansão, e por isso possuem tarifa reduzida em comparação aos demais agentes da rede. Neste caso, o método proposto é capaz de identificar a condição destes agentes no sistema, e transferi-la para o valor da tarifa, seguindo a mesma tendência de resultados presentes no método Nodal.

3.3 Intensidade de sinal locacional

Nesta simulação é avaliado se o método proposto é eficiente em fornecer sinais locais adequados às condições do sistema. Para tanto as linhas pontilhadas sinalizadas Figura 4 são eliminadas do sistema para reduzir a rotas de escoamento dos geradores 36 e 38. O objetivo é criar um cenário mais extremo onde os geradores estão ainda mais isolados em comparação ao sistema original. O resultado esperado são tarifas com sinais locais mais fortes para estes geradores, uma vez que a liberdade do método para minimização de dispersão entre as tarifas foi limitada. Os resultados para as tarifas dos geradores são apresentadas na Figura 5. Dado o foco específico desta simulação, as tarifas de demandas não serão apresentadas.

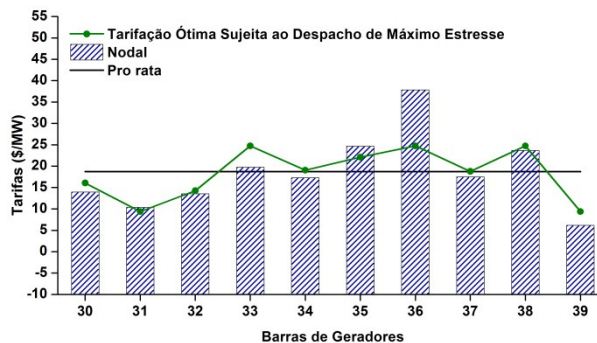


Figura 5 – Tarifas de geradores para o sistema de 39 barras com retirada de linhas.

Na Figura 5 observa-se, primeiramente, que para o método proposto as tarifas são mais diversificadas entre si, em comparação aos resultados da Figura 4-(a), o que significa sinais locais mais acentuados. Este efeito é consequência da redução de rotas de fluxo pelo sistema. Além disso, essa diversificação se dá acompanhando a tendência de sinalização locacional do método Nodal, sinalizando que o método proposto mantém uma identificação coerente das condições da rede.

Em relação às tarifas que desestimulam os investimentos em expansão, destaca-se o resultado do gerador 36. No método Nodal este agente recebe uma tarifa elevada em comparação às demais, o que ilustra o quadro citado na seção 1 deste trabalho. O método proposto minimiza esta penalização, mantendo uma tarifa coerente, ou seja, entre as maiores do sistema.

4.0 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados mostram um bom desempenho das metodologias adotadas para atingir os objetivos de minimização da dispersão tarifária, reduzindo as tarifas de geradores distantes dos centros de consumo, de manutenção de um sinal locacional coerente com as condições do sistema e utilização de um despacho de máximo estresse para o cálculo das TUSTs. É possível concluir ainda que o método proposto fornece tarifas que estão entre a solução do método Nodal e do método Pro rata, no que diz respeito à intensidade de sinal locacional. O que define a proximidade do resultado ótimo de tarifas com cada um dos extremos são as características do sistema. Isso faz com que o método seja adaptável a mudanças na rede, mantendo o atendimento aos objetivos traçados. Como evolução para este trabalho, o objetivo principal é particularizá-lo para as demais características importantes do sistema brasileiro. O despacho de geração de máximo estresse será aperfeiçoado para considerar cenários reais de geração na definição do espaço viável de soluções. Além disso, pretende-se adaptar o método para uma estrutura multiárea de forma a considerar a configuração de submercados do sistema brasileiro.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2022; Disponível em: <http://epe.gov.br/PDEE/20140124_1.pdf>. Acessado em 1 set. 2014.
- [2] SUPERINTENDÊNCIA DE REGULAÇÃO DOS SERVIÇOS DE TRANSMISSÃO – STR/ANEEL. Manual da metodologia nodal para cálculo de tarifas de uso dos sistemas elétricos; Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Metodologia_completa.pdf>. Acessado em 11 jul. 2014.
- [3] TELLES, E.; LIMA, D. A. Transmission Tariff Allocation under High Renewable Source Penetration and Congestion Conditions; 18th Power Systems Computation Conference (PSCC'14), Wroclaw, Polônia, 2014.
- [4] ABHYANKAR, A. R.; SOMAN, S. A.; KHAPARDE, S. A. Min-Max fairness criteria for transmission fixed cost allocation; IEEE Transactions on Power Systems, v. 22, n. 4, p. 2094-2104, nov. 2007.
- [5] RAO, M. S. S. et al. Min-max fair power flow tracing for transmission system usage cost allocation: A large system perspective; IEEE Transactions on Power Systems, v. 25, n. 3, p. 1457 – 1468, ago. 2010.

- [6] TELLES, E.; LIMA, D. A. ; STREET, A.; SANZ, J. C. Min-max long run marginal cost to allocate transmission tariffs for transmission users; Electric Power Systems Research (Print), v. 101, p. 25-35, 2013.
- [7] GALIANA, F. D.; CONEJO, A. J.; GIL, H. A. Transmission network cost allocation based on equivalent bilateral exchanges; IEEE Transactions on Power Systems, v. 18, n. 4, p. 1425-1431, nov. 2003.
- [8] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº559, de 27 de junho de 2013; Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2013559.pdf>>. Acessado em 15 jul. 2014.
- [9] BAKIRTZIS, A. et al., Comparison of two methods for long-run marginal cost-based transmission use-of-system pricing; IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., v. 148, n. 4, jul 2000.
- [10] CHVATAL, V. Linear Programming; New York: W. H. Freeman and Company.
- [11] PEREIRA, M. V. et al. Strategic Bidding Under Uncertainty: A Binary Expansion Approach; IEEE Transactions on Power Systems, v. 20, n. 1, feb. 2005.
- [12] TASK FORCE ON BENCHMARK SYSTEMS FOR STABILITY CONTROLS. 39 bus system; Disponível em < <http://www.sel.eesc.usp.br/ieee/index.htm> >. Acessado em 5 out. de 2014.
- [13] MATHWORKS. MATLAB (Matrix Laboratory) – Software; Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>. Acessado em 5 out. de 2014.
- [14] GUROBI OPTIMIZATION. Gurobi Software; Disponível em: <<http://www.gurobi.com/download/gurobi-optimizer>>. Acessado em 5 out. de 2014.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Érica Telles Carlos graduação e M.Sc. em Engenharia Elétrica (Sistemas de Potência) pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, Brasil. Atualmente, é doutoranda pela mesma universidade, e pesquisadora visitante na Universidad de Castilla—La Mancha, Ciudad Real, Espanha. Sua área de pesquisa inclui tarifação do sistema de transmissão de energia elétrica e métodos de otimização.

Delberis A. Lima conclui graduação e M.Sc. em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, em 2000 e 2003, respectivamente. Ele foi pesquisador visitante na Universidad de Castilla—La Mancha, Ciudad Real, Espanha, em 2005. Atualmente, é professor na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Sua área de pesquisa inclui planejamento, operação e parte econômica de sistemas de energia, e mercados de energia.

Alexandre Street possui M.Sc. e D.Sc. em Engenharia Elétrica (Pesquisa Operacional) pela PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil. De 2003 a 2007 participou de diversos projetos relacionados a proposta estratégica nos leilões brasileiros de energia e regulação de mercado na Power System Research Consulting (PSR), Rio de Janeiro, Brasil. De agosto de 2006 a março de 2007 foi pesquisador visitante na Universidad de Castilla—La Mancha, Ciudad Real, Espanha. No início de 2008 ingressou na PUC-Rio como Professor Assistente do Departamento de Engenharia Elétrica dando aulas de Otimização. Sua área de pesquisa inclui: propostas estratégicas em leilões de contratação de energia, regulação de mercados de energia, métodos de otimização, e tomada de decisão sob incerteza, portfólios integrados de gás e energia e estratégias de comércio de energia renovável.