



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

CB/GIA/08

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - XI

GRUPO DE ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS - GIA

INTRODUÇÃO DE IMPOSTO AMBIENTAL EM UM PROBLEMA DE DESPACHO ECONÔMICO DE CARGA

**Jefferson Oliveira dos Santos(*)
UNIPAMPA**

**João Plínio Juchem Neto
UNIPAMPA**

**Eduardo Machado dos Santos
UNIPAMPA**

RESUMO

Este trabalho analisa a introdução de um imposto ambiental do tipo pigouviano em um problema de despacho econômico de carga com três unidades termoeletricas, com o objetivo de evitar que as usinas operem em altos níveis de potência, onde a emissão de óxidos de nitrogênio é mais elevada. É utilizado o PSO na resolução deste problema, considerando diferentes cenários e taxas do imposto. Os resultados obtidos demonstram que a utilização de tal instrumento é eficaz ao fazer as usinas operarem em níveis menos poluentes, com um aumento no custo total de geração de no máximo 1,29% nas situações aqui analisadas.

PALAVRAS-CHAVE

Despacho Econômico de Carga, Controle de Poluição, Imposto Ambiental, Usinas Termoeletricas, PSO.

1.0 - INTRODUÇÃO

A crescente preocupação em mitigar impactos ambientais nos processos produtivos vem motivando governos a utilizar impostos como instrumento de política ambiental. O imposto ambiental (ou pigouviano) tem por objetivo corrigir externalidades negativas associadas com a poluição, incentivando, deste modo, a produção de bens e serviços de maneira ambientalmente sustentável. Desde 1920, quando o economista Arthur Pigou começou a investigar a relação entre imposto e meio ambiente, muitos estudos foram realizados e diversos países adotaram o imposto ambiental (Nery, 2014).

Processos produtivos podem apresentar externalidades positivas, quando a ação do produtor beneficia a terceiros, ou negativas, quando a ação do produtor gera custos a terceiros. Na presença de externalidades, o preço de um bem não reflete o seu valor social. Nesse contexto o produtor pode vir a produzir de maneira excessiva ou insuficiente, resultando em um equilíbrio de mercado ineficiente (Pindyck & Rubinfeld, 2005). A motivação para a utilização de um imposto ambiental não se encontra na elevação da arrecadação fiscal, mas seu objetivo maior é incentivar a produção sustentável e corrigir externalidades negativas relacionadas ao impacto ambiental gerado a partir da atividade produtora. Um exemplo na área de geração de energia elétrica é a poluição produzida pelas termoeletricas, que gera um custo externo ao produtor. O imposto ambiental é utilizado para internalizar o custo externo, fazendo o gerador da poluição pagar por um custo que já existia, porém até então pago por terceiros.

O objetivo deste trabalho é analisar o impacto da introdução do imposto pigouviano como forma de evitar que as usinas termoeletricas operem em níveis de potência onde a poluição gerada seja muito elevada. Para tal será utilizado o método de otimização por enxame de partículas (PSO) na resolução de um problema de Despacho Econômico (DE) constituído por três unidades geradoras, considerando as perdas nas linhas de transmissão, conforme apresentado por Saadat (1999) e Serapião (2009). Por exemplo, sabe-se que emissões mais elevadas de óxidos de nitrogênio (NO) ocorrem quando a usina está operando perto de sua capacidade máxima de geração

(Coelho, 2013). No problema aqui tratado, é considerado que cada usina deve operar em um certo intervalo de potências e que a taxa pigouviana é aplicada na função custo das geradoras apenas em altos níveis de geração. Desta forma, a função custo de cada geradora é definida por partes: o custo para unidades que operam abaixo de determinado nível crítico não é onerado com o imposto, já o custo para unidades que estão produzindo além deste limite estão sujeitas à cobrança do imposto. Assim, a proposta é induzir a diminuição da emissão de óxidos de nitrogênio na atmosfera desincentivando as usinas a operarem próximas de sua capacidade máxima de geração, onde seu custo de operação aumenta devido ao imposto.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: na Seção 2 é apresentado o problema de despacho econômico em sua forma básica; na Seção 3 é discutido a poluição por emissões de óxidos de nitrogênio e o imposto ambiental; na Seção 4 é apresentado o método de Otimização custo por Enxame de Partículas (PSO); na Seção 5 é apresentada a solução do sistema com três geradores utilizando o PSO com critério de parada, onde são analisados e discutidos os resultados obtidos a partir da introdução do imposto ambiental. Por fim, na Seção 6 são apresentadas as conclusões.

2.0 - DESPACHO ECONÔMICO DE CARGA BÁSICO

O estudo do despacho econômico de carga se ocupa em tornar mínimo o custo total de geração e operação de energia elétrica, de maneira a atender a demanda total de carga e respeitar as restrições inerentes ao sistema. Cada unidade geradora possui determinado custo de produção, o qual depende principalmente do recurso energético empregado em sua geração (Gómez-Expósito et al., 2011). Desta forma, o custo total de geração é a soma dos custos de cada unidade geradora e é dada pela eq. (1), onde P_i é a potência em MW fornecida pela unidade i e C_i é o custo de operação da mesma em \$/h.

$$C(P_1, \dots, P_n) = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) \quad (1)$$

O custo de geração de cada unidade é aproximada por uma função quadrática convexa (Gómez-Expósito et al., 2011), expressa em termos da própria potência de saída. A eq. (2) expressa o custo individual de cada unidade geradora, onde os coeficientes a_i , b_i e c_i representam as características do gerador pertencente à unidade i (Serapião, 2009).

$$C_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

A energia produzida pela unidade geradora i estará sujeita aos limites operacionais da mesma conforme a eq. (3), que mostra respectivamente as saída de potência mínima e máxima de geração da unidade i . As unidades geradoras devem atender a demanda total do sistema considerando as perdas de transmissão eq. (4), com potência total demandada P_D e perda de transmissão $P_L(P_1, \dots, P_n)$ medidos em MW.

$$P_{min} \leq P_i \leq P_{max}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i - P_D - P_L(P_1, \dots, P_n) = 0 \quad (4)$$

As perdas nas linhas de transmissão são calculadas em função da potência gerada utilizando a matriz de coeficientes de perdas B . Essa matriz é obtida a partir de um estudo realizado sobre o fluxo de potência do sistema, onde são obtidos os dados de potência gerada e as respectivas perdas. Através de métodos de regressão não linear é possível obter as matrizes de perdas da rede e calcular as mesmas utilizando a Fórmula de Perda de Kron (Saadat, 1999), eq. (5):

$$P_L(P_1, \dots, P_n) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} P_i P_j + \sum_{i=1}^n B_{0i} P_i + B_{00} \quad (5)$$

onde B_{ij} é o ij -ésimo elemento da matriz de coeficientes de perda, B_{0i} é o i -ésimo elemento do vetor de coeficiente de perdas e B_{00} é a constante do coeficiente de perda. Em suma, o despacho econômico de carga pode ser escrito, matematicamente, como um problema de otimização não linear dado pela eq. (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} \min C(P_1, \dots, P_n) = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) \\ \text{s. a. } \sum_{i=1}^n P_i - P_D - P_L(P_1, \dots, P_n) = 0 \\ P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max}, \quad i = 1, \dots, n. \end{array} \right. \quad (6)$$

3.0 - EMISSÕES DE ÓXIDO DE NITROGÊNIO E O IMPOSTO AMBIENTAL

Dentre as diversas formas de degradação ambiental, a poluição do ar atmosférico é uma das que mais prejuízos trazem à sociedade, afetando a saúde humana, os ecossistemas e o clima. A qualidade do ar é influenciada diretamente pelos níveis de poluição atmosférica, os quais estão vinculados a um complexo sistema de fontes emissoras como indústrias, queima de lixo, emissões naturais, veículos automotores, aviões, trens e outros.

Nos processos térmicos, como o de uma usina termoeletrica, algumas substâncias liberadas são prejudiciais para os seres vivos. Os Óxidos de Nitrogênio (NO), estão entre os mais encontrados no processo de combustão. Óxidos de Nitrogênio são gases altamente poluentes e portanto, nocivos ao homem e ao meio ambiente. Eles causam irritação nos olhos e no sistema respiratório, contribuem parcialmente para a formação das chuvas ácidas e do *smog*, que é um processo fotoquímico de oxidação da atmosfera, juntamente com material particulado, ozônio e hidrocarbonetos (Gallego, 2000).

Durante a reação química do nitrogênio com o oxigênio submetido a altas temperatura, o NO térmico é formado. Outros compostos de NO são obtidos, porém a maioria dos NO formados a partir da combustão a altas temperaturas é NO térmico. Esse composto pode ser reduzido controlando a temperatura de combustão. As cargas de operação das usinas com turbinas a gás afetam as emissões de NO térmico, sendo que a poluição é mais elevada para cargas operacionais pesadas, quando a elevação da temperatura para geração a plena carga resulta em uma maior quantidade de NO térmico emitido no meio ambiente. O oposto ocorre para emissões de Monóxido de Carbono (CO). Quando o nível de geração está muito abaixo da sua plena carga, a eficiência é reduzida e o índice de combustão incompleta aumenta, propiciando a formação de Monóxido de Carbono (Coelho, 2013).

A poluição gerada por emissão de NO térmico impõe custos a terceiros, caracterizando um exemplo de externalidade negativa, quando a ação de poluir provoca danos e custos a sociedade (Pindyck & Rubinfeld, 2005). Um exemplo, são os problemas de saúde ocasionados à população em virtude da poluição emitida. Como forma de corrigir essa externalidade, o imposto ambiental é aplicado de forma a transferir para o causador da externalidade o custo da poluição gerada por sua produção (Nery, 2014). Como a quantidade de NO térmico emitido no meio ambiente é maior quando a usina opera próximo ao seu limite máximo, um instrumento da política ambiental é o imposto pigouviano. Ele é aplicado para desestimular a produção de energia em sua plena capacidade de geração, fazendo diminuir dessa forma, a emissão de NO térmico.

O imposto ambiental pode atuar como mecanismo inibitório junto às indústrias térmicas de geração de energia elétrica, contribuindo principalmente para a produção sustentável de eletricidade e redução das emissões de NO térmico. Seu principal objetivo é incentivar a produção de energia térmica ambientalmente sustentável, corrigindo as externalidades negativas associadas à poluição. Sendo assim, o desafio para realizar o DE introduzindo o imposto ambiental, está em relacionar um ponto de equilíbrio entre custo de geração ótimo, nível de produção eficiente e redução do impacto ambiental.

4.0 - OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS - PSO

Em 1995, James Kennedy e Russell Elberhart apresentaram o método de otimização PSO (Mahor et al., 2009), o qual é baseado em uma população composta por indivíduos capazes de interagir entre si e com o meio ambiente (Serapião, 2009). Dois parâmetros norteiam o processo de decisão de cada indivíduo do enxame: um é social, gBest (gB), e relaciona a influência que a melhor partícula exerce sobre toda população; outro é cognitivo, pBest (pB), que reflete o melhor resultado obtido individualmente (Serapião, 2009).

Iniciando um enxame de partículas com posições aleatórias dentro do espaço de busca, a partícula i , cuja posição é \vec{x}_i , deverá se mover com uma velocidade \vec{v}_i , que pode ser calculada pela eq. (7), onde φ_1 e φ_2 são constantes que representam, respectivamente, os parâmetros cognitivo e social, conforme Kennedy et al. (2001), pB é o melhor valor da função objetivo para a respectiva partícula até o momento, \vec{x}_{pB} é sua posição, gB o melhor valor da função objetivo dentre todas as partículas, \vec{x}_{gB} é sua posição, $\vec{v}_i(k)$ a velocidade atual, $\vec{x}_i(k)$ a posição atual da

partícula e e_1 e e_2 são variáveis aleatórias escalares, possuindo distribuição de probabilidade uniforme no intervalo entre 0 e 1.

A posição da partícula é atualizada pela eq. (8), porém para que o espaço de busca não seja ultrapassado, são impostos limites para o módulo da velocidade das partículas, $v_{max} > 0$, conforme mostra a eq. (9).

$$\vec{v}_i(k+1) = \vec{v}_i(k) + \varphi_1 e_1 (\vec{x}_{pB} - \vec{x}_i(k)) + \varphi_2 e_2 (\vec{x}_{gB} - \vec{x}_i(k)) \quad (7)$$

$$\vec{x}_i(k+1) = \vec{x}_i(k) + \vec{v}_i(k+1) \quad (8)$$

$$\text{Se } |\vec{v}_i| > v_{max} \text{ então } \vec{v}_i = \frac{\vec{v}_i}{|\vec{v}_i|} v_{max} \quad (9)$$

Um critério de parada comumente utilizado na literatura, consiste em executar o algoritmo até que um respectivo número máximo de iterações seja alcançado, porém geralmente não é apresentada uma razão para a adoção deste critério, além de tentativa e erro. Esse critério de parada apresenta uma desvantagem, pois é desconhecido o número de iterações necessárias para se atingir a convergência (Zielinski et al., 2005). Desta forma, um critério de parada que estime o erro é uma importante ferramenta para determinar o número de iterações necessárias para se obter convergência. Um critério de parada simples, porém eficiente, consiste em calcular o erro relativo estimado nas últimas g iterações e verificar se esse erro é menor que um valor previamente estabelecido para o erro mínimo (Zielinski et al., 2005), critério que será adotado neste trabalho.

5.0 - ESTUDO DE CASO: SISTEMA COM TRÊS USINAS TERMOELÉTRICAS E O IMPOSTO AMBIENTAL

Nesta seção será resolvido o Despacho Econômico de Carga (DE) apresentado na seção 2.0 de um sistema termoeletrico com três unidades geradoras, considerando a demanda de potência $P_D = 150$ MW, perdas nas linhas de transmissão e a introdução do imposto ambiental no custo das unidades que produzirem acima de determinado nível crítico de operação. Os dados do sistema em questão são reproduzidos nas Tabelas 1 e 2, e as matrizes B com os coeficientes de perda nas linhas de transmissão (base de 100 MW) são dados pelas eq. (10-12) (Saadat, 1999; Serapião, 2009). Todas as simulações computacionais foram realizadas utilizando o Matlab 8.5.0 (MathWorks) executado em um computador com processador Intel(R) Core(TM) i5-2410M, de 2.30 GHz e 6GB de RAM, sistema operacional Windows 7, 64 Bits.

Tabela 1 – Coeficientes de Custos

Unidade _i	a_i (\$/MW ²)	b_i (\$/MW)	c_i (\$)
1	0,008	7,0	200
2	0,009	6,3	180
3	0,007	6,8	140

Tabela 2 - Capacidade de Geração

Unidade _i	P_i^{\min} (MW)	P_i^{\max} (MW)
1	10	85
2	10	80
3	10	70

$$B_{ij} = 10^{-2} \times \begin{bmatrix} 0,0218 & 0,0093 & 0,0028 \\ 0,0093 & 0,0228 & 0,0017 \\ 0,0028 & 0,0017 & 0,0179 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B_{0i} = 10^{-2} \times [0,3 \quad 3,1 \quad 1,5] \quad (11)$$

$$B_{00} = 0,030523 \quad (12)$$

Para o problema de otimização apresentado, a eq. (13) é um caso particular do DE discutido na seção 2.0 eq. (6). O problema de otimização fica da seguinte forma:

$$\begin{cases} \min C(P_1, P_2, P_3) \\ \text{s. a. } P_1 + P_2 + P_3 - P_D - P_L(P_1, P_2, P_3) = 0 \\ 10 \leq P_1 \leq 85 \\ 10 \leq P_2 \leq 80 \\ 10 \leq P_3 \leq 70 \end{cases} \quad (13)$$

cujo objetivo é minimizar a função custo que estará sujeita às restrições de igualdade e desigualdade, que são respectivamente o balanço de potência considerando as perdas nas linhas de transmissão e as referidas faixas de geração de cada unidade termoeletrica.

No problema aqui tratado, cada usina deve operar em um certo intervalo de potências e a taxa pigouviana é aplicada na função custo das geradoras apenas em altos níveis de geração. Desta maneira, a função custo de cada geradora é definida por partes: o custo para usinas que operam abaixo de determinado nível crítico não é onerado com o imposto; já o custo para usinas que estão produzindo além deste limite estará sujeito ao imposto, como mostra a eq. (14):

$$C_i(P_i) = \begin{cases} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i, & P_{min} \leq P_i \leq P_t \\ a_i P_i^2 + (b_i + t) P_i + c_i, & P_t < P_i \leq P_{max} \end{cases} \quad (14)$$

onde a taxa do imposto t é aplicada nas unidades com nível de geração P_i acima do limite crítico P_t permitido entre os níveis mínimo, P_{min} , e máximo P_{max} , de cada unidade.

As simulações computacionais foram realizadas considerando que cada geradora teve seu nível crítico P_t para aplicação do imposto variando de 50% a 90% da sua capacidade máxima de geração. Para cada um destes casos, a taxa pigouviana t aplicada nas unidades que geravam acima do nível crítico foi considerada variando de 10% a 50%. Assim, o objetivo é diminuir a emissão de NO térmico na atmosfera, desincentivando que as unidades operem próximas de sua capacidade máxima de geração.

Como métodos clássicos de otimização não se aplicam à problemas com função objetivo descontínuas e não diferenciáveis, que é o caso deste trabalho, foi aplicado o método heurístico PSO discutido na seção 4.0, com critério de parada automático, método este que vem sendo reconhecido como um algoritmo eficiente para solucionar tais tipos de problemas (Mahor et al., 2009).

Na implementação do PSO, a função objetivo utilizada é dada pela eq. (15):

$$f(\vec{P}) = \sum_{i=1}^3 C_i(P_i) + \alpha \left| \sum_{i=1}^3 P_i - P_D - P_L(P_1, P_2, P_3) \right| \quad (15)$$

onde α é uma constante positiva que penaliza as soluções que não atendem ao equilíbrio no balanço de carga.

Foram utilizadas 20 partículas diferentes e aleatoriamente inicializadas em 30 execuções do algoritmo. Durante sua execução, tomou-se o cuidado de não permitir que as partículas saíssem do espaço de busca definido pelas potências mínima e máxima de geração de cada usina. Adicionalmente, foi utilizado como critério de parada a verificação de quando a estimativa do erro relativo nas 500 iterações anteriores é menor do que o valor 10^{-6} . Finalmente foi considerada a solução, dentre as 30 simulações, que apresentou o menor custo total de geração.

5.1 Resultados e Discussões

Como caso de referência, a solução do DE sem considerar o imposto pigouviano apresentou as duas usinas de menor custo (unidade 2 e 3), gerando entre 75% e 80% de suas capacidades máximas, e a usina de maior custo (unidade 1), gerando menos de 40% de sua capacidade máxima, como mostra a Figura 1 - (a). Foi calculado a média (μ) e o desvio padrão (σ) do custo total apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Custos sem Imposto Ambiental

Custos	\$/h
Custo Mín	1.599,98
Custo Méd (μ)	1.600,24
Custo Máx	1.603,60
Desvio Padrão (σ)	0,76

Nas simulações realizadas considerando nível crítico P_t de 90% para aplicação do imposto ambiental, as usinas operam dentro do esperado e apresentam DE idêntico ao caso referência, onde o imposto ambiental não é aplicado.

A partir do nível crítico de 80%, a introdução do imposto pigouviano começa a fazer efeito, e uma taxa de 10% é suficiente para fazer com que a usina 2, que estava operando levemente acima desse nível crítico, passasse a produzir a 80% de sua capacidade. Este caso é apresentado na Figura 1 - (b), que mostra em termos de porcentagem o DE de cada usina e em MW a potência gerada. Nenhuma das unidades são taxadas e a operação dentro do nível crítico resultou em um custo total igual ao obtido sem a introdução do imposto.

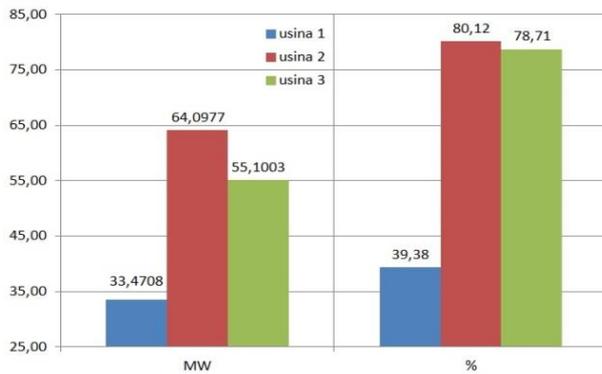


Figura 1- (a) Despacho Econômico sem Imposto Ambiental.

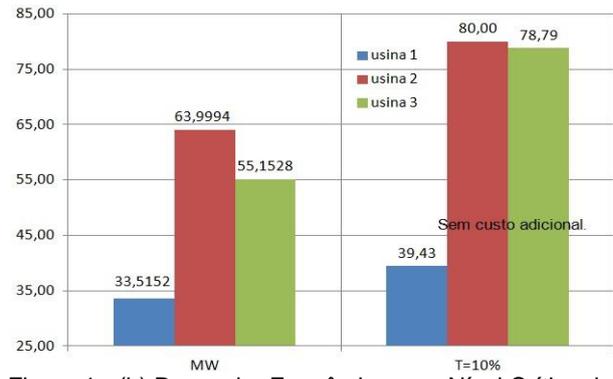


Figura 1 - (b) Despacho Econômico com Nível Crítico de Geração Igual a 80%.

Analisando o nível crítico de 75% e a introdução do imposto ambiental, a taxa de 10% garantiu que as duas usinas de menor custo passassem a produzir a 75% de sua capacidade e a usina de maior custo passasse a produzir em um patamar de 47,23% de sua capacidade. A Figura 2 - (b) mostra a potência gerada e a porcentagem do DE de cada usina neste caso. Nenhuma das unidades são taxadas, no entanto, a operação abaixo do nível crítico implica em um aumento do custo em 0,04% quando comparado ao custo sem a introdução do imposto ambiental. Na Figura 2 - (a) é apresentado a solução do caso de referência para comparação.

Tal comportamento qualitativo, de todas as usinas ajustarem as potências geradas de modo a evitar a aplicação do imposto, também se verificou no nível crítico de 70%, com custo total aumentado em 0,17%, sendo suficiente uma taxa de 10% para que todas as usinas operassem dentro do esperado. Já para níveis críticos de 60% e 50%, não há como atender a carga total sem pelo menos uma das usinas pagar imposto.

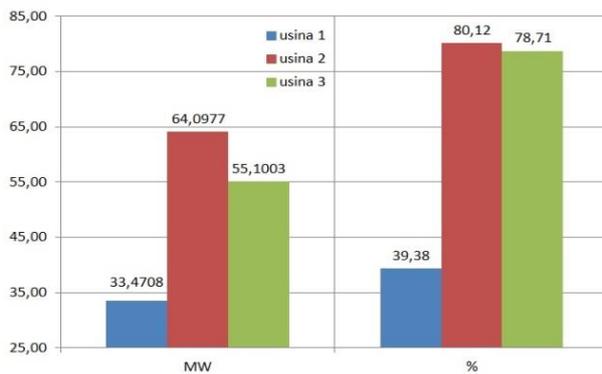


Figura 2 - (a) Despacho Econômico sem Imposto Ambiental.

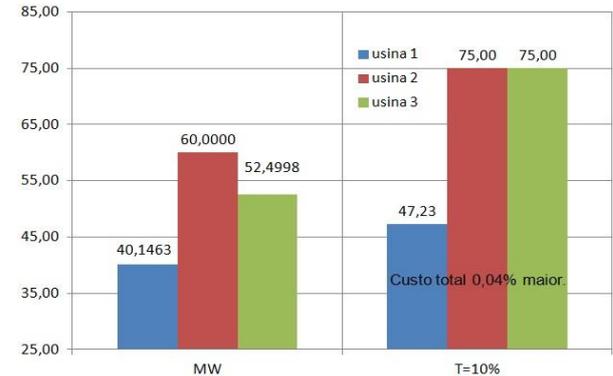


Figura 2 - (b) Despacho Econômico com Nível Crítico de Geração Igual a 75%.

Quando o nível crítico é igual a 60%, a taxa de 10% faz com que as usinas 1 e 3 operem abaixo do nível crítico e a usina 2 acima, operando a um nível de 84,49% da sua capacidade de geração. A unidade 2 é taxada em 10% e o custo total é 0,58% maior que o caso de referência que não considera o imposto ambiental. O menor percentual de potência gerada acima do nível crítico de geração, 76,54%, é alcançado quando o imposto ambiental passa a ser de 40%, implicando em um custo total maior de 1,68%. As usinas 1 e 2 atendem o nível crítico de operação, enquanto que a usina 3 é penalizada com o imposto pigouviano. A Figura 3 mostra o percentual de geração considerando o DE sem imposto ambiental e com imposto de 10 e 40%.

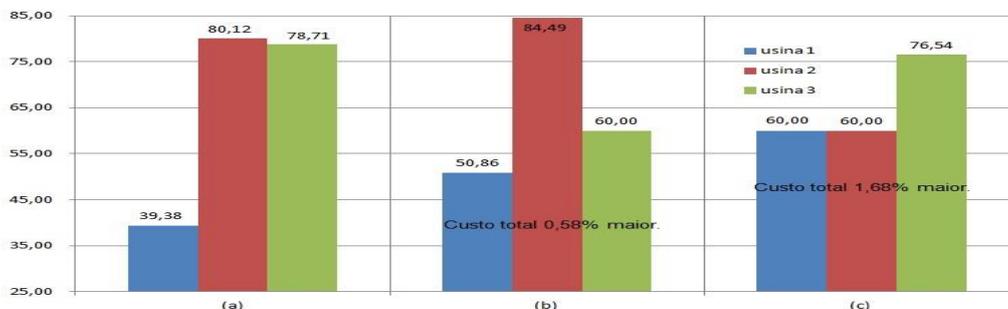


Figura 3 - (a) Despacho Econômico sem Imposto Ambiental. Figura 3 - (b) Despacho Econômico com Nível Crítico de Geração Igual a 60% e Taxa de 10%. Figura 3 - (c) Despacho Econômico com Nível Crítico de Geração Igual a 60% e Taxa de 40%.

Para o nível crítico de 50%, uma taxa de 10% é insuficiente para fazer com que duas usinas operem abaixo do nível crítico. A menor taxa para que pelo menos duas usinas gerem abaixo deste nível é de 20%. Nesta última situação as usinas 1 e 3 operam abaixo do nível crítico, enquanto que a usina 2 opera em um nível de 94,40% da sua capacidade de geração, a qual é taxada em 20%. O custo total neste caso é 1,29% maior do que o caso de referência. A Figura 4 mostra o percentual de geração comparando o caso referência a um nível crítico de 50% com um imposto ambiental de 10 e 20%.

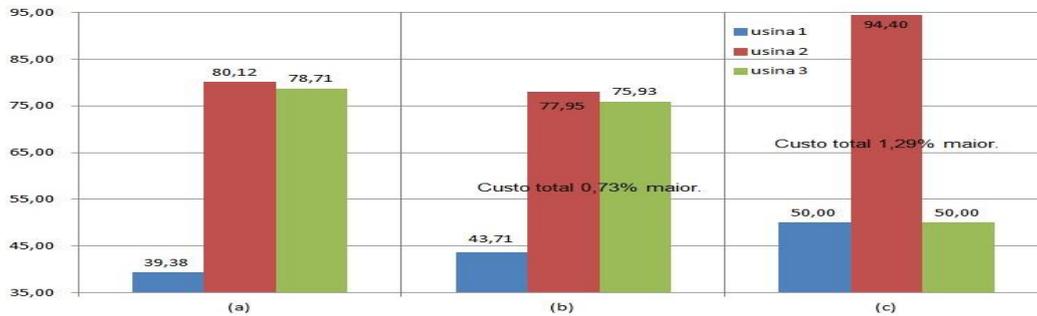


Figura 4 - (a) Despacho Econômico sem Imposto Ambiental. Figura 4 - (b) Despacho Econômico com Nível Crítico de Geração Igual a 50% e Taxa de 10%. Figura 4 - (c) Despacho Econômico com Nível Crítico de Geração Igual a 50% e Taxa de 20%.

No geral, pode-se concluir que a introdução do imposto pigouviano atingiu o resultado esperado, que era fazer com que as usinas se ajustassem a níveis de geração ótimos menos poluentes, causando um aumento no custo total de geração variando de 0,04% a 1,29%, dependendo do nível crítico adotado. A Tabela 4 apresenta os melhores resultados obtidos, relaciona a menor taxa aplicada para que o nível crítico seja respeitado, o percentual de geração de cada unidade em relação a sua capacidade máxima, o custo total de geração e o aumento percentual no caso da introdução do imposto ambiental.

Tabela 4 - Custos com a Introdução do Imposto Ambiental

P_t (%)	t (%)	Un 1 (%)	Un 2 (%)	Un 3 (%)	Custo total (\$/h)	Aumento (%)
50	20	49,99	94,42	49,98	1.620,69	1,29
60	10	50,86	84,49	60,00	1.609,22	0,58
70	10	56,06	70,00	70,00	1.602,76	0,17
75	10	47,23	75,00	75,00	1.600,61	0,04
80	10	39,43	80,00	78,79	1.599,98	0,00
90	0	39,38	80,12	78,71	1.599,98	0,00
100	0	39,38	80,12	78,71	1.599,98	0,00

6.0 - CONCLUSÃO

A principal conclusão deste trabalho é que a utilização de um imposto ambiental do tipo pigouviano no problema de despacho econômico de carga com três unidades geradoras aqui considerado, com o objetivo de desincentivar a operação das usinas termoeletricas próximas da plena carga, é um instrumento eficaz para o controle de emissão de óxidos de nitrogênio na atmosfera.

Através de simulações computacionais, utilizando o método de otimização PSO com critério de parada, foram considerados cenários onde cada geradora teve seu nível crítico para aplicação do imposto ambiental variando de 50% a 90% da sua capacidade máxima de geração. Para cada um destes casos, a taxa pigouviana aplicada nas unidades que geravam acima do nível crítico foi considerada variando de 10% a 50%.

No caso de referência, a solução do despacho sem considerar o imposto pigouviano apresentou as duas usinas de menor custo gerando entre 75% e 85% de suas capacidades máximas, e a usina de maior custo gerando menos de 40% de sua capacidade. No caso em que o nível crítico considerado foi de 90%, não houve diferença se comparado ao caso de referência. Já quando se considerou o nível crítico de 80%, a introdução do imposto começa a apresentar efeito sobre o nível de potência despachada. Neste caso, uma taxa de imposto de 10% faz com que as três unidades passem a operar abaixo do nível crítico, sem causar aumento mensurável de custo total de geração.

Para um nível crítico de 75%, a introdução de uma taxa de 10% fez com que as duas usinas de menor custo passassem a produzir a 75% de suas capacidades (sem pagar imposto) e a usina de maior custo passasse a produzir em um patamar abaixo de 50% de sua capacidade, implicando em um custo total 0,04% maior do que o

obtido sem a introdução do imposto. Tal comportamento qualitativo, de todas as usinas ajustarem as potências geradas de modo a evitar a aplicação do imposto, também se verificou no nível crítico de 70%, com custo total 0,17% maior, a uma taxa de imposto de 10%.

Já para níveis críticos de 60% e 50%, não há como atender a carga total sem pelo menos uma das usinas pagar imposto. Neste primeiro caso, uma taxa de 10% é suficiente para que duas geradora operem abaixo de 60%, e uma opere entre 80% e 90% de sua capacidade (custo total 0,58% maior). Já se a taxa subir para 40%, duas usinas operam exatamente a 60% de sua capacidade e a restante a 76,54%, causando um aumento de custo de 1,68%. No segundo caso, foi necessária uma taxa de 20% para que duas usinas se ajustassem a 50% de sua capacidade de geração (custo total 1,29% maior), sendo que o nível de operação da geradora restante ficou acima dos 90% de sua capacidade (pagando imposto).

No geral, podemos concluir que a introdução do imposto pigouviano atingiu o resultado esperado, que era fazer com que as usinas se ajustassem a níveis de geração menos poluentes, causando um aumento no custo total de geração que não ultrapassou 1,29%, dependendo do nível crítico adotado. Por fim, a técnica utilizada aqui também pode ser utilizada para analisar o caso em que o objetivo seja controlar a emissão de monóxido de carbono (CO) na atmosfera, o que ocorre mais fortemente quando a usina opera bem abaixo de sua capacidade máxima, quando o índice de combustão incompleta é mais elevado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NERY, P. F. Como Nossos Impostos Afetam o Meio Ambiente? Política Tributária e Sustentabilidade. Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/ Senado, Boletim do Legislativo nº 18, de 2014.
- (2) PINDYCK, R. S. and RUBINFELD, D. L. Microeconomia, Prentice Hall 2005.
- (3) SAADAT, H. Power system analysis, McGraw-Hill 1999.
- (4) SERAPIÃO, A. B. d. S. Fundamentos de Otimização por Inteligência de Enxames: uma visão geral. SBA: Controle & Automação, Sociedade Brasileira de Automática 20(3): 271-304.
- (5) COELHO, S. O. Avaliação das Emissões Atmosféricas das Principais Termelétricas Brasileiras a Gás Natural. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, 2013.
- (6) GÓMEZ-EXPÓSITO, A., CONEJO, A. and CAÑIZARES, C. Sistemas de Energia Elétrica: Análise e Operação, LTC 2011.
- (7) GALLEGO, A. G., MARTINS, G. and GALLO, W. L. Emissões de Nox em Turbinas a Gás: Mecanismos de Formação e Algumas Tecnologias de Redução. Revista de Ciência & Tecnologia 15: 13-22, de 2000.
- (8) MAHOR, A., PRASAD, V. and RANGNEKAR, S. Economic Dispatch Using Particle Swarm Optimization: a Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13(8): 2134-2141, of 2009.
- (9) KENNEDY, J., KENNEDY, J. F., EBERHART, R. C. and SHI, Y. Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann, of 2001.
- (10) ZIELINSKI, K., PETERS, D. and LAUR, R. Stopping Criteria for Single-Objective Optimization. Proceedings of the Third International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems, Citeseer of 2005.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Jefferson Oliveira dos Santos

Rio de Janeiro/RJ - 1985

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA Campus Alegrete. Atualmente é aluno Pesquisador e Colaborador do Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência - GESEP. Desenvolve pesquisa nas seguintes áreas: despacho econômico de carga, sistemas elétricos de potência e métodos de otimização.



João Plínio Juchem Neto

São Sebastião do Cai/RS - 1978

Bacharel em Ciências Econômicas (2004), mestre (2008) e doutor (2013) em Matemática Aplicada pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

Atualmente é professor adjunto na área de Matemática na Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA Campus Alegrete, atuando nos cursos de graduação em Engenharia e Ciência da Computação, e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Desenvolve pesquisa nas seguintes áreas: matemática aplicada à engenharia e à economia, métodos de otimização, sistemas elétricos de potência e despacho econômico de carga, dinâmica não-linear e modelos espaciais de crescimento econômico.



Eduardo Machado dos Santos

Santa Maria/RS - 1985

Bacharel (2009), mestre (2011) e doutor (2015) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria, UFSM.

Atualmente é professor adjunto na Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA Campus Alegrete, atuando no curso de graduação em Engenharia Elétrica e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Desenvolve pesquisa nas seguintes áreas: inteligência artificial e técnicas matemáticas e computacionais de processamento de sinais, aplicadas à proteção de sistemas elétricos de potência.