

SOLUÇÃO DESCENTRALIZADA PARA O PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO MULTIÁREA ATRAVÉS DE UM ALGORITMO EVOLUTIVO MULTIOBJETIVO

ELIZETE A. AMORIM*, JOSÉ R. S. MANTOVANI⁺, CARLOS R. M. ROCHA *

* Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, - UNIOESTE, Av. Tarquínio Joslin dos Santos, 1300 - Lot. Universitario das Americas, Foz do Iguaçu - PR, 85851-100, Brazil

+Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira-SP, 15385-000, Brasil

elizete.amorim@gmail.com, mant@dee.feis.unesp.br, rrocha41@hotmail.com

Abstract— In this work a decentralized solution of Multi-Area Optimal Power Flow (MOPF) problem is presented. The solution is determined by analyzing each area of an interconnected power system in an independent manner, seeking to preserve the operational autonomy of each area, thus contributing to increased competitiveness. The Optimal Power Flow problem is converted into equivalent and controlled sub problems through the control of apparent power flow between the interconnecting lines of the multi-area system. The MPOF problem considers the minimization of three conflicting objective functions, which are related to the cost of generation, emission of polluting gases and electrical losses. The equivalent sub problems are solved with a multi-objective evolutionary algorithm considering the Pareto theory. To circumvent the problems of infeasibility that may occur after the execution of genetic operators, inequality constraints are treated as objective functions that must be minimized. The results obtained demonstrate the efficiency and robustness of the implemented decentralized model and the solution technique used.

Keywords— Multiobjective Evolutionary Algorithm, Environmental/Economic Power Dispatch, Multi-Objective Metaheuristic, *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*, Multi-area Interconnected Power System, Optimal Power Flow.

Resumo— Neste trabalho é proposta uma solução descentralizada para o problema de Fluxo de Potência Ótimo multiárea (FPOM). A solução é determinada analisando cada área de um sistema de potência interconectado de maneira independente, buscando preservar a autonomia de cada área, contribuindo assim para o aumento da competitividade. Neste contexto, o problema de Fluxo de Potência Ótimo é convertido em subproblemas equivalentes e controlados através dos fluxos de potência aparente entre as linhas que interligam as áreas do sistema multiárea. O problema de FPOM considera a minimização de três funções objetivos conflitantes, que estão relacionadas com o custo da geração, emissão de gases poluentes e com as perdas elétricas. Os subproblemas equivalentes são resolvidos com a aplicação de um algoritmo evolutivo multiobjetivo desenvolvido considerando a teoria de Pareto. Para contornar os problemas de infactibilidades que podem ocorrer após a execução dos operadores genéticos, as restrições de desigualdades são tratadas como funções objetivos que devem ser minimizadas. Os resultados obtidos, e que são apresentados neste trabalho, demonstram a eficiência e robustez do modelo descentralizado implementado e da técnica de solução aplicada no processo de busca da solução do problema.

Palavras-chave— Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo, Despacho Econômico e ambiental, Meta-heurística multiobjetivo Sistemas de Multiáreas, Fluxo de potência ótimo.

1 Introdução

Na operação do sistema de energia a eficiência econômica pode ser obtida através do problema de despacho econômico (DE). O problema de DE é um caso particular do problema de FPO, que consiste em minimizar o custo total da geração, enquanto restrições de igualdade e de desigualdade são satisfeitas (Chowdhury e Rahman, 1990). Quando se tem por objetivo do problema, além da minimização do custo de geração a minimização de poluentes na atmosfera, trata-se de um problema de despacho econômico e ambiental (DEA) (Abido, 2006; Dhillon et al., 1998; Hazra e Sinha, 2011; Radosavljevic, 2016; Venkatesh e Kwang, 2008). Essa abordagem é importante porque apresenta um maior comprometimento ecológico.

Em um sistema de potência de grande porte, geralmente, os geradores estão distribuídos em várias áreas conectadas fisicamente por linhas de interconexão e frequentemente operadas por operadores independentes do sistema (OISs). Um OIS possui todas as informações de sua área de controle, mas não pode ter informações de outras áreas, como por exemplo, as condições de operação.

O despacho econômico multiárea (DEM) é uma extensão do problema de DE e consiste em minimizar o custo total de combustível em todas as áreas enquanto satisfaz as equações de balanço de potências ativa e reativa, os limites de geração e os limites dos fluxos de potência nas linhas de interconexão entre as áreas ou subsistemas.

O problema de FPOM de sistemas interconectados de grande porte pode ser decomposto em subproblemas que são resolvidos de maneira coordenada. Desta forma, o controle dos subsistemas pode ser compartilhado pelos centros de controles das empre-

sas que fazem parte do sistema interligado, e cada uma dessas empresas é responsável pela operação de sua área ou subsistema. A coordenação é necessária porque as configurações escolhidas por uma empresa possivelmente influenciam o estado de todo o sistema e, portanto, das áreas.

Diversas técnicas de decomposição têm sido propostas para a decomposição do problema de FPOM. Os autores do trabalho apresentado em (Zhao e Abur, 2004) propõem um método de decomposição baseado nos fatores de distribuição de transferência de potência para determinar a máxima transferência de potência entre as áreas e resolver o problema de FPOM linear de forma descentralizada. Desta forma, a máxima transferência de potência do sistema integrado é calculada, mas as áreas não compartilham suas informações operacionais.

Entre os métodos de decomposição dual, a abordagem mais clássica é baseada na técnica de relaxação do lagrangiano (Conejo e Aguado, 1998; Aguado et al. 1999; Nogales et al. 1999). Outras abordagens para a decomposição do problema de FPOM são baseadas no princípio do problema auxiliar (PPA). O PPA permite determinar a solução do problema original através da solução de uma sequência de problemas auxiliares (Cohen, 1980). Os autores dos trabalhos apresentados em (Kim e Baldick, 1997) e (Baldick et al., 1999) utilizam o PPA com o objetivo de paralelizar a solução do problema de FPOM. Para a solução do problema de FPOM descentralizado, geralmente têm-se utilizado as técnicas de programação clássicas, tais como, o método de pontos interiores (Lu, et al., 2018; Aguado et al., 1999) e programação quadrática (Bakirtzis e Biska, 2003).

Neste trabalho, o problema de DEA considerando múltiplas áreas interconectadas é resolvido de forma descentralizada. Para a solução descentralizada, o problema é dividido em subproblemas associados a cada área. Os subproblemas menores são resolvidos de forma coordenada, utilizando os dados de rede de suas áreas e informações das barras de fronteiras associadas às linhas de interconexões.

Para solução do problema descentralizado é utilizada uma adaptação do algoritmo NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*), proposto em (Deb et al., 2002). No entanto, quando o problema de otimização é restrito, os operadores originais dos algoritmos evolutivos (AEs) não garantem a obtenção de soluções viáveis. De acordo com (Lenive, 1997) a solução de problemas desta classe limita o uso dos AEs em sua forma original, principalmente pelo fato de não existir a garantia de que a factibilidade seja mantida após a recombinação ou a mutação.

Para contornar este problema, considera-se que as restrições de desigualdade violadas sejam tratadas como funções objetivo do problema que devem ser minimizadas (Amorim et al., 2010), atendendo as restrições físicas e operacionais do problema sem comprometer a qualidade das soluções encontradas.

A eficiência e a robustez da metodologia e da técnica de solução propostas são demonstradas através de resultados obtidos com o sistema teste IEEE-354 barras.

2 Formulação do Problema

O problema de FPOM proposto consiste no despacho econômico e ambiental de energia elétrica, isto é, consiste em minimizar duas funções objetivo conflitantes, custo de combustível e a emissão de gases poluentes na atmosfera, enquanto satisfaz o conjunto de restrições físicas e operacionais. No entanto, a otimização da potência reativa do sistema de potência influencia diretamente a estabilidade do sistema e na qualidade da energia, requerendo a minimização das perdas de potência ativa do sistema. Desta forma, é possível melhorar o desempenho do sistema através do despacho de potência ativa.

2.1 Modelo Centralizado

A. Funções Objetivos

1) **Minimização do custo da geração:** O custo total de combustível incluindo o efeito de válvula é descrito matematicamente através da equação (1):

$$F_1 = \sum_{i=1}^{N_G} \left[a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + \left| e_i \times \sin \left(f_i \times (P_{Gi}^{min} - P_{Gi}) \right) \right| \right] \quad (1)$$

sendo F_1 o custo total de combustível da i -ésima unidade geradora; P_{Gi} a potência ativa gerada pela i -ésima unidade; a_i, b_i, c_i os coeficientes de custos do gerador térmico i ; e_i e f_i os coeficientes de custo para o efeito do ponto de válvula; N_G o número total de geradores térmicos.

2) **Minimização das emissões:** A geração de energia a partir de fontes de energia térmicas convencionais emite gases poluentes ao meio ambiente. Quanto maior a potência gerada através de geradores térmicos maior será a emissão de Óxidos de Enxofre (SO_x) e Óxidos de Nitrogênio (NO_x). A equação 2 permite quantificar a emissão de poluentes em toneladas por hora (t/h):

$$F_2 = \sum_{i=1}^{N_G} \left[10^{-2} \times (\alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2) + \omega_i e^{(\mu_i P_{Gi})} \right] \quad (2)$$

sendo $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \omega_i$ e μ_i os coeficientes de todas as emissões correspondente ao i -ésimo gerador térmico.

3) **Minimização das perdas de potência ativa:** As perdas de potência ativa na rede de transmissão são calculadas de acordo com (3):

$$F_3 = \sum_{i=1}^{nl} \sum_{j \neq i}^{nl} G_{ij} \left(V_i^2 + V_j^2 - 2|V_i||V_j|\cos(\delta_{ij}) \right) \quad (3)$$

sendo $\delta_{ij} = \delta_j - \delta_i$ a diferença angular entre as barras i e j ; G_{ij} a condutância da linha conectada entre as barras i e j ; V_i e V_j : magnitude das tensões nas barras i e j .

B. Restrições de Igualdade

As restrições de igualdade são as equações não lineares que são resolvidas através do método de Newton Raphson (Monticelli, 1983) para gerar uma solução para o problema de fluxo de carga.

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j [G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\delta_{ij})] = 0 \quad (4)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j [G_{ij} \sin(\delta_{ij}) - B_{ij} \cos(\delta_{ij})] = 0 \quad (5)$$

Sendo: NB - Número total de barras; P_{Di} e Q_{Di} : Demandas de potências ativa e reativa da barra i , respectivamente; P_{Gi} e Q_{Gi} : Potências ativa e reativa geradas para a barra i , respectivamente; e, B_{ij} : Susceptância da linha de transmissão ou transformador entre as barras i e j .

C. Restrições de Desigualdade

Estas restrições representam os limites operacionais dos equipamentos, componentes do sistema de energia e restrições de segurança em linhas e barras de cargas.

1) Restrições Físicas e Operacionais:

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \quad i=1, \dots, N_G \quad (6)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, \quad i=1, \dots, N_G \quad (7)$$

$$V_{Gi}^{\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max}, \quad i=1, \dots, N_G \quad (8)$$

$$T_i \in D_{T_i}, \quad i=1, \dots, N_T \quad (9)$$

$$B_i \in D_{B_i}, \quad i=1, \dots, N_{sh} \quad (10)$$

2) Restrições de segurança:

$$V_{lp}^{\min} \leq V_{lp} \leq V_{lp}^{\max}, \quad p=1, \dots, NL \quad (11)$$

$$S_{lq} \leq S_{lq}^{\max}, \quad q=1, \dots, NL \quad (12)$$

As equações (6) - (7) representam os limites da geração de potências ativa (P_{Gi}) e reativa (Q_{Gi}), respectivamente. As equações (8) e (11) representam o limite de tensão nas barras de geração (V_{Gi}) e de carga (V_{lp}). As equações (9) e (10) representam os valores discretos para os *taps* dos transformadores (T_i) e bancos de capacitores/reatores *shunts* (B_i). D_{T_i} e D_{B_i} são os conjuntos de valores discretos para as variáveis T_i e B_i , respectivamente. A equação (12) representa os limites da capacidade de potência aparente das linhas de transmissão (S_{lq}). NL ,

N_T , N_{sh} e N_L são respectivamente, os números de barras de carga, transformadores com controle automático dos *taps*, barras com bancos de capacitores/reatores *shunts* e linhas de transmissão.

Dentre as restrições de desigualdade, a potência ativa gerada (exceto para a barra de referência) e as tensões nas barras de geração e de referência são as variáveis de controle do problema. Para cada uma dessas variáveis, o algoritmo de otimização seleciona um valor factível que deve estar entre os limites inferior e superior preestabelecidos. Os limites de potência ativa gerada na barra de referência, potência reativa nas demais barra de geração, tensões nas barras de carga e de fluxo nas linhas necessitam de atenção especial. O tratamento das restrições de desigualdade para estas variáveis é discutido na seção 3.

2.2 Modelo Descentralizado

Na Fig. 1 ilustra-se um sistema de potência com duas áreas interconectadas para ilustrar o princípio da decomposição. As barras i e j são denominadas barras de fronteiras e as linhas entre estas barras são as linhas de interconexão (Amorim, 2006).

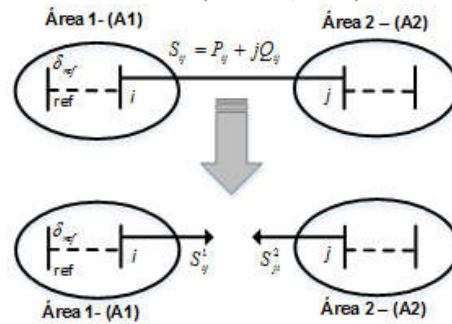


Figura 1: Princípio da Decomposição.

O FPO regional é obtido convertendo-se o problema de FPO original, Equações (1)-(12), em um problema equivalente através da adição de $2 \cdot N_{ties}$ novas variáveis, isto é, para cada linha de interconexão ij , $i \in A1$ e $j \in A2$ adicionam-se duas novas variáveis S_{ij}^1 e S_{ij}^2 representando os fluxos da linha de interligação da área A1 para a área A2 e da área A2 para a área A1, como mostrado na Fig. 1. N_{ties} é o número de linhas de interligações. O problema equivalente para a área a , $a \in \{A_1, A_2\}$ é dado por:

$$\text{Min } F_i^a(\mathbf{x}^a, \mathbf{u}^a), \quad i=1, \dots, N_{obj} \quad (13)$$

Sujeito a:

$$g(\mathbf{x}^a, \mathbf{u}^a) = 0 \quad (14)$$

$$h(\mathbf{x}^a, \mathbf{u}^a) \leq 0 \quad (15)$$

$$\mathbf{x}_{\min}^a \leq \mathbf{x}^a \leq \mathbf{x}_{\max}^a \quad (16)$$

$$\mathbf{u}_{C\min}^a \leq \mathbf{u}_C^a \leq \mathbf{u}_{C\max}^a \quad (17)$$

$$\mathbf{u}_D^a \in D^a \quad (18)$$

$$S_{Fij} - S_{Fji} = 0 \quad i \in a, j \in Ka \quad (19)$$

no qual $\mathbf{x}^a$ é vetor das variáveis de estado da área a ; $\mathbf{u}^a = [\mathbf{u}_C^a \ \mathbf{u}_D^a]$ é o vetor que contém as variáveis de controle contínuas da área a ; $(\mathbf{u}_C^a)$ e as variáveis de controle discretas $(\mathbf{u}_D^a)$ da área a ; D^a em (18) representa a região de factibilidade das variáveis de controle discretas da área a ; $F_i^a(\mathbf{x}^a, \mathbf{u}^a)$ representa as funções objetivos da área a ; $g(\mathbf{x}^a, \mathbf{u}^a)$ em (14) representa as equações de balanço de potências ativa e reativa na barra i da área a ; a equação (15) representa o conjunto de restrições de desigualdade; $\mathbf{x}_{\min}^a$ e $\mathbf{x}_{\max}^a$ em (16) são os vetores dos limites inferiores e superiores de $\mathbf{x}^a$, respectivamente; $\mathbf{u}_{C\min}^a$ e $\mathbf{u}_{C\max}^a$ em (16) são os vetores dos limites inferiores e superiores de $\mathbf{u}_C^a$, respectivamente; A equação (19) representa a condição de que as variáveis das barras de fronteira das duas áreas tenham os mesmos valores. Esta característica permite resolver o problema de despacho econômico e ambiental para uma determinada área sem interferir nas variáveis de controle das áreas que não estão sendo otimizadas. $S_{Fij} = P_{Fij} + jQ_{Fij}$ em (19) representa o fluxo potência aparente entre as áreas e Ka o conjunto da barras de fronteira pertencente a área vizinhas da área a .

A principal característica do método é que, globalmente, apenas exige a troca de informações das variáveis de fronteira, já que os intercâmbios entre as áreas são controlados através dos fluxos de potências aparente das linhas de interligações. Além disso, não necessita alterações no modelo original da rede. A área que contém a barra de folga do sistema de potência é denominada área de referência. Para resolver o problema de FPO multiárea para as demais áreas do sistema de potência faz-se necessário determinar uma barra de geração que deverá exercer a função de uma barra de folga na área que está sendo otimizada.

3 Análise das Restrições de Desigualdade

A presença de restrições de igualdade e desigualdade introduz uma complexidade adicional para resolver problemas de otimização através dos AEs porque dividi o espaço de soluções em duas classes: soluções factíveis (que atendem a todas as restrições simultaneamente) e soluções infactíveis (que violam uma ou mais restrições). Para atender as restrições físicas e operacionais, sem comprometer a qualidade das soluções encontradas propõe-se considerar conjunto de restrições de desigualdade como funções objetivos do problema original. Desta forma, além de minimizar as funções objetivos do modelo satisfazendo as restrições de igualdade, as infactibilidades nas restrições de desigualdade também são minimizadas. As funções objetivos referente as restrições de

desigualdade violadas para cada área a , são dadas por:

$$\text{Min } F_4^a = \Delta P_{g_{ref}}^a \quad (20)$$

$$\text{Min } F_5^a = \sum_{i=1}^{NG} \Delta Q_{Gi} \quad (21)$$

$$\text{Min } F_6^a = \sum_{i=1}^{NB} \Delta V_i \quad (22)$$

$$\text{Min } F_7^a = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i,j \in a}}^{NB} \Delta S_{ij} \quad (23)$$

$$\text{Min } F_8 = \sum_{i,j=1}^{NF} \Delta S_{Fij}, \quad i \in a, j \in Ka \quad (24)$$

Sendo:

- $\Delta P_{g_{ref}}^a = \begin{cases} P_{g_{ref}} - P_{g_{ref}}^{\max}, & P_{g_{ref}} > P_{g_{ref}}^{\max} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $P_{g_{ref}}$ e $P_{g_{ref}}^{\max}$ a potência ativa gerada e a capacidade máxima de geração na barra de referência, respectivamente.
- $\Delta Q_{Gi} = \begin{cases} Q_{Gi}^{\min} - Q_{Gi}, & Q_{Gi} < Q_{Gi}^{\min} \\ Q_{Gi} - Q_{Gi}^{\max}, & Q_{Gi} > Q_{Gi}^{\max} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $\Delta V_i = \begin{cases} V_i^{\min} - V_i, & V_i < V_i^{\min} \\ V_i - V_i^{\max}, & V_i > V_i^{\max} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $\Delta S_{ij} = \begin{cases} S_{ij} - S_{ij}^{\max}, & S_{ij} > S_{ij}^{\max} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- NF é o conjunto das barras de fronteiras.
- $\Delta S_{Fij} = \begin{cases} |S_{Fij} - S_{Fji}|, & |S_{Fij} - S_{Fji}| \neq 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

4 Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo (AEMO)

A solução dos problemas regionais de FPOM é baseada no algoritmo *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II). O NSGA-II (Deb, et al., 2002) é um algoritmo elitista que permite explorar apenas um subconjunto do espaço de busca no âmbito da otimização combinatória multiobjetivo, para determinar uma fronteira de Pareto mais próxima da ótima. Este algoritmo é amplamente utilizado em problemas restritos e complexos com variáveis reais e inteiras.

O AEMO utilizado para a solução do problema de FPOM utiliza os operadores de seleção por torneio, recombinação e mutação para criar novas populações capazes de gerar soluções melhores a cada iteração. Para obter um melhor desempenho o algoritmo implementado combina algumas estratégias, tais como codificação das variáveis de controle em base real, desacoplamento implícito das variáveis e

taxas de recombinação e mutação adaptativas, escolha da melhor solução compromisso baseada na teoria dos conjuntos *fuzzy*. Estas estratégias são detalhadas a seguir:

4.1 População inicial

Os indivíduos (cromossomos) que compõem a população são formados por quatro subconjuntos de variáveis de controle do problema (potência ativa gerada por todos os geradores (exceto para a barra de referência), tensões nas barras com geradores conectados (incluindo a barra de referência), *taps* dos transformadores e banco de capacitores/reatores *shunt*).

A potência ativa gerada e as tensões são tratadas como variáveis reais e contínuas. Assim, os seus valores são gerados de forma aleatoriamente controlada e devem estar dentro dos limites mínimo e máximo do vetor de decisão. O j -ésimo componente do i -ésimo vetor de decisão é dado por:

$$x_{ij}^0 = x_{\min,j} + rand_{ij}[0,1](x_{\max,j} - x_{\min,j}) \quad (25)$$

na qual $rand_{ij}[0,1]$ é um número aleatório uniformemente distribuídos entre 0 e 1. O sobrescrito '0' representa a inicialização. Se N_p é o tamanho da população e d a dimensão do vetor de decisão das variáveis contínuas, então $i = 1, \dots, N_p$ e $j = (2 \cdot NG) + 1$.

Os *taps* dos transformadores e bancos de capacitores/reatores *shunts* são representados por valores discretos, de acordo com (26).

$$x_{Dij}^0 = x_{D\min,j} + n_i (\Delta x_{Dj}) \quad (26)$$

sendo $i = 1, \dots, N_p$ e j a dimensão de cada subconjunto de variáveis discretas. $x_{D\min,j}$ e $x_{D\max}$ são os limites inferior e superior das variáveis discretas, respectivamente. Δx_D representa o tamanho do passo de discretização e n_j um número pseudoaleatório tal que $0 \leq n_j \leq K_j$ e:

$$K_j = \text{int} \left(\frac{x_{D\max,j} - x_{D\min,j}}{\Delta x_{Dj}} \right) \quad (27)$$

4.3 Desacoplamento implícito das variáveis de controle

As violações das restrições de desigualdades são tratadas como funções objetivo do problema e, ao atualizar um determinado conjunto de variáveis de controle através de recombinação ou mutação, um objetivo é melhorado em detrimento de outros. Desta forma, após sortear os indivíduos para executar a recombinação ou mutação, deve-se verificar qual dos objetivos está sendo contemplado e efetuar a recombinação ou mutação considerando apenas o(s) subconjunto(s) de variáveis de controle que interferem diretamente neste objetivo.

4.4 Taxas de Recombinação e Mutação Adaptativas

Para preservar a diversidade da população em algoritmos evolutivos multiobjetivos, geralmente, utiliza-se a técnica de *niching* (Mathfound, 2000) que consiste na divisão da população em espécies para reduzir a competição por recursos e criar subpopulações estáveis, cada uma delas concentrada em um nicho do espaço de busca. O esquema de *niching* utiliza um mecanismo de *sharing* que trabalha alterando a função de avaliação de cada elemento da população de acordo com o número de indivíduos semelhantes a ele na população (Mathfound, 2000). Porém, ao contrário do esperado, seus resultados não melhoraram significativamente a diversidade das soluções não-dominadas encontradas. Neste trabalho, para preservar a diversidade na população, além do mecanismo de *sharing* utilizam-se as taxas de recombinação (Pr) e mutação (Pm) atualizadas de forma adaptativa, de acordo com (28):

$$\begin{aligned} Pr &= \left[Pr^{\max} - ig \cdot (Pr^{\max} - Pr^{\min}) \right] / nmax \\ Pm &= \left[Pm^{\min} + ig \cdot (Pm^{\max} - Pm^{\min}) \right] / nmax \end{aligned} \quad (28)$$

sendo $Pm^{\min}$, $Pm^{\max}$, $Pr^{\min}$ e $Pr^{\max}$ os limites inferior e superior das taxas de mutação e recombinação.

4.5 Melhor solução Compromisso

Para determinar uma solução particular, após a convergência do AEMO aplica-se um mecanismo de decisão, baseado na teoria dos conjuntos *fuzzy* aos indivíduos pertencentes a primeira fronteira de Pareto da última iteração. Os conjuntos *fuzzy* são definidos através de funções de pertinência μ_i que representam o grau de pertinência de uma solução no conjunto *fuzzy* (Dhillon et al., 2002). Os valores das funções de pertinência indicam o grau de satisfação das funções objetivos do problema. A função de pertinência utilizada é definida por (29).

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & f_i(x) \leq f_i^{\min}(x) \\ 0 & f_i(x) \geq f_i^{\max}(x) \\ \frac{f_i^{\max}(x) - f_i(x)}{f_i^{\max}(x) - f_i^{\min}(x)} & f_i^{\min}(x) \leq f_i(x) \leq f_i^{\max}(x) \end{cases} \quad (29)$$

$i = 1, \dots, N_{obj}$

sendo $f_i^{\min}(x)$ e $f_i^{\max}(x)$ são os valores mínimos e máximos da i -ésima função objetivo.

Seja N_{dom} o número de soluções não-dominadas da primeira fronteira de Pareto, então, para cada solução não-dominada k ($k \in N_{dom}$) a função de pertinência é normalizada como:

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} \mu_i^k}{\sum_{k=1}^{N_{dom}} \sum_{i=1}^{N_{obj}} \mu_i^k}$$

A melhor solução compromisso é dada por $\gamma = \max \{\mu^k\}$, $k=1, \dots, N_{dom}$.

5 Resultados e Discussões

A implementação computacional da metodologia proposta foi testada no sistema IEEE-354 barras (Aguado e Quintana, 2001). Este sistema é composto por 3 áreas interconectadas e os dados de barras, linhas e geradores são obtidos triplicando o sistema teste IEEE-118 barras como apresentado no *software* MATPOWER (Zimmerman et al., 2011). Os detalhes dos coeficientes de custo e de emissão para os geradores são encontrados em (Hazra e Sinha, 2010).

Em todas as simulações, foram executadas 1000 iterações com uma população com 800 indivíduos, cada caso foi executado 5 vezes e o melhor resultado encontrado é apresentado. Os limites inferiores e superiores das taxas de recombinação e mutação são:

$$Pm^{min} = 0,01; Pm^{max} = 0,8; Pr^{min} = 0,1; Pr^{max} = 0,9.$$

Na modelagem das variáveis de controle discretas o tamanho do passo entre dois valores consecutivos são 0,01 p.u. para os transformadores com controle automático de *taps* e 0,125 p.u. para os capacitores/reatores *shunts*.

Os limites mínimo e máximo para os transformadores com controle automático de *taps* são 0,90 p.u. e 1,10 p.u. Para os capacitores/reatores *shunts* os limites mínimo e máximo são dados por:

$$\begin{cases} Se B_i < 0 & \text{então } B_i^{min} = B_i \text{ e } B_i^{max} = 0 \\ Se B_i > 0 & \text{então } B_i^{max} = B_i \text{ e } B_i^{min} = 0 \end{cases}, i=1, \dots, N_{sh}$$

Nas Figuras 2 a 5 ilustram-se os resultados das simulações. Nestas figuras tem-se A_i ($i=1, \dots, 3$) representa a i -ésima área do sistema, FC o fluxo de carga convencional e FPO- A_i o subproblema de despacho econômico e ambiental da área i que está sendo analisada. Os resultados de simulações com o FC são apresentados para fins de comparação.

Na Figura 2 apresentam-se os custos total de combustível consumido pelos geradores para geração da potência ativa para as três áreas interconectadas, quando apenas uma delas é otimizada e os custos total de combustível que seria necessário para a solução utilizada na simulação do FC.

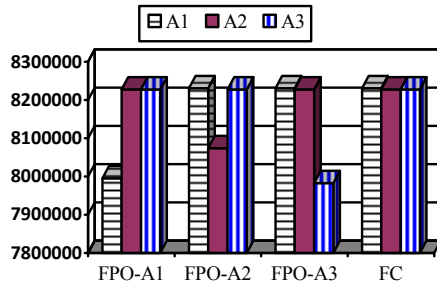


Figura 2: Custos da Geração (R\$/MWh)

Analisando-se a Figura 2 verifica-se que a metodologia proposta foi capaz de reduzir os custos total de combustível em todas as áreas que foram otimizadas. Além disso, os custos totais de combustíveis das áreas vizinhas permaneceram inalterados quando comparados com os resultados do FC. Em todos os casos, ao utilizar o modelo de despacho econômico regional, houve uma redução de 2% a 3% nos custos total de combustível quando comparado com a solução fornecida pelo FC.

Na Figura 3 apresentam-se as quantidades de emissão de gases poluentes obtidas através da solução de problema de despacho econômico e ambiental regional e do FC convencional.

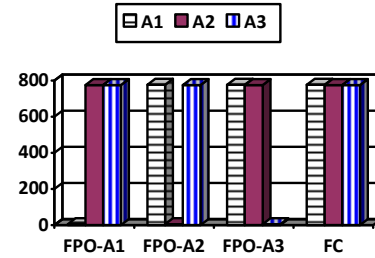


Figura 3: Emissão (ton/h)

Analisando estes resultados é possível verificar que a metodologia proposta foi capaz de reduzir a emissão de gases poluentes na área simulada sem comprometer as demais áreas interconectadas. Em todos os casos, a redução na emissão de gases poluentes, na área otimizada, é de aproximadamente 98%. Este resultado mostra que a metodologia é capaz de atender as necessidades do setor de energia elétrica que tem sofrido enorme pressão para reduzir as emissões de gases poluentes devido ao aquecimento global. Considerando que as emissões dos geradores continuam as mesmas os resultados obtidos mostram que é possível reduzir as emissões de poluentes apenas fazendo o redespacho dos geradores existentes no sistema.

Os resultados numéricos para as perdas de potência ativa são apresentados na Figura 4 evidenciando o potencial da metodologia e da técnica de solução na redução das perdas. Em todas as áreas otimizadas houve uma redução de aproximadamente 80%. Novamente é possível verificar que o redespacho das unidades geradoras pode levar à redução significativa das perdas no sistema de transmissão.

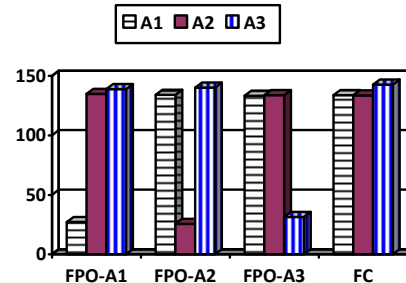


Figura 4: Perdas (MW/h)

Na Fig. 5 pode-se observar os resultados numéricos referente às violações na geração de potência reativa. Analisando-se os resultados para o FC conclui-se que este sistema necessita de suporte de potência reativa, mas independente da característica deste sistema teste o modelo de despacho econômico e ambiental multiárea foi capaz de reduzir as infactibilidades na geração de potência reativa em 100% sem comprometer o estado de operação das áreas vizinhas.

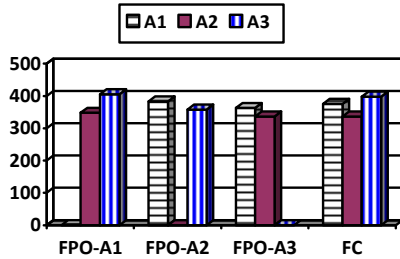


Figura 5: Violações na Geração de Potencia Reativa (MVar)

As restrições referentes às magnitudes das tensões em todas as barras, fluxo de potência aparente nas linhas de transmissões e à capacidade de geração de potência ativa foram devidamente atendidas em todas as simulações realizadas.

Nas Tabelas 1 e 2 apresentam-se os valores das variáveis de controle associadas aos transformadores com controle automático de *taps* e bancos de capacitores/reatores *shunts*, respectivamente.

Tabela 1. *Taps* dos transformadores (*p.u.*)

Barras		FC	FPO Multiárea		
De	para		A1	A2	A3
38	37	1,11	1,02	0,97	0,99
63	59	1,11	1,02	1,00	0,93
64	61	0,91	1,00	1,01	1,00
65	66	1,01	1,00	0,94	0,97
68	69	0,91	1,09	1,02	1,03
81	80	1,11	1,07	1,01	1,03
8	5	1,07	1,01	1,03	1,02
26	25	1,11	1,00	1,00	0,94
30	17	1,11	1,08	1,10	0,93

Tabela 2. Capacitores/reatores *shunts* (*p.u.*)

Barras	FC	FPO Multiárea		
		A1	A2	A3
5	-0,400	-0,375	-0,400	-0,125
34	0,140	0,125	0,000	0,125
37	-0,250	-0,125	-0,250	-0,250
44	0,100	0,100	0,100	0,100
45	0,100	0,100	0,100	0,100
46	0,100	0,100	0,100	0,100
48	0,150	0,000	0,000	0,150
74	0,120	0,120	0,120	0,120
79	0,200	0,200	0,200	0,200
82	0,200	0,200	0,200	0,200
83	0,100	0,100	0,100	0,100
105	0,200	0,000	0,200	0,200
107	0,060	0,000	0,060	0,000
110	0,060	0,060	0,000	0,060

O ajuste ótimo destes equipamentos contribui para a compensação de potência reativa e minimização das perdas do sistema de potência.

Conforme apresentado na equação (19) a condição necessária para que uma determinada área seja otimizada sem interferir nas demais é que as injeções líquidas de potências ativa e reativa que entra e que sai da área otimizada sejam iguais. Para validar o modelo de decomposição proposto, na Tabela 3, apresentam-se as injeções de potências ativa e reativa entre as áreas interconectadas. Estes resultados referem-se às simulações com a área A2, mas em todas as simulações a soma das injeções líquidas de potências ativa e reativa tenderam a zero.

Tabela 3. Injeções líquidas de potências ativa e reativa entre as áreas do sistema de potência multiárea

<i>i</i>	<i>j</i>	Potência ativa (<i>MW</i>)		Potência Reativa (<i>MVar</i>)	
		P_{Fij}	P_{Fji}	Q_{Fij}	Q_{Fji}
1	2	-21,951	21,951	-19,561	19,561
1	3	25,468	-25,468	-54,046	54,046
2	3	-20,827	20,827	-10,548	10,548

Os resultados apresentados na Tabela 4 foram obtidos simulando o problema de FPOM através dos modelos centralizado (FPOMC) e descentralizado (FPOMD). No modelo descentralizado os subproblemas regionais foram individualmente analisados e após a convergência do algoritmo os valores obtidos para as variáveis de controle são atualizados e uma nova área é escolhida para ser otimizada. O processo é repetido até que todas as áreas do sistema de potência interconectado sejam analisadas. Nesta tabela F1, F2, F3 e F5 são as funções referentes ao custo total de combustível, emissão de gases poluentes, perdas de potência ativa na rede de transmissão e infactibilidade na potência reativa gerada.

Tabela 4. Melhor solução compromisso para FPOM centralizado e para o FPOM descentralizado

Modelo	Áreas	F1	F2	F3	F5
FPOM C	A1	8112399,65	4,34	33,39	10,99
	A2	7979268,63	5,18	27,69	68,49
	A3	8055131,86	4,87	34,70	26,41
FPOM D	A1	8107437,58	3,94	21,73	13,61
	A2	8148049,15	4,26	29,71	10,47
	A3	7939642,19	4,82	28,88	15,88

Comparando os resultados obtidos para os modelos de FPOMC e FPOMD verifica-se que os resultados são similares.

4 Conclusão

Neste trabalho o problema de despacho econômico e ambiental foi abordado como um problema de otimização multiobjetivo e resolvido através de um algoritmo evolutivo baseado na teoria de Pareto. O problema foi decomposto em subproblemas regionais e controlados através dos fluxos de potências aparen-

te nas linhas de interconexões. Os resultados obtidos com o sistema teste IEEE-354 barras mostram a viabilidade do modelo e da técnica de solução. Em todos os casos analisados o algoritmo implementado convergiu para soluções otimizadas de boa qualidade e demonstrou-se robusto para resolver os problemas de cada área. Além disso, os resultados computacionais mostram que o AEMO apresentou um excelente desempenho em termos de qualidade de soluções e tempo de execução quando comparado com a solução do FPO multiárea original, isto é, antes da decomposição em subproblemas regionais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PNPd/CAPES (Processo 1752551) pelo financiamento deste projeto de pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Abido, M. A. (2006). Multiobjective evolutionary algorithms for electric power dispatch problem, . *IEEE Trans. On Evolutionary Computation*, vol. 16, no. 3, pp.315-32.9.
- Aguado, J. A. and Quintana, V. H. (2001). "Inter-utilities power-exchange coordination: A market-oriented approach. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, pp.513-519.
- Aguado, J. A.; Quintana, V. H. and Conejo, A. J. (1999). Optimal Power Flows of Interconnected Power Systems. In *Proc. IEEE PES Summer Meeting*, vol. 2, pp. 814-819.
- Amorim, E. A. (2006). Fluxo de potência ótimo em sistemas multimercados através de um algoritmo evolutivo multiobjetivo. 159f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Disponível em <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/100376>. Acesso em: 28 Fev. 2018.
- Amorim, E. A.; Hashimoto, S. H. M.; Lima, F. G. and Mantovani, J. R. S. (2010). Multi Objective Evolutionary Algorithm Applied to the Optimal Power Flow Problem. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 8, no. 3, pp. 236-244.
- Bakirtzis, A. and Biskas, P. (2003). A decentralized solution to the DC-OPF of interconnected power systems. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 1007–1013.
- Baldick, R.; Kim, B. H., Chase, C. and Luo, Y. (1999). A fast distributed implementation of optimal power flow. . *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 3, pp.858-863.
- Chowdhury, B. H. and Rahman, S. (1990). A review of recent advances in economic dispatch. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 5, no. 4, pp.1248-1259.
- Cohen, G. (1980). Auxiliary problem principle and decomposition of optimization problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 32, no. 3, pp. 277–305.
- Conejo, A. J. and Aguado, J. A. (1998). Multi-area Decentralized DC Optimal Power Flow. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 1272-1278.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197, 2002.
- Dhillon, J. S., Parti, S. C. and Kothari, D. P. (1993) Stochastic economic emission load dispatch. *Electric Power Syst. Res.*, vol. 26, pp. 186–197, 1993.
- Dhillon, J. S., Parti, S. C. and Kothari, D. P. (2002) Fuzzy decision making in stochastic multiobjective short-term hydrothermal scheduling. *IEE Proc.-C*, 149, vol.2, pp. 191–200.
- Hazra, J. and Sinha, A. K. (2010). A multi-objective optimal power flow using particle swarm optimization. *Euro. Trans. Electr. Power*.
- Kim, B. H. and Baldick, R. (1997). Coarse-Grained Distributed Optimal Power Flow. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 932-939.
- Lenive, D. (1997). Genetic algorithms: a practitioner's view. *Journal on Computing*, vol. 9, no. 3, pp. 256-259.
- Lu, W.; Liu, M.; Lin, S. and Li, L. (2018). Fully Decentralized Optimal Power Flow of Multi-Area Interconnected Power Systems Based on Distributed Interior Point Method. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 901-910.
- Mathfound, S. W. (2000). "Niching methods, In: Back, T.; Fogel, D.B.; Michalewicz (Eds.)," *Evolutionary Computation* 2, pp 87-92, Institute of Physics Publishing.
- Monticelli, A. (1983). Fluxo de carga em redes de energia elétrica. Edgard Blucher, Rio de Janeiro.
- Nogales, F. J.; Pietro, F. J. and Conejo, A. J. (1999). Multi-area AC Optimal Power Flow: A New decomposition approach. *Proc. Power Syst. Comput. Conf.*, Trondheim, Norway, pp. 1201-1206.
- Radosavljevic, J. (2016). A Solution to the Economic and Emission Dispatch using Hybrid PSOGSA Algorithm. *Applied Artificial Intelligence*, vol. 30, no. 5, pp. 445-474.
- Venkatesh, P. and Lee, K.Y. (2008). Multiobjective Evolutionary Programming for Economic Dispatch Problem. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*.
- Zhao, L. and Abur, A. (2004). Two-layer Multi-Area Total Transfer Capability Computation. *IREP Symposium*, Cortina D'Ampezzo, Italy, August 23-27.
- Zimmerman, R.D., Murillo-Sánchez, C.E., Thomas, R.J.. Matpower (Available at.) [http:// www.pserc.cornell.edu/matpower](http://www.pserc.cornell.edu/matpower).