



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

GAT - 04
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO IV
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA- GAT**

FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO DESCENTRALIZADO ATRAVÉS DE ALGORITMOS EVOLUTIVOS (AEs)

Elizete de Andrade Amorim

José Roberto Sanches Mantovani *

**Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”**

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se a formulação do problema de fluxo de potência ótimo para sistemas multiárea. A técnica de solução proposta é um algoritmo evolutivo multiobjetivo. A função objetivo consiste em minimizar os custos de geração de potência ativa e obter os ajustes ótimos dos controles das fontes reativas. As restrições consideradas são: a capacidade das linhas de transmissão, controle e despacho de potências ativa e reativa, análise do intercâmbio de potências entre as áreas, capacidade dos geradores e limites da magnitude de tensão. São apresentados e analisados os resultados numéricos obtidos com as simulações dos sistemas teste IEEE-118 e RTS-96.

PALAVRAS-CHAVE

Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo, Controle Corretivo de Tensão, Despacho Ótimo de Potências Ativa e Reativa, Fluxo de Potência Ótimo Descentralizado.

1.0 - INTRODUÇÃO

No modelo reestruturado do setor elétrico brasileiro os serviços de geração, transmissão e distribuição são oferecidos por empresas distintas, na maioria dos estados. Estas mudanças se refletem nos aspectos técnicos e econômicos, fazendo com que haja a necessidade de uma análise criteriosa dos investimentos em novos equipamentos e reforços da capacidade do sistema de transmissão. A desregulamentação do setor elétrico afeta sensivelmente a operação dos sistemas de potências (1)-(2) e a utilização ótima dos recursos existentes passou a ser um problema fundamental. Para isso são necessárias ferramentas de otimização robustas, capazes de atender estes novos requisitos, em especial, aqueles que influenciam na qualidade dos serviços oferecidos e nos aspectos econômicos. O fluxo de potência ótimo com restrições de segurança (*Security Constrained Optimal Power Flow – SCOPF*) é capaz de ajustar os controles na operação do caso base ou pré-contingência para prevenir as violações nas condições pós-contingências, através de mudanças no despacho ótimo de geração, potência ativa e tensão dos geradores, taps de transformadores, intercâmbio de potências, entre outros ajustes.

Nos sistemas interligados, compostos por diversas empresas geradoras e transmissoras de diferentes regiões, o número de variáveis a serem otimizadas aumenta sensivelmente, com conseqüente aumento no esforço computacional, principalmente quando o sistema de potência é operado de forma estressada. Neste caso, uma alternativa para atender as necessidades de ferramentas rápidas e robustas, é decompor o sistema de potência interconectado de grande porte em vários subsistemas, e realizar a análise e controle de cada subsistema independentemente.

O problema de Fluxo de Potência Ótimo Multiárea (FPOM), normalmente, é abordado descentralizadamente, ou seja, cada área é analisada de forma independente. As áreas que não estão sob estudos são consideradas através de modelos de equivalentes estáticos. De acordo com a literatura o problema de FPO, para cada subsistema, considerando-se os demais subsistemas como equivalentes estáticos, é resolvido por intermédio de

*Avenida Brasil Norte, 364 - CP 31 - CEP 15385-000 – Ilha Solteira - SP - BRASIL

Tel.: (018) 3743-1150 - Fax: (018) 3743-1163 - e-mails: elizete@aluno.feis.unesp.br mant@dee.feis.unesp.br

técnicas de otimização clássicas, como por exemplo, relaxação lagrangeana e métodos de pontos Interiores, entre outras (3)-(9).

Neste trabalho, propõe-se um algoritmo de otimização baseado nos conceitos da evolução natural para a solução do problema de despacho ótimo de potências ativa e reativa multiárea. O problema abordado é constituído por diferentes funções objetivo, em geral, conflitantes entre si. Estes conflitos entre objetivos (isto é, minimizar os custos enquanto maximiza a eficiência operacional, qualidade de serviço e confiabilidade) devem ser tratados criteriosamente, pois na maioria dos casos é impossível melhorar um objetivo sem deteriorar algum outro. Além destas características, o problema proposto realiza o despacho ótimo de potências ativa e reativa acopladamente o que aumenta a complexidade de solução.

Baseado nestas características, o algoritmo de otimização implementado é fundamentado nos conceitos dos algoritmos evolutivos multiobjetivo (AEMO). Os AEMO buscam a otimização de objetivos conflitantes, em que cada um deles corresponde a uma solução ótima, isso faz com que o problema abordado apresente várias soluções ótimas, e seja preferencialmente resolvido por métodos capazes de gerar um conjunto de soluções ótimas de uma só vez.

O algoritmo proposto para a solução do problema de FPOM possui as seguintes características:

- Otimização independente de cada área, para sistemas interconectados;
- Fácil detecção dos problemas de cada área, tais como, controle e despacho de reativos;
- Análise e controle do intercâmbio de potências entre os sistemas interligados;
- Habilidade no tratamento das restrições físicas, econômicas e operacionais dos sistemas, devido ao uso de técnicas de otimização multiobjetivo.

Para validar a eficiência da proposta de solução para o problema de FPOM apresentam-se os resultados e as análises dos testes realizados com os sistemas de três áreas IEEE-118 (10) e RTS-96 (11), considerando três níveis de cargas (leve, nominal e pesada) e diferentes custos de geração para cada área.

2.0 - MODELO MATEMÁTICO

O problema de despacho ótimo de potências ativa e reativa de sistemas multiárea é um subproblema do Fluxo de Potência Ótimo (FPO), sendo caracterizado como um problema de otimização não linear inteiro misto (PNLIM) de grande porte, multiobjetivo e não-convexo. Seja A o conjunto das áreas interligadas e a o índice da área a ser otimizada, então o problema de despacho ótimo de potências ativa e reativa multiárea pode ser matematicamente formulado como:

$$\text{Min} \quad \sum_{i \in G} C_i^a P g_i^a \quad (1)$$

sujeito a:

$$P g_i^a - P c_i^a - P(\theta, V)_i^a = 0 \quad \forall i \in N, \quad \forall a \in A \quad (2)$$

$$Q g_i^a - Q c_i^a - Q(\theta, V)_i^a = 0 \quad \forall i \in N, \quad \forall a \in A \quad (3)$$

$$P g_i^{a, \text{mim}} \leq P g_i^a \leq P g_i^{a, \text{max}} \quad \forall i \in G, \quad \forall a \in A \quad (4)$$

$$Q g_i^{a, \text{mim}} \leq Q g_i^a \leq Q g_i^{a, \text{max}} \quad \forall i \in G, \quad \forall a \in A \quad (5)$$

$$V_i^{a, \text{mim}} \leq V_i^a \leq V_i^{a, \text{max}} \quad \forall i \in N, \quad \forall a \in A \quad (6)$$

$$|S_{ij}^a| \leq S_{ij}^{a, \text{max}} \quad \forall i, j \in N, \quad \forall a \in A \quad (7)$$

$$\sum_{j \in \Omega_f} P_{fj} = 0 \quad \forall f \in F \quad (8)$$

$$\sum_{j \in \Omega_f} Q_{fj} = 0 \quad \forall f \in F \quad (9)$$

sendo:

i, j :	Índices das barras.
f :	Índice das barras de fronteiras.
a :	Índice das áreas (subsistemas), $a = 1, \dots, A$.
A :	Conjunto das áreas interconectadas.
F :	Conjunto das barras de fronteiras.
N :	Conjuntos das barras do sistema.
L :	Conjuntos das barras de carga do sistema.
G :	Conjunto das barras com geração controlável.
Ω_n :	Conjunto das barras conectadas a barra n .
$P c_i$ e $Q c_i$:	Demanda de potências ativa e reativa, respectivamente, na barra i .

Pg_i^{min} e Pg_i^{max} : Capacidades mínima e máxima de geração ativa no gerador i .

Qg_i^{min} e Qg_i^{max} : Capacidades mínima e máxima de geração de potência reativa no gerador i .

V_i^{min} e V_i^{max} : Magnitude mínima e máxima de tensão na barra i .

$P(\theta, V)_i$ e $Q(\theta, V)_i$: Injeções líquidas de potências ativa e reativa, respectivamente, na barra i .

Pg_i e Qg_i : Potências ativa e reativa, respectivamente, geradas na barra i .

V_i e θ_i : Magnitude e ângulo de tensão, respectivamente, na barra i .

A função objetivo (1) é dada pela minimização do custo da geração de potência ativa, e foi adotada como sendo uma função linear (12). O conjunto de restrições de igualdade (2) e (3) são as equações do Fluxo de Potência (13), que correspondem ao atendimento da demanda e das perdas dos sistemas elétricos. As restrições (4)-(7) representam os limites de potências ativa e reativa nas barras de geração, magnitudes de tensão e fluxo de potência aparente nas linhas do sistema, respectivamente.

As equações do problema de FPOM são similares as equações de um problema de FPO, exceto as restrições que fazem o acoplamento entre as diferentes áreas, representadas pelas equações (8) e (9). Estas equações lineares são introduzidas na formulação do problema de FPO para impor que as variáveis das barras de fronteira entre duas regiões, isto é fluxo de potências ativa e reativa, magnitude e ângulo de tensão, assumam valores que permitam manter a independência entre as diferentes áreas do sistema.

2.1 Decomposição em Subsistemas e Linhas de Ligação

A decomposição de um sistema de potência interconectado de grande porte em subsistema é realizada considerando-se a topologia e as conexões existentes entre os diversos sistemas interligados. As linhas de ligação são as linhas que fazem o acoplamento entre as áreas adjacentes e as variáveis de acoplamento são os fluxos das linhas, a magnitude e ângulo das tensões.

3.0 - TÉCNICA DE SOLUÇÃO E DETALHES DA IMPLEMENTAÇÃO

A técnica de solução adotada para o problema de Despacho Ótimo de Potências Ativa e Reativa multiárea (1)-(9) é baseada no algoritmo de otimização *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA) (14).

Os princípios da otimização multiobjetivo visam encontrar um conjunto de soluções de boa qualidade para cada um dos objetivos conflitantes entre si. Estas soluções ótimas são chamadas de soluções ótimas de Pareto, que são obtidas com base no seguinte conceito de dominância (15):

Seja um problema multiobjetivo com k funções objetivos para serem minimizados simultaneamente. Uma solução x_1 domina uma solução x_2 , se x_1 é melhor que x_2 em pelo menos um objetivo f_i , e não é pior que x_2 para qualquer outro objetivo f_j , $j = 1, \dots, K$:

$$x_1 \text{ domina } x_2 \text{ se } f_i(x_1) < f_i(x_2) \text{ e } f_j(x_1) \leq f_j(x_2)$$

Uma solução $x_1 \in P$, que domina qualquer outra solução $x_2 \in P$ ($P \subseteq S$, sendo S o espaço de busca do problema), é chamada solução não dominada em P . As soluções que são não dominadas sobre todo o espaço S são chamadas de soluções ótimas de Pareto (Critério de otimalidade de Pareto).

O AEMO implementado apresenta as seguintes características:

- Codificação das variáveis de controle em base real;
- Estratégia de elitismo;
- Recombinação e mutação utilizando o desacoplamento implícito das variáveis do problema.

3.1 Geração da População Inicial, Sistema de Codificação e Fluxo de Potência

Devido às características físicas do problema (1)-(9), para obter um desempenho satisfatório sob os aspectos da eficiência computacional e qualidade do algoritmo, é necessário gerar uma população inicial de boa qualidade. Os indivíduos (cromossomos) que compõem a população do AEMO implementado são formados por dois subconjuntos, representados pelas variáveis de controle do sistema e codificados considerando uma base real, como ilustrado na Figura1.

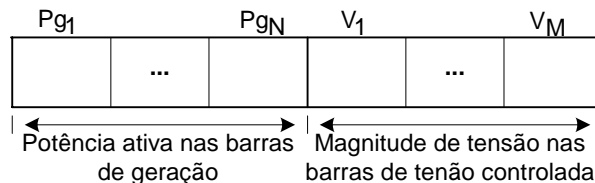


FIGURA 1 - Estrutura do cromossomo da população do AEMO.

As variáveis de controle (Pg nas barras de geração e V nas barras de tensão controlada), para cada área, são geradas de forma semi-aleatória, satisfazendo a região de factibilidade, ou seja, os limites operacionais representados através das equações (4) e (6), e a demanda de potência ativa que deve satisfazer a equação:

$$\sum_{i \in G} Pg_i^a = \sum_{i \in L} D_i^a \quad \forall a \in A \quad (10)$$

Sendo D_i^a a demanda de potência ativa nas barras de carga i , na área $a \in A$ (incluindo as perdas).

Após gerar os indivíduos da população inicial de uma determinada área, resolve-se o FP para o sistema completo, através do método de Newton (13) para cada indivíduo. Nesta etapa, as áreas que não estão sendo otimizadas têm os valores das variáveis de controle fixos, ou seja, utilizam-se os valores preestabelecidos na base de dados de cada subsistema. Se a otimização é realizada em mais de uma área seqüencialmente, deve-se atualizar na base de dados os valores das variáveis de controle das áreas já otimizadas.

3.2 Classificação da População e Critério de Convergência

Após os cálculos das equações de FP, para o sistema completo, as soluções convergidas são classificadas de acordo com a dominância das soluções. Na solução do problema proposto as restrições (4)-(7) são considerados separadamente como funções objetivo, juntamente com a função de custo (1) acrescida das restrições (8)-(9) penalizadas; totalizando 05 funções objetivo.

Os critérios de parada para o método de Newton, AEMO e FPOM são, respectivamente, os números máximos de iterações, de gerações e de áreas escolhidas para otimização.

3.3 Operadores Genéticos

Na implementação dos operadores genéticos, recombinação e mutação é realizado o desacoplamento implícito das variáveis de controle. Esta estratégia foi adotada para evitar conflitos entre os diferentes tipos de violações das restrições funcionais ou de acoplamento. O desacoplamento implícito das variáveis consiste em realizar a recombinação e mutação entre as variáveis do subconjunto V_i^a , quando os objetivos selecionado referem-se a violação de tensão, capacidade de geração reativa ou balanço de potência reativa nas barras de acoplamento. Realizam-se os operadores genéticos nas variáveis do subconjunto Pg_i^a , se a capacidade de geração ativa ou balanço de potência ativa nas barras de acoplamento é selecionada.

Além dos operadores básicos, um esquema de elitismo foi também incorporado ao método. O elitismo é um fator muito importante em métodos de otimização multiobjetivo, podendo melhorar consideravelmente sua performance (16)-(17).

A implementação dos operadores genéticos é descrita abaixo:

3.3.1 Estratégia elitista

No algoritmo AEMO proposto, a cada geração um conjunto de indivíduos não dominados é encontrado, e inicialmente incorporados ao conjunto elitista N_{elite} . Porém, ao invés de manter todo o conjunto de soluções dominantes (melhor aproximação do conjunto Pareto-ótimo) cujo tamanho pode ser consideravelmente grande, e alcançar 100% dos indivíduos da população, limita-se o número de indivíduos elitistas que compõe a população (neste caso 30%), para evitar estagnação da população. As soluções do subconjunto de N_{elite} , denominada E , são selecionadas aleatoriamente.

3.3.2 Seleção por Torneio e Recombinação

Os operadores de seleção e recombinação são realizados juntamente, para cada um dos objetivos sorteado aleatoriamente. Seja N_{pop} o número máximo de indivíduos da população e M um subconjunto que contém as soluções $M = (N_{pop} - E)$, então, a seqüência destes operadores genéticos é descrita abaixo:

- i. Selecionar por torneio um indivíduo pai, $P1$, do subconjunto M ;
- ii. Com base no subconjunto E , escolher, de forma aleatória o segundo pai, $P2$;
- iii. Selecionar um dos objetivos do problema e realizar a recombinação de um único ponto;
- iv. Gerar um número aleatório r , entre 0 e 1. Se $r > Pr$ (Probabilidade de recombinação) obter, aleatoriamente, o ponto de recombinação. Caso contrário, voltar ao passo I;
- v. Repetir os passos i à iv até que a nova população possua o número de indivíduos predefinido.

No passo iii, se o objetivo escolhido se refere ao custo da geração, então a recombinação é realizada nos dois subconjuntos das variáveis de controle do indivíduo, (ver Figura 1). Caso contrário, é realizado o desacoplamento implícito das variáveis do problema.

3.3.3 Mutação

A mutação é aplicada com a finalidade de explorar aleatoriamente outras trajetórias no espaço de busca. Neste trabalho, a mutação é um operador de grande importância, pois introduz, aleatoriamente, novas informações na população, prevenindo a convergência prematura do algoritmo. A seqüência deste procedimento é descrita abaixo:

- i. Escolher, aleatoriamente, um dos objetivos do problema;

- ii. Escolher, de forma aleatória, um indivíduo candidato à mutação;
- iii. Gerar um número aleatório m entre 0 e 1. Se $m < P_m$ (Probabilidade de mutação), então, obter a variável que sofrerá mutação. Caso contrário, voltar ao passo i;
- iv. Trocar o valor atual da variável selecionada, por um valor gerado, aleatoriamente, no domínio desta variável;
- v. Repetir os passos i à iv até que a nova população tenha o número de indivíduos predefinido.

No passo iv se o objetivo escolhido no passo i for diferente do custo da geração, então se deve realizar o desacoplamento implícito das variáveis do problema, caso contrário, a mutação é realizada nos dois subconjuntos de variáveis de controle do indivíduo (Figura 1).

4.0 - IMPLEMENTAÇÃO

O pseudocódigo do método implementado é dado por:

INÍCIO

Definir o número de áreas a serem otimizadas.

Definir a área a ser otimizada.

PARA CADA área FAÇA

Gerar a população inicial para a área que se deseja otimizar, com N_{pop} indivíduos.

Fixar as variáveis de controle (V , P_g) das áreas que não estão sob análise.

PARA CADA geração FAÇA

PARA CADA indivíduo FAÇA

Calcular o FP para o sistema completo.

Armazenar os resultados dos objetivos utilizados pelo problema (1)-(9).

FIM PARA

Encontra todos os indivíduos não dominados da população.

Selecionar aleatoriamente 30% dos indivíduos não dominados da população (E).

PARA $i \leftarrow 1$ até $(N_{pop} - E)/2$

Executar a seleção por torneio para selecionar um indivíduo pai, P1.

Selecionar, aleatoriamente, do conjunto E um indivíduo pai, P2.

Executar a recombinação de P1 e P2, produzindo os filhos F1 e F2.

Realizar a mutação

Adicionar F1 e F2 na população da próxima geração.

FIM PARA

FIM PARA

Verificar se todas as áreas selecionadas já foram otimizadas. Se SIM PARE, caso contrário, definir a próxima área para otimização.

FIM PARA

FIM

5.0 - TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se os resultados de simulações usando os sistemas testes IEEE-118 e RTS-96, considerando-se as cargas, nominal, leve (85% da carga nominal) e pesada (115% da carga nominal).

5.1 Sistema IEEE-118

O sistema teste IEEE-118 foi decomposto em 3 áreas (áreas A, B e C) conforme apresentado em (10). O custo de cada unidade geradora encontra-se em (16). Os limites mínimo e máximo de tensão para todas as barras do sistema são 0,94 pu e 1,06 pu, respectivamente.

Na Tabela 1 apresentam-se os resultados obtidos com a proposta de solução para os problemas de despacho ótimo de potências ativa e reativa multiárea, de Fluxo de Potência Ótimo centralizado (FPO) e FP convencional, para os três níveis de carga. As regiões mais escuras representam as áreas otimizadas independentemente.

5.2 Sistema RTS-96

O sistema IEEE 3-áreas RTS-96 (11) consiste de 72 barras, 119 linhas de transmissão e 05 linhas de ligação. O custo de cada unidade geradora é apresentado na Tabela 2.

Na Tabela 3 exibem-se os resultados das simulações, considerando-se o problema FPO, o FP convencional e o problema de FPOM. Esta tabela tem por finalidade a análise e comparação entre as técnicas, visando-se mostrar a eficiência da técnica de solução adotada na solução do problema de FPOM. As regiões mais escuras representam as áreas otimizadas independentemente.

Nas simulações com o sistema RTS-96, utilizando-se as técnicas de FPO e FPOM, a potência ativa dos geradores foi mantida igual aos valores da base de dados na geração da população inicial. A alteração otimizada da capacidade de geração através do ciclo geracional do AE foi efetuada através da mutação. Neste caso, a mutação passou a ser de fundamental importância para o desempenho do processo de evolução.

5.3 Discussão dos Resultados

Observa-se que ao otimizar qualquer uma das áreas os custos da geração se reduzem significativamente, enquanto as demais variáveis de controle não sofrem alterações relevantes. A pequena alteração destes valores é devida a tolerância adotada para as restrições de acoplamento (8) e (9). As violações de potência reativa se reduzem em função da área sob estudo e das características físicas do sistema, que podem não permitir o atendimento da restrição (9) com boa precisão. Este aspecto está claramente apresentado nas Tabelas 1 e 3. Para o sistema IEEE 118 nem sempre é conveniente otimizar o despacho de reativos para todas as áreas, mas apenas para as áreas 1 e 3. O sistema RTS96 não apresenta esta característica. Em todos os testes realizados o AEMO implementado convergiu para soluções de boa qualidade, ou seja, com perfil de tensão, capacidade de potência ativa gerada e fluxo nas linhas de transmissão atendendo aos limites operacionais da área otimizada, enquanto os estados das áreas adjacentes permaneceram inalterados.

Comparando-se os problemas OPF e FPOM observa-se que devido ao fato da FPOM executar o OPF para cada um dos subsistemas as variáveis de controle estão restritas à área que está sendo otimizada, tornando o problema bem mais restrito, e os valores obtidos para os custos de geração e violação de potência reativa são maiores. Mas, considerando-se os resultados otimizados para cada área em relação ao FP convencional, a metodologia apresenta-se como uma ferramenta robusta para a otimização dos sistemas descentralizados, conforme apresentados nas Tabelas I e III. Além disso, o algoritmo de otimização AEMO demonstrou ser uma ferramenta versátil e eficiente na solução dos problemas de cada uma área, sendo capaz de minimizar os custos operacionais e atender as necessidades de mercados, em relação a qualidade e confiabilidade dos serviços oferecidos.

TABELA 1 – CUSTO DA GERAÇÃO (MWh) E VIOLAÇÕES DAS CAPACIDADES REATIVAS PARA O SISTEMA IEEE-118

CUSTO DA GERAÇÃO (IEEE - 118)					VIOLAÇÕES DE POTÊNCIA REATIVA GERADA (IEEE -118)						
CARGA NOMINAL	AREAS			Σ	CARGA NOMINAL	AREAS			Σ		
	A	B	C			A	B	C			
FP	\$ 785,52	\$ 889,11	\$ 2277,53	\$ 3952,16	FP	0,074 pu	1,196 pu	1,259 pu	2,529 pu		
ÁREAS OTIMIZADAS	FPOM - A	\$ 156,39	\$ 889,17	\$ 2277,53	\$ 3303,09	ÁREAS OTIMIZADAS	FPOM - A	0,013 pu	1,446 pu	1,275 pu	2,734 pu
	FPOM - B	\$ 785,52	\$ 330,71	\$ 2277,53	\$ 3393,76		FPOM - B	0,134 pu	0,194 pu	1,320 pu	1,648 pu
	FPOM - C	\$ 785,52	\$ 901,81	\$ 1256,32	\$ 2921,98		FPOM - C	0,319 pu	1,997 pu	0,142 pu	2,458 pu
FP0	\$ 414,29	\$ 815,96	\$ 1793,43	\$ 3023,68	FP0	0,010 pu	0,299 pu	0,624 pu	0,933 pu		
FP0M - A, B, C	\$ 172,31	\$ 543,82	\$ 1176,79	\$ 1892,92	FP0M - A, B, C	0,667 pu	0,997 pu	0,007 pu	1,671 pu		
CARGA LEVE					CARGA LEVE						
FP	\$ 668,88	\$ 754,75	\$ 2087,71	\$ 3952,16	FP	0,307 pu	1,445 pu	1,914 pu	3,666 pu		
ÁREAS OTIMIZADAS	FPOM - A	\$ 136,59	\$ 754,97	\$ 2087,71	\$ 3303,09	ÁREAS OTIMIZADAS	FPOM - A	0,156 pu	1,589 pu	1,946 pu	3,691 pu
	FPOM - B	\$ 668,88	\$ 321,56	\$ 2087,71	\$ 3078,15		FPOM - B	0,365 pu	0,214 pu	1,858 pu	2,437 pu
	FPOM - C	\$ 668,88	\$ 766,37	\$ 1193,16	\$ 2628,41		FPOM - C	0,357 pu	1,959 pu	0,119 pu	2,435 pu
FP0	\$ 445,64	\$ 698,75	\$ 1540,00	\$ 2684,39	FP0	0,025 pu	0,036 pu	0,055 pu	0,116 pu		
FP0M - A, B, C	\$ 173,07	\$ 301,80	\$ 1190,07	\$ 1664,94	FP0M - A, B, C	0,296 pu	2,116 pu	0,049 pu	2,461 pu		
CARGA PESADA					CARGA PESADA						
FP	\$ 902,16	\$ 1024,53	\$ 2467,35	\$ 4394,04	FP	0,167 pu	1,205 pu	1,477 pu	2,849 pu		
ÁREAS OTIMIZADAS	FPOM - A	\$ 211,23	\$ 1024,30	\$ 2467,35	\$ 3702,88	ÁREAS OTIMIZADAS	FPOM - A	0,024 pu	1,519 pu	1,444 pu	2,987 pu
	FPOM - B	\$ 902,16	\$ 469,17	\$ 2467,35	\$ 3838,68		FPOM - B	0,103 pu	0,246 pu	1,598 pu	1,947 pu
	FPOM - C	\$ 902,16	\$ 1037,86	\$ 1374,28	\$ 3287,30		FPOM - C	0,431 pu	1,831 pu	0,549 pu	2,811 pu
FP0	\$ 453,50	\$ 814,75	\$ 1513,77	\$ 2782,02	FP0	0,011 pu	0,024 pu	0,014 pu	0,049 pu		
FP0M - A, B, C	\$ 256,49	\$ 338,40	\$ 1499,72	\$ 2094,61	FP0M - A, B, C	0,397 pu	0,065 pu	1,622 pu	2,084 pu		

TABELA 2 – CUSTO DA GERAÇÃO (MWh) E VIOLAÇÕES DAS CAPACIDADES REATIVAS PARA O SISTEMA RTS-96

AREA - A				AREA - B				AREA - C			
Barra	Custo (\$/h) C_i e C_o	Pg_i^{\min}	Pg_i^{\max}	Barra	Custo (\$/h)	Pg_i^{\min}	Pg_i^{\max}	Barra	Custo (\$/h)	Pg_i^{\min}	Pg_i^{\max}
101	0,217391	0,10 pu	2,00 pu	201	0,217391	0,10 pu	2,00 pu	301	0,217391	0,10 pu	2,00 pu
102	5,217391	0,10 pu	2,00 pu	202	5,217391	0,10 pu	2,00 pu	302	5,217391	0,10 pu	2,00 pu
107	0,308642	0,10 pu	3,00 pu	207	0,308642	0,10 pu	3,00 pu	307	0,308642	0,10 pu	3,00 pu
113	0,308642	0,10 pu	5,50 pu	213	3,308642	0,10 pu	5,50 pu	313	2,308642	0,10 pu	5,50 pu
114	0,000000	0,000000	0,000000	214	0,000000	0,000000	0,000000	314	0,000000	0,000000	0,000000
115	1,05263	0,10 pu	2,50 pu	215	1,05263	0,10 pu	2,50 pu	315	1,05263	0,10 pu	2,50 pu
116	0,434783	0,10 pu	1,90 pu	216	0,434783	0,10 pu	1,90 pu	316	0,434783	0,10 pu	1,90 pu
118	0,249377	0,10 pu	4,80 pu	218	0,249377	0,10 pu	4,80 pu	318	0,249377	0,10 pu	4,80 pu
121	0,18997	0,10 pu	4,20 pu	221	0,18997	0,10 pu	4,20 pu	321	0,18997	0,10 pu	4,20 pu
122	0,606061	0,10 pu	2,85 pu	222	0,606061	0,10 pu	2,85 pu	322	0,606061	0,10 pu	2,85 pu
123	0,205339	0,10 pu	5,30 pu	223	0,205339	0,10 pu	5,30 pu	323	0,205339	0,10 pu	5,30 pu

TABELA 3 – CUSTO DA GERAÇÃO (MWh) E VIOLAÇÕES DAS CAPACIDADES REATIVAS PARA O SISTEMA RTS-96

CUSTO DA GERAÇÃO (RTS - 96)					VIOLAÇÕES DE PROTÊNCIA REATIVA GERADA (RTS - 96)						
CARGA NOMINAL	AREAS			Σ	CARGA NOMINAL	AREAS			Σ		
	A	B	C			A	B	C			
FP	\$ 1703,21	\$ 3168,23	\$ 2680,23	\$7551,67	FP	0,410 pu	0,381 pu	0,377 pu	1,167 pu		
ÁREAS OTIMIZADAS	FPOM - A	\$ 958,32	\$ 3168,23	\$ 2680,23	\$ 6806,47	ÁREAS OTIMIZADAS	FPOM - A	0,015 pu	0,534 pu	0,377 pu	0,926 pu
	FPOM - B	\$ 1705,00	\$ 2957,43	\$ 2680,23	\$ 7342,66		FPOM - B	0,414 pu	0,067 pu	0,391 pu	0,872 pu
	FPOM - C	1704,27	\$ 2957,43	\$ 2462,24	\$ 7334,74		FPOM - C	0,410 pu	0,380 pu	0,000 pu	0,790 pu
FP0	\$ 1086,32	\$ 2060,73	\$ 1722,42	\$ 4869,47	FP0	0,000 pu	0,000 pu	0,000 pu	0,000 pu		
FPOM - A, B, C	\$ 1075,63	\$ 2670,03	\$ 1548,56	\$ 5294,22	FPOM - A, B, C	0,000 pu	0,468 pu	0,168 pu	0,654 pu		
CARGA LEVE	AREAS			Σ	CARGA LEVE	AREAS			Σ		
A	B	C	A		B	C					
FP	\$ 1444,61	\$ 2694,76	\$ 2279,81	\$ 6419,18	FP	0,552 pu	0,614 pu	0,519 pu	1,685 pu		
ÁREAS OTIMIZADAS	FPOM - A	\$ 690,37	\$ 2694,76	\$ 2279,81	\$ 5664,94	ÁREAS OTIMIZADAS	FPOM - A	0,000 pu	0,534 pu	0,377 pu	0,926 pu
	FPOM - B	\$ 1449,30	\$ 1930,31	\$ 2279,81	\$ 5659,42		FPOM - B	0,551 pu	0,000 pu	0,575 pu	1,126 pu
	FPOM - C	\$ 1451,45	\$ 2694,76	\$ 1585,25	\$ 5731,46		FPOM - C	0,552 pu	0,609 pu	0,057 pu	1,218 pu
FP0	\$ 897,35	\$ 1731,95	\$ 1497,59	\$ 4126,89	FP0	0,086 pu	0,000 pu	0,013 pu	0,099 pu		
FPOM - A, B, C	\$ 718,19	\$ 2104,42	\$ 1615,50	\$ 4438,12	FPOM - A, B, C	0,018 pu	0,091 pu	0,137 pu	0,246 pu		
CARGA PESADA	AREAS			Σ	CARGA PESADA	AREAS			Σ		
A	B	C	A		B	C					
FP	\$ 1963,84	\$ 3641,70	\$ 3080,65	\$ 8686,19	FP	0,625 pu	0,400 pu	0,431 pu	1,456 pu		
ÁREAS OTIMIZADAS	FPOM - A	\$ 1463,31	\$ 3641,70	\$ 3080,65	\$ 8185,65	ÁREAS OTIMIZADAS	FPOM - A	0,091 pu	0,470 pu	0,443 pu	1,004 pu
	FPOM - B	\$ 2043,57	\$ 3436,92	\$ 3080,65	\$ 8561,14		FPOM - B	0,464 pu	0,00 pu	0,481 pu	0,945 pu
	FPOM - C	\$ 2042,56	\$ 3641,70	\$ 2885,29	\$ 8569,55		FPOM - C	0,557 pu	0,409 pu	0,000 pu	0,966 pu
FP0	\$ 1330,56	\$ 2140,79	\$ 2079,02	\$ 5550,12	FP0	0,046 pu	0,029 pu	0,000 pu	0,075 pu		
FPOM - A, B, C	\$ 1467,23	\$ 3366,48	\$ 2642,03	\$ 7475,74	FPOM - A, B, C	0,054 pu	0,000 pu	0,549 pu	0,603 pu		

6.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se uma metodologia eficiente baseada nos conceitos de AEMO para solução descentralizada do FPO para sistemas multiáreas. Os resultados obtidos com os sistemas da literatura mostram que a técnica de solução proposta é versátil, e permite determinar soluções ótimas ou otimizadas de boa qualidade para cada um dos subsistemas e permitindo atender diferentes objetivos de acordo com as necessidades do usuário – despacho ótimo de potências ativa e reativa, ajustes do controle de tensão, redução de perdas, e atender um conjunto de restrições físicas, operacionais e de acoplamento entre as áreas do sistema.

A descentralização do problema de FPO em subproblemas de FPO independentes, além de contribuir na diminuição dos problemas computacionais existentes, para análise de sistemas de grande porte, que envolvem um grande número de variáveis também se apresenta como uma possibilidade para o desenvolvimento de uma ferramenta para a análise e o controle dos sistemas interconectados de grande porte, além disso, é capaz de detectar os problemas de cada área. Este aspecto, torna a metodologia apresentada de grande utilidade para as concessionárias de energia elétrica, que se encontra em um mercado altamente competitivo, e com a obrigação de oferecer seus serviços a preços mínimos, mas com qualidade e segurança.

Na metodologia proposta o esforço computacional para o cálculo de FP convencional do sistema completo, considerando a eficiência dos programas comerciais de FP não representa uma limitação para a técnica de solução do FPO através de AE e, por outro lado, evita os cálculos de equivalentes estáticos, problemas de precisão e convergência do FPO devido o uso destes equivalentes.

Futuros desenvolvimentos deste trabalho, que estão em fase de estudos, são a aplicação da metodologia num sistema real de grande porte e a elaboração de um modelo de programação assíncrono para implementação em computadores de memória distribuída.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da CAPES e do CNPq.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SHIRMOHAMMADI, D.; WOLLENBERG, B.; VOJDANI, SANDRIN, P., A., PEREIRA, M., RAHIMI, SCHNEIDER, T. and STOTT, B. "Transmission dispatch and congestion management in the emerging market structures;" IEEE Trans. Power Syst., vol. 13, pp.1466-1474, Nov. 1998.
- (2) MOSER, A.; EJEBE, G.C. and FRAME, J.G. "Network and power applications for EMS within a competitive environment;" in Proc. Power Eng. Society Transmission and Distribution Conf., vol. 1, pp.280-285.
- (3) BAKIRTZIS, A.G. and BISKAS, P.N. "A decentralized solution to the DC-OPF of interconnected power systems;" IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, pp.1007-1013, Aug. 2003.
- (4) CONEJO, A.J. and AGUADO, J.A. "Multi-area coordinated decentralized DC optimal power systems;" IEEE Trans. Power Syst., vol. 13, pp.1272-1278, Nov. 1998.
- (5) KIM, B.H. and BALDICK, R. "Coarse-grained distributed optimal solution flow;" IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, pp.932-939, May 1997.
- (6) BALDICK, R., KIM, B.H., CHASE, C., and LUO, Y. "A fast distributed implementation of optimal power flow;" IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, pp.858-863, Aug. 1997.
- (7) AGUADO, J. A., QUINTANA, V.H. and CONEJO, A.J. "Optimal power flows of interconnected power systems;" in IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, vol. 2, pp. 814-819, 1999.
- (8) AGUADO, J. A. and QUINTANA, V.H. "Inter-utilities power-exchange coordination: A market-oriented approach;" IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, pp.513-519, Aug. 2001.
- (9) NOGALES, F.J., PRIETO, F.J. and CONEJO, A.J. "Multi-area AC optimal power flow: A new decomposition approach;" in Proc. Power Syst. Comput. Conf., Trondheim, Norway, pp.1201-1206, June/July 1999.
- (10) LEBOW, W.M. et. al. "Optimization of reactive volt-ampere sources in system planning;" vol. 1, Solution Techniques Computing Methods, and Result, EL-3729, final Report, 1984.
- (11) GRIGG, C.; WONG, P.; ALBRECHT, P.; ALLAN, R.; BHAVARAJU, M.; BILLINTON, R.; CHEN, Q.; FONG, C.; HADDAD, S.; KURUGANTY, S.; LI, W.; MUKERJI, R.; PATTON, D.; RAU, N.; REPPEN, D.; SCHNEIDER, A.; SHAHIDEHPOUR, M.; SINGH, C. "The reliability test system-1996;" IEEE Trans. Power Syst, Vol. 14, pp.1010-1020, Aug. 1999.
- (12) ZIMMERMAN, R.D and GAN, D. "MATPOWER - A MATLAB Power System Simulation Package", User's Manual, School of Electrical Engineering, Cornell university, 1997, available: www.pserc.cornell.edu/matpower/.
- (13) MONTICELLI, A. "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", Editora Edgard Blücher Ltda., 1983.
- (14) SRINIVAS, N. and DEB, K. "Multi-Objective Function Optimization Using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm;" Evolutionary Computation, 2(3), pp. 221-248.
- (15) DEB, K. "Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms;" John Willey & Sons, Chichester, England, 2001. 498p.
- (16) ZITLER, E. and THIELE, L. "Multi-Objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach;" IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 3, nº 4, pp.257-271, 1999.
- (17) ZITLER, E.; LAUMANN, M.; THIELE, L.; FONSECA, C.M.; FONSECA, V.G. "Why Quality Assessment of Multi-Objective Optimizers is Difficult;" In: Proc. GECCO-2002, pp.666-673, 2002.