

METODOLOGIA DE DESPACHO ÓTIMO DE UNIDADES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA CONSIDERANDO QUESTÕES TÉCNICAS E AMBIENTAIS

Fernando A. Carvalho¹ Antônio C. B. Alves² Lina P. G. Negrete² Gelson A. A. Brigatto²

¹ Saneamento de Goiás – SANEAGO - Av. Fued José Sebba, N. 1245 – Jardim Goiás - Goiânia – Goiás, mestrando,
E-mail: feapca@gmail.com

² Universidade Federal de Goiás – EMC – Av. Universitária, N. 1488, Setor Leste Universitário - Goiânia – GO,
E-mails: baleeiro@ufg.br, linitagarces@gmail.com, gelson@emc.ufg.br

Resumo – Por sua característica bastante modular, um empreendimento de Geração Distribuída pode constituir-se de diversas unidades geradoras, o que representa uma alternativa para melhor adequar oferta e demanda. Este trabalho apresenta uma modelagem multiobjetivo para otimizar o número de unidades geradoras provenientes de geradores distribuídos, considerando a minimização de perdas elétricas de rede e emissões de CO₂ dos geradores, e restrições de penetração e quantidades máximas de unidades de geração. O processo de solução do modelo emprega Algoritmos Genéticos e o Método da Ponderação dos Objetivos para obtenção de um conjunto de soluções Pareto-ótimas. Exemplos de casos são apresentados para testes com a metodologia proposta.

Palavras-Chave - Algoritmos Genéticos, Geração Distribuída, Modelo Multiobjetivo, Fronteira de Pareto.

METHODOLOGY FOR OPTIMAL DISPATCH OF DISTRIBUTED GENERATION UNITS TAKING INTO ACCOUNT TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL ISSUES

Abstract – Due to their very modular characteristic, distributed generators can be constitute of several generating units, which represents an alternative to better match supply and demand. This paper presents a multi-objective modeling to optimize the number of generating units from distributed generators, considering the minimization of network losses and CO₂ emissions from generators, and restrictions of penetration and maximum number of generating units. The solution process employs Genetic Algorithms and Weighting Objective Method for obtaining a set of Pareto optimal solutions. Case examples are presented for testing with the proposed methodology.

Keywords - Distributed Generation, Genetic Algorithm, Multiobjective Modeling, Pareto Frontier.



XIII CEEL - ISSN 2178-8308
12 a 16 de Outubro de 2015
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

I. INTRODUÇÃO

A opção por produção de eletricidade baseada em grandes empreendimentos, chamada Geração Centralizada, tem a finalidade de buscar maior eficiência econômica por meio de ganhos de escala. Esta opção, porém, tem requerido extensos sistemas de transmissão, o que intensificam problemas com perdas elétricas. Assim, com os avanços nas tecnologias de geração elétrica em pequena escala, entende-se que uma das estratégias para aumentar a eficiência energética e atender a crescente demanda consiste na redução da distância entre geração e consumo, através da chamada Geração Distribuída (GD). Espera-se então que a GD complemente e incorpore ganhos para o setor elétrico e forneça um cenário propício ao desenvolvimento de uma nova cadeia de negócios.

No Brasil, a base legal e comercial da Geração Distribuída foi inserida no setor energético com a Lei 10.848/04 [1] e com o Decreto 5.163/04 [2], que a regulamenta e a define formalmente através do Art. 14: "... produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos (...) conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador ...". Por este artigo, considera-se então Geração Distribuída as PCH's até o limite de 30 MW, a co-geração qualificada (rendimento maior que 75%) e qualquer geração a biomassa e resíduos sólidos, não importando sua eficiência.

Como recente paradigma, a GD tem suscitado grande interesse da comunidade acadêmica, com diversos trabalhos publicados na literatura abordando aspectos diversos como técnicos, econômicos e ambientais. Uma das linhas de estudo apresenta uma modelagem multiobjetivo para a otimização da capacidade instalada e do ponto de inserção de geradores distribuídos em redes de distribuição [3], [4]. Contudo, aspectos como o montante da fonte de energia disponível, área de ocupação e restrições ambientais, podem também ser determinantes para a definição do ponto de inserção e a máxima capacidade de geração possível para estes geradores.

Este trabalho pressupõe então que os empreendimentos de geração distribuída são existentes e, portanto, o ponto de inserção na rede de distribuição e sua capacidade de geração são dados conhecidos. Além disso, como as tecnologias disponíveis para a produção em pequena escala são bastante modulares, considera-se ainda que os geradores distribuídos consistem de diversas unidades de produção, de forma tal que sua operação poderá envolver qualquer parcela destas unidades, o que imprime maior versatilidade entre a oferta e o crescimento da demanda de redes de distribuição.

Devido ao impacto da GD na operação da rede e o seu passivo ambiental, pode-se realizar estudos com o objetivo de otimizar a parcela da capacidade total de produção de

geradores distribuídos considerando fatores como técnicos e ambientais, o que resulta em um problema multiobjetivo.

O objetivo deste trabalho consiste em propor um modelo para determinar a quantidade ótima de unidades de produção de empreendimentos de geração distribuída, que minimiza as perdas ativas na rede de inserção e as emissões equivalentes de CO₂, e atenda as restrições de penetração e quantidades máximas de unidade de geração, resultando em um problema de otimização multiobjetivo com variável de decisão inteira. As perdas de rede são estimadas com o cálculo do Fluxo de Carga pelo Método da Soma das Potências, e os montantes de emissão de CO₂ dos geradores estimados com o emprego do conceito de Fator de Emissão equivalente de CO₂.

Devido ao fato do modelo matemático do problema não dispor explicitamente uma função analítica, e como forma de facilitar a varredura do espaço de decisão da variável inteira, optou-se neste trabalho por um processo de solução baseado em Algoritmos Genéticos. Além disso, como as funções objetivo são conflitantes, optou-se pelo emprego do Método da Ponderação dos Objetivos para obter um conjunto de soluções não dominadas (fronteira de Pareto).

O prosseguimento deste artigo consiste nos seguintes tópicos: no item II é vista a teoria básica para a apresentação da metodologia desenvolvida, abordada no item III; no item IV são apresentados exemplos de aplicação do modelo em sistemas teste, sendo as conclusões discutidas no item V.

II. BASE TEÓRICA

Neste item são apresentados alguns tópicos que consistem na base teórica da metodologia proposta neste trabalho.

A. Otimização Multiobjetivo

A otimização multiobjetivo consiste em minimizar e/ou maximizar quantidades numéricas representadas por funções matemáticas, de modo a obter uma solução, ou um conjunto de soluções, que seja aceitável por satisfazer certas restrições do problema. Este problema pode ser definido como [5]:

$$\begin{aligned} \text{minimizar: } \quad & \underline{z} = [f_1(\underline{x}) \ f_2(\underline{x}) \ \dots \ f_N(\underline{x})] \\ \text{sujeito a: } \quad & \underline{x} \in X \subseteq \mathbb{R}^D \end{aligned} \quad (1)$$

em que, $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_D)$ é o vetor de decisão D-dimensional pertencente ao espaço de decisão X formado pelas restrições de igualdade e desigualdade, e $\underline{z}: \mathbb{R}^D \rightarrow \mathbb{R}$ é o vetor objetivo N-dimensional contido no espaço objetivo. Para problemas com variáveis de decisão inteiras, tem-se que, $\underline{x} \in X \subseteq \mathbb{Z}^D$.

Quando os objetivos são conflitantes entre si e na ausência de preferências entre eles, a otimização multiobjetivo se caracteriza por não possuir uma única solução ótima, tendo a necessidade de negociação entre os objetivos. Isso resulta em um conjunto de possíveis soluções diferenciadas entre si por um conceito chamado dominância de Pareto.

O Método da Ponderação dos Objetivos consiste tratar problemas Multiobjetivo com a substituição dos critérios de otimização por uma única função escalar $f(\underline{x})$ da forma [5]:

$$f(\underline{x}) = \sum_{i=1}^N w_i f_i(\underline{x}) c_i \quad (2)$$

em que, w_i são os coeficientes de ponderação (pesos), tal que $\sum w_i = 1$, e c_i são constantes de normalização das funções

objetivo para que seus valores, por vezes distintos, possam se tornar adimensionais e expressar sua importância aos pesos. Usualmente adota-se $c_i = 1/f_i^o(\underline{x})$, onde $f_i^o(\underline{x})$ é a solução ideal (ótima) de cada função objetivo. Neste caso, com um processo de varredura nos valores dos pesos, pode-se então obter um conjunto de soluções não dominadas.

B. Fator de Emissão de CO₂

Fator de Emissão refere-se a uma taxa de emissão média de um dado poluente relativo à intensidade de uma atividade específica com relação a uma determinada fonte. O Fator de Emissão de um gás corresponde, então, à relação entre a quantidade do gás emitido (*kg* ou *ton*) por cada unidade de produção energética resultante da atividade (*kJ* ou *kWh*).

Para a avaliação da emissão de CO₂ proveniente de fontes de energia utilizadas na geração de energia elétrica, foi empregada a metodologia definida no *International Panel on Climate Change* [6] que, através do Fator de Emissão, assume uma relação linear entre a energia produzida (*kWh*) e a consequente emissão de poluentes (*ton_CO₂*), tal que:

$$\text{Emissão} = FE_{\text{fonte}} \times E_{\text{fonte}} \quad (3)$$

em que FE_{fonte} é o Fator de Emissão de CO₂ equivalente para determinada fonte e E_{fonte} é a energia produzida pela fonte. A Tabela I dada a seguir mostra os fatores de emissão de CO₂ equivalente típicos para algumas fontes primárias de energia.

Tabela I - Fatores de Emissão de CO₂ equivalente (Fonte: [7]).

Tipo de fonte	FE (10 ⁻⁵ ton_CO ₂ ^{equiv} / kWh)
Hidroelétrica	1,50
Eólica	2,10
Gás natural	61,5
Óleo Combustível	91,0
Carvão	102,0

III. METODOLOGIA

Como mencionado, o objetivo deste trabalho consiste em otimizar a operação de geradores distribuídos, de modo a minimizar perdas na rede de inserção e emissões de CO₂ equivalente provenientes da operação destes geradores.

Neste item é apresentado o equacionamento do modelo de otimização proposto, bem como a estratégia de solução do problema multiobjetivo com base em Algoritmos Genéticos e no Método da Ponderação dos Objetivos.

A. Modelo de Otimização

Seja $i \in \Omega_{GD}$ o índice dos empreendimentos de geração distribuída presentes em uma rede elétrica de distribuição, onde Ω_{GD} é o conjunto dos empreendimentos. Seja NGD_i^{max} o total de unidades de geração de cada empreendimento, cada qual com capacidade $P_i^{GD, \text{mit.}}$ de fornecimento de potência ativa. Definindo a variável de decisão NGD_i como o número de unidades geradoras de cada empreendimento i , tem-se que a potência ativa P_i^{GD} de cada gerador i será dada por:

$$P_i^{GD} = NGD_i P_i^{GD, \text{mit.}} \quad (4)$$

Supondo uma base diária de produção e considerando que as demandas diárias das barras podem ser tipificadas em NP patamares de carga, cada patamar p de duração Δt_p , para um

total de 24 h, o problema da minimização do total de perdas de energia na rede de inserção pode ser definido por:

$$\text{Minimizar: } E_{perdas}^{total} = \sum_{p=1}^{NP} \left[\sum_{k-m \in \Omega_L} R_{km} I_{km}^2 \Delta t_p \right] \quad (5)$$

em que, E_{perdas}^{total} é o total de energia de perdas, onde $k-m \in \Omega_L$ é um ramo genérico e Ω_L é o conjunto de todos os ramos da rede, R_{km} é a resistência série do ramo percorrido por uma corrente I_{km} para o atendimento de carga. As correntes de ramos podem ser obtidas com a solução do Problema do Fluxo de Carga (PFC) da rede de distribuição, onde as restrições de balanço de potência nas barras (1ª e 2ª leis de Kirchoff) são atendidas na solução do PFC da rede.

O problema da minimização do total das emissões de CO₂ equivalente $E_{CO2 eq.}^{total}$ provenientes dos geradores distribuídos, por definição operados diariamente, pode ser definido por:

$$\text{Minimizar: } E_{CO2 eq.}^{total} = \sum_{p=1}^{NP} \left[\sum_{i \in \Omega_{GD}} P_i^{GD} FE_i \Delta t_p \right] \quad (6)$$

em que FE_i é o fator típico de emissões de CO₂ equivalente da fonte primária empregada em cada empreendimento i .

O modelo matemático definido trata-se de um problema de otimização de dois objetivos conflitantes, pois aumentos na quantidade de unidades geradoras podem resultar em uma diminuição no total de energia de perdas da rede, porém no aumento do total de emissões destes geradores. Desse modo, um conjunto de soluções não dominadas é possível.

Como mencionado, as restrições consideradas no modelo do problema de otimização consiste nos limites de unidades de geração das GD, que pode ser definido por:

$$0 \leq NGD_i \leq NGD_i^{max} \quad (7)$$

bem como a penetração dos geradores distribuídos na rede (porcentagem da demanda de rede atendida pelos geradores), limitada a um valor PM^{GD} previamente estabelecida, tal que:

$$\frac{\sum_{i \in \Omega_{GD}} P_i^{GD}}{\sum_{j \in \Omega_B} P_j^{carga, p}} \times 100 \leq PM^{GD} \quad (8)$$

em que, $P_j^{carga, p}$ é a demanda de potência ativa em cada barra $j \in \Omega_B$ e em cada patamar de carga p , onde Ω_B é o conjunto de todas as barras de carga da rede elétrica.

B. Algoritmo de Solução

No cálculo das perdas de rede optou-se neste trabalho por empregar o Método da Soma das Potências, indicado para a solução do PFC de sistemas elétricos de distribuição radiais.

Para a solução do modelo multiobjetivo, optou-se pelo emprego de um processo baseado em Algoritmos Genéticos, bem como no Método da Ponderação dos Objetivos, para obter um conjunto de soluções não dominadas. Como a solução ótima para a minimização de emissões de CO₂ é nula (sem produção de geração), o que inviabiliza esta solução como constante de normalização do critério emissões, optou-se por um processo de solução dividido em duas etapas:

1ª Etapa: obtenção do número ótimo de unidades geradoras dos geradores distribuídos considerando apenas o problema de minimização de perdas de rede definido pela equação (5) e as restrições do modelo. Este resultado é definido como solução ideal $E_{perdas}^{total, o}$ para a normalização do critério de

perdas, bem como para o cálculo das emissões totais de CO₂ equivalente, cujo resultado $E_{CO2 eq.}^{total, o}$ é adotado para determinar a constante de normalização do critério emissões.

2ª Etapa: com os resultados dos fatores de normalização obtidos na 1ª Etapa, os critérios de perdas e emissões são colocados em competição com a definição de um problema de minimização de uma função objetivo FO correspondente à soma ponderada dos critérios de otimização, tal que:

$$\text{Minimizar: } FO = w \frac{E_{perdas}^{total}}{E_{perdas}^{total, o}} + (1 - w) \frac{E_{CO2 eq.}^{total}}{E_{CO2 eq.}^{total, o}} \quad (9)$$

em que, $w \in [0,1]$. Com a varredura do peso w , obtém-se então um conjunto de soluções não dominadas.

Em relação ao método de solução baseado em Algoritmos Genéticos, foram adotados os seguintes procedimentos:

a) Codificação: número de bits igual ao número de barras com GD e valores dos bits múltiplos da capacidade unitária. Por exemplo, supondo 150 kW de capacidade então, para uma capacidade total de 900 kW (6 unidades de geração), os valores que os bits pode armazenar seriam 0,1,2, 3, 4, 5 e 6.

b) Operadores genéticos: após a formação da população de indivíduos, procede-se com os operadores genéticos. Para a seleção de indivíduos adotou-se o torneio binário. Para o operador de *crossover* adotou-se o de ponto simples com probabilidade de 98%. Para o operador de mutação, adotou-se uma probabilidade de 5% para cada bit de cada indivíduo. A seguir, o bit selecionado para mutação será incrementado ou decrementado em 1 com probabilidade de 50%. Porém, se o bit selecionado para mutação é nulo então obrigatoriamente seu valor será ajustado para 1 e, se igual ao número de unidades máximo, seu valor é decrementado em 1.

c) Penetração da GD: para esta restrição à capacidade total de produção das GDs, adotou-se um nível de penetração máximo de 15%, como forma de aumentar a pluralidade de soluções na composição de unidades geradoras. Neste caso, para manter a factibilidade dos indivíduos, calcula-se um fator k definido como a razão entre o nível de penetração máximo pelo nível de penetração do indivíduo e , se $k < 1$, o cromossomo é multiplicado por este valor e seus valores são truncados para baixo, resultando num indivíduo factível. Este método é também utilizado na geração da população inicial.

d) Módulo da população: consiste na forma como os novos indivíduos passam a compor uma nova geração. O módulo de população adotado é o elitismo, que garante que o gráfico da avaliação do melhor indivíduo de cada geração seja uma função monotonamente decrescente. Isto quer dizer que o melhor indivíduo da geração $t+1$ é pelo menos igual ao melhor da geração t , no caso em que nenhum indivíduo melhor seja criado na geração $t+1$. De forma prática, o elitismo é implementado passando os N melhores indivíduos para geração posterior, podendo ainda manter o tamanho da população constante. Esta pequena mudança colabora muito para a melhoria do desempenho de busca do GA, comparada ao módulo em que todos os filhos geram a nova população.

IV. ESTUDO DE CASOS E ANÁLISES

Para a demonstração do desempenho da modelagem e do algoritmo de solução propostos neste artigo, serão estudados dois sistemas de distribuição conhecidos da literatura e, para

empreendimentos de geração distribuída, consideradas fontes renovável e fóssil para comparação da questão das emissões, desprezadas possíveis intermitências e sazonalidades.

Considerando que fontes renováveis são preferíveis para a minimização de emissões de poluentes, optou-se por alocar empreendimentos com este tipo de fonte em regiões do sistema com barras de menor carga, e empreendimentos de fonte não-renovável em regiões com barras de maior carga, de modo a possibilitar a estes últimos contribuir melhor para a minimização de perdas. Como isso, garante-se uma maior competição entre os critérios de emissões e perdas.

Para os perfis de carga das barras da rede, considerou-se os dados de carga da rede como demanda *flat* diária e, desse modo, assumiu-se a ocorrência de apenas 1 patamar de carga. Para o fator de emissão de CO₂ equivalente para cada tipo de fonte primária, adotou-se os valores mostrados na Tabela I.

Como forma de verificação do desempenho do algoritmo de solução, os resultados dos sistemas testes são comparados com resultados obtidos por busca exaustiva.

A. Teste 1: rede de distribuição de 34 barras e 33 ramos

A Figura 1 mostra o diagrama unifilar do sistema de 34 barras, adaptado da rede de distribuição descrita em [8], onde nas barras 9 e 11 (região de carga baixa) são alocados micro centrais hidroelétricas compostos por 5 unidades de 40 kW de capacidade cada, e nas barras 22 e 27 (região de carga elevada) são alocadas termelétricas a gás natural compostas por 8 unidades de 40 kW de capacidade cada. Para os fatores de emissão de CO₂ equivalente, foram adotados os valores $1,5 \times 10^{-5} \text{ ton_CO}_2$ e $61,5 \times 10^{-5} \text{ ton_CO}_2$ para as fontes hídrica e gás natural, respectivamente, dados na Tabela I.

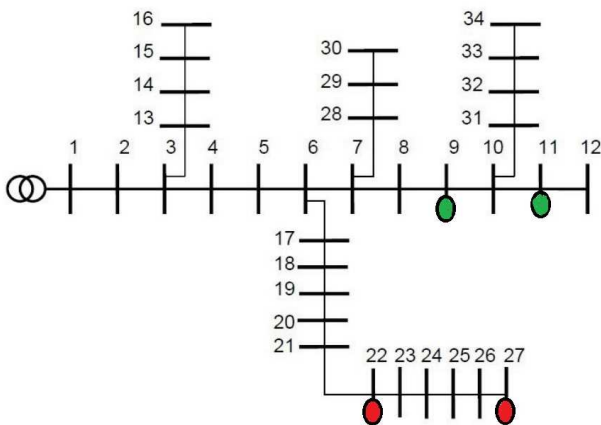


Fig. 1. Sistema teste de 34 barras e barras com presença de GD.

Na Etapa 1 foram obtidos os valores 3892 kWh para a normalização do critério de perdas e 9,46 ton_CO₂ para o critério de emissões. Para a verificação do desempenho do algoritmo proposto, a Figura 2 ilustra uma comparação entre os pontos de fronteira obtidos por busca exaustiva e os resultados da Etapa 2 do algoritmo, descritos na Tabela II.

Considerando que o processo de busca exaustiva aplicada à solução do modelo de otimização, por sua própria natureza, resulta na fronteira de Pareto ótima, com base na Figura 2 observa-se então que os resultados obtidos pelo algoritmo de solução mostram-se satisfatórios, devido ao fato dos pontos obtidos serem os mesmos da busca exaustiva. No entanto,

algumas regiões da fronteira não foram alcançadas pelo algoritmo, o que identifica a necessidade de se implementar mecanismos de *niching* para possibilitar ao algoritmo de solução a prospecção de pontos também nestas regiões.

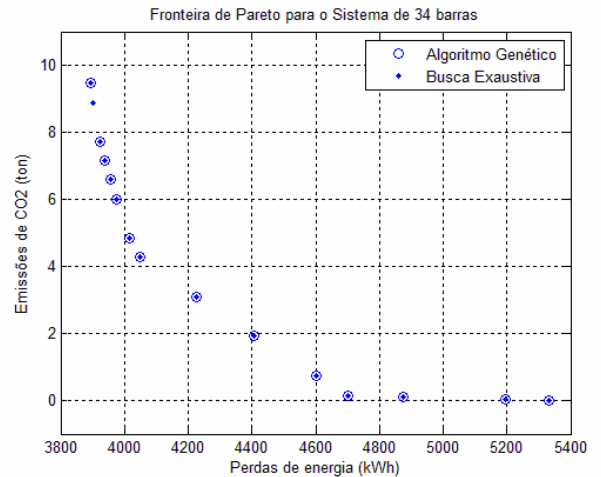


Fig. 2: Comparação entre conjunto de soluções não-dominadas obtidas por busca exaustiva e pelo algoritmo de solução aplicado.

Tabela II: Soluções de fronteira para o sistema teste 1.

Pesos	Quantidade de máquinas nas barras com GD				Critérios de otimização	
	9	11	22	27	Perdas (kWh)	Emissões (ton_CO ₂)
0	0	0	0	0	5334	0,000
0,08	0	2	0	0	5195	0,029
0,09	2	5	0	0	4876	0,101
0,10	5	5	0	0	4703	0,144
0,71	5	5	0	1	4602	0,734
0,72	5	5	0	3	4408	1,915
0,73	5	5	0	5	4224	3,096
0,74	5	5	0	7	4049	4,277
0,90	4	5	0	8	4017	4,853
0,92	2	5	2	8	3975	6,005
0,93	1	5	3	8	3955	6,581
0,94	0	5	4	8	3938	7,157
0,95	0	4	5	8	3924	7,733
1,00	0	1	8	8	3892	9,461

B. Teste 2: Sistema de 70 barras e 69 ramos

A Figura 3 mostra um diagrama unifilar do sistema de 70 barras, descrito em [9], onde nas barras 13, 30 e 65 são alocados geradores hidrelétricos compostos por 5 unidades de 25 kW de capacidade cada, e nas barras 22, 51 e 62 são alocados geradores movidos a gás natural compostos por 5 unidades de 24 kW de capacidade cada. Para os fatores de emissão de CO₂, são adotados os mesmos do teste 1.

Para a Etapa 1 foram obtidos os valores 4452 kWh para a normalização do critério de perdas e 5,96 ton_CO₂ para o critério de emissões. A Figura 4 ilustra os pontos de fronteira de Pareto obtidos por busca exaustiva e pelos resultados da Etapa 2 do algoritmo, mostrados na Tabela III.

Com base nos resultados observa-se novamente que os resultados obtidos pelo algoritmo de solução mostram-se satisfatórios, porém este apresenta problemas, com pontos não atingidos em algumas regiões da fronteira, o que reforça a necessidade de ajustar o algoritmo para a busca de soluções não dominadas para o preenchimento destas regiões.

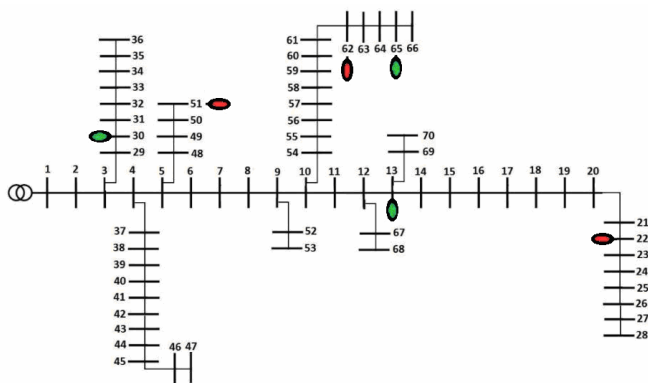


Fig. 3. Sistema teste de 70 barras e barras com presença de GD.

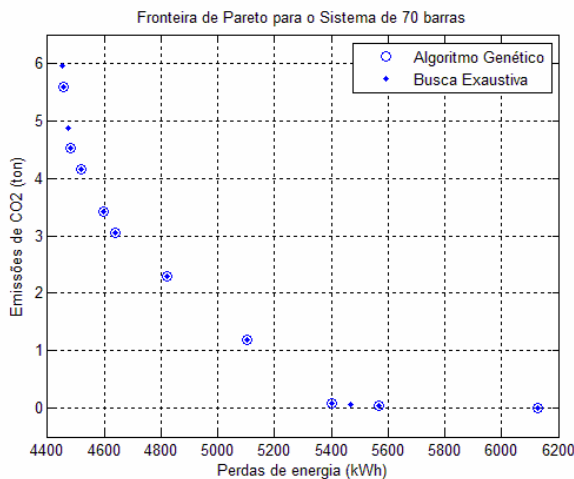


Fig. 4: Comparação entre conjunto de soluções não-dominadas obtidas por busca exaustiva e pelo algoritmo de solução aplicado.

Tabela III: Soluções de fronteira para o sistema teste 2.

Pesos	Quantidade de máquinas nas barras com GD						Critérios de otimização	
	13	30	65	22	51	62	Perdas (kWh)	Emissões (ton CO ₂)
0,00	0	0	0	0	0	0	6127	0,000
0,06	0	0	0	0	0	5	5568	0,045
0,20	5	0	0	0	0	5	5402	0,090
0,74	5	0	0	0	3	5	5102	1,197
0,75	5	0	0	0	6	5	4819	2,304
0,80	5	0	0	0	8	5	4640	3,042
0,87	5	1	0	0	8	5	4597	3,411
0,88	5	3	0	0	8	5	4518	4,149
0,89	5	4	0	0	8	5	4481	4,518
1,00	2	7	0	0	8	5	4458	5,598

V. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, observa-se que as soluções do problema estão de acordo com o esperado, visto que, independentemente do tipo de fonte primária, qualquer dos empreendimentos contribuem para a minimização das perdas de rede, porém, a grande discrepância nos valores dos fatores de emissões confere aos geradores de fonte menos poluente (hídrica) uma maior predominância sobre os de fonte mais poluente (gás natural) quando os critérios de otimização conflitantes são colocados em disputa.

Desse modo, quando os pesos expressam uma importância maior para o critério de emissões totais (primeiras soluções das Tabelas II e III), o processo de solução busca uma maior produção dos geradores hídricos, não optando por qualquer fonte fóssil. Por outro lado, quando os pesos expressam uma importância maior para critério de perdas (últimas soluções das Tabelas II e III), as soluções resultam em maior produção dos geradores a gás natural por estas se encontrarem em região da rede com barras de maior concentração de carga, porém, com produção também geradores hídricos, de modo a contribuir para a redução das emissões de poluentes.

Como trabalhos futuros para melhoria da modelagem de otimização e algoritmo de solução propostos, pretende-se:

- Realizar estudos com 3 patamares de carga em cada barra da rede, tipificadas nos tipos comercial, residencial e industrial considerados como preponderante na barra.
- Considerar geradores distribuídos de outros tipos de fonte de energia primária, além dos já avaliados.
- Implementar uma metodologia de análise de decisão para a escolha de uma alternativa de solução dentre o conjunto ótimo, com base nas preferências de um decisor.
- Buscar métodos para a obtenção conjuntos de soluções de fronteira mais uniformes e esparsos (*niching*).

REFERÊNCIAS

- [1] Lei N. 10.848, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica e dá outras providências. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica. 2004b.
- [2] Decreto N. 5.163, de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica e dá outras providências. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica. 2004.
- [3] G. Celli, E. Ghiani, S. Mocci, F. Pilo, "A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation". IEEE Transactions on Power Systems, pp.750-757, 2005.
- [4] M. R. Haghifam, H. Falaghi, O. P. Malik, "Risk-based distributed generation placement". IET Generation Transmission & Distribution, v. 2, n. 2, p. 252-60, 2008.
- [5] L. S. Oliveira. Uma Contribuição ao Estudo dos Métodos de Otimização Multiobjetivo. (2005). 117 f. (Dissertação de mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, 2005.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Acesso em Agosto de 2010, em: <http://www.ipcc.ch/>.
- [7] G. A. A. Brigatto, C. C. B. Carmargo, E. T. Sica, "Multiobjective Optimization of Distributed Generation Portfolio Insertion Strategies", IEEE / PES Transmission and Distribution Latin America, 2010.
- [8] M. Chis, M. M. A. Salama, S. Jayaram, "Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies," IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, vol.144, no.3, pp.225-230, 1997.
- [9] M. E. Baran, F. F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.4, no.1, pp.725-734, Jan 1989.