

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Despacho Econômico e Ambiental com a Inclusão da Energia Eólica e sua Influência na Redução da Emissão de CO_2

Andréa Camila dos Santos Martins¹

Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, FEB, UNESP, Bauru, SP

Antonio Roberto Balbo²

Departamento de Matemática, FC, UNESP, Bauru, SP

Resumo. Atualmente o Brasil tem se destacado na produção de energia eólica e auxiliado na redução dos impactos ambientais feitos através de outras fontes de energia. O objetivo deste trabalho é mostrar como uma boa exploração da produção eólica pode auxiliar na redução dos custos operacionais de geração de energia térmica e nos danos provocados pela emissão de CO_2 na atmosfera. Um modelo de otimização multiobjetivo foi formulado minimizando simultaneamente os custos e a emissão de CO_2 , os quais são provenientes do despacho econômico e ambiental das usinas térmicas e do despacho econômico das usinas eólicas. O método de solução de restrições progressivas canalizadas e a solução dos subproblemas gerados por este método foram realizadas através de pacotes computacionais.

Palavras-chave. Energia eólica, Otimização, Multiobjetivo

1 Introdução

No ano de 2017 o Brasil subiu de posição em capacidade instalada de energia eólica no *ranking* mundial, alcançando a 8^a posição com 13 GW (gigawatts) de potência instalada e mais de 500 parques eólicos instalados [2]. Por ser uma energia renovável, com baixo impacto ambiental e com a região podendo ser reaproveitada por outras atividades como a agropecuária e criação de animais, a produção de energia eólica tem se destacado e seu aumento produz uma significativa redução na emissão de CO_2 , que atualmente é uma preocupação mundial. No ano de 2017 foram evitadas a emissão de 20 milhões de toneladas de CO_2 , representando um grande aumento em relação ao ano anterior que foi de 17,81 milhões [1]. A produção eólica ocupa a 3^a posição na matriz energética brasileira representando 8,2% do total da matriz energética. Para conseguir melhorar a redução da emissão de CO_2 e aumentar a quantidade de produção de energia eólica será utilizado um modelo multiobjetivo de despacho econômico que correlaciona a produção simultânea de energia térmica e de energia eólica bem como os seus custos de produção, incluindo o problema de despacho ambiental.

O modelo de despacho para o sistema de geração térmica busca, no aspecto econômico, minimizar o custo dos combustíveis e no aspecto ambiental, minimizar a emissão dos

¹andreacamila.martins@hotmail.com

²arbalbo@fc.unesp.br

poluentes que ocorrem através da queima de combustíveis fósseis e, ao mesmo tempo, atender as restrições operacionais do problema [4]. O modelo de despacho relativo a energia eólica é influenciado por fatores climáticos, como a velocidade do vento, a qual é importante para estabelecer o limite de potência máxima de energia gerada. Considerando que a velocidade do vento é uma variável aleatória, o modelo é estocástico, e de acordo com [3] a distribuição de probabilidade de *Weibull* é considerada na análise do aproveitamento da energia eólica. Essa distribuição de probabilidade foi utilizada no modelo de despacho proposto baseando-se em [5].

Esse modelo é uma combinação do despacho econômico e ambiental das usinas térmicas e o despacho econômico das usinas eólicas, com o objetivo de minimizar simultaneamente os custos e emissão de CO_2 , atendendo a uma demanda de produção determinada e restrições operacionais dos geradores térmicos e eólicos.

A validação do modelo e influência da produção de energia eólica na redução da emissão de CO_2 , com a conseqüente redução dos custos operacionais de produção da energia térmica é feita explorando uma simulação computacional deste e sua resolução através do método de restrições progressivas canalizadas em [4], desenvolvidos para problemas multiobjetivos. Os subproblemas gerados são solucionados através do *software Gams* utilizando o pacote computacional *knitro* que é um pacote de otimização para encontrar soluções locais de problemas de otimização.

2 O modelo matemático

O modelo multiobjetivo proposto corresponde à minimização dos custos de energia térmica e eólica e à minimização dos impactos ambientais gerados, o qual é representado por:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar} && \{f_e + f_w, f_a\} \\ & \text{Sujeito a} && \sum_{i=1}^n Pw_i + \sum_{j=1}^m Pt_j = D \\ & && 0 \leq Pw_i \leq Pw_i^{max} \\ & && Pt_j^{min} \leq Pt_j \leq Pt_j^{max} \end{aligned} \tag{1}$$

para $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, m$ onde:

f_e : função econômica das usinas térmicas, dado por:

$$f_e = \sum_{j=1}^m a_j Pt_j^2 + b_j Pt_j + c_j \tag{2}$$

a_j, b_j e c_j representam os valores dos coeficientes da função econômica.

f_a : função ambiental das usinas térmicas, dada por:

$$f_a = \sum_{j=1}^m \alpha_j Pt_j^2 + \beta_j Pt_j + \gamma_j \tag{3}$$

α_j, β_j e γ_j são os valores dos coeficientes da função ambiental.

f_w : função econômica das usinas eólicas, dada por: $f_w = C_w + C_p + C_r$;

D: potência demandada pelas usinas eólicas e térmicas;

P_{w_i} : potência gerada pela usina eólica i, respectivamente;

P_{t_j} : potência gerada pela usina térmica j, respectivamente;

$P_{w_i}^{max}$: limite máximo de potência da usina eólica i;

$P_{t_j}^{min}$ e $P_{t_j}^{max}$: limites mínimo e máximo de potência da usina térmica j.

A função custo das usinas eólicas é definida pela soma de 3 funções de custo: linear (C_w), penalidade (C_p) e reserva (C_r) os quais são, respectivamente, o custo associado a quantidade de energia produzida, o custo que representa a diferença entre a energia eólica disponível e a energia eólica utilizada e o custo que representa a incerteza da geração de energia eólica disponível ser menor que a energia eólica programada. As funções de custo penalidade e reserva utilizam a distribuição de probabilidade de *Weibull* em sua formulação.

O sistema de conversão de energia eólica descrito em [5] utiliza a seguinte função de distribuição de probabilidade:

$$fW(w) = \frac{klv_i}{c} \left(\frac{(1+\rho l)v_i}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{(1+\rho l)v_i}{c} \right)^k \right) \quad (4)$$

onde:

k e c são parâmetros da distribuição de *Weibull*.

l: relação entre a faixa linear da velocidade do vento e a velocidade de corte.

ρ : relação entre a potência de saída e a potência nominal.

As funções de custo penalidade e reserva para o sistema de conversão de energia eólica são da seguinte forma:

$$C_p = k_p \int_{P_{w_i}}^{w_{r_i}} (w - P_{w_i}) fW(w) dw \quad e \quad C_r = k_r \int_0^{P_{w_i}} (P_{w_i} - w) fW(w) dw \quad (5)$$

sendo assim, a função custo eólica é:

$$f_w = \sum_{i=1}^n d_i \cdot P_{w_i} + C_{p_i} + C_{r_i} \quad (6)$$

Para que o custo penalidade e reserva sejam calculados é necessário estimar a velocidade diária do vento para determinar a produção de energia, de acordo com o que segue na seção 2.1.

2.1 A incerteza da velocidade do vento

Como a produção de energia eólica depende da velocidade do vento, que é caracterizada como uma variável aleatória, o sistema de conversão de energia eólica é um problema estocástico, por isso utiliza-se a função de probabilidade (4). Para determinar a potência de saída de geração do sistema é feita uma transformação da velocidade do vento (m/s) em função da potência de saída (MW). A figura 1 mostra como a variação da velocidade do vento determina a potência de saída relacionada à energia gerada.

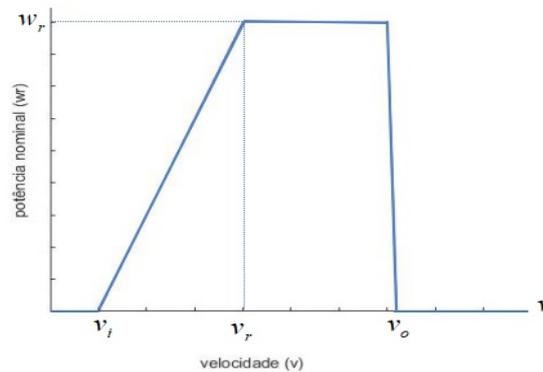


Figura 1: Comportamento da potência em relação a velocidade do vento

As turbinas de geração de energia eólica respeitam determinados limitantes de velocidade do vento para geração de energia, sendo necessário uma velocidade inicial (v_i) para que as turbinas comecem sua geração. Com o aumento da velocidade do vento, a potência começa a aumentar gradativamente até atingir a potência nominal do gerador (w_r) e a partir do momento em que a velocidade chega a uma velocidade nominal (v_r) a potência permanece constante. Caso a velocidade continue aumentando uma velocidade de corte (v_o) é determinada para que danos estruturais na turbina sejam evitados, deixando assim de gerar energia. Após estabelecer a correlação entre a velocidade do vento e a potência eólica gerada, a resolução do modelo (1) é feita considerando-se subproblemas mono-objetivos gerados através do Método de restrições canalizadas progressivas visto na seção 3.

3 Método de restrições canalizadas progressivas

Para modelos de otimização multiobjetivo, o método de restrições canalizadas progressivas, proposto por [4], transforma o problema original em um conjunto de subproblemas mono-objetivos. Para o modelo proposto, a função custo ($f_e + f_w$) torna-se a função objetivo do modelo e a função ambiental (f_a) é incorporada às restrições deste, sendo limitada superior e inferiormente para níveis mínimos e máximos de emissão, de acordo com o problema mono-objetivo (7).

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} && f_e + f_w \\
 & \text{Sujeito a} && \sum_{i=1}^n Pw_i + \sum_{j=1}^m Pt_j = D \\
 & && f_{a_k}^{min} \leq f_a \leq f_{a_k}^{max} \\
 & && 0 \leq Pw_i \leq Pw_i^{max} \\
 & && Pt_j^{min} \leq Pt_j \leq Pt_j^{max}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Para $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$ e $k = 1, \dots, N$, onde N é o número de soluções eficientes a serem determinadas considerando cada subintervalo $I_k = [f_{a_k}^{min}, f_{a_k}^{max} \subset I]$, onde $I = [f_a^{min}, f_a^{max}]$ em que f_a^{min} e f_a^{max} são, respectivamente, os valores mínimo e máximo da função objetivo ambiental obtidos para as soluções lexicográficas determinadas pela minimização das funções de f_a e $f_e + f_w$. A resolução do problema (7) foi realizada para 4 casos distintos de geração de energia que serão vistos na seção 4.

4 Resultados numéricos

Os seguintes casos foram realizados para a resolução do subproblema (7) utilizando o pacote computacional *knitro* do *software Gams*.

caso I: problema sem a adição de usinas eólicas;

caso II: com inserção das usinas eólicas e velocidade do vento igual a $v = [0, v_i]m/s$;

caso III: com inserção das usinas eólicas e velocidade do vento igual a $v =]v_i, v_r]m/s$;

caso IV: com inserção das usinas eólicas e velocidade do vento igual a $v =]v_r, v_o]m/s$;

Os casos II, III e IV estão de acordo com a variação de velocidade vista na figura 1. Para cada caso foram calculados os valores lexicográficos da função custo e função ambiental e a partir deles determinado 10 intervalos para a canalização da função ambiental e resolução dos subproblemas mono-objetivo (7).

Os resultados obtidos foram feitos com os dados encontrados em [4] para as usinas térmicas de 3 geradores para despacho econômico e ambiental representados respectivamente como dólar por hora ($\$/h$) e quilograma por hora (Kg/h). Quanto as usinas eólicas, os valores de potência máxima estão associados a algumas unidades geradoras brasileiras, dadas por: $Pw_1^{max} = 15.54$ MW, $Pw_2^{max} = 15$ MW, $Pw_3^{max} = 14.70$ MW, $Pw_4^{max} = 15.60$ MW e $Pw_5^{max} = 10.32$ MW e os valores mínimos são diferentes para cada velocidade do vento. Os valores de velocidade de inicial (v_i), velocidade nominal (v_r) e velocidade de corte (v_o) das turbinas eólicas são, 5 m/s, 15 m/s e 40 m/s respectivamente. A demanda de produção determinada é de 850 MW.

A figura 2 mostra a curva de Pareto ótima para cada um dos casos simulados. Analisando as soluções encontradas, podemos observar que no caso I, onde ainda não foram inseridos os geradores eólicos ao problema, os valores com relação ao custo dos combustíveis

e a emissão de CO_2 são extremos e, a partir desse caso, analisamos como a energia eólica auxilia na redução da emissão de CO_2 . No caso II, encontramos o pior valor tanto para a função custo como para a função ambiental, desde que a velocidade de 5 m/s não ultrapassou a velocidade mínima para que as usinas eólicas começassem a produzir, mas como os coeficientes de custo eólico foram inseridos na função objetivo, devido a função 4 os resultados de produção das usinas térmicas são diferentes do caso I. No caso III, a velocidade adotada está dentro do segundo intervalo apresentado no gráfico 1, onde a produção de energia eólica começa a crescer e soluções melhores são encontradas, tanto para a função ambiental como para a função custo. No caso IV a velocidade adotada possibilita que as usinas eólicas atinjam o seu máximo de produção, encontrando assim o melhor valor da função ambiental e conseqüentemente a redução da função custo, estabelecendo o melhor valor dentre todos os casos apresentados.

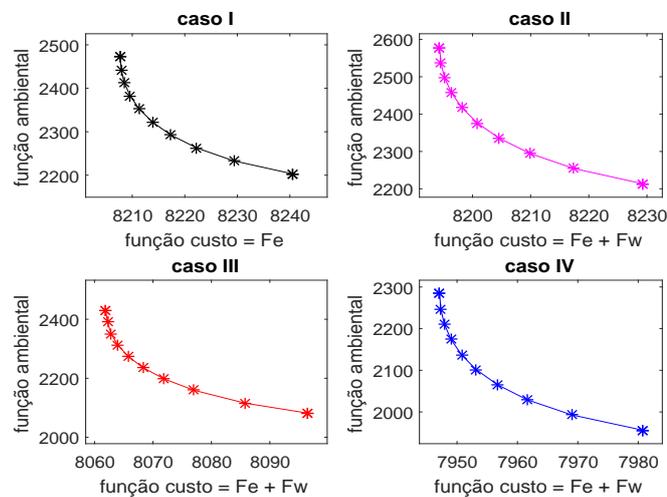


Figura 2: Curva de Pareto ótima para cada caso

A tabela 1 mostra os valores lexicográficos das funções utilizados para cada caso.

Tabela 1: Valores lexicográficos da função custo e ambiental para cada os casos I, II, III e IV

	f_a^{min} (em kg/h)	f_a^{max} (em kg/h)	$(f_e + f_w)^{min}$ (em \$/h)	$(f_e + f_w)^{max}$ (em \$/h)
Caso I	2203.10	2471.75	8207.70	8240.54
Caso II	2213.89	2578.73	8194.36	8229.16
Caso III	2082.20	2428.41	8061.93	8096.37
Caso IV	1956.60	2283.57	7947.13	7980.64

Note que, dentre todos os casos analisados, os melhores valores para as funções investigadas são estabelecidos para o caso IV.

5 Conclusão

Esse trabalho permitiu analisar como a inserção das usinas eólicas podem auxiliar na redução da emissão de CO_2 e nos custos operacionais para a produção de energia envolvendo as usinas térmicas e eólicas. Sendo o Brasil um país com uma vasta diversidade climática e velocidade de vento diferentes para cada região, a produção eólica está em crescente expansão com instalação de novas unidades geradoras de energia, tornando-se possível a realização de estudos em grande escala. Os resultados apresentados mostram a importância e a viabilidade de se explorar essa fonte de energia no país. Para trabalhos futuros o problema multiobjetivo será definido considerando 3 funções objetivos: custo dos combustíveis, redução da emissão e custo de produção eólica.

Referências

- [1] Eolica, Associação Brasileira de Energia Eólica. *Boletim Anual de Geração Eólica 2016*. ABEEolica, São Paulo, 2016.
- [2] Council, Global Wind Energy. *Global wind statistics 2017*. Annual market update, Bruxelas/Bélgica, 2018.
- [3] L.R.A. Gabriel, C.P. Cremasco, O.J. Seraphim and F.D.L. Caneppele. *Caracterização analítica e geométrica da metodologia geral de determinação de distribuições de Weibull para o regime eólico e suas aplicações*. Engenharia Agrícola, p.56-66, 2011.
- [4] E. Gonçalves *Métodos híbridos de pontos interiores/exteriores e de aproximantes de funções em problemas multiobjetivo de despacho econômico e ambiental*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho- Faculdade de Engenharia de Bauru, p. 172, 2015.
- [5] J. Hetzer, C. Yu. David, C. Yu and K. Bhattarai. *An economic dispatch model incorporating wind power*. IEEE Transactions on energy conversion, v. 23, n. 2, p. 603-611, 2008.
- [6] D. F. Jones and M. Tamiz *Practical goal programming*. Springer, New York, Volume 141, No. 141, 2010.