

DESPACHO ECONÔMICO E AMBIENTAL SOB RESTRIÇÃO DE COMBUSTÍVEL UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR FUZZY

JÉSSICA CRISTINA DA SILVA SOUSA*, OSVALDO RONALD SAAVEDRA*, SHIGEAKI LEITE LIMA*

*Departamento de Engenharia de Eletricidade-UFMA, São Luís, MA

Emails: jessicacristina.eng@gmail.com, o.saavedra@ieee.org, shigeaki.lima@ufma.br

Resumo— Este trabalho apresenta uma proposta para a solução do despacho econômico e ambiental com restrições de combustível utilizando programação linear fuzzy (PLF). Através da PLF, a programação linear clássica - onde a função objetivo é linearizada por partes - tem seu desempenho melhorado. O erro introduzido na linearização por partes é mitigado pela utilização da abordagem fuzzy, que modela os limites de cada incremento de geração como uma função de pertinência. Este tratamento fuzzy dos limites das capacidades dos geradores agrega mais flexibilidade ao problema, permitindo que seja testado um maior número de soluções possíveis. A restrição de consumo total de combustível é inserida ao despacho econômico e ambiental por meio de contratos *take-or-pay*. Para resolver o problema em questão é necessário discretizar o período de tempo semanal total e aplicar o método proposto através da função objetivo decomposta em uma soma de funções lineares. O estudo de caso foi realizado usando o sistema IEEE-30 como forma de validação do método. Os resultados quando comparados ao método convencional mostraram-se promissores.

Palavras-chave— Despacho econômico e ambiental, Programação Linear, Incertezas, Combustível

1 Introdução

Tradicionalmente, as usinas térmicas de geração têm sido despachadas sob critério de otimalidade em relação ao mínimo custo de geração e poluição produzida. O primeiro critério consiste no despacho econômico cujo objetivo é alocar as unidades de geração atendendo a uma demanda específica de forma a minimizar os custos de combustível utilizado na produção de energia elétrica. O segundo critério consiste no despacho ambiental que visa minimizar as emissões de poluentes provenientes da queima de combustível fóssil. A geração de energia através de usinas termoeletricas convencionais produz vários tipos de poluentes, entre elas a de emissão de gases tais como dióxidos de carbono e enxofre, assim como óxido de nitrogênio. As inquietudes ambientais que surgem com as emissões produzidas pelo abastecimento fóssil das plantas elétricas decorrem das Emendas da Lei de Ar Limpo (the Clean Air Act Amendments) que foram aplicadas para reduzir emissões de SO_2 e NO_2 desse tipo de usina (Oliveira and Saavedra, 2008) e (Oliveira and Saavedra, 2007). Por outro lado, existem cláusulas contratuais que impõem ao agente gerador a compra de um montante mínimo de combustível de forma a reduzir a volatilidade da remuneração do produtor (Borelli, 2003).

Neste trabalho é proposta a solução para o problema de despacho econômico e ambiental para um sistema de energia composto por unidades termo-elétricas com restrições de combustível utilizando a técnica de PLF. A proposta é validada com um sistema teste da literatura e comparada em termos de desempenho com outras metodologias recentes.

1.1 Despacho com mínimo custo de produção

O problema original do despacho econômico consiste em um sistema formado por N usinas térmicas conectadas à rede de energia atendendo à uma demanda específica (P_{Load}).

O custo total de produção deste sistema é equivalente ao somatório dos custos individuais de produção de cada usina. Os custos individuais são determinados a partir de uma função não-linear que relaciona o custo incremental ($R\$/kWh$) versus a potência de saída em *megawatts* (Wood and Woolemberg, 2012).

Analiticamente, o problema do despacho econômico é formulado através de uma função objetivo (F_E) de custo do combustível. O problema consiste em minimizar esta função tal que o somatório das potências geradas seja igual à potência da carga (as perdas foram desprezadas pois não houve a modelagem da rede) e sejam obedecidas as restrições de limites operacionais das unidades geradoras, conforme representado abaixo:

$$\min F_E = \min \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_i = P_{Load} \quad (2)$$

$$P_{i\min} \leq P_i \leq P_{i\max} \quad (3)$$

no qual N_G representa o número total de unidades geradoras do sistema, a_i , b_i e c_i são coeficientes característicos da função custo, $P_{G,i}$ as potências de saída de cada unidade de geração, P_{Load} é a potência total demandada.

1.2 Despacho com mínimo impacto ambiental

A operação econômica das usinas termoeletricas visa na maioria das vezes, a maximização dos lucros ou minimização dos custos. Contudo, após o protocolo de Kyoto em 1997, foi estabelecido por lei que as usinas reduzissem suas emissões de NO_x provenientes da queima de combustíveis fósseis (Alrashidi and M, 2004). Diante disso, tornou-se necessário elaborar uma estratégia de minimização das emissões de poluentes na atmosfera. O problema de despacho ambiental é então formulado da seguinte forma:

$$\min F_A = \min \sum_{i=1}^{N_G} (d_i P_i^2 + e_i P_i + f_i) \quad (4)$$

sujeito às mesmas restrições apresentadas em (2) e (3). Na qual, a função F_A representa as emissões totais de poluentes na atmosfera em Kg/h , P_i é a geração da unidade i em MW , e d_i , f_i , e_i são os coeficientes de emissão das unidades de geração.

1.3 Restrição de combustível

Em sistemas puramente térmicos, o preço da energia recebida por todos os geradores é igual ao custo marginal de operação do sistema, estabelecido pelo custo do último gerador despachado. Com isso, conclui-se que não há nenhuma interligação temporal com os custos de operação (Mello and Ohishi, 2010).

Todavia, em sistemas hidrotérmicos, quando as decisões são tomadas em um horizonte de médio a longo prazo, o cenário muda, uma vez que as incertezas quanto as previsões futuras das vazões naturais de usinas hidrelétricas aumentam. Com isso, a geração hidrelétrica fica reduzida e as usinas térmicas começam a assumir uma parcela cada vez maior da demanda, aumentando assim o custo de geração (Cerqueira Jr S. N. ; Santos and Saavedra, 2011).

Atualmente existem cláusulas contratuais do tipo *Take-or-Pay* que, com objetivo de diminuir grandes flutuações da remuneração do produtor do combustível, impõem ao agente gerador a compra de um volume mínimo de combustível, mensal e anual, quer este combustível seja consumido ou não (Barroso and Street, 2007). Desta forma, cabe ao gerador determinar uma estratégia para o gerenciamento eficiente do combustível dentro de um determinado prazo a fim de que todo combustível contratado seja consumido. Para que isso seja possível, adiciona-se restrição (5) ao problema:

$$\sum_{j=1}^{j_{max}} n_j q_{Gj} = q_{TOT} \quad (5)$$

sendo $j = 1 \dots j_{max}$, o intervalo de tempo para o consumo total do combustível, q_{Gj} , o consumo de combustível das unidades geradoras, em $tons/h$, a

cada intervalo de tempo j , n_j é o número de horas no j -ésimo intervalo e q_{TOT} o combustível total contratado.

2 Formulação do Problema

O principal problema ao tentar minimizar simultaneamente os dois objetivos (econômico e ambiental) é que uma vez que se minimiza os custos de geração, aumentam-se as emissões de cinzas volantes (*fly ash*) e vice-versa, além disso, são objetivos incomensuráveis pois enquanto a função F_E é expressa em $[R\$/h]$, a função a F_A é dada em $[kg/h]$ (Oliveira and Saavedra, 2014).

Com isso, o problema de despacho econômico ambiental é um problema multiobjetivo, uma vez que trata-se de dois objetivos a serem minimizados, mas que pode ser tratado como um problema monobjetivo cuja reformulação é apresentada da seguinte maneira (Bayon and Grau, 2008):

$$\min F_T = \min [\delta F_E + h(1 - \delta) F_A] \quad (6)$$

onde F_T é a função objetivo final a ser minimizada, segundo (Palanichamy and Sundar, 2008), δ é o fator de ponderação que pode assumir valores entre 0 e 1 (para valores de δ muito próximos de 0, o despacho tende a se tornar puramente ambiental enquanto que ao se aproximar de 1, o despacho tende-se a tornar puramente econômico) e h representa o fator de conversão das unidades. O parâmetro δ é estimado a partir da técnica da curva de Pareto tratada com mais detalhes em (Zavala and Flores, 2013).

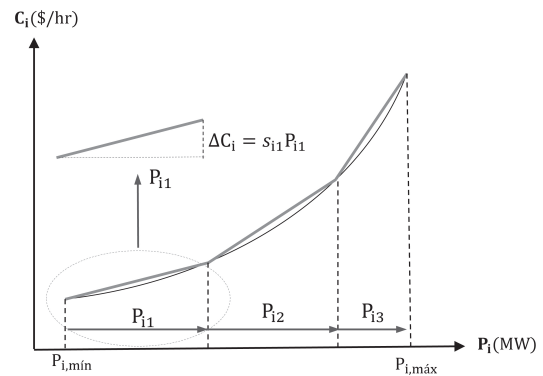


Figura 1: Curva custo linearizada por partes

Para aplicar a técnica de programação linear, a função objetivo anterior é linearizada por partes, visto com mais detalhes em (Park, 1993) em (Warid et al., 2016). A função é linearizada em três segmentos de reta ($k = 1, 2, 3$) no qual cada segmento apresentará sua própria função linear de custo conforme ilustrado na Figura 1. A restrição de balanço de combustível é agora inserida na programação e assim, o objetivo final será determinar o custo mínimo de produção com mínimo

impacto ambiental de forma que sejam asseguradas o balanço de potência e restrições operativas a cada intervalo de despacho e ao final da programac  o todo o combustível contratado seja consumido, deste modo, o problema pode ser formulado da seguinte forma:

$$\min F_T = \sum_{j=1}^{j_{max}} \sum_{i=1}^{N_G} [s_{i1}P_{i1}(j) + s_{i2}P_{i2}(j) + s_{i3}P_{i3}(j)] \quad (7)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^{N_G} \left(\sum_{k=1}^3 P_{ik} \right) = P_{j_{Load}} - \left(\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,min} \right) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{j_{max}} n_j q_{Gj} = q_{TOT} \quad (9)$$

$$P_{ik,min} \leq P_{ik} \leq P_{ik,max} \quad (10)$$

onde s_{i1} , s_{i2} e s_{i3} representa a inclinação da reta de cada segmento, $j = 1..j_{max}$ corresponde ao intervalo de tempo em horas, $P_{j_{Load}}$ é a demanda da carga no intervalo j . Observe-se que o problema abordado não tem perdas, porque a rede não está sendo representada, limitando-se apenas à modelagem do parque gerador. É importante notar que P_{ik} não corresponde ao valor de geração em si, mas ao incremento de geração com valores entre $P_{ik,min}$ e $P_{ik,max}$.

Fundamentando-se na teoria dos conjuntos fuzzy no qual fornece uma estrutura natural para modelar a transição gradual entre limites considerados rígidos, pretende-se utilizar deste conceito para modelar os incrementos de potência dos geradores por meio de funções de pertinência flexibilizando os limites de potências ativas nas barras de geração substituindo os limites discretos de geração por funções de pertinência trapezoidais. Isso permite com que o espaço de busca da solução seja explorado de forma mais eficaz, reduzindo o efeito da linearização na qualidade da solução final.

Seja $d_i (>0)$, uma tolerância para os limites dos incrementos de potências ativas de saída das unidades geradoras (Wang, 1999). Então, a restrição $P_{ik,min} \leq P_{ik} \leq P_{ik,max}$ pode ser reescrita como:

$$P_{ik,min} - \theta d_i \leq P_{ik} \leq P_{ik,max} + \theta d_i. \quad (11)$$

onde $\theta \in [0, 1]$.

A função de pertinência para (11)   ilustrada na Figura (2) e descrita em (12).

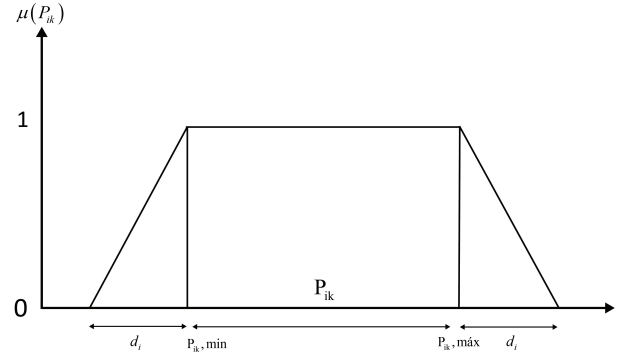


Figura 2: Função de Pertinência para o limite relaxado de potência

$$\mu_i(\mathbf{P}) = \begin{cases} 1, & \text{se } P_{ik,min} \leq P_{ik} \leq P_{ik,max} \\ 1 + \frac{(P_{ik} - P_{ik,min})}{d_i}, & \text{se } P_{ik,min} - d_i \leq P_{ik} \leq P_{ik,min} \\ 1 + \frac{(P_{ik,max} - P_{ik})}{d_i}, & \text{se } P_{ik,max} \leq P_{ik} \leq P_{ik,max} + d_i \\ 0, & \text{se } P_{ik,min} - d_i \leq P_{ik} \leq P_{ik,min} + d_i \end{cases} \quad (12)$$

onde $i = 1, \dots, N_G$ é o  ndice de cada gerador e d_i   o limite flexibilizado da potência ativa, conforme ilustrado na Figura 2.

O problema consiste então em determinar os valores de P_{ik} , tal que F_T e $\mu_i(\mathbf{P})$ sejam minimizados. Em (Wang, 1999) foi proposto o seguinte método para resolução desse problema: soluciona-se o problema (7) sujeito às restrições (8), (9) e (10) pelo método de programac  o linear convencional e posteriormente com os limites de potências estendidos conforme apresentada na restrição (11).

Deste modo, sendo $\mathbf{P}^0$ e $\mathbf{P}^1$ os vetores de soluções da função objetivo(7) respectivamente sem e com a tolerância d_i inserida, substituem-se essas soluções na função objetivo para determinar $z^0 = F_T^0$ e $z^1 = F_T^1$. Deste modo, a função de pertinência em (13)   definida para representar o grau de otimalidade da função objetivo:

$$\mu_0(\mathbf{P}) = \begin{cases} 1, & \text{se } \mathbf{F_T} > z^1 \\ 1 - \frac{z^1 - \mathbf{F_T}}{z^1 - z^0}, & \text{se } z^0 \leq \mathbf{F_T} \leq z^1 \\ 0, & \text{se } \mathbf{F_T} < z^0 \end{cases} \quad (13)$$

Uma vez que as restrições e a função objetivo são representadas em forma de funções de pertinência, utiliza-se o método **max – min** para resolver o problema neste estágio:

$$\max \min[\mu_0(\mathbf{P}), \dots, \mu_{N_G}(\mathbf{P})] \quad (14)$$

Que finalmente pode equivalentemente ser representada da seguinte forma:

$$\min \alpha \quad (15)$$

$$F_T \geq z^1 - (1 - \alpha)(z^1 - z^0) \quad (16)$$

$$P_{ik\min} - (1-\alpha)/d_i \leq (P_{ik}) \leq P_{ik\min} + (1-\alpha)/d_i \quad (17)$$

$$\alpha \in [0,1] \quad P_{ik} > 0 \quad (18)$$

sendo α o mínimo ponto de intersecção baseado no mínimo operador, em que as curvas de custos de combustível e de emissão de poluentes se cruzam.

3 Simulações e Resultados

Foi implementado um método para resolução do despacho econômico ambiental, utilizando a programac  o linear fuzzy considerando as restrições fuzzy, foi estabelecido ainda que, as unidades térmicas geradoras possuem contrato (*take-or-pay*) de combustível semanal, desta forma a técnica além de minimizar os custos de geração e as emissões de poluentes, exige que ao final da programac  o, todo combustível contratado, seja consumido.

3.1 Sistema teste IEEE 30

Para validar o método supracitado, foi utilizado o sistema teste IEEE-30 barras (PSTCA, 2016), composto por 6 geradores. Os dados de limites de geração e dos coeficientes econ micos e ambientais podem ser observados respectivamente nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Limites operacionais em MW

Gerador	1	2	3	4	5	6
$P_{G_{max}}$	200	80	50	100	90	40
$P_{G_{min}}$	20	20	15	10	10	12

O despacho foi realizado de acordo com os contratos de combustíveis obtidos em (Wood and Woolemberg, 2012) e para um período total de uma semana. Para isso, foi considerada uma curva de carga diária discreta. A Figura 3 ilustra o modelo de curva diária utilizada na modelagem, em que a cada 4 horas é apresentado um valor constante de demanda. A tabela 3 apresenta os respectivos valores de demanda em relação ao intervalo de horas do dia. Após o término da programac  o semanal, impõe-se que todas as unidades tenham consumido 22.000 ton de combustível, o equivalente ao valor contratado.

Com o objetivo de comparar os resultados alcançados, optou-se por tabelar comparativamente os resultados das operações pelo método de programac  o linear tradicional e o método de programac  o linear fuzzy. Para o modelo proposto, os incrementos de potências foram flexibilizados em 5% (0,05 pu), quanto aos coeficientes de fator de

Tabela 2: Dados das funções de custos e de emissão dos geradores

(Wood and Woolemberg, 2012)

Gerador	Função Custo Combustível			Função Emissão de NO_x		
	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i
1	0,00375	2,00	75,67	0,0126	-1,10	22,983
2	0,01750	1,75	4,61	0,0126	-0,10	25,313
3	0,06250	1,00	10,49	0,0270	-0,01	25,505
4	0,00834	3,25	12,43	0,0290	-0,0050	24,900
5	0,02500	3,00	16,58	0,0290	-0,0040	24,700
6	0,02500	3,00	13,46	0,0271	-0,0055	25,300

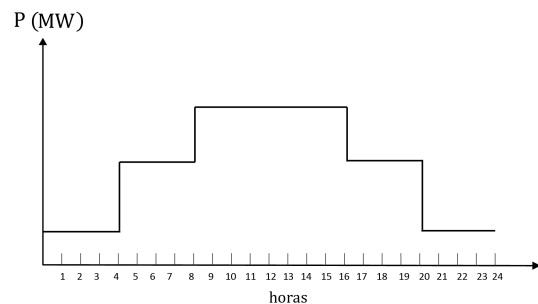


Figura 3: Modelo discreto de curva de demanda diária

ponderação (δ) e fator de conversão (h_i), foi determinado através da curva de Pareto os respectivos valores $\delta = 0.75$ e $h_i = 6.5$

As Tabelas 4 e 5 mostram a eficiência do método proposto. Quando comparados com os resultados dos despachos utilizando método de PL-fuzzy, os despachos via PL-convencional somaram um custo total mais elevado, o mesmo ocorreu com as emissões de NO_x para atmosfera, mostrando com isso, que o método proposto polui menos e com um custo menor. Uma vez que foram superadas todas as expectativas quanto ao mínimo custo de produção e mínima poluição ambiental, nota-se ainda que, ao final da programac  o de cada semana, todo o combustível contratado foi consumido conforme previsto.

É possível notar que a durante a semana, a

Tabela 3: Intervalo de tempo para curva de carga diária

Período de Tempo (h)	Demanda (MW)
00:00 - 04:00	280
04:00 - 08:00	290
08:00 - 12:00	320
12:00 - 16:00	370
16:00 - 20:00	350
20:00 - 00:00	330

Tabela 4: Resultados PL Convencional

Demanda diária (MW)	Potência das unidades de geração (MW)						Custos (R\$/hora)	Emissão (kg/hora)
	P1	P2	P3	P4	P5	P6		
280	111,5	50	27,5	55	10	26	940,25	366,44
290	121,5	50	27,5	55	10	26	968,99	384,80
320	151,5	50	27,5	55	10	26	1059,71	454,99
370	177,5	50	27,5	55	23,5	36,5	1243,49	564,10
350	177,5	50	27,5	55	10	30	1161,38	540,22
330	161,5	50	27,5	55	10	26	1091,44	483,43
Custo Total na semana (R\$)					Emissão Poluentes Total na semana (Ton)			
181.027,64					78,2315			

Tabela 5: Resultados PL Fuzzy

Demanda diária (MW)	Potência das unidades de geração (MW)						Custos (R\$/hora)	Emissão (kg/hora)
	P1	P2	P3	P4	P5	P6		
280	154,92	39,09	28,08	17,06	16,01	24,85	907,85	359,03
290	157,95	41,35	29,30	18,49	17,20	25,71	943,53	386,44
320	167,39	47,35	32,33	23,78	21,50	27,65	1051,96	441,70
370	182,64	54,94	35,86	35,48	31,21	29,87	1244,50	545,51
350	176,61	52,23	34,48	30,68	27,07	28,93	1166,15	502,31
330	170,27	49,28	33,14	25,96	23,23	28,11	1090,31	461,38
Custo Total na semana (R\$)					Emissão Poluentes Total na semana (Ton)			
179.325,38					76,44234			

diferença entre os custos totais de produção calculados pela programação linear convencional e o modelo fuzzy proposto chegaram R\$ 1.702,26. Em relação ao aspecto ambiental, não foi diferente, a emissão de poluentes totais em toneladas emitidas pelas unidades de geração durante ao longo da semana, e considerando o método fuzzy foram bem menores quando comparada ao método convencional. Além disso, ambos métodos obedeceram às restrição impostas de limites de geração, balanço de potência e combustível.

4 Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma solução para o problema do despacho econômico ambiental com restrições de combustível utilizando recursos fuzzy. Foi estabelecido que durante o período de uma semana todas as unidades geradoras devem utilizar totalmente o combustível contratado obedecendo os limites operacionais de geração e atendendo à demanda. Para isso, converteu-se a função inicialmente multiobjetivo em uma função monobjetivo por meio do fator de conversão δ obtido através da curva de Pareto. Para obter as soluções pelo método de programação linear fuzzy foi realizada a linearização por partes (*piece-wise*) das curvas de custo e emissões das unidades geradoras. A metodologia proposta foi aplicada ao

sistema teste IEEE-30 constituído de 6 geradores.

O presente trabalho revelou que, ao flexibilizar os limites das gerações incrementais na forma de funções de pertinência trapezoidal fuzzy, obteve-se bom resultado que por sua vez se mostrou melhor frente ao método de otimização de programação linear convencional. Observe-se que a flexibilização é outro processo que pode ser modelado através de lógica fuzzy, ilustrando assim o amplo escopo de aplicabilidade desta técnica, que vai desde informações com incertezas até conhecimento subjetivo. No problema alvo, ao permitir que os incrementos de potência pudessem se estender por meio de uma função de pertinência além dos limites inferiores e superiores exigidos, aumenta-se em forma fuzzy região de viabilidade de cada intervalo, permitindo lidar melhor com a função linearizada por partes, aumentando o espaço de busca e possibilitando a extração de melhores soluções do que o caso de programação linear clássica.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa e Desenvolvimento Científico do Maranhão - FAPEMA e ao CNPQ pelo suporte financeiro.

Referências

- Alrashidi, M. R. and M, E.-H. (2004). Impact of loading conditions on the emission-economic dispatch, *Proc. World Academy of Science, Engineering and Technology* .
- Barroso, L. and Street, A. (2007). Impactos derivados da criação de um mercado flexível de gás natural no brasil, *Grupo de estudo e comercialização economia e regulação de energia elétrica* .
- Bayon, L. and Grau, J. (2008). Power system control and stability, *Proc. World Academy of Science, Engineering and Technology* .
- Borelli, S. (2003). Viabilização da termoeletricidade no brasil através de mudanças no ambiente regulatório da indústria de gás natural, *Segundo Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás* .
- Cerqueira Jr S. N. ; Santos, S. T. and Saavedra, O. R. (2011). Pré-despacho hidrotérmico em ambiente competitivo via otimização por exame de partículas, *X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São João del Rei* .
- Mello, O. D. and Ohishi, T. (2010). Modelo de despacho termoeletrico considerando restrições no suprimento de gás natural, *O impacto da pesquisa operacional nas novas tendências multiciplinares, XXXVI -SBPO* .
- Oliveira, A. J.; Cerqueira-Junior S. S ; PINTO, M. S. and Saavedra, O. R. (2014). Despacho hidrotérmico levando em conta a emissão de poluentes, *XX Congresso Brasileiro de Automação, 2014, Belo Horizonte. Anais do XX CBA* .
- Oliveira, K. W. ; Nascimento Junior, N. T. and Saavedra, O. R. (2007). Uma abordagem evolutiva para o despacho econômico ambiental considerando zonas proibidas, *VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2007, Florianópolis. Anais do VIII SBAI* .
- Oliveira, K. W. ; Nascimento Junior, N. T. and Saavedra, O. S. (2008). An evolutionary approach for the solution of the economic dispatch considering generation constraints, *Revista IEEE América Latina* .
- Palanichamy, C. and Sundar, B. N. (2008). Analytical solution for combined economic and emissions dispatch, *Electric Power Systems Research* pp. 1129–11137.
- Park, J. H., e. a. (1993). Economic load dispatch for a piecewise quadratic cost function using hopfield neural network, *IEEE, Power Systems Transactions on* 8.3 .
- PSTCA (2016). Power systems test case archive, <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>. Acessado em : 15-02-2016.
- Wang, L.-X. (1999). *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall Press, USA.
- Warid, W., Hizam, H., Mariun, N. and Abdul-Wahab, N. I. (2016). An efficacious multi-objective fuzzy linear programming approach for optimal power flow considering distributed generation, *PloS one* **11**(3): e0149589.
- Wood, A. and Woolemberg, L. B. (2012). *Power Generation Operation and Control*, John Wiley Sons, USA.
- Zavala, V. M. and Flores, A. (2013). Stability of multiobjective predictive control: A utopia tracking approach, *Automatica* **8**.