

Resolução de Despacho Multicombustível via Estratégia Evolutiva

Paulo Henrique Cunha

paulo.cunha@discente.ufma.br

Prof. Dr. Osvaldo R. Saavedra



Departamento de Engenharia de Eletricidade
Grupo de Sistemas de Potência
Universidade Federal do Maranhão

26 de junho de 2020



Introdução

Formulação do Despacho

Despacho Clássico

Despacho Multicombustível

Efeito dos Pontos de Válvula

Restrições de Operação

Resolução via Estratégia Evolutiva

Fluxograma do Método

Resultados Parciais

Sistema com 10 geradores

Sistema com 80 geradores

Conclusões Parciais

Computação Evolutiva: Algoritmos que se baseiam na Teoria da Evolução de Darwin.

- ▶ Algoritmos genéticos;
- ▶ Programação evolutiva;
- ▶ **Estratégias evolutivas.**

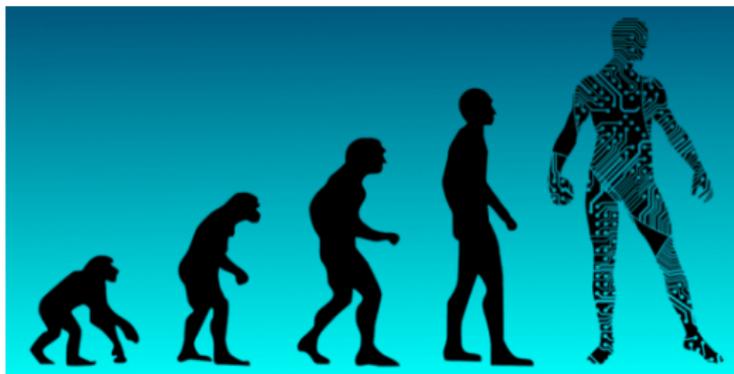


Figura 1: Processo de evolução



$$\text{Min } C_T = \sum_{i=1}^n F_i(P_i)$$

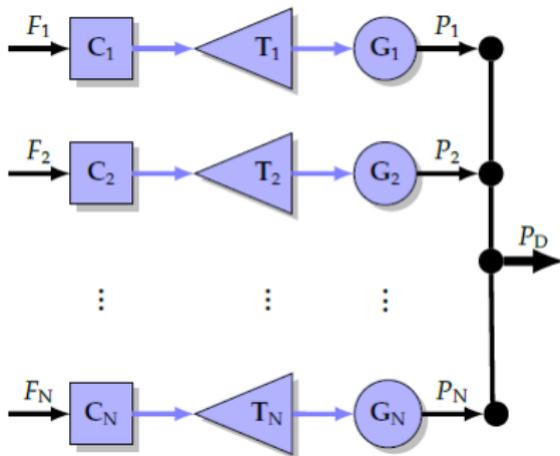


Figura 2: Representação de um sistema de geração termelétrica



Despacho Clássico

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2$$

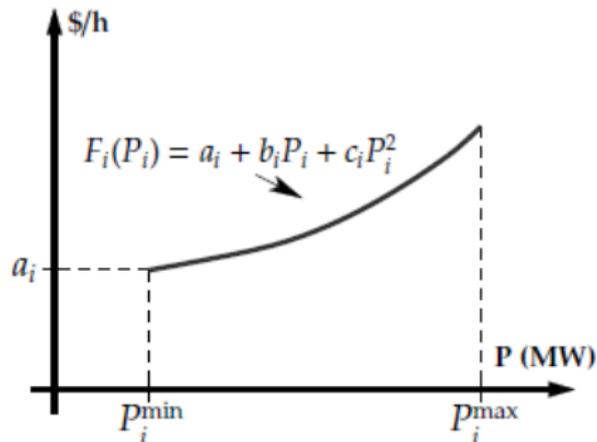


Figura 3: Curva de custo de geração



Despacho Multicombustível

$$F_i(P_i) = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}P_i + c_{i1}P_i^2, & \text{combustível 1, se } P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i1} \\ a_{i2} + b_{i2}P_i + c_{i2}P_i^2, & \text{combustível 2, se } P_{i1} < P_i \leq P_{i2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{ik} + b_{ik}P_i + c_{ik}P_i^2, & \text{combustível } k, \text{ se } P_{ik-1} < P_i \leq P_i^{\max} \end{cases}$$

onde:

- ▶ a_{ik} , b_{ik} e c_{ik} são os coeficientes de custo do i -ésimo gerador utilizando o k -ésimo combustível.



Despacho Multicombustível

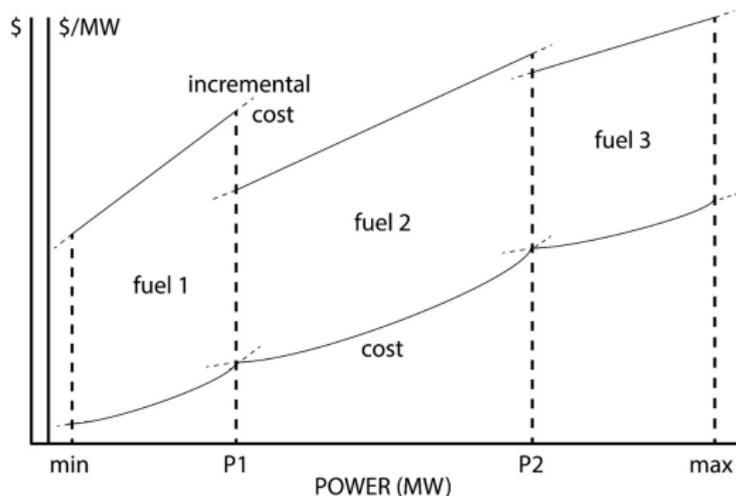


Figura 4: Curvas de custo com múltiplos combustíveis



Despacho Clássico

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |d_i \text{sen}(e_i (P_i^{\min} - P_i))|$$

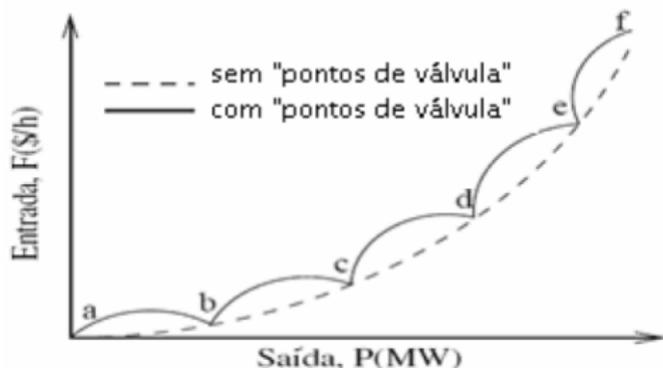


Figura 5: Função de custo com pontos de válvula



Despacho Multicombustível

$$F_i(P_i) = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}P_i + c_{i1}P_i^2 + |d_{i1}\text{sen}(e_{i1}(P_{i1}^{\min} - P_{i1}))|, & \text{combustível 1, se } P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i1} \\ a_{i2} + b_{i2}P_i + c_{i2}P_i^2 + |d_{i2}\text{sen}(e_{i2}(P_{i2}^{\min} - P_{i2}))|, & \text{combustível 2, se } P_{i1} < P_i \leq P_{i2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{ik} + b_{ik}P_i + c_{ik}P_i^2 + |d_{ik}\text{sen}(e_{ik}(P_{ik}^{\min} - P_{ik}))|, & \text{combustível } k, \text{ se } P_{ik-1} < P_i \leq P_i^{\max} \end{cases}$$

onde:

- ▶ a_{ik} , b_{ik} e c_{ik} são os coeficientes de custo do i -ésimo gerador utilizando o k -ésimo combustível;
- ▶ d_{ik} e e_{ik} são os coeficientes de custo com o efeito dos pontos de válvula.

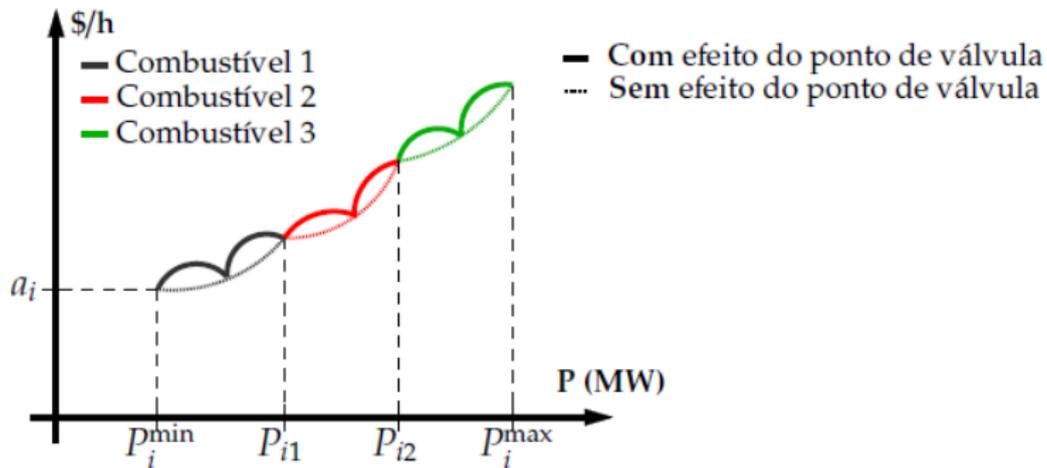


Figura 6: Curvas de custo com múltiplos combustíveis e efeito dos pontos de válvula



Limites Operacionais

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max}$$

Balço de Potência

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_d + P_{loss}$$

onde:

- ▶ n - número de geradores;
- ▶ P_d - potência de demanda;
- ▶ P_{loss} - perdas na transmissão.



Perdas na Transmissão

$$P_{loss} = \mathbf{P}^T [B] \mathbf{P} + B_0^T \mathbf{P} + B_{00}$$

onde:

- ▶ \mathbf{P} - vetor de todas as barras geradoras (MW);
- ▶ B - matriz quadrada dos coeficientes das perdas e de mesma dimensão que \mathbf{P} ;
- ▶ B_0 - vetor de mesmo tamanho que \mathbf{P} ;
- ▶ B_{00} - constante.

A equação das perdas também pode ser expressa como:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_{0i} P_i + B_{00}$$



Limites de Rampa

- ▶ Se a geração aumenta:

$$P_i - P_i(t-1) \leq UR_i$$

- ▶ Se a geração diminui:

$$P_i(t-1) - P_i \leq DR_i$$

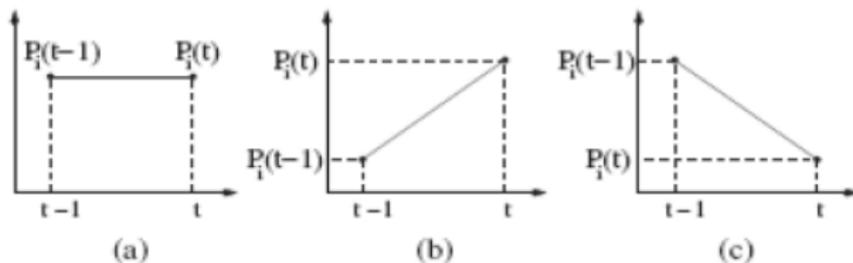


Figura 7: Rampas de Geração



Zonas Proibidas de Operação

- ▶ Faltas nas máquinas;
- ▶ Oscilações das válvulas a vapor;
- ▶ Serviços auxiliares como caldeiras.

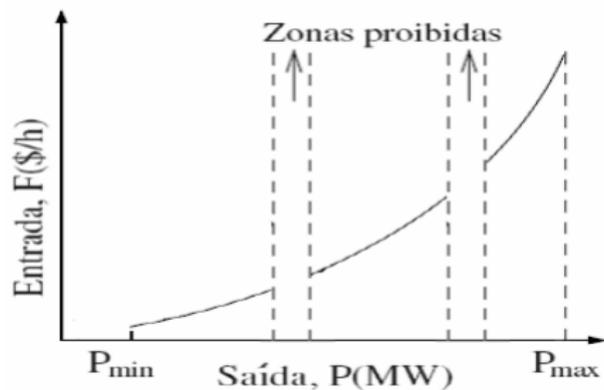


Figura 8: Zonas Proibidas de Operação

Dados do sistema de teste



Unit	Generation				Fuel type	Cost coefficients				
	Min	P_1	P_2	Max		a_i	b_i	c_i	e_i	f_i
	F1	F2	F3							
1	100	196	250		1	.2697e2	-.3975e0	.2176e-2	.2697e-1	-.3975e1
		1	2		2	.2113e2	-.3059e0	.1861e-2	.2113e-1	-.3059e1
2	50	114	157	230	1	.1184e3	-.1269e1	.4194e-2	.1184e0	-.1269e2
		2	3	1	2	.1865e1	-.3988e-1	.1138e-2	.1865e-2	-.3988e0
					3	.1365e2	-.1980e0	.1620e-2	.1365e-1	-.1980e1
3	200	332	388	500	1	.3979e2	-.3116e0	.1457e-2	.3979e-1	-.3116e1
		1	3	2	2	-.5914e2	.4864e0	.1176e-4	-.5914e-1	.4864e1
					3	-.2875e1	.3389e-1	.8035e-3	-.2876e-2	.3389e0
4	99	138	200	265	1	.1983e1	-.3114e-1	.1049e-2	.1983e-2	-.3114e0
		1	2	3	2	.5285e2	-.6348e0	.2758e-2	.5285e-1	-.6348e1
					3	.2668e3	-.2338e1	.5935e-2	.2668e0	-.2338e2
5	190	338	407	490	1	.1392e2	-.8733e-1	.1066e-2	.1392e-1	-.8733e0
		1	2	3	2	.9976e2	-.5206e0	.1597e-2	.9976e-1	-.5206e1
					3	-.5399e2	.4462e0	.1498e-3	-.5399e-1	.4462e1
6	85	138	200	265	1	.5285e2	-.6348e0	.2758e-2	.5285e-1	-.6348e1
		2	1	3	2	.1983e1	-.3114e-1	.1049e-2	.1983e-2	-.3114e0
					3	.2668e3	-.2338e1	.5935e-2	.2668e0	-.2338e2



Figura 9: Fluxograma do Algoritmo



$$v_i = ([P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}], [\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \dots, \sigma_{in}])$$

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i1} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{\mu 1} & \dots & P_{\mu j} & \dots & P_{\mu n} \end{pmatrix}$$

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \dots & \sigma_{1j} & \dots & \sigma_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{i1} & \dots & \sigma_{ij} & \dots & \sigma_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{\mu 1} & \dots & \sigma_{\mu j} & \dots & \sigma_{\mu n} \end{pmatrix}$$



Primeiro operador para criação de novos indivíduos.

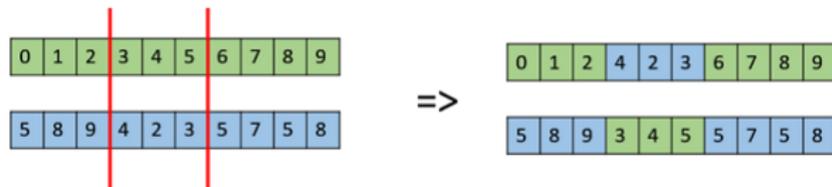


Figura 10: Operador de Recombinação

1. Recombinação Aleatória;
2. Recombinação Intermediária Global;



Recombinação Aleatória

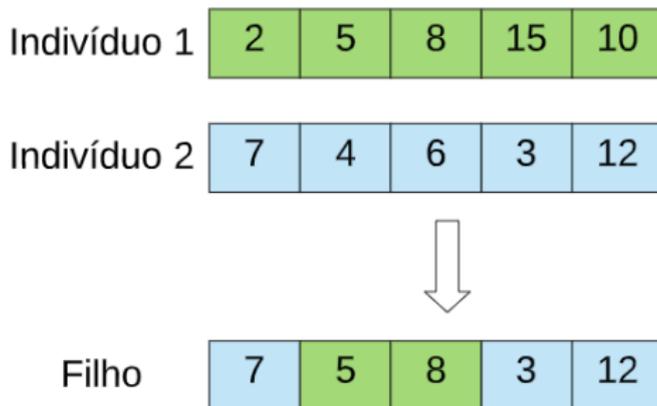


Figura 11: Recombinação Aleatória



$$P_{cruz} = \begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i1} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{\mu 1} & \dots & P_{\mu j} & \dots & P_{\mu n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{(\lambda-1)1} & \dots & P_{(\lambda-1)j} & \dots & P_{(\lambda-1)n} \\ P_{\lambda 1} & \dots & P_{\lambda j} & \dots & P_{\lambda n} \end{pmatrix} \mathbf{1}$$

¹A matriz P_{cruz} representa a nova população de indivíduos após o operador de recombinação.



Este operador aplica a mutação gaussiana nos λ descendentes obtidos através da recombinação.

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} \cdot \exp(\tau' N(0, 1) + \tau N(0, 1))$$

$$P'_{ij} = P_{ij} + \sigma'_{ij} \cdot N(0, 1)$$

sendo os fatores $\tau = \left(\sqrt{2\sqrt{n}}\right)^{-1}$ e $\tau' = \left(\sqrt{2n}\right)^{-1}$ definidos como *taxa de aprendizagem*.



$$P_{mut} = \begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i1} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{\mu 1} & \dots & P_{\mu j} & \dots & P_{\mu n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P'_{(\lambda-1)1} & \dots & P'_{(\lambda-1)j} & \dots & P'_{(\lambda-1)n} \\ P'_{\lambda 1} & \dots & P'_{\lambda j} & \dots & P'_{\lambda n} \end{pmatrix}^2$$

²A matriz P_{mut} representa a nova população de indivíduos após o operador de mutação.



Refinamento da mutação com o decorrer das gerações.

$$\sigma(t)_{max} = \sigma_{max}^0 \cdot \exp(-t/T)$$

$$\sigma(t)_{min} = \sigma_{min}^0 \cdot \exp(-t/T)$$

$$\sigma(t) = \sigma(t)_{min} + \delta \cdot (\sigma(t)_{max} - \sigma(t)_{min})$$

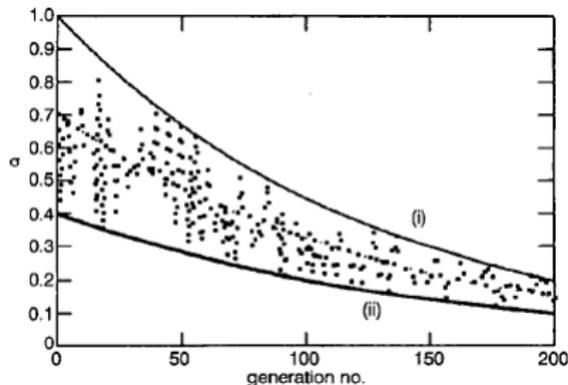


Figura 12: Limites dinâmicos



Avalia cada indivíduo de acordo com a função objetivo (*fitness*). Para o caso do despacho clássico:

$$fit_i = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) + K_d \cdot \left(\sum_{i=1}^n P_i - P_d - P_{loss} \right)^2$$

$$\begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i1} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{\mu 1} & \dots & P_{\mu j} & \dots & P_{\mu n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{\lambda 1} & \dots & P_{\lambda j} & \dots & P_{\lambda n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} fit_1 \\ \vdots \\ fit_i \\ \vdots \\ fit_{\mu} \\ \vdots \\ fit_{\lambda} \end{pmatrix}$$



Etapa em que são selecionados os μ melhores indivíduos para a próxima geração.

$$P_{sel} = \begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i1} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{\mu 1} & \dots & P_{\mu j} & \dots & P_{\mu n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{\lambda 1} & \dots & P_{\lambda j} & \dots & P_{\lambda n} \end{pmatrix}$$



► EE- (μ, λ)

$$P_{sel} = \begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i1} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{\mu 1} & \dots & P_{\mu j} & \dots & P_{\mu n} \\ P_{(\mu+1)1} & \dots & P_{(\mu+1)j} & \dots & P_{(\mu+1)n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{(\lambda-1)1} & \dots & P_{(\lambda-1)j} & \dots & P_{(\lambda-1)n} \\ P_{\lambda 1} & \dots & P_{\lambda j} & \dots & P_{\lambda n} \end{pmatrix}$$



► EE-($\mu + \lambda$)

$$P_{sel} = \begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i1} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{\mu 1} & \dots & P_{\mu j} & \dots & P_{\mu n} \\ P_{(\mu+1)1} & \dots & P_{(\mu+1)j} & \dots & P_{(\mu+1)n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{(\lambda-1)1} & \dots & P_{(\lambda-1)j} & \dots & P_{(\lambda-1)n} \\ P_{\lambda 1} & \dots & P_{\lambda j} & \dots & P_{\lambda n} \end{pmatrix}$$



Parâmetros de Simulação

- ▶ $\mu = 50$ pais;
- ▶ $\lambda = 100$ filhos;
- ▶ gerações = 500;
- ▶ $\sigma_{min}^0 = 0,005$;
- ▶ $\sigma_{max}^0 = 3$;
- ▶ 10 execuções.



Tabela 1: Resultados para o sistema com 10 geradores

Método	2400 (MW)	2500 (MW)	2600 (MW)	2700 (MW)	Iterações
ALO	485,0665	528,0273	579,7788	625,8732	750
IALO	481,7230	526,2391	574,3814	623,8092	750
EE	481,7226	526,2388	574,3808	623,8092	500

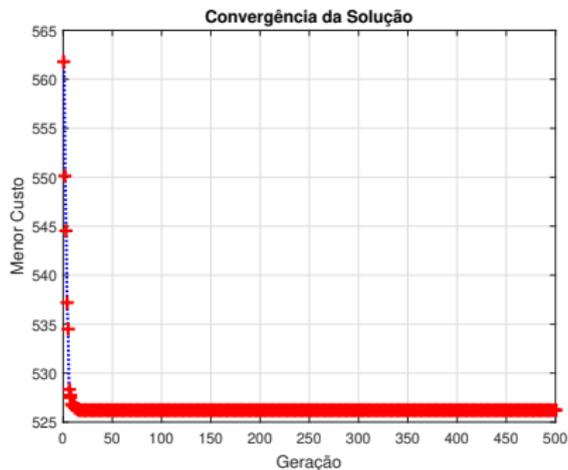


Figura 13: Convergência da solução



Tabela 2: Potências de saída

Gerador	2400 (MW)	2500 (MW)	2600 (MW)	2700 (MW)
G_1	189,7416	206,5196	216,5459	218,2492
G_2	202,3428	206,4575	210,9065	211,662
G_3	253,8955	265,738	278,5435	280,723
G_4	233,0457	235,9527	239,0963	239,6313
G_5	241,8298	258,0185	275,5186	278,4999
G_6	233,0446	235,9528	239,0957	239,6313
G_7	253,2755	268,864	285,7169	288,5835
G_8	233,0451	235,9524	239,0963	239,6317
G_9	320,3823	331,4889	343,4933	428,5196
G_{10}	239,3971	255,0555	271,9869	274,8684
Pot. Saída	2400,000	2500,000	2600,000	2700,000



Tabela 3: Resultados para o sistema com 10 geradores com pontos de válvulas

Método	Melhor Custo	Custo Médio	Pior Custo	Desvio	Iterações
ALO	623,9214	626,0822	243,8231	3,8731	8000
IALO	623,8347	623,9930	626,4434	0,4232	8000
EE	623,9111	623,9707	624,1411	0,0769	500

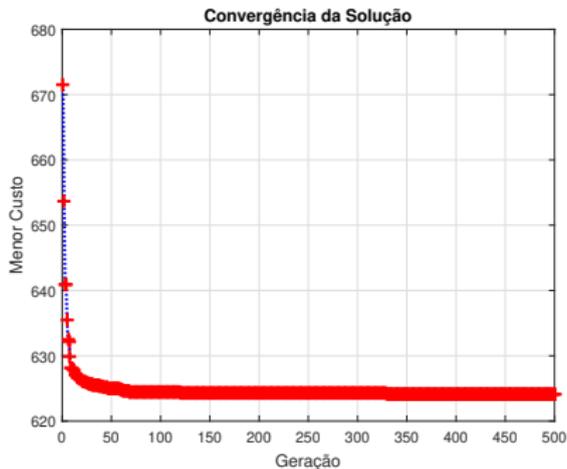


Figura 14: Convergência da solução



Tabela 4: Resultados para o sistema com 80 geradores com pontos de válvulas

Método	Melhor Custo	Custo Médio	Pior Custo	Desvio	Iterações
ALO	5001,8871	5028,8184	5053,1242	11,9668	80000
IALO	4992,1712	5004,8651	5018,6019	8,3978	80000
EE	4995,3874	4997,3184	4998,7059	1,1213	500

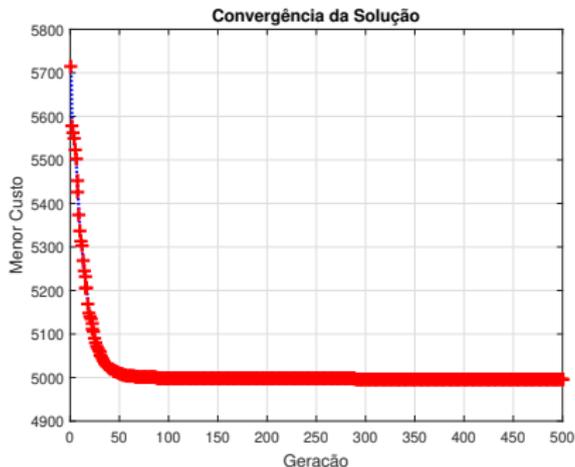


Figura 15: Convergência da solução



- ▶ Simples implementação;
- ▶ Robustez;
- ▶ Rápida convergência;
- ▶ Soluções satisfatórias;
- ▶ Confiabilidade;
- ▶ Ainda não engloba a restrição de zonas proibidas;
- ▶ Quando comparado a outros métodos da literatura, obteve os melhores resultados.



Obrigado!

