

Despacho econômico e ambiental em microrredes usando algoritmo de busca direta

Sidney Cerqueira Jr*, Osvaldo Saavedra*

*Departamento de Engenharia

Elétrica - UFMA

São Luís, Maranhão - Brazil

Email: cerqueirasidney@gmail.com, o.saavedra@ieee.org

Resumo—This paper presents the solution to Environmental/economic Dispatch for a microgrid system operating connected to main grid with diesel, microturbine, energy storage, wind and photovoltaic power plants. This problem has nonlinear functions with equality constraints and inequality as well be dynamic and time dependent. The objective function take into account the operation and maintenance costs of generators, generators power cost curve, state of charge constraints for batteries, and includes wind and photovoltaic generation. The Pattern Search algorithm is used to solve the problem to minimize the total system costs. Computer simulations shows the application and effectiveness of proposed methodology.

I. INTRODUÇÃO

As mudanças ocorridas na estrutura operacional e organizacional dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) nos últimos anos, trouxe novos desafios e barreiras a serem vencidos. Aliado à essas mudanças, observa-se uma forte tendência por uma produção eficiente e com menos impacto ambiental, o que nos direciona em busca de novas fontes alternativas para geração de energia elétrica. Partes promissoras dessas fontes alternativas são as turbinas eólicas e painéis solares [1]. Com a introdução da microgeração nos SEPs, se introduz a ideia de microrrede.

As microrredes são definidas como sendo uma parte do sistema de distribuição contendo recursos de energia distribuídos, dispositivos de armazenamento e cargas. Esses sistemas podem operar conectados à rede principal ou operar de maneira isolada (ilhamento). São sistemas conectados à rede principal de distribuição ou isolados, que possuem potência variando até uns *megawatts*, que atendem parte ou a totalidade de uma carga local, podendo exportar o excedente para outra microrrede ou sistema de distribuição. Definições mais amplas consideram as microrredes como parte ou bloco de uma rede elétrica inteligente (*Smart grid*) [1].

Em vários países, há políticas de incentivo a implementação de microrredes, devido aos benefícios oriundo destas, tais como: baixa emissão de CO_2 ; aumento de confiabilidade do sistema; baixo custo de implementação; diversificação das fontes de geração de energia e redução de perdas elétricas. Demais benefícios das microrredes podem ser encontrados em [2].

Assim como no SEP, o despacho econômico e ambiental em microrredes é um problema essencial e diário ao operador do sistema. O despacho econômico visa determinar o ponto

de operação dos geradores ao menor custo possível, atendendo uma variedade de restrições inerentes ao processo. Nas microrredes, o despacho deve considerar variações da carga, fontes intermitentes com grande penetração e sistemas de armazenamento de energia, o que torna o problema dependente do tempo.

Algumas propostas para solução do despacho podem ser encontradas na literatura. Em [3], a operação de uma microrrede com várias fontes de microgeração, contribuindo com o sistema adaptativo Fuzzy aplicado na performance do PSO, obtendo melhores resultados quando comparado com outras técnicas de Inteligência Artificial (IA). Em [4] é resolvido o despacho considerando sistema de armazenamento, microgeração eólica e solar, em modo conectado à rede, com dois cenários de preços. A solução foi obtida via PSO. Em [5], os autores propuseram um método eficiente em três passos para o despacho ótimo de microrredes, considerando restrições do *unit commitment* dentro da formulação. Já em [6], é proposto um método para uma microgrid sem considerar as perdas elétricas e comparado com o otimizador CPLEX. Não foram considerados fontes renováveis neste estudo. As funções de custo dos geradores incluindo o custo de investimento são apresentados em [7]. Um despacho multiobjetivo foi proposto em [8], onde os custos de saídas dos consumidores, emissão de poluentes e produção foram considerados, utilizando fuzzy e enxame de partículas como técnica de solução. Aplicações de sistemas multiagentes em controle e operação de microrredes podem ser encontradas em [9], [10], [11].

Neste artigo é proposta a operação econômica/ambiental de uma microrrede considerando fontes de energia renováveis, geradores diesel, microturbinas e baterias como sistema de armazenamento de energia. Serão considerados ainda dentro da formulação, os custos associados à emissão de poluentes e limites operacionais e técnicos das fontes. São considerados alguns cenários para análise da importância de fatores com armazenamento de energia e custos associados a emissão de poluentes. O algoritmo *Pattern search* é utilizado como ferramenta para solução do problema.

Na seção 2, será apresentado a formulação do problema proposto. Já na seção 3, são detalhados as fontes de geração e suas restrições. Na seção 4, é explorado de forma breve o algoritmo *pattern search*, e na seção 5, são mostrados as simulações e a análises dos resultados obtidos. Por fim, na

seção 6 serão feitas as conclusões deste artigo.

II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A. Despacho Econômico

A solução do despacho econômico visa minimizar o custo total de produção dos geradores, atendendo todas as restrições técnicas e suprindo sua demanda local. Quando conectado à rede principal, a microrrede tem a possibilidade de vender o excedente, gerando lucro. Deste modo, matematicamente tem-se um problema de programação não linear e é formulado como segue:

$$\min FC = \sum_{t=1}^T \left[\left(\sum_{i=1}^{N_G} CF_i(P_{i,t}) + OM_i(P_{i,t}) \right) + P_{R,t} \cdot \pi_{R,t} + C_{B,t}(P_{B,t}) \right] \quad (1)$$

onde $CF_i(P_{i,t})$ é o custo de produção do gerador térmico i , que pode ser um gerador diesel ou microturbina. $OM_i(P_{i,t})$ é o custo de operação e manutenção gerador i ; $P_{i,t}$ é a potência do gerador i na hora t . $P_{R,t}$ e $\pi_{R,t}$ é a potência da rede e o preço da energia na rede, respectivamente. A potência das baterias na hora t é representada por $P_{B,t}$.

Os valores positivos para a potência da rede, indicam compra de energia na hora t , enquanto os valores negativos indicam venda para a rede, resultando em lucro para microrrede.

O custo de operação e manutenção será dado em função da potência de saída, como segue:

$$OM(P_i) = \lambda_{OP} \cdot P_i \quad (2)$$

onde λ_{OP} é uma constante de proporcionalidade em função da potência do gerador i . A potência fornecida ou absorvida da rede é a diferença entre a produção da microrrede com a demanda.

B. Despacho Ambiental

Outro aspecto importante ao planejamento da operação é a emissão de poluentes tais como CO_2 , SO_2 e NO_x . Este problema é conhecido como Despacho ambiental, onde deseja-se operar as unidades geradoras com a menor emissão de poluentes possível. Deste modo, tem-se uma segunda função objetivo a ser minimizada, relacionada com a emissão de poluentes, dada por:

$$\min FE = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_G} \sum_{a=1}^A CE_a(P_{i,t}) + \sum_a ER_a(P_{R,t}) \right] \quad (3)$$

sendo FE a função de custo da emissão, A refere-se ao conjunto de poluentes (CO_2 , NO_x , SO_2). As funções CE e ER podem ser calculadas por:

$$CE_a(P_i) = \xi_{a,i} \times H_a \times P_{i,t} \quad (4)$$

e

$$ER_a(P_i) = \xi_{a,rede} \times H_a \times P_{R,t} \quad (5)$$

onde H_a é um fator de conversão em kg/kWh , $\xi_{a,i}$ e $\xi_{a,rede}$ representam a intensidade de emissão da unidade geradoras e rede, respectivamente.

C. Formulação Geral

As funções FC e FE possuem objetivos a serem minimizados distintos. Uma solução para este problema é fazer uma combinação linear dessas funções de custo e emissão, transformando-as em uma só equação com um fator de ponderação v [12]. A formulação geral do problema é dada como segue:

$$\min CT = v \cdot FC + (1 - v) \cdot FE \quad (6)$$

Esse fator de ponderação irá determinar a importância que se dará a um dos problemas. Assim, caso $v = 1$, a função objetivo irá levar em conta apenas o aspecto econômico na otimização. Caso $v = 0$, apenas o aspecto ambiental será abordado.

D. Restrições

1) *Balanço de potência*: A demanda deve ser atendida e deste modo a potência fornecida pelas fontes renováveis entram como cargas negativas, dado como segue:

$$\sum_{t=1}^{N_G} P_{i,t} + P_{V,t} + P_{w,t} + P_{B,t} + P_{R,t} = P_{D,t} + P_{P,t} \quad (7)$$

sendo P_D a demanda do sistema, P_R a potência da Rede principal e P_P são as perdas do sistemas, que nesse trabalho serão consideradas zero. As potências eólica e fotovoltaica de saída são representadas por P_w e P_V respectivamente. Para a operação em modo isolado, o valor de P_R será igual à zero na Equação 7.

Cada componente da microrrede será modelado separadamente, levando em conta suas restrições. Assim, a seguir são modelados os componentes utilizados neste trabalho.

III. MODELAGEM DOS GERADORES

A. Turbinas Eólicas

As turbinas eólicas são modeladas em função da velocidade do vento, velocidade nominal, velocidade de corte, dentre outros parâmetros [11]. Deste modo, a potência de saída pode ser calculada como segue:

$$P_w = \begin{cases} 0, & V_w < V_{ci} \\ a_w V_w^3 + b_w V_w^2 + c_w V_w + d_w, & V_{ci} \leq V_w \leq V_N \\ P_{w_{max}}, & V_{max_P} \leq V_w \leq V_{co} \\ 0, & V_w > V_{co} \end{cases} \quad (8)$$

sendo P_w é a potência de saída da turbina, V_{ci} é a velocidade mínima do vento, V_{co} velocidade de corte, V_N velocidade nominal e V_w velocidade do vento. Os coeficientes da curva de potência em função do vento são representados por a_w , b_w , c_w e d_w .

B. Painéis solares

Os painéis solares convertem energia fornecida pelo sol, em energia elétrica. Cada painel é uma combinação de várias células solares. Assim, a potência fornecida por um painel solar é limitada por questões técnicas e o fator de clima. Entre os fatores técnicos estão a eficiência, a capacidade nominal instalada, a temperatura nominal de cada célula. Já entre as questões climáticas tem-se a radiação solar e temperatura ambiente.

As vantagens da implementação de um sistema fotovoltaico estão na praticidade na montagem, pouco tempo para projetar, sem partes móveis (sem ruídos na durante operação), fácil instalação em ambientes urbanos, vida útil longa e pouca manutenção [13].

Considerando todos esses fatores, podemos obter a máxima potência de saída através da expressão:

$$P_V = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} [1 + k_{PV}(T_c - T_r)] \quad (9)$$

onde G_{ING} é a radiação solar incidente, G_{STC} é a radiação nas condições STC ¹, T_c é a temperatura da célula, T_r é a temperatura de referência e k é o coeficiente de temperatura. Já P_V é a potência de saída e P_{STC} é o módulo máximo da potência de saída em condições padrões de teste.

C. Gerador diesel

A curva de custo característica em função da potência de saída de um gerador diesel pode ser representada através de uma função quadrática, como segue:

$$C(P_i) = d \cdot P_i^2 + e \cdot P_i + f \quad (10)$$

sendo d , e e f os coeficientes do gerador i .

Cada gerador deve respeitar as restrições operacionais de máximo e mínimo de geração:

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (11)$$

O custo de operação e manutenção para esse gerador é de $OM_D = \$0,01258$ por kW .

D. Microturbinas

Microturbinas são pequenos geradores, cuja capacidade varia de 25–500 kW e que vem sendo utilizada amplamente em microrredes. Os principais componentes são um compressor, uma câmara de combustão, um gerador e uma turbina. Seu funcionamento é baseado no mesmo princípio das turbinas a gás convencionais, ou seja, no ciclo de Brayton.

O custo de geração de uma microturbina à gás está associado ao preço do combustível e eficiência, e pode ser calculado de acordo com a expressão que segue:

$$C_{MT} = C_{gas} \frac{P_{MT}}{\eta_{MT}} \quad (12)$$

sendo C_{gas} o preço do combustível, P_{MT} a potência de saída e η_{MT} eficiência da microturbina.

A microturbina é restrita a uma faixa de operação dada por:

$$P_{MT}^{\min} \leq P_{MT} \leq P_{MT}^{\max} \quad (13)$$

O custo de operação e manutenção é de $OM_{MT} = 0.018$ por kW .

E. Baterias

Um importante fator para aumentar a vida útil das baterias é seu estado de carga. Como nas baterias existem restrições de limites de energia, a medição do estado de carga previne a bateria de sobrecargas e descargas profundas, ou até mesmo de ficarem muito tempo descarregadas. Deste modo a energia em cada intervalo de tempo, pode ser calculada como segue:

$$SOC_t = SOC_{t-1} - P_{B,t} \cdot \Delta t \quad (14)$$

onde SOC_t é a energia armazenada na hora t e Δt é o intervalo de tempo. Considera-se valores positivos para descarga da bateria e negativos para carga. As restrições dos limites máximo e mínimo do estado de carga pode ser visto na expressão 15.

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (15)$$

Para o cálculo da potência de saída das baterias, será utilizada metodologia realizada em [14], o qual considera a eficiência na conversão do sistema de armazenamento. Deste modo, são consideradas duas novas variáveis, P_{in} e P_{out} , sendo as potências de entrada e saída respectivamente, definas como:

$$P_{out} = \begin{cases} P_B/\eta_o, & \text{if } P_B \geq 0, \\ 0, & \text{if } P_B < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$P_{in} = \begin{cases} 0, & \text{se } P_B \geq 0, \\ -P_B\eta_i, & \text{se } P_B < 0 \end{cases} \quad (17)$$

sendo η_o e η_i as eficiências de conversão de saída e entrada. Com isso, a potência das baterias será dada por:

$$P_B = \eta_o \cdot P_{out} - \frac{P_{in}}{\eta_i} \quad (18)$$

Considera-se como limite para as potências de carga/descarga 10% do valor máximo do estado de carga.

IV. PATTERN SEARCH

Algoritmos de busca padrão (*Pattern Search*) são uma classe de métodos de busca direta para problemas de otimização não linear [15]. São métodos que minimizam uma função através da comparação da função objetivo em um número finito de pontos.

A grande vantagem desse método está no fato de não realizar derivadas da função de custo, além ser fácil sua implementação. Baseia-se em uma estrutura simples para explorar um conjunto de pontos ao redor do ponto atual,

¹Standard Test Conditions

sempre procurando por um outro ponto que tenha um valor de função objetivo menor que o atual [16]. Esse conjunto de pontos são chamados de *mesh* e são formados pela adição do ponto atual a um escalar multiplicado por um conjunto de vetores chamado *pattern*. Se o ponto *mesh* possuir uma função objetivo com menor valor que o ponto atual, esse será o novo ponto na próxima iteração, como mostra o fluxograma da Figura 1. Os detalhes da implementação desse algoritmo e que serão utilizados nesse artigo podem ser encontrados em [15], [16].

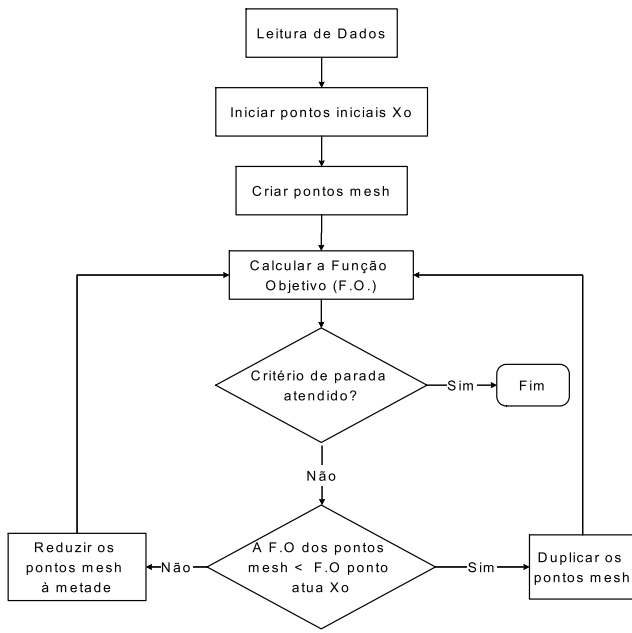


Figura 1. Fluxograma do algoritmo Pattern Search

V. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para as simulações são considerados alguns cenários com e sem participação do sistema de armazenamento e verificação da influência do impacto do custo da emissão no despacho.

Algumas características devem ser observadas: as fontes renováveis, eólica e solar, tem prioridade no despacho, pois além de não possuírem custo de geração, tem emissão zero, contribuindo no aspecto ambiental. Se as fontes renováveis não forem suficientes para atender à demanda, utiliza-se as baterias, respeitando os limites de energia armazenada. Logo após, utiliza-se os geradores diesel/microturbinas ou Rede principal para atender à demanda. Observando excesso na produção das fontes renováveis e com o sistema de armazenamento carregado em parcialmente ou totalmente, pode-se vender à rede esse montante.

A. Dados da microrrede

O perfil da demanda da microrrede varia de $20kW$ a $250kW$ como mostra a Figura 2 e a previsão de potência das turbinas eólica e painéis solares são mostrados na Figura 3. Assume-se os dados de geração eólica e solar como determinísticos. Neste artigo, a discretização do tempo é de 1h e nesse caso,

considera-se que todas as variáveis do sistema são constantes durante esse intervalo.

Tabela I
DADOS DE EMISSÃO PARA OS GERADORES (g/kWh)

Tipo de DG		SO ₂	NO _X	CO ₂
Rede		2,430	0,88	643,890
DG	Diesel	0,664	4,431	320,00
	Microturbina	0,464	2,331	232,00

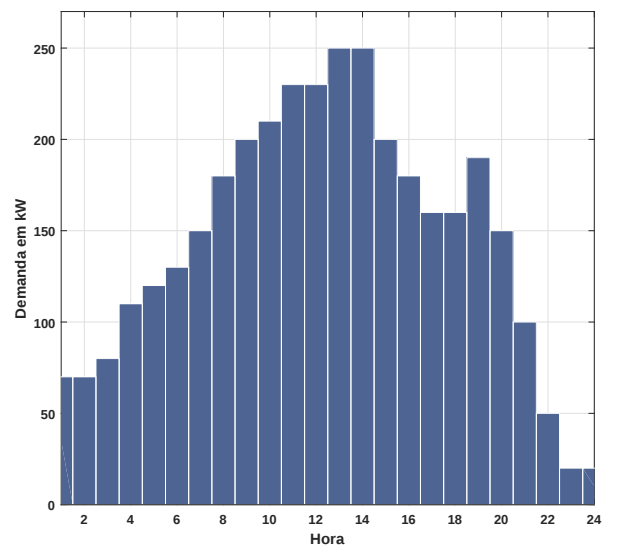


Figura 2. Curva de demanda da microrrede

Os dados da microturbina, da bateria e gerador diesel para simulação podem ser observados na Tabela II. A previsão de preços para Rede principal são mostrados na Tabela III [11], [17].

Tabela II
PARÂMETROS DO GERADOR DIESEL, MT E BATERIA

Gerador Diesel e MT, respectivamente (kW)				
Pmin	Pmax	a	b	c
25	250	0.001	0.37	0.0
10	100	0.000	0.41	0.00
Parâmetros da Bateria (kWh)				
SOC_{min}	SOC_{max}	SOC_{ini}	OM_B	$P_B(kW)$
70	350	300	.008	-70/70

B. Resultados

1) *Caso 1:* Para o caso tem-se a microrrede conectada à rede principal, banco de baterias com estado de carga inicial de

Tabela III
PREÇOS DA ENERGIA DA REDE PRINCIPAL

Hora	Preço (\$)	Hora	Preço (\$)
1	0.07	13	0.25
2	0.07	14	0.25
3	0.08	15	0.20
4	0.11	16	0.18
5	0.12	17	0.16
6	0.13	18	0.16
7	0.15	19	0.19
8	0.18	20	0.15
9	0.20	21	0.10
10	0.21	22	0.05
11	0.23	23	0.02
12	0.23	24	0.02

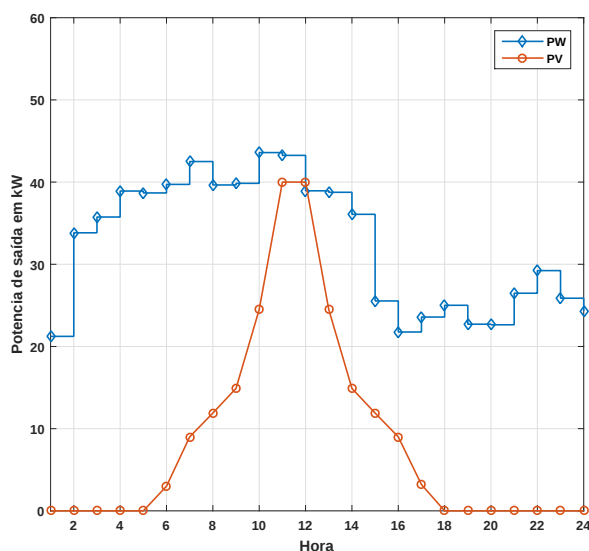


Figura 3. Potência de saída da microgeração eólica e fotovoltaica

300 kWh, com a microrrede podendo vender o excedente. Os resultados obtidos para $v = 0$ podem ser observados na Figura 4, onde percebe-se as baterias são carregadas nas primeiras horas, para o uso posterior durante as horas 9h até às 21h, sendo carregada novamente. A microturbina funciona na maior parte do tempo, pois comparado com a rede e o gerador diesel emite menos poluentes. O gerador diesel funciona apenas em sua geração mínima. Já rede principal funciona como complemento da demanda. Para este caso tem-se um custo total de \$ 1057,13 e custo de emissão de \$ 79,36. Na Figura 5, nota-se a utilização maior da rede para diminuição dos custos totais de operação.

Na Tabela IV, os valores de custos para casos para $v = 0, v = 1.0$ e v entre $[0,1]$ como ponderações na função objetivo, que representam respectivamente as escolhas por despacho puramente ambiental, custo combustível e ambos.

Assim, quando considera-se uma otimização levando em conta aspectos econômicos e ambientais, o custo total é de \$ 858,04.

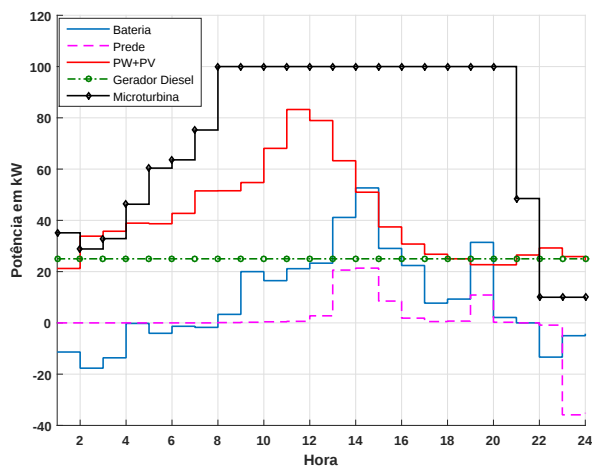


Figura 4. Resultado para o despacho considerando $v=0$

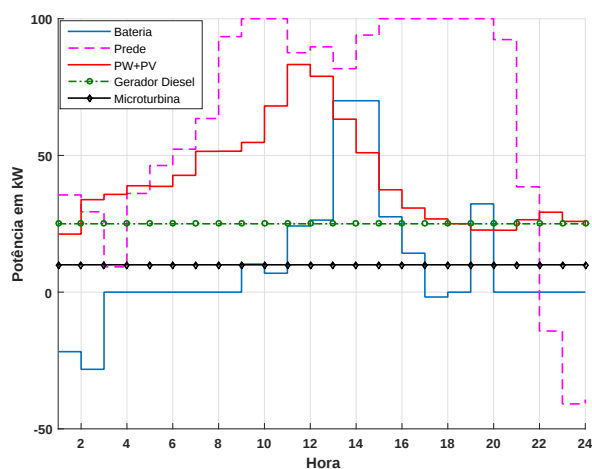


Figura 5. Resultado para o despacho considerando $v=1$

Tabela IV
RESULTADOS PARA O CASO 1 EM \$

Tipo de Despacho	Custo Emissão	Custo Geradores	Custo Rede	Custo Total
Ambiental	79,36	960,22	14,74	1057,13
Econômico	92,27	344,36	278,75	718,05
Econ. + Amb.	85,80	652,76	116,78	858,04

2) *Caso 2:* Para este caso, considera-se a operação sem sistema de armazenamento. Os resultados obtidos estão na Tabela V, onde notam-se todos os resultados são maiores que o caso 1, o que era esperado devido a ausência das

baterias, que tem custo de operação baixo, havendo com isso a necessidade de uma participação maior da Rede principal. Na Figura 6, tem-se o resultado para o caso Econ + Amb.

Observa-se ainda, uma participação maior da microturbina, principalmente nos horários entre 9h e 16h, devido ao elevado preço da rede nesse intervalo. A venda de energia a rede acontece apenas nos horários entre 22h à 24h, que ocorre devido ao redução na demanda e o gerador diesel, a microturbina e renováveis, podem atender a carga e o excedente é exportado.

Tabela V
RESULTADOS PARA O CASO 2 EM \$

Tipo de Despacho	Custo Emissão	Custo Geradores	Custo Rede	Custo Total
Ambiental	88,16	939,43	74,72	1102,30
Econômico	98,59	442,01	286,26	826,86
Econ. + Amb.	94,23	649,71	178,34	922,28

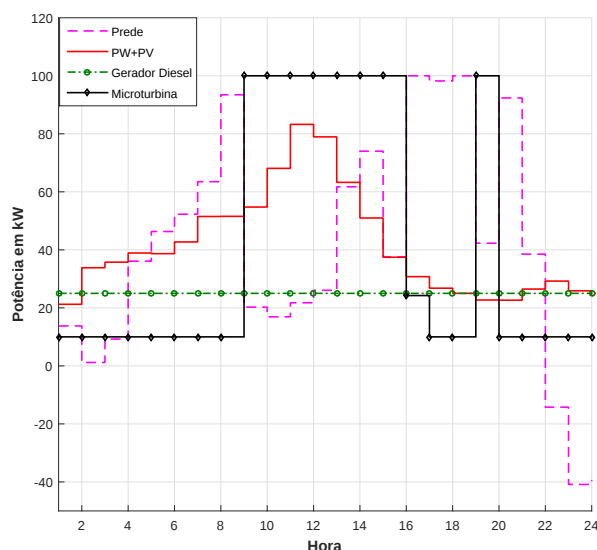


Figura 6. Resultados para o caso 2 (Econ+Amb)

Outro fator importante a ser observado, é que devido ao custo emissão do gerador diesel ser mais alto, faz com esse participe do despacho apenas com sua potência mínima para ambos os casos.

VI. CONCLUSÃO

Neste artigo foi proposto e resolvido o problema do despacho econômico e ambiental aplicado às microrredes de energia elétrica, considerando-a conectada à rede principal. O modelo levou em conta a tarifação horária da energia da rede, restrições operacionais dos geradores, restrições do sistema de armazenamento, alguns tipos de microgeração dentro da formulação. Os resultados mostraram a importância da geração renovável e uso gerenciado dos recursos energéticos

disponíveis, que podem reduzir a emissão de poluentes. Além disso, um sistema de armazenamento de energia é uma estratégia a mais no gerenciamento de energia, reduzindo os custos operacionais e emissão de poluentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e o CNPq pelo apoio financeiro dado para realização dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Hatziaargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*. John Wiley & Sons, 2013.
- [2] N. Hatziaargyriou, A. Anastasiadis, J. Vasiljevska, and A. Tsikalakis, "Quantification of economic, environmental and operational benefits of microgrids," in *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*. IEEE, 2009, pp. 1–8.
- [3] A. A. Moghaddam, A. Seifi, and T. Niknam, "Multi-operation management of a typical micro-grids using particle swarm optimization: A comparative study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1268–1281, 2012.
- [4] S. Cerqueira, O. Saavedra, and S. Lima, "Microgrid economic dispatch with storage systems by particle swarm optimization," *XI Simposio Brasileiro de Automacao Inteligente*, Outubro 2015.
- [5] T. Logenthiran and D. Srinivasan, "Short term generation scheduling of a microgrid," in *TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference*. IEEE, 2009, pp. 1–6.
- [6] M. Modiri-Delshad, S. Koohi-Kamali, E. Taslimi, A. Kaboli, S. Hr, and N. Rahim, "Economic dispatch in a microgrid through an iterated-based algorithm," in *Clean Energy and Technology (CEAT), 2013 IEEE Conference on*. IEEE, 2013, pp. 82–87.
- [7] N. Augustine, S. Suresh, P. Moghe, and K. Sheikh, "Economic dispatch for a microgrid considering renewable energy cost functions," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES*. IEEE, 2012, pp. 1–7.
- [8] M. Meiqin, J. Meihong, D. Wei, and L. Chang, "Multi-objective economic dispatch model for a microgrid considering reliability," in *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2010 2nd IEEE International Symposium on*, June 2010, pp. 993–998.
- [9] A. L. Dimeas and N. D. Hatziaargyriou, "Operation of a multiagent system for microgrid control," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 3, pp. 1447–1455, 2005.
- [10] T. Logenthiran, D. Srinivasan, and A. M. Khambadkone, "Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 1, pp. 138–148, 2011.
- [11] N. Cai, N. T. T. Nga, and J. Mitra, "Economic dispatch in microgrids using multi-agent system," in *North American Power Symposium (NAPS), 2012*. IEEE, 2012, pp. 1–5.
- [12] A. J. d. S. Oliveira, S. N. Cerqueira Jr, M. S. Pinto, and O. R. Saavedra, "Despacho hidrotérmico levando em conta a emissão de poluentes," *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, Setembro 2014.
- [13] F. A. Mohamed and H. N. Koivo, "Multiobjective optimization using modified game theory for online management of microgrid," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 21, no. 1, pp. 839–854, 2011.
- [14] A. Hoke, A. Brissette, S. Chandler, A. Pratt, and D. Maksimovizc, "Look-ahead economic dispatch of microgrids with energy storage, using linear programming," in *Technologies for Sustainability (SusTech), 2013 1st IEEE Conference on*, Aug 2013, pp. 154–161.
- [15] V. Torczon, "On the convergence of pattern search algorithms," *SIAM Journal on optimization*, vol. 7, no. 1, pp. 1–25, 1997.
- [16] M. A. Gargeya and S. P. Pabba, "Economic load dispatch using genetic algorithm and pattern search methods," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 1203–1212, 2013.
- [17] W. Liu, Y. Zhang, B. Zeng, S. Niu, J. Zhang, and Y. Xiao, "An environmental-economic dispatch method for smart microgrids using vss-qga," *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2014, 2014.