

XI-584 - FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA REDE ELÉTRICA INTELIGENTE

Rafael Denerson Ramos de Sousa⁽¹⁾

Cientista da Computação pela Fundação de Assistência e Educação (FAESA). Especialista em Desenvolvimento Orientado a Objetos com Java pela Universidade Candido Mendes (UCAM). Mestrando em Tecnologias Sustentáveis pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES/Vitória).

Clainer Bravin Donadel⁽²⁾

Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Professor do Instituto Federal do Espírito Santo - Ifes *campus* Vitória.

Endereço^(1,2): Av. Vitória, 1729 - Jucutuquara - Vitória - ES - CEP: 29.040-780 - Brasil - Tel: (27) 3331-2110 - e-mail: rafael.denerson@ifes.edu.br

RESUMO

Este artigo propõe uma aplicação computacional capaz de otimizar o consumo de energia elétrica em equipamentos elétricos residenciais através da recondução de funcionamento para horários de menor custo tarifário. No algoritmo de otimização proposto utilizou-se a metaheurística GRASP Básico, escolhida por ser utilizada em conjunto com algoritmos exatos em diversos problemas para obtenção de um conjunto-solução de facilidades localizadas. O método proposto foi aplicado a um caso utilizado como prova de conceito. Os resultados computacionais alcançados com a execução do algoritmo GRASP Básico para o deslocamento de carga foram comparados com a situação original da unidade consumidora (sem qualquer deslocamento de carga). No caso apresentado, houve uma redução de R\$ 6,03 (4,51%) no valor base da fatura, ressaltando a eficácia do método proposto. Apesar da diferença no valor base da fatura justificar por si só aplicações deste tipo, podem ser verificados impactos significativos na operação do sistema elétrico de potência e, por consequência, impactos no meio ambiente, uma vez que o custo marginal total de geração é maior no horário de ponta. Assim, ao se deslocar o consumo do horário de ponta para outros patamares horários, contribui-se diretamente para a redução do consumo no horário de ponta, permitindo a potencial postergação de investimentos em novos empreendimentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica que, sabe-se, podem impactar diretamente o meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência Energética, GLD, Metaheurística GRASP, Otimização, Redes Inteligentes.

INTRODUÇÃO

Depois que o homem passou a utilizar energia elétrica, ocorreram diversos desdobramentos em sua utilização. A integração dos grandes sistemas de energia elétrica e a adoção de fontes renováveis são exemplos destes desdobramentos. Neste contexto, evoluiu também a necessidade de uso consciente da energia produzida, desde aqueles que geram energia elétrica (usinas hidrelétricas) até os que consomem energia elétrica (consumidores).

Ultimamente, diversos problemas são enfrentados pelos setores de energia como crise nos reservatórios de hidrelétrica, degradação do meio ambiente, gestão inadequada da utilização de energia elétrica (PANDA et al., 2022; VIJAYAN; KURUPATH; DAS, 2021; RAJARAJESWARI; VIJAYAKUMAR; MODI, 2016), segurança, confiabilidade e eficiência no sistema de energia (WEN et al., 2022), dentre outros. Essas adversidades afetam setores econômicos devido ao aumento dos preços de energia elétrica, abalam o meio ambiente em razão das emissões de gases de efeito estufa (PANDA et al., 2022), níveis de emissão de carbono e aquecimento global (ALI et al., 2022), bem como influenciam no âmbito social.

Neste contexto, as categorias de preços dinâmicos de energia elétrica foram introduzidas no mercado com a finalidade de minimizar ou mesmo possibilitar certas classes de clientes a economizar energia elétrica por meio de preços diferenciados para certos horários do dia (LABELLO, 2019), inclusive os consumidores residenciais. Assim, acredita-se na possibilidade do consumidor residencial conseguir economizar no pagamento de energia

elétrica por meio da adesão à tarifa branca, ao deslocar o funcionamento dos seus aparelhos do posto tarifário de ponta para preferencialmente o fora de ponta ou para o posto intermediário. Para o sistema elétrico e o meio ambiente, isso implica em reduzir a utilização de fontes de energia mais agressivas ao meio ambiente no horário de ponta do sistema, permitindo o uso de fontes melhores em outros horários.

As ferramentas computacionais disponíveis e que são aplicadas ao deslocamento de carga possuem diversas limitações, tais como a portabilidade limitada a diferentes plataformas computacionais. Nesse contexto, esta pesquisa sugere uma ferramenta computacional para apoiar os usuários na recondução do funcionamento dos seus aparelhos do posto tarifário de ponta para fora de ponta ou para o posto intermediário, beneficiando o sistema elétrico e o meio ambiente, de maneira flexível, bastante personalizada, gratuita e de código aberto.

Este artigo propõe uma aplicação computacional capaz de otimizar o consumo de energia elétrica em equipamentos elétricos residenciais através da recondução de funcionamento para horários de menor custo tarifário.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada está contextualizada com a pesquisa do deslocamento de carga para equipamentos residenciais no Brasil. Trata-se de uma das técnicas do Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD), que corresponde a tradução para o português do termo originalmente em inglês *Demand Side Management* (DSM), que se constitui no planejamento, implementação e monitoramento das ações por parte da distribuidora de energia elétrica que tem como objetivo possibilitar um controle maior do usuário quanto ao seu gasto de energia, viabilizando o aproveitamento eficiente da energia elétrica (HONORATO *et al.*, 2016, p.960).

Sobre a abordagem, trata-se de uma pesquisa quantitativa. Quanto à natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada, pois volta-se para a solução de problemas específicos vinculados ao fornecimento e utilização de energia elétrica.

Baseado no problema e nos objetivos, realizou-se a revisão de literatura sobre os assuntos deste artigo e grande parte do referencial teórico.

A otimização de demanda em uma rede inteligente residencial pode ser caracterizada como um problema de otimização combinatória (OC), sendo então efetuada a adaptação da formulação matemática proposta por Rajarajeswari, Vijayakumar e Modi (2016) para Problemas de Cronograma e Agendamento (PCA) em aparelhos elétricos residenciais (BLUM; ROLI, 2003).

A metaheurística implementada foi o GRASP Básico, escolhida porque pode ser utilizada em conjunto com algoritmos exatos em diversos problemas (inclusive problemáticas de transporte) para obtenção de um conjunto-solução de facilidades localizadas. Assim, problemas de localização estudados por diversos pesquisadores (VIANNA; COELHO, 2014), em problemas práticos de deslocamento de carga apresentados por Honorato *et al.* (2016). Dessa maneira, considera-se aqui que o emprego da metaheurística GRASP é baseada na resolução de PCA, pois além de estar entre uma das suas possíveis formas de aplicação, ela será também utilizada para demonstrar a sua eficiência para deslocamento de carga em aparelhos elétricos residenciais.

GRASP é uma técnica aleatória de amostragem iterativa, sendo que, em cada iteração ele fornece uma solução para o problema de que se trata (FEO; RESENDE, 1995, p.109). O GRASP é composto por duas etapas dentro de cada iteração: na primeira inicialmente uma solução inteligente através de uma função gulosa adaptável e aleatória. Já na segunda etapa, aplica-se um procedimento de busca local à solução construída objetivando encontrar uma melhoria.

As duas etapas são repetidas por um número máximo de iterações (que é um parâmetro da meta-heurística) e ao final do processo, a melhor solução da busca é retomada (PRATA, 2018).

A metaheurística foi implementada em Java (linguagem de programação escolhida como ferramenta por ser orientada a objetos e multiplataforma), sendo avaliadas em um caso de testes. Ferramentas adicionais foram utilizadas: Python (linguagem de programação interpretada, interativa e orientada a objetos), Eclipse (ambiente de desenvolvimento integrado - *Integrated Development Environment* - IDE) e Excel.

A função objetivo utilizada para o deslocamento de carga é dada pela equação (1):

$$\text{Minimizar: } f(t) = \sum_{t=0}^{23} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^z (R_{ij}(t) \cdot S_{ij}(t) \cdot S_p(t)), \quad \text{equação (1)}$$

onde a função $R(t)$ está sujeita à condição: $R(t) = \sum_{t=0}^{23} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^z (R_{ij}(t) \cdot S_{ij}(t) \leq LP(t))$

As variáveis são definidas como:

$Mi = 24 - DHi$

Onde:

t - intervalos de tempo;

i - quantidade de aparelhos;

j - tipo de aparelho;

R_{ij} - estado do aparelho i do tipo j (que pode ser ligado ou desligado);

S_{ij} - consumo de energia do aparelho i classificado como j ;

$S_p(t)$ - valor da energia elétrica no intervalo de tempo t que é classificado como: ponta, intermediário e fora de ponta;

$LP(t)$ - limite de potência máxima no intervalo de tempo t ;

Mi - atraso máximo permitido do equipamento;

DHi - duração do tempo de operação;

O método proposto foi aplicado a um caso utilizado como prova de conceito.

RESULTADOS

Os resultados computacionais alcançados com a execução do algoritmo GRASP Básico para o deslocamento de carga são apresentados na Tabela 1. A Tabela 1 foi usada para apresentar a comparação entre a aplicação GRASP Básico e a situação original da unidade consumidora, ou seja, sem qualquer deslocamento de carga.

Tabela 1: Comparação entre os valores de consumo nos postos tarifários ponta, intermediário e fora ponta - com e sem deslocamento de carga.

Total de Consumo (kWh)								
Caso base (sem deslocamento)			GRASP básico (com deslocamento)			Diferença		
Fora Ponta	Intermediário	Ponta	Fora Ponta	Intermediário	Ponta	Fora Ponta	Intermediário	Ponta
154,77	14,07	28,14	166,32	10,22	20,44	11,55	-3,85	-7,70
196,98			196,98			0,00		

Fonte: Elaborado pelos autores.

É possível ainda quantificar os benefícios do método/ferramenta proposto apresentando uma avaliação financeira a partir dos valores vigentes de tarifa branca (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022) – Tabela 2. A partir dos dados da Tabela 2, nota-se uma redução no valor da base da fatura igual a R\$ 6,03.

Tabela 2: Comparação financeira entre os valores de consumo nos postos tarifários ponta, intermediário e fora ponta - com e sem deslocamento de carga.

Valores base de fatura (R\$)								
Caso base (sem deslocamento)			GRASP básico (com deslocamento)			Diferença		
Fora Ponta	Intermediário	Ponta	Fora Ponta	Intermediário	Ponta	Fora Ponta	Intermediário	Ponta
87,65	11,48	34,47	94,19	8,34	25,04	6,54	-3,14	-9,43
133,60			127,57			-6,03		

Fonte: Elaborado pelos autores.

* Considera-se o valor base de cada posto tarifário, não incluindo impostos, tributos e bandeiras tarifárias.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Por meio de comparação dos dados da Tabela 1, nota-se uma redução no consumo nos postos tarifários ponta e intermediário de, respectivamente, 7,70 kWh e 3,85 kWh. Por outro lado, houve um aumento no consumo no posto tarifário fora ponta de 11,55 kWh. Nota-se também que a variação total de consumo foi nula ($11,55 - 7,70 - 3,85 = 0$), uma vez que foi adotada a premissa de que a carga seria apenas deslocada, mantendo seu uso necessário.

Já a partir dos dados da Tabela 2 é possível notar uma redução no valor base da fatura da unidade consumidora em questão. No caso base, sem deslocamento de carga, o valor base da fatura foi de R\$ 133,60; após a aplicação do método de otimização, o valor base da fatura da unidade consumidora foi de R\$ 127,57, representando uma diferença de R\$ 6,03, uma redução de 4,51% em relação ao caso base.

Assim, por meio dos dados dispostos na Tabela 1 e Tabela 2, é possível observar que para o experimento realizado a metaheurística GRASP é vantajosa para reconduzir o consumo em aparelhos elétricos residenciais, pois, além dos benefícios do deslocamento de carga, foi possível analisar também certa vantagem no valor de economia da fatura com a aplicação da metaheurística mencionada.

Destaca-se, entretanto, que a diferença obtida poderá variar em função dos parâmetros de configuração da ferramenta, fornecidos pelo usuário, tais como sua flexibilidade em permitir o deslocamento de carga.

Apesar da diferença no valor base da fatura justificar por si aplicações deste tipo, podem ser verificados impactos significativos na operação do sistema elétrico de potência e, por consequência, impactos no meio ambiente, se for considerado a aplicação da ferramenta em um grande quantitativo de unidades consumidoras (milhares/milhões). A razão disso é que, tipicamente, o custo marginal total de geração é maior no horário de ponta, ou seja, o custo para se produzir, transmitir e distribuir 1 kWh é maior no horário de ponta, quando comparado com os demais postos horários. Esse custo pode englobar não só os custos operacionais diretos, mas também custos indiretos como, por exemplo, custos envolvendo aspectos de saúde pública associados às emissões oriundas da geração baseada em combustíveis fósseis.

Associado a isso, tem-se ainda o fato de que o sistema elétrico é projetado para suportar a pior situação de consumo, ou seja, é projetado para suportar o horário de ponta. Assim, ao se deslocar o consumo do horário de ponta para outros patamares horários, contribui-se diretamente para a redução do consumo no horário de ponta, permitindo a potencial postergação de investimentos em novos empreendimentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica que, sabe-se, podem impactar diretamente o meio ambiente.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A otimização para resposta à demanda em uma rede elétrica inteligente se tornou importante na contemporaneidade devido à capacidade de proporcionar benefícios socioeconômicos à população que usa energia elétrica. Contudo, ainda assim há problemas relacionados ao uso de energia elétrica em uma rede inteligente que extrapolam os fatores sociais e econômicos, como por exemplo, a degradação do meio ambiente. Isso significa que, promover benefícios que abarquem tanto o consumo consciente de energia elétrica como o

seu uso em um local ou região colabora significativamente com o desenvolvimento de uma sociedade sustentável. Por essa razão, este artigo propôs uma aplicação computacional capaz de otimizar o consumo de energia elétrica em equipamentos elétricos residenciais, reconduzindo o funcionamento deles para um horário em que o posto tarifário seja mais barato.

O algoritmo metaheurístico implementado (GRASP básico) apresentou bons resultados no processo de otimização; no caso de testes, proporcionou uma economia mensal de R\$ 6,03 no valor base da fatura da unidade consumidora. Ganhos potenciais da aplicação em massa da ferramenta incluem ainda a potencial postergação de investimentos em novos empreendimentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica que, sabe-se, podem impactar diretamente o meio ambiente.

Como recomendação de trabalhos futuros, cita-se a implementação de outros métodos heurísticos, permitindo a comparação entre eles, bem como a criação de uma interface gráfica com o usuário, que permita a utilização facilitada da ferramenta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro e institucional do Ifes *campus* Vitória e da Reitoria do Ifes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução homologatória nº 3.091, de 02 de agosto de 2022. Homologa o resultado da Revisão Tarifária Periódica – RTP de 2022 da EDP Espírito Santo Distribuição de Energia S.A – EDP ES, as Tarifas de Energia – TE e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 05 ago. 2022. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20223091ti.pdf>. Acesso em: 28 set. 2022.
2. ALI, S. *et al.* Solving day-ahead scheduling problem with multi-objective energy optimization for demand side management in smart grid. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v. 36, p. 101135, 2022.
3. BLUM, C.; ROLI, A. *Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison*. *ACM Computing Surveys*, 2003, v. 35, n. 3, p. 41.
4. FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*. *Journal of Global Optimization*, v. 6, n. 2, p. 109–133, 1995.
5. HONORATO, Í. H.; CELESTE, W. C.; COURA, D. J. C.; RISSINO, S. D.; ROCHA, H. R. O. Otimização Multi-Objetivo da Demanda em Redes Elétricas Inteligentes Residenciais. p. 12, 2016.
6. LABELO PUCRS. Tarifa Branca: uma realidade para os consumidores residenciais brasileiros. 2019. Disponível em: <https://www.pucrs.br/labelo/tarifa-branca-novidade-na-modalidade-tarifaria-no-brasil-tem-novos-criterios-de-adesao-para-2019-e-2020/>. Acesso em: 28 set 2022.
7. PANDA, S. *et al.* Residential Demand Side Management model, optimization and future perspective: A review. *Energy Reports*, v. 8, p. 3727-3766, 2022.
8. PRATA, B. A. Meta-heurísticas (GRASP), 2018. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=9R-_BL_5Gno&t. Acesso em: 03 mar. 2022.
9. RAJARAJESWARI, R.; VIJAYAKUMAR, K.; MODI, A. Demand Side Management in Smart Grid using Optimization Technique for Residential, Commercial and Industrial Load. *Indian Journal of Science and Technology*, v. 9, n. 43, 2016. Disponível em: <https://indjst.org/articles/demand-side-management-in-smart-grid-using-optimization-technique-for-residential-commercial-and-industrial-load>. Acesso em: 9 jul. 2021.
10. VIANNA, D. S.; COELHO, S. R. Otimização do Tempo de Espera das Embarcações no Porto de Imbetiba – Petrobrás, 2006.
11. VIJAYAN, A.; KURUPATH, V.; DAS, J. Residential Demand Side Management Using Artificial Intelligence. In: *2021 8th International Conference on Smart Computing and Communications (ICSCC)*. IEEE, 2021. p. 323-327. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9528174>. Acesso em: 26 ago. 2022.
12. WEN, I.; ZHOU K.; YANG S; FENG W. Demand Side Management in Smart Grid: A Dynamic-Price-Based Demand Response Model. *IEEE Transactions on Engineering Management*, p. 1–30, 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9751348>. Acesso em: 26 ago. 2022.