

PLANEJAMENTO EFICIENTE DE APARELHOS ELÉTRICOS RESIDENCIAIS: UMA APLICAÇÃO DO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO E DO PROBLEMA DA MOCHILA EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO DE PICO

EFFICIENT SCHEDULING OF HOUSEHOLD APPLIANCES: AN APPLICATION OF THE ANALYTICAL HIERARCHICAL PROCESS AND THE KNAPSACK PROBLEM IN SMART GRIDS TO REDUCE PEAK CONSUMPTION

Daniel Velasque de Oliveira*  E-mail: danielvelasqueo@gmail.com

Mário Mestria*  E-mail: mmestria@uol.com.br

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES), Vitória, ES, Brasil.

Resumo: O cenário atual de crescente demanda energética faz surgir discussões acerca da eficiência e da sustentabilidade dos atuais sistemas de distribuição elétrica, o aumento constante do consumo de energia nas horas de ponta exige uma solução sustentável e de baixo custo para reduzir o stress dos sistemas de distribuição elétrica. Para resolver este problema, foi proposta uma metodologia baseada na gestão do lado da procura e na precificação dinâmica, que consiste em planejar o uso de aparelhos eletrodomésticos do cliente utilizando algoritmos de decisão e otimização, a fim de diminuir o consumo energético durante os horários de pico, proporcionando alívio aos sistemas de distribuição elétrica e economia aos consumidores. Porém, o planejamento na utilização de um eletrodoméstico pelos clientes não é uma tarefa simples, dada a complexidade no agendamento desses aparelhos e as preferências dos clientes. Na literatura, há uma ampla discussão sobre heurísticas e algoritmos multiobjetivo que podem ser utilizados para resolver este problema. Porém, neste trabalho, um algoritmo utilizando o processo analítico hierárquico em conjunto com a modelagem do problema da mochila foi desenvolvido para resolver este problema. Após testes, foi constatado que o algoritmo elaborado foi capaz de planejar o uso de eletrodomésticos de para diversos perfis de consumidor, obtendo uma economia de energia para o horário de pico de, no mínimo, 20 por cento. Os resultados sugerem que o método, quando aplicado sobre uma gama maior de consumidores, pode ser utilizado para reduzir os níveis de estresse sobre o sistema de geração nos horários de pico até um patamar satisfatório, contribuindo para um melhor balanceamento da carga diária.

Palavras-chave: Otimização. Gerenciamento pelo lado da demanda. Redes elétricas inteligentes. Processo analítico hierárquico. Problema da mochila. Precificação dinâmica.

Abstract: The current scenario of growing energy demand emerges on the agenda discussions about the efficiency of the actual electrical distribution systems. Beyond, the constant increase in energy demand at peak hours requires a sustainable and low-cost solution to reduce the stress of the electrical distribution systems. To solve this problem, a methodology based on demand-side management and dynamic pricing was proposed, which consists of planning the use of the customer's household appliances using decision and optimization algorithms, in order to reduce energy consumption during business hours peak, providing relief to electrical distribution systems and savings to consumers. However, the planning in the use of an appliance to the customers is not a simple task, given the complexity in the scheduling these appliances and customer preferences. In the literature, there is a wide discussion about heuristics and multi-objective algorithms that can be used to solve this problem. However, in this work, an algorithm using the analytical hierarchical process in conjunction to the knapsack problem modeling was developed to solve this problem. This algorithm makes a schedule for the usage of the appliances. After testing, it was found that the developed

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 25, n. 1, e-5354, 2025.

algorithm was capable of planning the use of household appliances for different consumer profiles, achieving energy savings of at least 20 percent during peak hours. The results suggest that the method, when applied to a wider range of consumers, can be used to reduce stress levels on the generation system at peak times to a satisfactory level, contributing to better balancing of the daily load.

Keywords: Optimization. Demand side management. Smart grids. Analytic hierarchy process. Knapsack problem. Dynamic pricing.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a vasta rede de distribuição de energia, que supre potência para as mais diversas aplicações, se encontra fundada sobre um preceito simples de abastecimento constante e uniforme. O conceito de rede de distribuição centralizado está se provando cada vez mais ineficiente diante do cenário de crescente demanda energética (NEWSHAM; BOWKER, 2010) e (KUMARAGURUPARAN; SIVARAMAKRISHNAN; SAPATNEKAR, 2012). Essa ineficiência da rede se manifesta nos momentos de estresse enfrentados pelo sistema nos horários de pico de consumo. No Brasil, em especial, os períodos de sobrecarga da matriz energética obrigam as concessionárias a mobilizar um número maior de usinas geradoras termelétricas para auxiliar no abastecimento da rede. Sabendo que o abastecimento da rede é efetuado primariamente por usinas hidrelétricas, torna-se evidente que a incapacidade de suprir as demandas de pico do sistema faz com que a matriz se torne menos sustentável.

Uma abordagem promissora para diminuir o consumo nos horários de pico sem recorrer à expansão da matriz de geração é o gerenciamento pelo lado da demanda. Esse gerenciamento é muito presente no ramo de pesquisa, pois utiliza de métodos complexos para alcançar reduções consideráveis no consumo no horário de pico, sem requerer grandes investimentos em infraestrutura, (NEBEY, 2024), (SHEWALE *et al.*, 2020) e (SILVA *et al.*, 2024).

O cenário mais desejável para o sistema é aquele em que a carga se encontra uniformemente distribuída ao longo do dia, e não concentrada em apenas alguns horários específicos. Para fazer com que a carga seja distribuída de maneira mais uniforme, deve-se fazer com que os consumidores mudem o seu perfil de consumo, adotando outro mais eficiente, proposto pela concessionária, sob uma modalidade de cobrança que leva em consideração os horários de maior demanda para determinar o preço do kWh, no caso do Brasil, a tarifa branca.

Esse novo perfil faria com que os horários de uso dos aparelhos elétricos fossem distribuídos de maneira mais uniforme ao longo do dia, direcionando o consumo para os horários de menor demanda e reduzindo a carga no horário de pico, conseqüentemente, por estarem sob a modalidade da tarifa branca, os consumidores alcançariam economia na cobrança de energia. Esse tipo de abordagem é uma alternativa à expansão da matriz energética, que demandaria um investimento muito grande em infraestrutura para construção de novas usinas geradoras (EARLE; KAHN; MACAN, 2009).

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver um algoritmo que utilize o Processo Analítico Hierárquico (SAATY, 1984) em conjunto com o modelo do Problema da Mochila (RAHIM; AHMAD, 2023) e (SIANAKI; HUSSAIN; TABESH, 2010). Desta forma, pode-se elaborar um cronograma de consumo para os clientes de uma concessionária de energia.

A meta é que a utilização desse cronograma proporcione o mínimo de incômodo ao cliente e que, ao mesmo tempo, proporcione uma economia significativa no consumo de energia elétrica nos horários de pico, equilibrando a carga ao longo do dia e aliviando o estresse sobre a rede de distribuição. Para fazer isso, o algoritmo deverá se basear nos dados de consumo dos equipamentos eletrodomésticos envolvidos e nas preferências de consumo de cada cliente.

Para obter os dados necessários para a elaboração do cronograma, o algoritmo deverá ser capaz de aceitar uma meta de consumo, em kWh, além de receber os dados elétricos e as informações de preferência do cliente acerca dos aparelhos que serão incluídos no julgamento. O cronograma final deve listar quando cada aparelho deve ser utilizado (horário de pico, intermediário ou fora de pico), de forma que o cliente alcance a maior satisfação possível dentro das metas de consumo estabelecidas.

É esperado também que, diante da proposta desse trabalho, os consumidores se sintam mais familiarizados com a modalidade utilizada e adotem a abordagem do gerenciamento de energia pelo lado da demanda, oferecendo às concessionárias uma redução do consumo no horário de pico e ao cliente uma redução no valor da conta de energia elétrica.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2, foi feita uma breve revisão de algumas literaturas relacionadas ao tema da pesquisa para fins de

contextualização e comparação. Na seção 3 foi descrita a metodologia utilizada e na seção 4 são apresentados os resultados obtidos e as análises. Na seção 5 as discussões são delineadas. Por último, as conclusões e trabalhos futuros são apresentados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nessa seção iremos descrever brevemente o método analítico hierárquico e demais artigos relacionados ao trabalho desenvolvido.

O Processo Analítico Hierárquico (AHP - Analytic Hierarchy Process) publicado, em 1984, por Thomas Saaty descreve a estrutura matemática que constitui o AHP e fornece explicações detalhadas de como utilizá-lo. Esse processo é um método para auxiliar os *decision makers* na tomada de decisões complexas (SAATY, 1984).

O trabalho de Earle, Kahn e Macan (2009), dissertou acerca das vantagens e desvantagens de modalidades de cobrança de energia dinâmicas para a implantação do gerenciamento pelo lado da demanda nos EUA. O trabalho destaca como a demanda energética nos horários de pico está cada vez maior, e expõe como a adoção de programas de cobranças dinâmicas pode estimular os consumidores a distribuir o consumo energético ao longo do dia em busca de economia.

O artigo de Newsham e Bowker (2010) seguiu a mesma linha que o anterior, avaliando o mesmo tema, porém dando mais foco ao impacto que as mudanças na modalidade de cobrança poderiam causar na satisfação do consumidor, revelou-se então que o método não só alcança redução na demanda de pico, como faz isso sem interferir de maneira significativa no bem-estar do consumidor.

Os algoritmos heurísticos são métodos para resolver problemas de otimização e obtém bons resultados, por exemplo, no trabalho de Breda e Mestria (2023) usou algoritmos heurísticos construtivos e algoritmos de busca local para resolver despachar veículos de emergência com níveis de prioridade para responder às falhas de energia elétrica.

Os resultados obtidos nesse trabalho foram promissores, tanto no quesito de tempo de processamento, quanto na qualidade da solução. Ingressando na área de manejo de cargas residenciais, fica evidente a implantação de “Smart grids”, como

por exemplo, o trabalho de Omar, Bushby e Williams (2019) que conduziu um estudo de caso onde o AHP é utilizado para escolher o melhor entre diversos algoritmos responsáveis por controlar um sistema de aquecimento e resfriamento residencial, baseando-se nos critérios de satisfação, consumo e preço.

Em Chakraborty, Mondal e Mondal (2018), elaboraram um algoritmo heurístico de controle e escalonamento coordenado de cargas com o objetivo de organizá-las para reduzir o consumo de pico. O algoritmo baseado na variante “MinPeak” da heurística do problema do empacotamento se mostrou a mais promissora dentre as variantes na redução do consumo nos horários de pico.

No trabalho de Honorato *et al.* (2016) foi apresentada uma tentativa de se aplicar a metaheurística NSGA-II na resolução do problema de escalonamento de eletrodomésticos sob a modalidade de cobrança “Time-Of-Use”. O algoritmo genético foi utilizado para organizar as cargas baseado no conforto do cliente e no preço pago pela energia consumida, sugerindo para cada aparelho, um horário ideal de utilização.

Kumaraguruparan, Sivaramakrishnan e Sapatnekar (2012) utilizaram o método do Problema da Mochila múltiplo (MKP) para construir um cronograma de utilização de cargas residenciais eficiente, sob tarifa dinâmica, levando em consideração o custo e o uso total de energia, e incluindo fatores como cargas de uso ininterrupto e geração independente. Já no artigo de Rahim e Ahmad (2023) utilizaram o mesmo método para alcançar um objetivo análogo, porém utilizando alguns algoritmos heurísticos para testar a integridade do modelo matemático.

O artigo de Rahim *et al.* (2015), seguiu a mesma linha dos dois trabalhos anteriores, também baseado no MKP, porém utilizando em conjunto com esse método, a metaheurística de otimização de colônia, a fim de alcançar um processo mais otimizado. Outro diferencial deste trabalho em relação a aqueles, é o fato deste considerar, junto aos outros fatores já presentes, a satisfação do consumidor como objetivo alvo do problema de otimização.

O trabalho de Mostafa *et al.* (2022), focou em analisar a aceitação de um aplicativo de escalonamento de cargas residenciais dentro de um grupo de candidatos. O aplicativo utiliza uma variação do AHP, o “Fuzzy AHP” ou FAHP para efetuar a escolha das cargas a serem utilizadas considerando a economia de

energia e as necessidades e preferências dos usuários. A taxa de economia esperada com a utilização do aplicativo é, de acordo com os autores, de 15%.

O artigo de Sianaki, Hussain e Tabesh (2010) trabalhou sob uma proposta muito semelhante à que foi abordada neste artigo, porém sobre um escopo menor. Nele os autores utilizaram do método analítico hierárquico em conjunto com o método do Problema da Mochila para selecionar qual dos eletrodomésticos, em um conjunto pré-definido, poderia ser utilizado por um consumidor durante o horário de pico. A ideia desse artigo é que o valor final a ser pago fosse tal que o preço do kWh no horário de pico se igualasse ao do horário fora de pico.

O escopo do artigo de Sianaki, Hussain e Tabesh (2010) abrangeu foi menor porque não se comprometeu em elaborar um algoritmo capaz de executar as tarefas de maneira autônoma. Além disso, ele não aplicou o método sobre todos os períodos da tarifa, apenas sobre o horário de pico.

O artigo de Paula e Cerri (2012) buscou avaliar as vantagens da aplicação do AHP no planejamento de planos municipais de redução de riscos nos municípios citados no título. Os autores puderam concluir que o método é capaz de realizar os julgamentos multicritério presentes no planejamento, com maior coerência quando comparado a um especialista, além de ter a vantagem do resultado não ser influenciado pela subjetividade.

O artigo de Monegat *et al.*(2020) promoveu uma melhor compreensão da progressão e representação matemática do método e atestando a capacidade do método realizar julgamentos coerentes de forma não subjetiva, independente do cenário ao qual ele é aplicado.

O trabalho de Dutra e Fogliatto (2007), propôs diversas mudanças na metodologia do AHP, alegando que várias algumas etapas do processo são redundantes ou limitadas devido à uma fundamentação teórica equivocada. Os autores apresentaram testes em que o método otimizado foi capaz de auxiliar na elaboração de um produto de grande aceitação no mercado. Isso expõe como que, apesar da robustez do método, ainda existem certos graus de liberdade para a elaboração de melhorias.

Essa revisão de literatura nos inspirou a desenvolver um planejamento eficiente para os aparelhos elétricos residências em redes elétricas inteligentes

utilizando o processo analítico hierárquico e o problema da mochila para a redução do consumo no horário de pico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia Geral

Esta seção se dedica a detalhar o processo utilizado para elaborar o cronograma de consumo mencionado no objetivo da pesquisa. O cronograma devia ser construído baseado na rotina de utilização de eletrodomésticos do cliente, porém, recebendo as alterações devidas, de forma que fosse possível alcançar uma certa meta de economia de energia no horário de pico, ferindo ao mínimo o bem-estar do cliente.

Para elaborar uma proposta razoável, foi necessário levar em consideração os dados de consumo de cada equipamento, visto que era desejável que os equipamentos com maior consumo fossem excluídos do horário de pico. Além disso, foi preciso considerar também fatores subjetivos, como a predileção e a necessidade do cliente em relação a cada um dos aparelhos em análise. Visto que cada pessoa possui preferências e necessidades únicas.

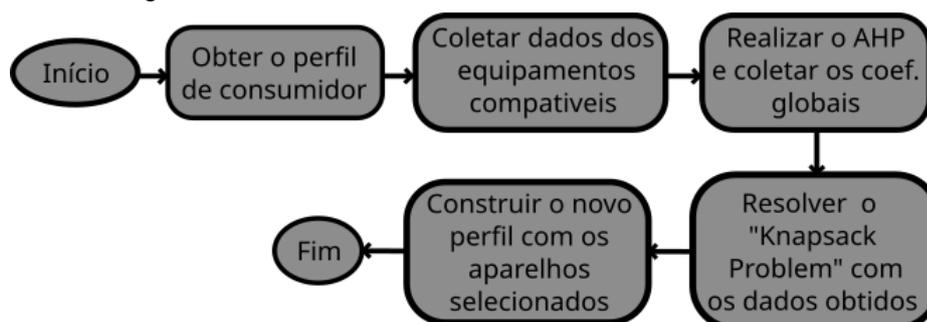
Tem-se então um problema multiobjetivo, sob os critérios de custo de uso (consumo), pertinência, e satisfação gerada pelo aparelho eletrodoméstico. Dentre as várias heurísticas já utilizadas por outros autores para resolver esse tipo de problema, foi utilizada, nessa pesquisa, uma rotina baseada no Processo Analítico Hierárquico (“Analytic Hierarchy Process”- AHP), (SAATY, 1984), (SIANAKI; HUSSAIN; TABESH, 2010), (PAULA; CERRI, 2012), (OMAR; BUSHBY; WILLIAMS, 2019), (MOSTAFA *et al.*, 2022), (RAHIM *et al.*, 2015), (RAHIM; AHMAD, 2023) e (RODRIGUES *et al.*, 2024), cuja robustez já foi atestada na literatura exposta na seção anterior.

Para atender à meta de consumo estabelecida pelo cliente, deve-se tentar incluir um conjunto de aparelhos que ofereçam o máximo de satisfação ao cliente e que, ao mesmo tempo, não consumam mais que a meta proposta. Essa formulação pode ser classificada como um problema de otimização, e para resolvê-la, foi utilizado o método do Problema da Mochila (“Knapsack Problem”) (RAHIM; AHMAD, 2023) e (SIANAKI; HUSSAIN; TABESH, 2010).

Aplicando ambas as técnicas citadas anteriormente, foi possível obter uma lista dos aparelhos que deveriam ser inclusos no cronograma diário do cliente e os que deverão ser excluídos, porém, aplicar esta sequência a todos os aparelhos e períodos ao mesmo tempo é ineficiente, pois os aparelhos não inclusos acabarão não sendo utilizados pelo cliente.

A alternativa que foi utilizada foi a de separar os aparelhos que serão utilizados em cada categoria de horário, e aplicar esse procedimento para cada uma delas, analisando primeiro o horário de pico, assim, os aparelhos que não forem inclusos nos seus horários alvos, poderão ser utilizados nos horários subsequentes menos restritos. O fluxograma da Figura 1 expõe uma ilustração de como deve se suceder o processo.

Figura 1 - Fluxograma ilustrando o método de escalonamento



Fonte: Autores, 2024.

Todos os cálculos e todo o processamento de dados necessários para completar cada etapa do fluxograma foram realizados em nível de software. Os cálculos matemáticos referentes ao AHP foram efetuados por um algoritmo elaborado pelos autores, que recebe os dados do perfil do cliente através de um arquivo de texto e retorna um enunciado do Problema da Mochila derivado dos dados dos aparelhos utilizados em um dos horários da tarifa branca selecionado.

O primeiro horário a ser selecionado é o horário de pico. Os dados do perfil em análise são fornecidos e o algoritmo resolve o AHP correspondente e elabora o enunciado associado. Em seguida, o enunciado é inserido no *solver* LINDO (LINDO, 2024), que é um software dedicado à resolução de problemas de otimização linear. O LINDO, então, resolve o Problema da Mochila e retorna uma lista dos aparelhos que foram incluídos no horário de pico. Feito isso, todo esse processo é repetido para o horário intermediário e fora de pico, tomando os aparelhos rejeitados do

horário anterior como candidatos a serem utilizados no horário atual, ao final do processo, obtém-se um cronograma completo referente a todos os três horários.

Utilizamos relatórios de consumo que foram pesquisados em campo e disponibilizados na literatura para elaborar perfis baseados nos consumidores brasileiros. Por isso, os perfis e as classes foram elaborados levando em conta alguns cenários julgados plausíveis e coerentes. De qualquer forma, não constitui uma limitação, pois o método foi desenvolvido com foco em vários cenários. Caso o método seja aplicado em outro país, basta elaborar as classes e perfis específica para esses consumidores.

3.2 Condicionamento dos Modelos Matemáticos às Variáveis do Problema

O Problema da Mochila, ou “Knapsack Problem” é uma abordagem matemática utilizada para resolver um problema de otimização combinatória com aplicação em diversas áreas (RAHIM; AHMAD, 2023) e (SIANAKI; HUSSAIN; TABESH, 2010). Nesse problema deseja-se, preencher um espaço (chamado de mochila) delimitado por um limite de peso c , com diversos elementos de peso w e valor v , de forma que o espaço seja preenchido com o maior valor possível dentro de seus limites. A dificuldade do problema reside no fato de que a somatória dos pesos w dos elementos desejados supera o limite de peso c , então nem todos os elementos poderão ser colocados dentro do espaço. O formato matemático padrão definido pelo método do Problema da Mochila, conforme Rahim e Ahmad (2023) consistem em maximizar a equação da Equação (1):

$$\sum_{i=1}^n v_i x_i \tag{1}$$

Que representa a somatória dos valores dos n elementos considerados. Enquanto se obedece ao contingente expresso na Equação (2):

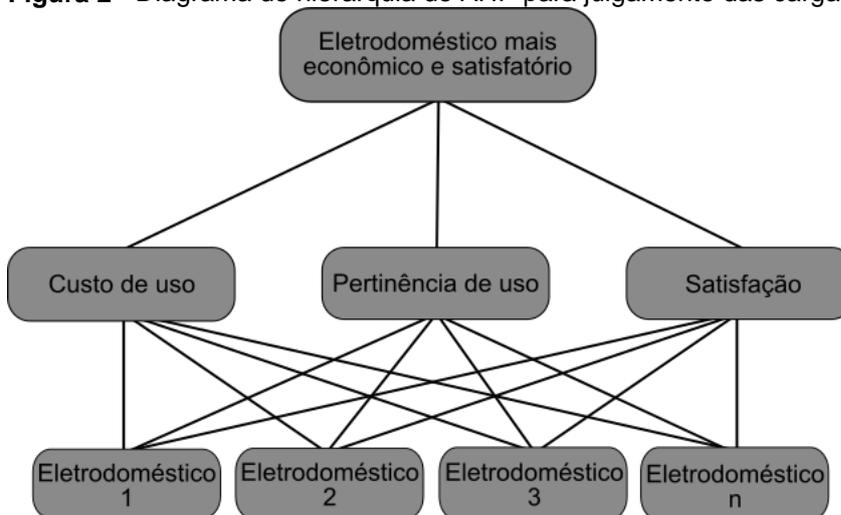
$$\sum_{i=1}^n w_i x_i \leq c \tag{2}$$

Que estabelece que a somatória dos pesos dos n elementos selecionados deve ser menor que o limite de peso da mochila. Os coeficientes x_i são binários, podendo assumir os valores 1 ou 0, e representam se o elemento de índice i foi selecionado (1) ou rejeitado (0) para aquele arranjo. Os coeficientes w_i , representam

o consumo, em kWh de cada eletrodoméstico considerado, esse custo foi calculado através da potência e o tempo de uso do aparelho. O coeficiente c , que é a meta de consumo de eletricidade, foi obtido somando o consumo de todos os eletrodomésticos para esse horário, e multiplicando pela porcentagem de redução de consumo desejada.

Os coeficientes de v_i representam o “valor” de cada eletrodoméstico, baseado na sua relação custo-benefício para o cliente. Para obter esses coeficientes de prioridade foi utilizado o Processo Analítico Hierárquico (SAATY, 1984). Essa abordagem permite uma tomada de decisão multiobjetivo e multicritério que emprega um procedimento de comparação pareada. Os critérios que foram utilizados para julgar os diversos eletrodomésticos selecionados foram: O custo de uso, a pertinência de uso e a satisfação oferecida pelo seu uso ao cliente. O sistema hierárquico exigido pelo AHP elaborado para este projeto está exposto na Figura 2.

Figura 2 - Diagrama de hierarquia do AHP para julgamento das cargas



Fonte: Autores, 2024.

Depois de feito o diagrama, já é possível iniciar as comparações entre a n alternativas, para isso, são utilizadas algumas matrizes de comparação, que são preenchidas comparando os n aparelhos um em relação ao outro dentro de certo critério. Os valores que são usados para preencher as posições da matriz devem estar em uma escala que exprime a intensidade da diferença na comparação, obedecendo à Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes de importância relativa

Intensidade da importância relativa	Definição
1	Mesma importância
3	Importância moderadamente superior
5	Importância superior
7	Importância fortemente superior
9	Importância absolutamente superior
2, 4, 6, 8	Valores intermediários de expressão de importância
Recíprocos dos números acima	Se uma alternativa primeira tem um dos coeficientes acima sobre uma outra segunda, esta segunda deve ter o coeficiente recíproco em relação à primeira

Fonte: Adaptado de SAATY, 1984.

Para realizar o preenchimento das matrizes do critério de satisfação e de pertinência, foram coletados os dados do perfil do cliente, em forma de coeficientes dentro de uma escala de 1 a 10, fornecidos pelo próprio usuário do programa, que representam quanto um determinado aparelho possui de valor naquele critério. Esses dados são coletados pelo programa e processados de forma que o valor para um determinado espaço da matriz seja numericamente igual à diferença entre os coeficientes dos dois aparelhos correspondentes, nesse passo, o valor inteiro é atribuído à posição em que domina o aparelho com maior coeficiente, a posição inversa recebe o valor inverso.

Diferentemente de como foi feito com as duas matrizes citadas anteriormente, o preenchimento da matriz de comparação em relação ao custo de uso não pode ser feita com valores arbitrários, pois ela deve obedecer a diferença entre os valores reais de consumo de cada eletrodoméstico, de forma que uma maior diferença entre consumos resulte em uma prioridade mais acentuada para o eletrodoméstico mais econômico. A relação matemática que será utilizada para mensurar a prioridade relativa é a seguinte:

$$Fc = \frac{C_2}{C_1} \quad (3)$$

Onde C_1 é o consumo do eletrodoméstico menos econômico C_2 é o consumo do eletrodoméstico mais econômico (O consumo é calculado pelo produto da

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 25, n. 1, e-5354, 2025.

potência do equipamento pelo seu tempo de uso). O fator de consumo F_c é o valor que foi analisado para determinar o coeficiente a ser utilizado na posição em análise da matriz. A relação utilizada para obter o coeficiente através de F_c está de acordo a Tabela 2.

Tabela 2 - Relação entre F_c e o coeficiente de comparação

Valor de F_c	Valor do Coeficiente
$0 \leq F_c < 0,2$	9
$0,2 \leq F_c < 0,4$	7
$0,4 \leq F_c < 0,6$	5
$0,6 \leq F_c < 0,8$	3
$0,8 \leq F_c \leq 1$	1

Fonte: Autores, 2024.

Vale a pena salientar que esse coeficiente foi o atribuído ao eletrodoméstico mais econômico em relação ao menos econômico.

Além da matriz de comparação das alternativas em relação aos critérios, também se deve elaborar uma matriz de comparação da importância dos critérios em relação ao objetivo principal.

Mesmo que a comparação entre os critérios também seja um exercício subjetivo, foi escolhido que a matriz referente a ela seria fixa, com valores razoáveis. Isso foi feito para reduzir a carga de parâmetros da rotina normal do programa.

Tendo sido construídas todas as matrizes de comparação citadas acima, o próximo passo é obter os coeficientes de prioridade locais. Cada matriz de comparação fornecerá um conjunto de coeficientes, obtidos através do autovetor normalizado correspondente ao maior autovalor da matriz.

Por fim, para obter os coeficientes globais, deve-se multiplicar os coeficientes locais de comparação de uma alternativa em relação a um critério pelo coeficiente de prioridade local do próprio critério, isto deve ser feito para todos os três critérios, e os valores devem ser somados, o resultado será o coeficiente global de prioridade da alternativa analisada, que foi usado para construir o modelo do Problema da Mochila.

Diante das diversas matrizes de comparação das quais deverão ser obtidos os autovetores correspondentes, se fez necessário sistematizar o processo de obtenção desses vetores. Normalmente, para se obter os autovetores de uma matriz A quadrada de ordem n , é necessário resolver um sistema de n equações advindo da seguinte identidade, que é consequência da definição de autovetor:

$$(A - \lambda \cdot I) \cdot X = 0 \quad (4)$$

Este método é eficiente, porém, a eliminação de Gauss (método mais comum na solução de sistemas lineares) é difícil de ser implementada na linguagem C, por isso, outro método foi escolhido.

O processo que foi utilizado para obter os autovetores foi o método da potência ou iteração de Von Mises, que é um método iterativo relativamente mais simples de programar. As etapas deste método são simples, primeiramente, tendo uma matriz A , deve ser escolhido um palpite inicial para o autovetor de A , que deve ser não nulo em todas as suas dimensões.

O segundo passo é multiplicar a matriz A pelo vetor palpite, dessa forma, obtém-se um vetor resultante, este vetor é normalizado e multiplica A novamente, este processo constitui uma iteração e é repetido quantas vezes necessário. Colocando em termos matemáticos:

$$b_{k+1} = \frac{A \cdot b_k}{|A \cdot b_k|} \quad (5)$$

A teoria do método afirma que, conforme o número de iterações aumenta, o vetor resultante b se aproxima cada vez mais do autovetor correspondente ao autovalor dominante. Como esse processo é iterativo, os valores obtidos não são exatos, e sim aproximações das soluções, que, para o problema em vista, são suficientemente próximas.

Obtidos os coeficientes globais, torna-se possível resolver o problema utilizando-os no modelo de Problema da Mochila citado anteriormente, obtém-se, assim, um modelo matemático completo para a resolução do problema.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Testes com Critérios Equilibrados

Para observar o comportamento do método, foram elaboradas três classes consumidoras, cada classe inclui certos equipamentos eletrodomésticos que buscam representar os hábitos de uso dos consumidores de certo grupo econômico. A classe 1, busca representar os consumidores classe média e média/alta, a classe 2 busca representar os consumidores da classe média baixa, e, por fim, a classe 3 busca representar os consumidores de classe mais alta.

Como as classes apenas fixam os eletrodomésticos em análise, Para cada classe, foram elaborados três perfis de consumidor, cada qual com um conjunto de preferências e com certas metas de consumo.

Para fins de comparação, as características de preferência e de meta de consumo diferem individualmente entre perfis, por exemplo, o perfil 1 tem a mesma meta de consumo que o perfil 2, porém preferências diferentes, e o perfil 3 tem as mesmas preferências que o perfil 1, porém metas diferentes.

As classes utilizadas nos testes e seus respectivos perfis e metas de consumo estão expostos nas Tabelas 3, 4, 5 e 6. A matriz de comparação entre critérios utilizada para essa bateria de testes foi a matriz unidade, ou seja, todos os critérios possuíam igual importância.

Tabela 3 - Características da classe de consumidor 1

Eletrodoméstico	Consumo (W)	Tempo de Uso (min)	Período	Pertinência			Satisfação		
				P1	P2	P3	P1	P2	P3
Cortador de grama	500	120	F	6	8	6	3	6	3
Lavadora de roupas	500	60	I	6	9	6	3	3	3
Lavadora de louças	1500	40	I	8	9	8	3	3	3
Secador de cabelo	600	10	P	5	9	5	9	7	9
Videogame	15	240	P	1	1	1	9	5	9
Barbeador	10	30	P	1	1	1	9	7	9
Ferro de passar	1000	10	I	7	5	7	4	4	4
Aspirador de pó	100	20	P	6	8	6	3	3	3
Liquidificador	300	15	F	6	3	6	6	5	6

Fonte: Autores, 2024.

Tabela 4 - Características da classe de consumidor 2

Eletrodoméstico	Consumo (W)	Tempo de Uso (min)	Período	Pertinência			Satisfação		
				P1	P2	P3	P1	P2	P3
Televisão	110	300	P	3	5	3	8	8	8
Barbeador	10	30	P	6	3	6	4	4	4
Liquidificador	300	15	I	5	4	5	4	4	4
Ferro de passar	1000	10	I	7	6	7	3	2	3
Lavadora de roupas	500	60	P	9	8	9	3	2	3
Batedeira	100	20	I	3	2	3	3	3	3
Computador de Mesa	180	50	F	4	7	4	4	4	4
Máquina de costura	100	40	P	3	4	3	6	3	6
Forno elétrico	750	50	I	5	7	5	5	4	5
Aparelho de som	200	40	I	2	2	2	8	5	8

Fonte: Autores, 2024.

Tabela 5 - Características da classe de consumidor 3

Eletrodoméstico	Consumo (W)	Tempo de Uso (min)	Período	Pertinência			Satisfação		
				P1	P2	P3	P1	P2	P3
Aquecedor de ambiente	1000	60	F	3	6	3	8	8	8
Impressora	90	10	I	5	3	5	1	1	1
Lavadora de roupas	500	60	P	8	6	8	3	3	3
Lavadora de louças	1500	40	I	7	8	7	3	3	3
Secador de cabelo	600	10	P	4	3	4	8	5	8
Barbeador	10	30	I	2	3	2	7	7	7
Ferro de passar	1000	10	I	7	7	7	4	4	4
Aspirador de pó	100	20	I	6	4	6	3	2	3
Sauna residencial	4500	30	P	1	1	1	8	8	8
Liquidificador	300	15	P	5	5	5	5	7	5

Fonte: Autores, 2024.

Tabela 6 - Metas de redução consumo por perfil

Perfil	Redução percentual no Pico de consumo	Redução percentual no período intermediário	Redução percentual fora do pico
--------	---------------------------------------	---	---------------------------------

1	20%	10%	0%
2	20%	10%	0%
3	50%	20%	0%

Fonte: Autores, 2024.

Aplicando o método elaborado sobre os perfis dentro de cada classe de consumidor, foram obtidos os seguintes resultados, expressos na Tabela 7.

Tabela 7 - Cronogramas de utilização conforme classe e perfil para a seção 5.1

Classe de consumidor	Perfil de Consumidor	Horário de pico	Horário intermediário	Horário fora do pico
Classe 1 - Média renda	1	Secador de cabelo Barbeador Aspirador de pó	Lavadora de louças Ferro de passar Videogame	Cortador de grama Liquidificador Lavadora de roupas
	2	Secador de cabelo Barbeador Aspirador de pó	Lavadora de roupas Ferro de passar Videogame	Cortador de grama Liquidificador Lavadora de louças
	3	Videogame Barbeador Aspirador de pó	Lavadora de louças Ferro de passar Secador de cabelo	Cortador de grama Liquidificador Lavadora de roupas
Classe 2 - Baixa renda	1	Barbeador Lavadora de roupas Máquina de costura	Liquidificador Ferro de passar Batedeira Aparelho De Som Televisão	Computador de mesa Forno elétrico
	2	Televisão Barbeador Máquina de costura	Liquidificador Batedeira Forno elétrico Aparelho de som Lavadora de roupas	Computador de mesa Ferro de passar
	3	Barbeador Lavadora de roupas	Liquidificador Ferro de passar Batedeira Aparelho de som Televisão Máquina de costura	Computador de mesa Forno elétrico
Classe 3 - Alta renda	1	Lavadora de roupas Secador de cabelo Liquidificador	Impressora Barbeador Ferro de passar Aspirador de pó Sauna residencial	Aquecedor de ambiente Lavadora de louças
	2	Lavadora de roupas Secador de cabelo Liquidificador	Impressora Lavadora de louças Barbeador Ferro de passar	Aquecedor de ambiente Sauna residencial

		Aspirador de pó	
3	Lavadora de roupas	Impressora	Aquecedor de ambiente
	Secador de cabelo	Barbeador	Lavadora de louças
	Liquidificador	Ferro de passar	
		Aspirador de pó	
		Sauna residencial	

Fonte: Autores, 2024.

Observando os cronogramas da classe de consumidor 1, conclui-se os seguintes, no perfil 1, é possível perceber que dois eletrodomésticos foram deslocados, o videogame, a lavadora de roupas, isso ocorreu porque, mesmo não sendo cargas com consumo relativamente alto, seus coeficientes de preferência são pequenos em relação aos dos aparelhos concorrentes.

Comparando os perfis 1 e 3, percebe-se que, mesmo mantendo as preferências, a mudança de meta fez com que a distribuição dos aparelhos fosse diferente, de forma que cargas de consumo relativamente maior (Secador de cabelo) foram deslocadas, isso ocorreu pois, dessa forma, a meta de economia pode ser atingida com menos aparelhos, o que gera menor perda de satisfação.

Comparando os perfis 1 e 2, é possível perceber que a mudança de preferência fez com que dois eletrodomésticos “trocassem de posição”, a lavadora de roupa e a lavadora de louça, isso era esperado, pois, como no segundo perfil os coeficientes desses aparelhos são iguais, a prioridade passou a ser do mais econômico, no perfil 1, essa diferença de economia foi compensada pela preferência do consumidor.

Nos três perfis pôde-se perceber que as cargas foram distribuídas uniformemente sobre o cronograma.

Para a classe de consumidor 2, o comportamento foi semelhante, no cronograma do perfil 1 desse conjunto, foram deslocados dois eletrodomésticos, a televisão, do horário de pico, e o forno elétrico, do horário intermediário, observa-se que ambos são aparelhos que possuem um alto uso de energia, devido a sua alta potência e/ou alto tempo de uso.

Comparando os perfis 1 e 2, percebe-se que, novamente, dois eletrodomésticos foram deslocados, a lavadora de roupas, que foi retirada do horário de pico, no lugar da televisão, e o ferro de passar, que foi retirado do horário intermediário, no lugar do forno elétrico. Isso ocorreu, pois no perfil 2, a lavadora de

roupas possui uma prioridade menor para o consumidor, em relação ao perfil 1, enquanto a televisão possui uma prioridade maior. O mesmo arranjo ocorreu com o ferro de passar e com o forno elétrico. Essa mudança de preferência foi a causadora da comutação.

Comparando os perfis 1 e 3, pode-se observar que, com o aumento da meta de economia, foi deslocado apenas mais um aparelho, a máquina de costura, o horário intermediário permaneceu inalterado, mesmo recebendo mais um aparelho vindo do horário de pico, isso mostra que a exclusão do forno elétrico desse horário não só cumpre a meta de 10% de economia exigida no perfil 1, mas alcança também os 20% exigidos no perfil 2. Esse comportamento expõe como o algoritmo trabalha apenas com uma meta mínima de economia, o percentual real de redução no consumo alcançado por um cronograma qualquer pode ser bem maior do que a meta estipulada para o período, desde que os demais parâmetros do perfil permitam.

Observando a classe de consumidor 3, percebe-se que, no perfil 1, foram deslocados dois aparelhos, a sauna residencial, do horário de pico, e a lavadora de louças, do horário intermediário, esse deslocamento ocorreu por fatores já explicados anteriormente (um destaque para os parâmetros da sauna residencial, que indicam que ela é um aparelho que proporciona muita satisfação, porém tem pouca pertinência).

Comparando o perfil 1 com o perfil 2, percebe-se que apenas a sauna residencial foi deslocada, do horário de pico para o horário fora de pico, ou seja, ela foi na verdade, deslocada duas vezes, uma na avaliação do horário de pico e outra, na avaliação do horário intermediário, isso ocorreu pois a lavadora de louças é mais pertinente no perfil 2 do que no perfil 1, enquanto os parâmetros da sauna permaneceram os mesmos.

Comparando o primeiro e o último perfil, percebe-se que não houve alteração nenhuma, isso aconteceu porque, tanto a sauna residencial, quanto a lavadora de louças, possuem um consumo bem maior que os outros eletrodomésticos presentes no mesmo horário que elas, logo, semelhante ao que ocorreu na classe de consumidor 2, o deslocamento desses eletrodomésticos se mostrou suficiente para cumprir não só a meta do perfil 1, mas também a do perfil 3. Esse fato revela uma

tendência do algoritmo de deslocar cargas elevadas, e expõe como essa tendência é fortalecida quando estas estão acompanhadas de cargas menores.

4.2 Testes com Pertinência Priorizada

Os resultados mostrados na seção anterior expuseram os julgamentos realizados através do método de otimização levando em consideração que todos os três critérios envolvidos possuíam a mesma importância.

Porém, também é interessante realizar uma nova série de julgamentos, fazendo com que o critério de pertinência seja considerado como mais importante que os demais, dessa forma, é possível garantir maior “inércia” aos aparelhos que os clientes desejam usar exclusivamente em um horário específico.

Para garantir uma maior importância ao critério de pertinência, foram alterados os coeficientes da matriz de comparação dos critérios, ao invés da matriz unidade, foi utilizada a matriz da Figura 3 como matriz de comparação.

Os testes que foram realizados para estas condições utilizaram o mesmo conjunto de classes, perfis e metas de consumo utilizado na seção anterior, expostos nas Tabelas 3, 4, 5 e 6.

Figura 3 - Matriz de comparação entre critérios para a fase de pertinência priorizada

$$M_c = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{9} & 1 \\ 9 & 1 & 9 \\ 1 & \frac{1}{9} & 1 \end{pmatrix}$$

Fonte: Autores, 2024.

Os resultados obtidos nas testagens com a nova matriz de comparação estão expostos na Tabela 8.

Tabela 8 - Cronogramas de utilização conforme classe e perfil para a seção 5.2

Classe de consumidor	Perfil de Consumidor	Horário de pico	Horário intermediário	Horário fora do pico
Classe 1 - Média renda	1	Secador De Cabelo Barbeador Aspirador De Pó	Lavadora De Louças Ferro De Passar Videogame	Cortador De Grama Liquidificador Lavadora De

				Roupas	
	2	Secador De Cabelo Barbeador Aspirador De Pó	Lavadora De Roupas Lavadora De Louças	Cortador De Grama Liquidificador Ferro De Passar Videogame	De
	3	Videogame Barbeador Aspirador De Pó	Lavadora De Louças Ferro De Passar Secador De Cabelo	Cortador De Grama Liquidificador Lavadora De Roupas	De
Classe 2 - Baixa renda	1	Barbeador Lavadora De Roupas Máquina De Costura	Liquidificador Ferro De Passar Batedeira Forno Elétrico Aparelho De Som	Computador De Mesa Televisão	De
	2	Barbeador Lavadora De Roupas Máquina De Costura	Liquidificador Ferro De Passar Batedeira Forno Elétrico Aparelho De Som	Computador De Mesa Televisão	De
	3	Barbeador Lavadora De Roupas	Liquidificador Ferro De Passar Batedeira Forno Elétrico Aparelho De Som Máquina De Costura	Computador De Mesa Televisão	De
Classe 3 - Alta renda	1	Lavadora De Roupas Secador De Cabelo Liquidificador	Impressora Lavadora De Louças Barbeador Ferro De Passar Aspirador De Pó	Aquecedor De Ambiente Sauna Residencial	De
	2	Lavadora De Roupas Secador De Cabelo Liquidificador	Impressora Lavadora De Louças Barbeador Ferro De Passar Aspirador De Pó	Aquecedor De Ambiente Sauna Residencial	De
	3	Lavadora De Roupas Secador De Cabelo Liquidificador	Impressora Lavadora De Louças Barbeador Ferro De Passar Aspirador De Pó	Aquecedor De Ambiente Sauna Residencial	De

Fonte: Autores, 2024.

Ao comparar os resultados obtidos nesta etapa com os obtidos na seção anterior, ficam nítidos como os eletrodomésticos que são considerados importantes foram mais preservados em suas posições em relação àqueles que podem ser considerados de menor prioridade.

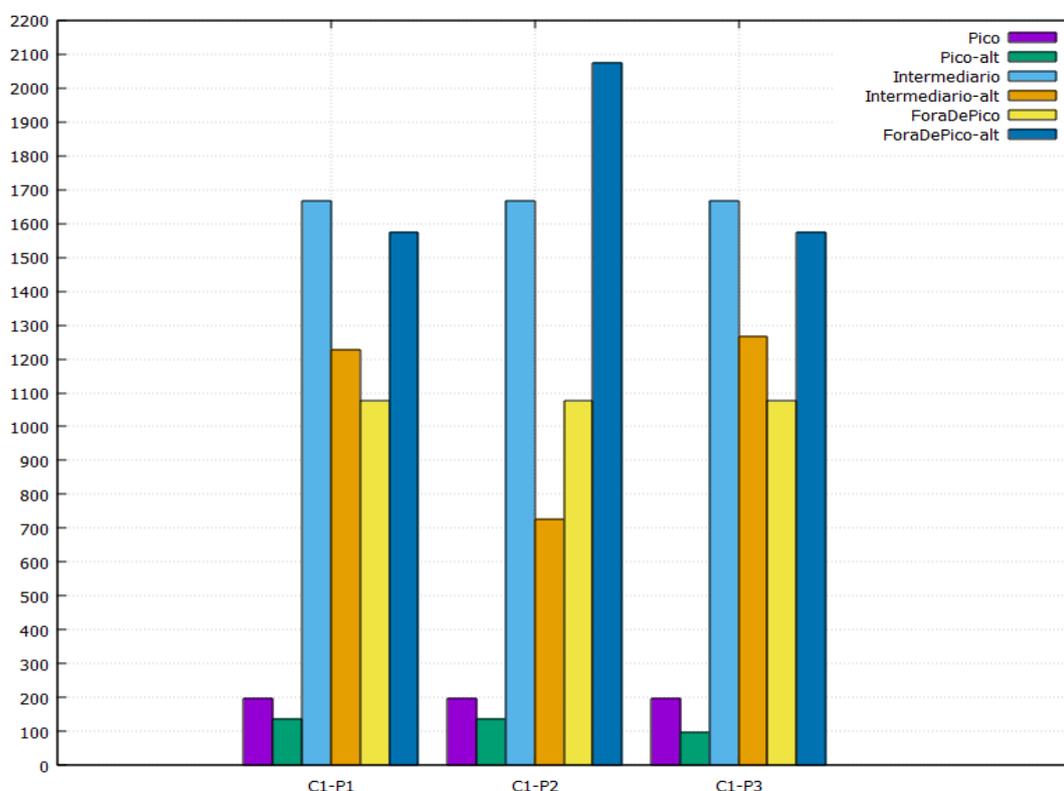
Logo, essa modalidade de julgamento pode ser utilizada para melhor garantir que eletrodomésticos de extrema importância para o consumidor não sejam deslocados e tenham sua utilidade prejudicada.

Por outro lado, se o consumidor tiver uma preferência, pode-se alocar seu desejo no uso do aparelho eletrodoméstico. Por exemplo, na Tabela 8 a Lavadora de Louças, da classe 1, perfil 2 foi para o horário intermediário, que comparando com a Tabela 7, esse aparelho estava no horário fora do pico.

4.3 Análises da Redução de Consumo

Para avaliar os resultados gerados pela realocação dos aparelhos eletrodomésticos foi calculado, para **cada classe**, em cada um dos testes (os **perfis**), o **consumo em kWh** para o cronograma desejado pelo consumidor e também o consumo para o cronograma sugerido pelo modelo.

Figura 4 – Histograma de consumo (kWh), Classe 1 (C1 e seus perfis P1, P2 e P3) sob critérios equilibrados



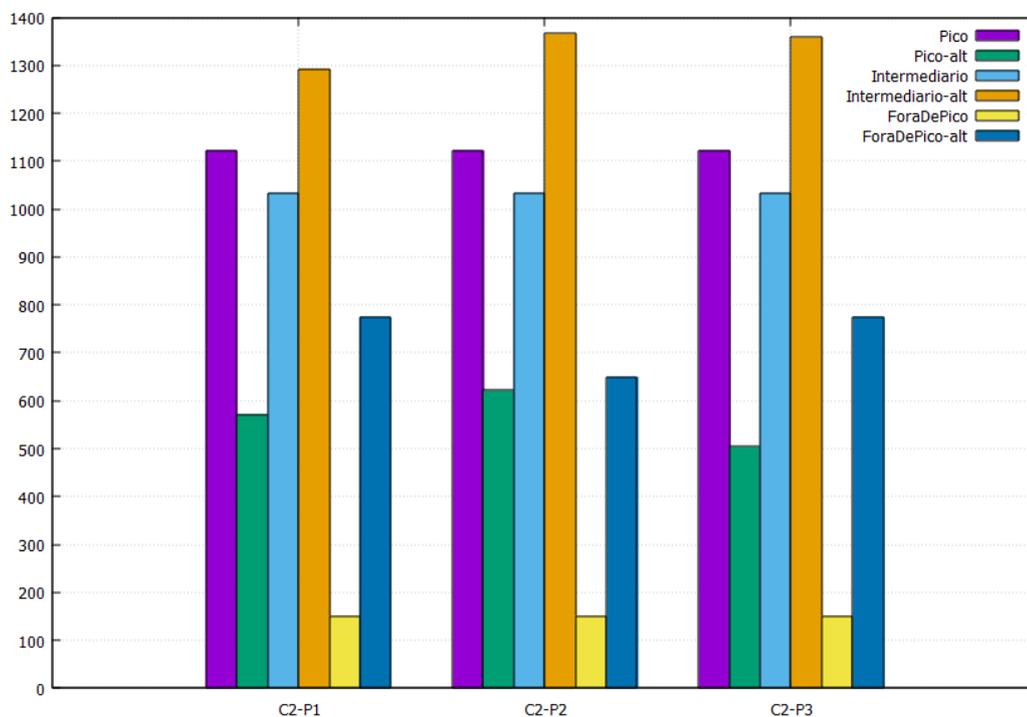
Fonte: Autores, 2024.

Os dados foram separados por classe e expostos nos gráficos das Figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9, contendo, cada um, três histogramas, um para cada perfil (P1 - Perfil 1, P2 - Perfil 2, P3 - Perfil 3) junto as classes (C1, C2 e C3), eixo x dos gráficos.

As barras representam o consumo para cada horário no cronograma desejado pelo consumidor (Pico, Intermediário, ForaDePico) e o consumo para cada horário no cronograma sugerido pelo método (Pico-alt, Intermediário-alt, ForaDePico-alt).

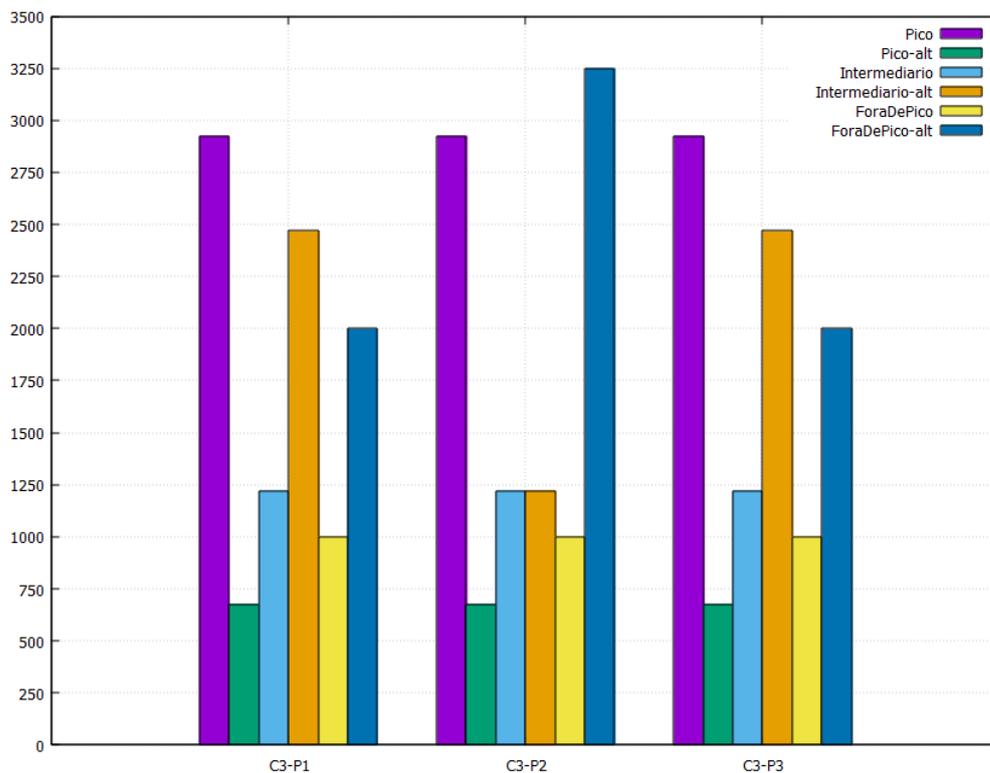
Ressalta-se que na ordenada (eixo y) representa o consumo em kWh para as Figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

Figura 5 – Histograma de consumo (kWh), Classe 2 (C2 e seus perfis P1, P2 e P3) sob critérios equilibrados



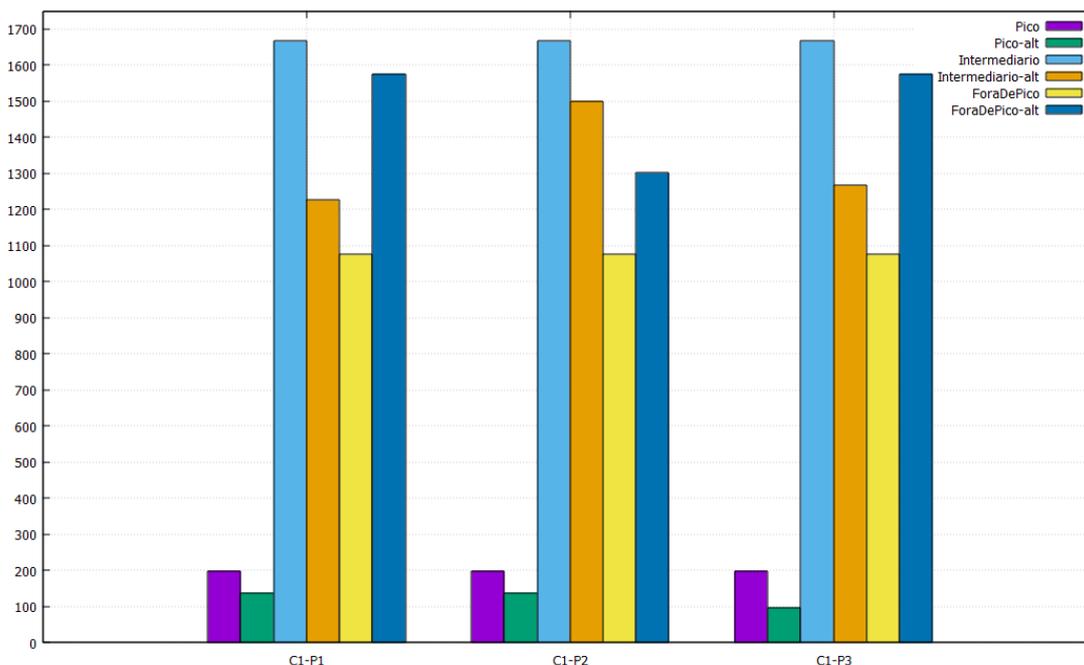
Fonte: Autores, 2024.

Figura 6 – Histograma de consumo (kWh), Classe 3 (C3 e perfis P1, P2 e P3), critérios equilibrados



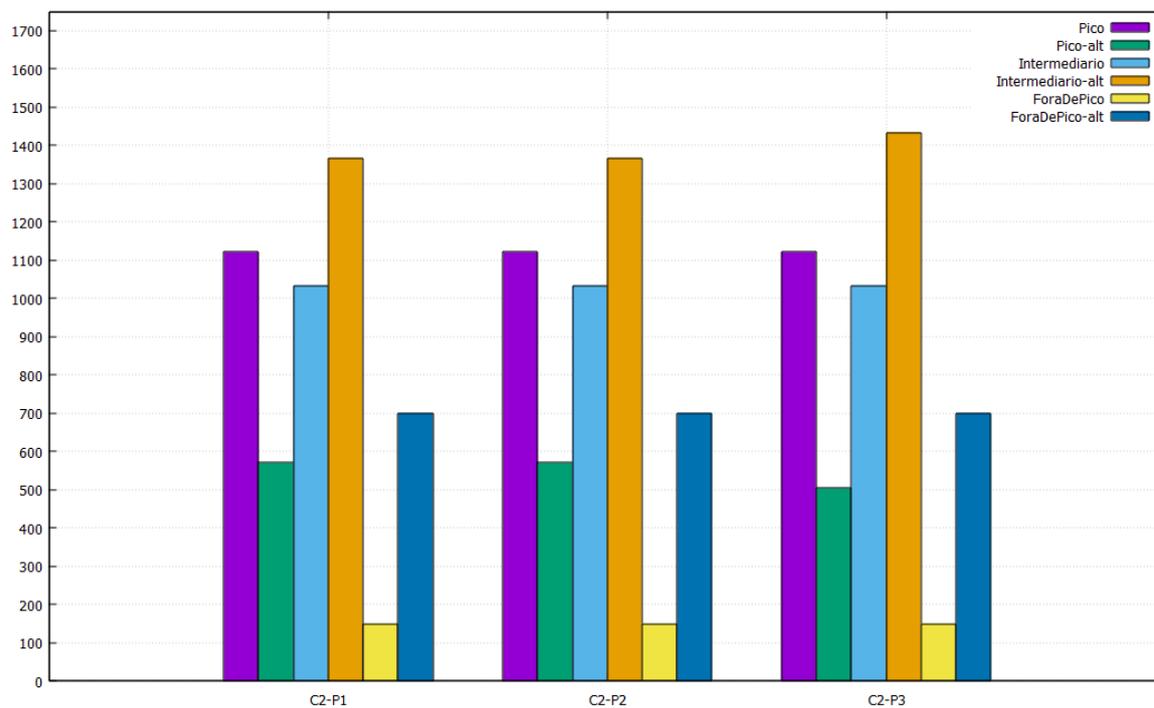
Fonte: Autores, 2024.

Figura 7 – Histograma de consumo (kWh), Classe 1 (C1 e seus perfis P1, P2 e P3), pertinência priorizada



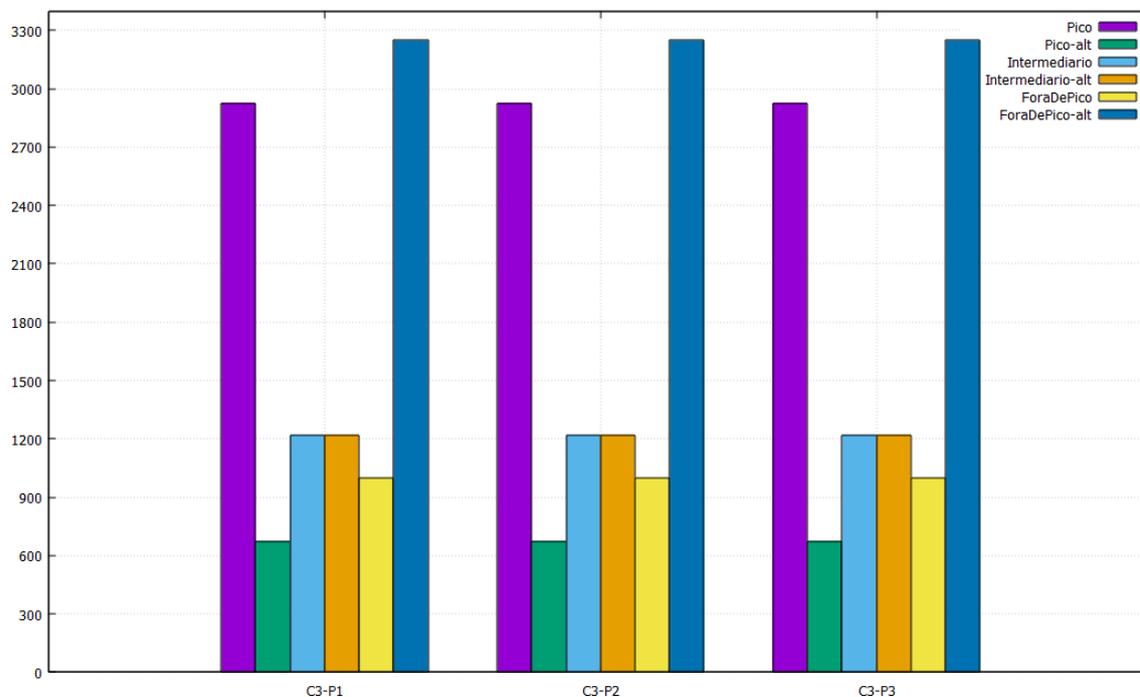
Fonte: Autores, 2024.

Figura 8 – Histograma de consumo (kWh), Classe 2 (C2 e perfis P1, P2 e P3), pertinência priorizada



Fonte: Autores, 2024.

Figura 9 – Histograma de consumo (KWh), Classe 3 (C3, perfis P1, P2 e P3), pertinência priorizada



Fonte: Autores, 2024.

Observando os resultados expostos nos gráficos, é possível perceber que o método elaborado é capaz de diminuir drasticamente o consumo de energia nos horários de pico. Para todos os perfis, foi possível alcançar a economia de 20% em uma situação desejada para o horário de pico e de 50% em outra. É interessante notar que, como já dito anteriormente, a meta de redução de consumo é uma métrica mínima.

A economia alcançada pelo cronograma sugerido pode ser bem maior do que a desejada para certo horário, como pode ser visto no gráfico da Figura 9. Nessa situação, o cronograma torna-se permanente, para os três perfis da classe, não obstante às alterações de preferência e meta de economia.

5 DISCUSSÕES

Fazendo uma análise global, é possível perceber como o modelo desloca as cargas dos horários de maior demanda para os de menor demanda. Nota-se como em todos os cronogramas sugeridos houve aumento de consumo para o horário fora de pico. Isso é esperado quando for exigida uma redução de consumo para o horário intermediário.

O comportamento do consumo no horário intermediário é o mais imprevisível. Nesse caso, pode-se constatar pelos gráficos na seção 4, que pode haver diminuição, aumento ou sem alteração do consumo de energia. Não há como prever, sem utilizar o método proposto nesse trabalho. Pois a meta de economia para o horário intermediário é aplicado não sobre o consumo total do horário no cronograma sugerido pelo cliente, mas na soma do consumo dos aparelhos deslocados do horário de pico. Não obstante a isso, o método foi aplicado dessa forma para evitar que o consumo no horário intermediário se torne elevado devido às cargas deslocadas do horário de demanda de maior pico.

Ressalta-se que é possível ajustar as metas de consumo para que a carga ao longo do dia se distribua de maneira mais equilibrada considerando as prioridades dos consumidores.

Segundo Nebey (2024), é importante implementar métodos de resposta à demanda que incentivam os consumidores a reduzir o consumo durante os períodos de maior pico de demanda. Nesse sentido, o gerenciamento do lado da demanda

contribui para uma infraestrutura de energia mais sustentável e resiliente. Esse autor destacou ainda, que esse gerenciamento proativo da demanda, não apenas minimiza a necessidade de atualizações de infraestrutura, mas também facilita uma utilização mais equilibrada e eficiente dos recursos, promovendo, em última análise, uma energia mais verde e mais econômica.

O fato do método utilizado no trabalho proposto considerar dados de preferência do consumidor para planejar as cargas, consiste em um diferencial em relação aos trabalhos de Chakraborty, Mondal e Mondal (2018) e de Kumaraguruparan, Sivaramakrishnan e Sapatnekar (2012). Esses últimos trabalhos foram considerados somente fatores de consumo energético, sem se atentar ao impacto que as mudanças propostas causariam no conforto dos clientes de energia elétrica.

Ainda, nos métodos dos trabalhos de Honorato *et al.* (2016), Mostafa *et al.* (2022) e Rahim *et al.* (2015), foram levados em consideração as preferências de uso dos clientes. Porém, a metodologia utilizada não permite a diferenciação entre as características de preferência por satisfação e a de preferência por necessidade. Assim, não são possíveis para esses dois métodos, atribuir diferentes níveis de importância para cada uma das características e alcançar a versatilidade obtida neste trabalho proposto.

Na literatura são encontrados vários trabalhos que mostram a redução de consumo de energia pelo consumidor quando utiliza o gerenciamento pelo lado da demanda. Podemos citar que a demanda no horário de pico de um conjunto de cargas na proposta em Awais *et al.* (2015) reduziu em 21,04 por cento e em Silva *et al.* (2024) com redução de 35,4 por cento. No entanto, em Nebey (2024) foram mostrados desempenhos entre 7,25 por cento e 24 por cento.

6 CONCLUSÕES

Esse trabalho desenvolveu um método de escalonamento de cargas capaz de analisar diversos perfis de consumidores e elaborar um cronograma sob uma meta de economia estabelecida. Esse cronograma distribui as cargas dos eletrodomésticos considerando as preferências individuais de cada perfil de consumidor.

Nas classes estudadas juntas aos perfis diferenciados podemos perceber que as cargas foram distribuídas uniformemente sobre o cronograma. Isso mostra a robustez do método proposto que combina o processo analítico hierárquico em conjunto ao problema da mochila. A combinação do processo analítico hierárquico junto à modelagem do problema da mochila é uma técnica inovadora que permite redução do consumo no horário de pico. Essa redução de consumo colabora para implantação de redes elétricas inteligentes possam ser gerenciadas pelo lado da demanda.

Os resultados computacionais constataram para diversos perfis de consumidores, uma economia de energia no horário de pico, de no mínimo, 20 por cento. Comparando com a técnica de proposta em Awais *et al* (2015) que foi de 21,04 por cento, mostra que nosso método proposto é compatível com a literatura.

Já em Silva *et al.* (2024), o algoritmo proposto reduziu em 35,4 por cento, no horário de maior demanda (horário de pico), de um conjunto de cargas. Entretanto, em Nebey (2024), demonstrou que os avanços recentes no sistema de gerenciamento de energia do lado da demanda obtiveram desempenhos na eficiência entre 7,25 por cento e 24 por cento.

Assim, a técnica inovadora desenvolvida nesse trabalho pode ser utilizada para reduzir os níveis de estresse sobre o sistema elétrico de potência nos horários de pico num patamar pré-definido. Com isso, contribuiu para um melhor balanceamento da carga diária nesses sistemas elétricos.

Para avaliar o impacto sobre critérios de pertinências, foram alterados os coeficientes da matriz de comparação que ao invés da matriz unidade, foi utilizada a nova matriz, conforme mostrado na Figura 3. Assim, os resultados obtidos nesta etapa e comparados com os obtidos anteriormente, mostrou-se que aparelhos que são considerados importantes foram preservados em suas escalas. Isso mostra a capacidade do método de resolver o problema considerando as preferências dos consumidores.

Destaca-se a capacidade do método de planejar cargas para todos os horários da tarifa é um avanço sobre a metodologia usada por Sianaki, Hussain e Tabesh (2010), que se limitou a analisar somente as cargas do horário de pico.

Apesar do desempenho satisfatório e coerente observado na seção dos resultados, o método ainda possui certas limitações e não considera alguns fatores

práticos. Por exemplo, um fator não considerado é o caso em que uma ou mais cargas são utilizadas entre duas janelas de horários distintos. Além disso, por analisar somente cargas com tempo de uso menor que a duração dos horários da tarifa branca, cargas de uso prolongado ou até de uso ininterrupto, não podem ser considerados nesse método desenvolvido.

Tendo em vista trabalhos futuros, o que se espera é que as limitações descritas anteriormente sejam superadas, de modo a tornar o método mais robusto e aplicável. Além disso, deverão ser avaliadas adaptações no método que possibilitem uma ampliação do escopo atual com um método diferenciado aos consumidores residenciais, seja em suas preferências, seja em suas cargas.

Nesse caso, adotar um procedimento de cálculo de economia baseado não no consumo elétrico em quilowatts, mas uma alternativa, como sugerido pelos autores Sianaki, Hussain e Tabesh (2010), que é baseada no preço a ser pago. Nesse sentido, deve-se fazer um estudo mais detalhado da estrutura de cobrança da energia elétrica no Brasil, com foco aos preços regionais e bandeiras tarifárias.

Outra sugestão de pesquisa futura é adequar o método para outras modalidades de consumidores, como os industriais e os comerciais, pois esses consumidores possuem métricas de preferências e perfis de cargas diferentes.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho teve apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), através do edital PRPPG/Ifes 03/2023 Pibit, projeto nº 5526 (Métodos de Otimização para Planejamento de Facilidades), plano de trabalho nº 11978.

REFERÊNCIAS

AWAIS, Muhammad *et al.* An efficient genetic algorithm based demand side management scheme for smart grid. In: 2015 18th international conference on network-based information systems. **IEEE**, p. 351-356, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/NBiS.2015.54>. Acesso em 05 de mar. 2024.

BREDA, G. R.; MESTRIA, M. Métodos heurísticos para despachar veículos de emergência com níveis de prioridade para responder às falhas de energia elétrica.

Revista Produção Online, [S. l.], v. 23, n. 1, p. 4860, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v23i1.4860>. Acesso em: 01 dez. 2024.

CHAKRABORTY, N.; MONDAL, A.; MONDAL, S. Efficient Scheduling of Nonpreemptive Appliances for Peak Load Optimization in Smart Grid, in **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, vol. 14, n. 8, p. 3447-3458, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2781284>. Acesso em 05 de mar. 2024.

DUTRA, C. C.; FOGLIATTO, F. S. Operacionalização do Processo Analítico Hierárquico Usando Matrizes Incompletas de Comparações Pareadas. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 48., Anais [...], Fortaleza, 2007. Disponível em: <https://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2007/pdf/arc0113.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2024.

EARLE, R.; KAHN, E. P.; MACAN, E. Measuring the Capacity Impacts of Demand Response. **The Electricity Journal**, 22(6), p. 47-58, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2009.05.014>. Acesso em: 05 mai. 2024.

HONORATO, Í. *et al.* Otimização Multi-Objetivo da Demanda em Redes Elétricas Inteligentes Residenciais. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, Anais [...], 48., Vitória, 2016. Disponível em: <https://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2016/pdf/155927.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2024.

KUMARAGURUPARAN N.; SIVARAMAKRISHNAN H.; SAPATNEKAR, S. Residential task scheduling under dynamic pricing using the multiple knapsack method. In **IEEE Conference, Washington**, DC, p. 1-6, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175656>. Acesso em: 03 jan. 2025.

LINDO Systems, Inc. Classic LINDO's Interface, 2024. Disponível em: <https://www.lindo.com/index.php/ls-downloads>. Acesso em: 03 out. 2024.

MONEGAT, A. D. R. *et al.* Aplicação do Método Processo Analítico Hierárquico para Seleção de Projetos, p. 2974-2986. *In*: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 15., Anais [...]. São Paulo: Blucher, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0034-75901988000100002>. Acesso em: 21 dez. 2024.

MOSTAFA, N. A. *et al.* A sustainable user-centered application for residential energy consumption saving, **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 53, part D, p. 102754, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102754>. Acesso em 03 dez. 2024.

NEBEY, Abraham Hizkiel. Recent advancement in demand side energy management system for optimal energy utilization. **Energy Reports**, v. 11, p. 5422-5435, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.028>. Acesso em 12 nov. 2024.

NEWSHAM, G. R.; BOWKER, B. G. The effect of utility time-varying pricing and load control strategies on residential summer peak electricity use: A review. **Energy Policy**, v. 38, n. 7, p. 3289-3296, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.027>. Acesso em: 03 jan. 2025.

OMAR, F.; BUSHBY, S. T.; WILLIAMS, R. D. Assessing the performance of residential energy management control Algorithms: Multi-criteria decision making using the analytical hierarchy process, **Energy and Buildings**, v. 199, p. 537-546, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.033>. Acesso em 03 dez. 2024.

PAULA, B. L.; CERRI, L. E. S. Aplicação do processo analítico hierárquico (AHP) para priorização de obras de intervenção em áreas e setores de risco geológico nos municípios de Itapeverica da Serra e Suzano (SP), **Geociências**, v. 31, n. 2, p. 247-257, 2012. Disponível em: https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/31_2/Art08_Paula_e_Cerri.pdf. Acesso em: 12 nov. 2024.

RAHIM, B. *et al.* Towards Multiple Knapsack Problem Approach for Home Energy Management in Smart Grid. In **18th International Conference on Network-Based Information Systems**, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/NBiS.2015.11>. Acesso em: 03 dez. 2024.

RAHIM, S.; AHMAD, H. Data-driven multi-layered intelligent energy management system for domestic decentralized power distribution systems. **Journal of Building Engineering**, v. 68, p. 106113, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106113>. Acesso em: 03 dez. 2024.

RODRIGUES, A. J. de F. .; SOUSA, E. F. de; GONÇALVES, T. J. M.; GUILHERMINO NETO, G. Estratégia de produção e competitividade: estudo de caso de uma usina siderúrgica. **Revista Produção Online**, [S. l.], v. 23, n. 3, p. 5007, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v23i3.5007>. Acesso em: 01 dez. 2024.

SAATY, T. L. The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments. *In*: AVENHAUS, R., HUBER, R.K. (EDS). **Quantitative Assessment in Arms Control**. Springer, Boston, MA, p. 285-308, 1984. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2805-6_12. Acesso em: 01 dez. 2024.

SHEWALE, Amit *et al.* An overview of demand response in smart grid and optimization techniques for efficient residential appliance scheduling problem. **Energies**, v. 13, n. 16, p. 4266, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13164266>. Acesso em: 21 dez. 2024.

SIANAKI, O. A.; HUSSAIN, O.; TABESH, A. R. A Knapsack problem approach for achieving efficient energy consumption in smart grid for endusers' life style. *In*: 2010 IEEE CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR AN EFFICIENT AND RELIABLE ELECTRICITY SUPPLY, Waltham, MA, USA, p. 159-164, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CITRES.2010.5619873>. Acesso em: 23 dez. 2024.

SILVA, B. N. *et al.* Meta-heuristic optimization based cost efficient demand-side management for sustainable smart communities. **Energy and Buildings**, v. 303, p. 113599, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113599>. Acesso em: 03 jan. 2025.

Autores

Daniel Velasque de Oliveira

Graduando no curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (Ifes), Campus Vitória, ES e Técnico em Eletrotécnica pelo Ifes. Atuação nas seguintes áreas: escalonamento de aparelhos domésticos em redes elétricas inteligentes, otimização usando modelo da mochila e gerenciamento do lado da demanda em redes elétricas inteligentes.

Mário Mestria

Doutor em Ciência da Computação pela Universidade Federal Fluminense. Atualmente é Professor Titular do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Campus Vitória, ES. Membro permanente do Mestrado em Tecnologias Sustentáveis, Campus Vitória. Tem experiência nas áreas de Ciência da Computação, Engenharia Elétrica e Engenharia de Produção com ênfase em Otimização Combinatória, Inteligência Computacional e Pesquisa Operacional. Atua nos seguintes temas: metaheurísticas, métodos híbridos, problema da mochila, otimização em sistemas elétricos, gerenciamento pelo lado da demanda para consumidores residenciais, redes elétricas inteligentes, problemas de localização, indústria 4.0, problema de cobertura de conjuntos e realidade virtual.



Artigo recebido em: 22/07/2024 e aceito para publicação em: 05/11/2024
DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v25i1.5354>