



Jun 7 2024 11:47AM Jun 7 2024 11:46AM **MUSO EFICIENTE DOS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS RESIDENCIAIS: INTEGRANDO CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO PARA EDUCAÇÃO NA ENGENHARIA**

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.4918

**Autores:** DANIEL VELASQUE DE OLIVEIRA

**Resumo:** O cenário atual de crescente demanda energética coloca em pauta discussões sobre a eficiência dos sistemas de geração de distribuição de energia elétrica. O constante aumento da demanda energética nos horários de pico exige uma solução sustentável e de baixo custo para aliviar a rede elétrica. Uma metodologia discutida é a gestão pelo lado da demanda. Essa metodologia consiste em planejar racionalmente o consumo dos clientes, oferecendo preços dinâmicos, de forma a proporcionar alívio para o sistema elétrico nos horários de pico e economia para os consumidores. Planejar a utilização de cargas para um cliente, porém, não é uma tarefa simples, dada a complexidade dos fatores de consumo e das preferências humanas envolvidas. Na literatura, há uma ampla discussão sobre algoritmos heurísticos e multiobjetivos que podem ser utilizados para resolver esse tipo de problema de forma rápida e confiável. Neste trabalho será desenvolvido um algoritmo baseado no processo hierárquico analítico, que será utilizado em conjunto com o problema da mochila para desenvolver um cronograma ao consumo.

**Palavras-chave:** otimização, algoritmos heurísticos, gerenciamento do lado da demanda, redes inteligentes, eficiência energética, processo hierárquico analítico, problema da mochila, escalonamento de carga, precificação dinâmica, redução de pico

# USO EFICIENTE DOS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS RESIDENCIAIS: INTEGRANDO CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO PARA EDUCAÇÃO NA ENGENHARIA

## 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 imutável e 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 proposta promissora para diminuir o consumo nos horários de pico sem recorrer à expansão da matriz de geração, seria adotar a metodologia do gerenciamento pelo lado da demanda, esse tipo de abordagem é muito presente no ramo de pesquisa, pois ela utiliza de métodos tecnicamente complexos para alcançar reduções consideráveis no consumo de horário de pico. Entre as competências mais recorrentes na área, pode-se citar: o conhecimento de métodos heurísticos e metaheurísticos; o domínio de algoritmos e métodos matemáticos de decisão e de otimização; e o conhecimento dos padrões de consumo dos clientes da rede. Investir na formação de profissionais bem qualificados é crucial para ultrapassar a barreira tecnológica imposta por esse tipo de abordagem que, sendo dominada, pode levar a uma modernização considerável da matriz de geração e distribuição de energia do Brasil.

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. A proposta apresentada para fazer com que a carga seja distribuída de maneira mais uniforme, é fazer com que os consumidores mudem o seu perfil de consumo, adotando outro mais eficiente e distribuído, 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 certa economia na cobrança de energia.

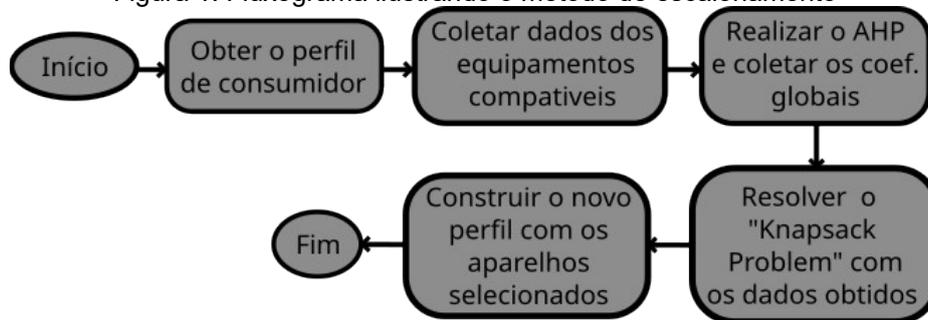
Esse tipo de abordagem é uma alternativa à expansão da matriz energética, que demandaria um investimento muito grande em infraestrutura para construção de novas usinas geradoras (EARLE; KAHN; MACAN, 2009). A mudança de perfil proposta, porém, deve ser realista, para que ela possa ser aceita com facilidade pelos consumidores; para elaborar uma proposta razoável, é necessário levar em consideração não só os fatores de consumo de cada equipamento como também fatores subjetivos de cada cliente, pois cada pessoa possui preferências e necessidades únicas, por causa desses impasses,

resolver esse tipo de problema se torna uma tarefa do tipo NP-hard. Dentre as várias heurísticas já utilizadas por outros autores para resolver esse tipo de problema multiobjetivo, será utilizada 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) e (RAHIM; AHMAD, 2023). Sob os critérios de custo de uso, pertinência de uso e satisfação.

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

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

Ambos os métodos matemáticos citados anteriormente serão melhor elaborados na seção 2.

A proposta técnica desta pesquisa é desenvolver um algoritmo em linguagem C, que utilize a formulação matemática do AHP e do problema da mochila e que seja capaz de auxiliar na elaboração de um cronograma de consumo individual, baseado nos dados de consumo e na preferência de cada cliente. O algoritmo será capaz de aceitar uma meta de consumo, em kWh, além de receber as informações sobre os aparelhos que serão incluídos no perfil. O cronograma final deve listar se e 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 dos resultados obtidos por esse trabalho, as instituições de ensino sejam incentivadas a apresentar, com maior ênfase, o nicho de pesquisa do gerenciamento de energia pelo lado da demanda, oferecendo, para seus alunos, o ensino das competências necessárias para contribuir de forma significativa com o desenvolvimento técnico e científico da área.

Este artigo está organizado da seguinte forma: Na seção 2, foram elaborados os conteúdos auxiliares contidos nos trabalhos relacionados, na seção 3, os métodos matemáticos utilizados nesta pesquisa são elaborados com mais profundidade. Na seção 4, é descrita a metodologia utilizada e na seção 5 são apresentados os resultados obtidos e as discussões relacionadas. Na seção 6, as conclusões são delineadas, assim como trabalhos futuros, por fim, na última seção são listadas as referências utilizadas.

## 2 TRABALHOS RELACIONADOS

Dentre os diversos trabalhos auxiliares utilizados na execução deste trabalho, o “THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS: DECISION MAKING IN COMPLEX ENVIRONMENTS” publicado, em 1984, por Thomas Saaty, foi de excepcional importância, nele, o autor do método analítico hierárquico descreve toda a estrutura matemática sequencial que constitui o AHP, e fornece explicações detalhadas de como utilizá-lo.

O trabalho “Measuring the Capacity Impacts of Demand Response” por Eagle, Kahn e Macan (2009), disserta 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 “The effect of utility time-varying pricing and load control strategies on residential summer peak electricity use: A review” por Newsham e Bowker (2010) segue 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.

Ingressando na área de manejo de cargas residenciais, fica evidente a grande variedade de algoritmos controle utilizados para a implantação de “Smart grids”, em “Assessing the performance of residential energy management control Algorithms: Multi-criteria decision making using the analytical hierarchy process”, Omar, Bushby e Williams (2019), conduzem 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 “Efficient Scheduling of Nonpreemptive Appliances for Peak Load Optimization in Smart Grid”, Chakraborty, Mondal e Mondal (2018), elaboram um algoritmo heurístico de controle e escalonamento coordenado de cargas com o objetivo de organizar-las de forma que haja redução do 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 “Otimização Multi-Objetivo da Demanda em Redes Elétricas Inteligentes Residenciais” por Honorato et al. (2016), é apresentada uma tentativa de se aplicar a metaheurística NSGA-II na resolução do problema de escalonamento de aparelhos elétricos residenciais 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.

Em “Residential task scheduling under dynamic pricing using the multiple knapsack method”, os autores Kumaraguruparan e Sivaramakrishnan (2012) utilizam 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. No artigo “Data-driven multi-layered intelligent energy management system for domestic decentralized power distribution systems”, os autores Rahim e Ahmad (2023) utilizam o mesmo método para alcançar um objetivo análogo, porém utilizando alguns algoritmos heurísticos para testar a integridade do modelo matemático utilizado. O artigo “Towards Multiple Knapsack Problem Approach for Home Energy Management in Smart Grid” por Rahim et al. (2015), segue 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 rápido e 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 “A sustainable user-centered application for residential energy consumption saving, Sustainable Energy Technologies and Assessments”, por Mostafa et al. (2022), foca 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%.

Um artigo de extremo apoio foi o “A Knapsack problem approach for achieving efficient energy consumption in smart grid for endusers' life style”, por Sianaki, Hussain e Tabesh (2010) que 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 para 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.

### 3 FORMULAÇÃO PARA O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO PARA ESCALONAMENTO DE ELETRODOMÉSTICOS

A formulação do problema de escalonamento de eletrodomésticos é baseado no problema da mochila, ou “Knapsack Problem”, que nada mais é do que uma abordagem matemática para resolver um problema de otimização específico, no qual deseja-se, em abstrato, preencher um espaço (chamado de mochila) com um limite de peso  $c$ , com diversos objetos 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 objetos desejados supera o limite de peso  $c$ , então nem todos os objetos poderão ser colocados dentro do espaço. O formato matemático do problema da mochila, que é usado para solucioná-lo, consiste em maximizar a função:

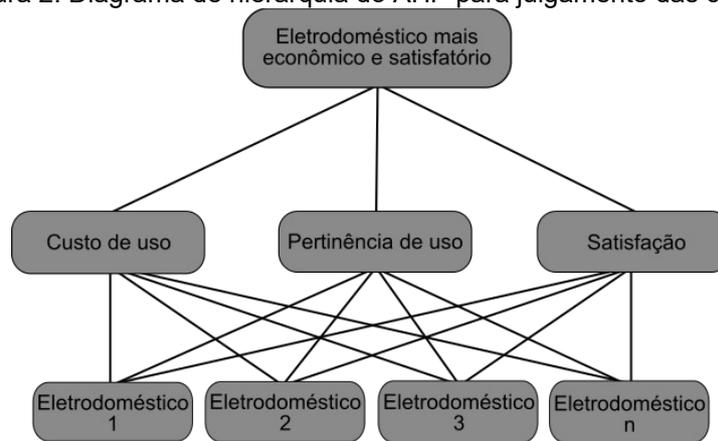
$$\sum_{i=1}^n v_i x_i \quad (1)$$

Que representa a somatória dos valores dos  $n$  objetos considerados, enquanto se obedece ao contingente expresso na Equação (2):

$$\sum_{i=1}^n w_i x_i \leq c \quad (2)$$

Que estabelece que a somatória dos pesos dos n objetos 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 objeto 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  $v_i$  representam o “valor” de cada eletrodoméstico, tendo em vista a sua relação custo-benefício para o cliente. Para obter esses coeficientes de prioridade foi utilizado uma abordagem baseada no 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 oferecidos pelo seu uso ao cliente. O sistema hierárquico elaborado para este projeto está exposto na Figura 2:

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



Fonte: Autores, 2023

Depois de feito o diagrama, já é possível iniciar as comparações entre a n alternativas, para isso, serão utilizadas algumas matrizes de comparação, que serão preenchidas comparando os n aparelhos um em relação ao outro dentro de um certo critério. Os valores que serão 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: SAATY, 1984

Para realizar o preenchimento das matrizes do critério de satisfação e de pertinência, foram coletados dados subjetivos, em forma de coeficientes dentro de uma escala de 1 a 10,, 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 preenchido com um coeficiente da Tabela 1 correspondente à magnitude da diferença entre os coeficientes coletados, nesse caso, o valor inteiro é atribuído à posição em que domina o aparelho com maior coeficiente, a posição inversa recebe o valor inverso. O preenchimento da matriz de custo de uso é feito de forma semelhante, porém, os valores comparados são os consumos de cada um dos aparelhos. 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, O processo que foi utilizado para obter os autovetores necessários foi o método da potência, que é um método iterativo relativamente simples de se implantar. 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 será usado para construir o modelo do problema da mochila.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar os cálculos extensos descritos acima para as três faixas de energia, foi implementado, em linguagem C, um programa capaz de receber um perfil de consumidor, em formato de texto, processá-lo, e obter os coeficientes globais para aquele cenário. Tendo um perfil a ser analisado, a sequência de processamento é a seguinte:

- Primeiramente os dados do perfil são processados por um programa principal, que elabora e resolve o AHP relacionado a ele, para o período de pico, de acordo com as prioridades estabelecidas, (SIANAKI; HUSSAIN; TABESH, 2010), (OMAR; BUSHBY; WILLIAMS, 2019) e (MOSTAFA et al., 2022) e retorna um arquivo texto contendo o enunciado do problema de mochila correspondente ao perfil;

- Esse enunciado é então utilizado como entrada pelo programa LINDO 6.1, que é um aplicativo dedicado à resolução de problemas de otimização. O LINDO 6.1 então resolve o problema da mochila do enunciado e retorna uma lista-solução que mostra os aparelhos incluídos e excluídos do horário de pico;
- Essa lista é analisada por outros programas auxiliares, que filtram quais aparelhos foram aceitos; os que não foram, são incluídos como parte da entrada para o horário intermediário;
- Tendo a entrada para o próximo horário, acrescida dos aparelhos rejeitados, ela é utilizada como entrada para o programa principal, basicamente repetindo todo o processo citado anteriormente, porém, dessa vez, os aparelhos rejeitados nessa etapa serão incluídos na entrada do horário fora do pico, sobre a qual o processo será realizado novamente;
- Depois de aplicado o processo sobre os três horários, as três listas de inclusão retornadas pelo LINDO 6.1 são analisadas por um programa auxiliar que elabora um cronograma final de utilização, que pode ser utilizado pelo cliente.

Infelizmente, os relatórios de consumo disponibilizados pelas concessionárias não possuíam dados suficientes para elaborar um perfil baseado no consumidor médio brasileiro, por isso, os perfis foram elaborados levando em conta alguns cenários julgados plausíveis e coerentes, isso, porém, não constitui uma limitação, pois o processo foi desenvolvido com foco em versatilidade.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

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 um 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 abaixo:

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

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

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.

## 6 CONCLUSÕES

Esse trabalho desenvolveu um método de escalonamento de cargas capaz de analisar um perfil de consumidor qualquer e elaborar, sob uma meta de economia qualquer, um cronograma de utilização que distribui as cargas realocáveis inclusas, levando em conta as preferências pessoais do consumidor.

Apesar do desempenho satisfatório e coerente observado na seção dos resultados, o método ainda possui certas limitações e não considera alguns fatores práticos. Um exemplo de fator não considerado são os casos em que uma ou mais cargas são utilizadas entre duas classes de horários. 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 julgadas por esse método.

Tendo em vista trabalhos futuros, um dos objetivos principais é corrigir limitações que existem no escopo do consumidor residencial, como as citadas cargas mistas, além disso, também deverão ser avaliadas adaptações no método que possibilitem uma ampliação do escopo atual. É necessário tornar o método mais palpável para os consumidores residenciais, isso pode ser feito adotando um procedimento de cálculo de economia baseado não no consumo elétrico em quilowatts, mas no preço a ser pago pelo consumidor como feito por Sianaki, Hussain e Tabesh (2010), para isso, deve-se fazer um estudo mais detalhado da estrutura de cobrança da energia elétrica no Brasil, com foco para fatores como preços regionais e bandeiras tarifárias. Também como parte do processo de expansão do escopo, é necessário adequar o método para outras modalidades de consumidores, como os industriais e os comerciais, que possuem outras métricas de preferência e um perfil de cargas totalmente diferente.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- EARLE, R.; KAHN, E. P.; MACAN, E. Measuring the Capacity Impacts of Demand Response. **The Electricity Journal**, 22(6), p. 47-58, 2009.
- HONORATO, Í. et al. Otimização Multi-Objetivo da Demanda em Redes Elétricas Inteligentes Residenciais. In **Anais do XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Vitória, 2016
- 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.
- MOSTAFA, N. A. et al. A sustainable user-centered application for residential energy consumption saving, **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 53, part D, p. 102754, 2022.
- 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**, 38(7), p. 3289-3296, 2010.

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**, vol. 199, p. 537-546, 2019.

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 Itapecerica da Serra e Suzano (SP), **Geociências**, v. 31, n. 2, p. 247-257, 2012.

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.

RAHIM, S.; AHMAD, H. Data-driven multi-layered intelligent energy management system for domestic decentralized power distribution systems, **Journal of Building Engineering**, vol. 68, p. 106113, 2023.

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.

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.

## EFFICIENT USE OF HOUSEHOLD APPLIANCES: INTEGRATING OPTIMIZATION CONCEPTS FOR ENGINEERING EDUCATION

**Abstract:** *The current scenario of growing energy demand puts on the agenda discussions about the efficiency of the design of electrical energy distribution generation systems, the constant increase in energy demand at peak times requires a sustainable and low-cost solution to the stress of the network. A much discussed methodology is demand-side management, which consists of rationally planning customer consumption, offering dynamic pricing, in order to provide relief for the electrical system at peak times and savings for consumers. Planning the use of loads for a customer, however, is not a simple task, given the complexity of consumption factors and human preferences involved. In the literature, there is a wide discussion about heuristic and multi-objective algorithms that can be used to quickly and reliably solve this type of problem. In this work, an algorithm based on the analytical hierarchical process will be developed, which will be used in conjunction with the knapsack problem heuristic to develop a usage schedule for the modality.*

**Keywords:** *optimization, heuristic algorithms, demand side management, smart grids, energy efficiency, analytic hierarchy process, knapsack problem, load scheduling, dynamic pricing, peak shaving.*

