

Uma Abordagem para Economia de Energia Elétrica na Refrigeração de Consumidores de Grande Porte

Thales A. S. Becker* Fillipe M. de Vasconcelos*
Michel W. de S. Campos**

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT, (e-mails: thales.becker@sou.ufmt.br, fillipe.vasconcelos@ufmt.br).

**Departamento de Eletricidade, Universidade Federal do Amazonas, Manaus-AM, (e-mail: michel.campos@ufam.edu.br).

Abstract: Industrial and commercial consumers who use central air coolers for air conditioning in Brazil and worldwide still lack automation in their operation. In a context of increasing electricity tariff rates (ETR) and emerging transition to dynamic pricing, new business models and energy efficiency practices become desirable. Currently, it is quite common for air cooler operations to be performed through automated spreadsheets and good engineering practices. However, pressured by high energy tariffs, it is of interest to control operational variables in an optimized manner. This work proposes an approach based on solving an optimization problem to reduce the electricity bill, subject to thermodynamic and thermal comfort equation constraints. To this end, an optimized power demand control of Chiller devices, in response to dynamic ETR signals, is performed. The case study consists of analyzing 12 consumer units of a commercial establishment refrigerated by a one Chiller. The operational performance of the establishment was analyzed in fixed, peak and off-peak, and dynamic pricing scenarios over a 168-hour period (i.e., 7 days). The results show that in the fixed tariff there are no immediate evident benefits, as expected, while in the peak and off-peak tariff, as well as in the dynamic tariff, reductions of 34,66% and 30,15% were observed in the energy bills of the optimized operation compared to a non-optimized one.

Resumo: Unidades consumidoras industriais e comerciais que fazem uso de tecnologias de resfriadores de ar central para climatização, no Brasil e no mundo, ainda carecem de automatização na sua operação. Tendo isto dito, e em um contexto de crescentes incrementos de tarifas de energia elétrica (TE), e de emergente transição para tarifação dinâmica, tem-se que novos modelos de negócio e novas práticas de eficiência energética se tornam desejadas. Atualmente, é bastante comum que as operações de refrigeradores de ar sejam realizadas por meio de planilhas automatizadas e de boas práticas de experiência de engenharia. De outro modo, pressionado pelas altas tarifas de energia, é de interesse que variáveis operacionais sejam controladas de maneira otimizada. Este trabalho, portanto, propõe uma abordagem baseada na resolução de um problema de otimização para reduzir a conta de energia elétrica, sujeito a restrições de equações termodinâmicas e de conforto térmico. Para tal, um controle otimizado de demanda de potência na utilização de dispositivos *Chiller*, em resposta a sinais de TE dinâmicos, é realizado. O estudo de caso consiste na análise de 12 unidades consumidoras de um estabelecimento comercial refrigerado por um único *Chiller*. Analisou-se o desempenho operacional do estabelecimento nos cenários de tarifação fixa, de ponta e fora de ponta, e dinâmica, no intervalo de tempo de 168 horas (i.e., 7 dias). Os resultados mostram que, na tarifa fixa não há benefícios imediatos evidentes, como esperado, enquanto na tarifa de ponta e fora de ponta, e na tarifa dinâmica, reduções de 34,66% e 30,15% foram observadas nas contas de energia da operação otimizada em relação a uma não otimizada.

Keywords: Air conditioning; *Chiller*; Dynamic pricing; Optimized control; Reduction of electricity cost.

Palavras-chaves: *Chiller*. Climatização. Controle otimizado. Redução do custo de energia elétrica. Tarifação dinâmica.

1. INTRODUÇÃO

O preço da eletricidade é uma questão que tem sido amplamente discutida nos últimos anos, especialmente no que diz respeito ao impacto que ele tem na economia dos países e nas contas de energia elétrica de suas populações. A tarifa média nominal de energia elétrica sofreu um aumento

de 230% nos últimos 18 anos, segundo cálculos da ANEEL (ANACE, 2019), sendo este, um crescimento não confortável para os brasileiros. Frente a isso, a preocupação com o custo sobre o consumo deste recurso tem sido pauta da rotina de muitos indivíduos, surgindo a necessidade de buscar alternativas para a sua redução diariamente.

No contexto de climatização, os resfriadores centrais são sistemas típicos de ar-condicionado e abundantemente utilizados em prédios comerciais, escritórios e fábricas para controlar a temperatura e garantir o conforto térmico dos ambientes (Chen, Y. et al., 2020). É certo que o consumo de energia destinado a essa finalidade seja afetado pelas mudanças climáticas, e devido as alterações climatológicas ao longo dos anos, prevê-se que a demanda de energia para resfriamento de espaços aumente exponencialmente após 2050 (Chakraborty, D. et al., 2021). Mediante essa probabilidade é necessário pensar em estratégias para reduzir o custo devido ao consumo de energia desses equipamentos, que vem se tornando um dos grandes focos no tópico de conservação de energia das construções modernas.

Uma das medidas que convergem para o melhor desempenho na busca de economia de energia é a automatização na operação do sistema. A fim de obter benefícios com novas práticas de eficiência energética é preciso contar com um grau de controle otimizado na operação, além de sua automatização, suficiente para reduzir a incerteza em relação a eficiência de operação do sistema. Bem como diminuir a complexidade de sua modelagem para que os equipamentos possam reagir às flutuações nos preços da eletricidade, atingindo a pretendida redução na conta de energia elétrica.

Tradicionalmente, as operações do sistema de climatização/refrigeração dependem em grande parte da experiência prática de engenheiros ou operadores. No entanto, a ocorrência de diversas incertezas, como mudanças climáticas e combinações complexas de resfriadores, tem levado a decisões inconsistentes em relação à substituição de equipamentos de resfriamento, bem como ao desperdício de energia (Liao, Y. et al., 2018). Práticas de engenharia com essas características são responsáveis por elevar os custos de operação e de energia elétrica na conta dos consumidores.

Considerando que o consumo de energia elétrica em uma planta de refrigeração pode aumentar significativamente se os equipamentos forem operados de forma inadequada, especialmente em plantas que operam 24 horas, a implementação de algoritmos de otimização pode permitir que esses dispositivos operem de maneira mais eficiente, mesmo em situações em que há um hiato entre as estimativas de preço da eletricidade e os preços reais. Em (Constantopoulos, P. et al., 1991), é descrita uma abordagem que utiliza previsões de preços de varejo e temperaturas externas para definir a temperatura interna de um edifício nas próximas 24 horas, considerando uma simplificação do edifício como um único espaço. Por outro lado, (Hong, Ying-Yi, et al., 2012) apresenta um método diferente, desenvolvido a partir da programação de seleção imune clonal para controlar a temperatura de um condicionador de ar. No entanto, estas abordagens são aplicadas a residências de pequeno consumo de energia.

Para aprimorar o desempenho operacional do sistema de refrigeração, resultando em economia de energia, este artigo, baseado em Constantopoulos e Hong, propõe a formulação de um problema de otimização da demanda de potência do resfriador em cada intervalo de tempo, utilizando técnicas de programação linear inteira mista (MIP), por meio da análise

da temperatura externa, fator de inércia (ϵ), coeficiente de performance (COP), condutividade térmica (A) e a potência de cada equipamento, com a finalidade de minimizar o custo dessa despesa, aumentar a eficiência operacional e, ao mesmo tempo, atender às demandas de resfriamento e conforto térmico necessárias.

A abordagem será aplicada para um sistema de refrigeração de um estabelecimento comercial ao longo de 168 horas em resposta a três cenários de sinais de preço: tarifação fixa (TFX), de ponta e fora de ponta (TFP), e dinâmica (TFD). Dessa maneira, mediante a adoção desta abordagem, os engenheiros podem obter suportes de decisão confiáveis e ajustar a configuração do sistema no momento mais apropriado, sem complexidades. O estudo de caso em questão demonstra a validade do método proposto na aplicação de otimização para economia de energia no segmento de refrigeração de grandes clientes.

O problema de MIP correspondente é implementado no ambiente de otimização de alto nível fornecido pelo Software de Modelagem Multidimensional Integrada Avançada (AIMMS), (Bisschop, J. et al., 2006).

A organização deste artigo é dividida em cinco seções. Na seção 2 é apresentada a metodologia proposta, abrangendo tanto a formulação quanto a resolução do problema em questão. Na seção 3, é descrito o Estudo de Caso, exibindo as características do ambiente e dos consumidores abordados. Na seção 4 os resultados obtidos são apresentados e discutidos. Por fim, as conclusões são expostas na seção 5.

2. OTIMIZAÇÃO APLICADA À REFRIGERAÇÃO

2.1 Considerações Iniciais

Um sistema de controle de temperatura interna é composto por três elementos fundamentais, a saber: o edifício, o equipamento e os usuários (Constantopoulos, P. et al., 1991). Visto isso, a abordagem e modelagem a seguir contempla a descrição desses três componentes.

Nessa abordagem, assume-se que:

1. O método proposto utiliza dados de temperatura externa medidos pelo órgão ou instituto responsável. Não realizando a previsão desses valores.
2. Será considerado um efeito de pré-resfriamento (*i.e.*, alto fator de inércia, $\epsilon = 0,99$), para unidades consumidoras situadas exclusivamente ao redor de ambientes climatizados, sem paredes em contato com a temperatura externa do estabelecimento.
3. A condutividade térmica dos ambientes será pequena, devido ao ambiente comercial ser construído com características e materiais com alto grau de isolamento térmica.
4. Este modelo se baseia na gestão da temperatura interna, baseado no controle otimizado de demanda de potência de cada equipamento, mantendo o valor esperado dentro da temperatura desejada e da banda morta definida.

5. O COP do sistema é constante para as unidades consumidoras, uma vez que o sistema de refrigeração é dimensionado para atender a demanda total do edifício. Neste trabalho, será considerado um valor médio: $COP = 2,80$.
6. Os cenários de tarifação aplicados serão em função da localidade do estudo de caso. A tarifação dinâmica proposta foi modificada de (Constantopoulos, P. *et al.*, 1991).
7. As influências provenientes de fontes de calor internas não são levadas em consideração.

2.2 Formulação e Resolução do Problema

2.2.1 Funções Objetivas

Três funções objetivo distintas serão expostas neste artigo, cada uma apresentando a definição específica para os cenários de tarifação que serão objeto de análise em um período de 24 horas, com um perfil de carga de 5 minutos.

1. Tarifa Fixa – TFX

$$\text{Min: } \gamma \times \sum_{t \in T, h \in H} \frac{1}{12} \times p_t^h \quad (1)$$

Onde:

- p_t^h demanda de potência (kW), no instante de tempo t e para cada equipamento h , necessário para preservar a temperatura interna desejada pelo usuário;
- γ custo do kWh em R\$ na tarifa fixa;
- H conjunto de equipamentos e de unidades consumidoras;
- T conjunto de tempo em um horizonte de um único dia.

2. Tarifa Ponta e Fora de Ponta – TFP

$$\begin{aligned} \text{Min: } & \alpha \times \sum_{t=210}^{246} \frac{1}{12} \times p_t^h \\ & + \beta \times \sum_{t < 210} \frac{1}{12} \times p_t^h \end{aligned} \quad (2)$$

Onde:

- α custo do kWh em R\$ no horário de ponta;
- β custo do kWh em R\$ no horário fora de ponta.

3. Tarifa Dinâmica – TFD

$$\text{Min: } \sum_{t \in T, h \in H} R\$_t \times \frac{1}{12} \times p_t^h \quad (3)$$

Onde:

- $R\$_t$ custo do kWh em R\$ no instante de tempo t .

2.2.2 Restrição de Desigualdade

A equação (4) representa uma proposta de limitar as variações de demanda de potência elétrica, com o objetivo de melhorar a eficiência energética, prolongar a vida útil dos equipamentos e garantir a estabilidade do fornecimento de

energia. A implementação de restrições com essa finalidade pode ajudar a reduzir o consumo total de energia elétrica e minimizar os efeitos negativos da variação de demanda sobre a rede elétrica. O valor 0,4 representa a escolha de variação da demanda de potência permitida neste trabalho.

$$p_{t+1}^h - p_t^h \leq 0,4 \text{ kW} \quad (4)$$

2.2.3 Restrições de Igualdade

As restrições de igualdade permitem limitar a demanda de potência do equipamento em cada intervalo de tempo e para cada unidade consumidora, assim como, introduz o conceito de conforto térmico na modelagem do problema. Conforme demonstrado na equação de balanço de energia dinâmica (5) e na equação da temperatura inicial (6).

$$\begin{aligned} T_{t+1}^{(in)} = \varepsilon_h T_{t,h}^{(in)} + (1 - \varepsilon_h) \left(T_t^{(ext)} \pm \frac{COP \cdot p_t^h}{A_h} \right) \\ \forall t \in T, h \in H \\ (+, \text{aquecimento}; -, \text{resfriamento}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$T_{t,h}^{(in)} = T_h^{(des)} \pm T_h^{(bm)} \quad (6)$$

Onde:

- A_h condutividade térmica (kW/°C), de cada unidade consumidora;
- COP coeficiente de performance;
- ε_h fator de inércia, conforme posição de cada unidade consumidora;
- h índice de cada equipamento, neste caso, também, de cada unidade consumidora, $h = 1, 2, 3, \dots, 12$, visto que apenas um equipamento é modelado para cada consumidor;
- t índice de tempo, $t = 1, 2, 3, \dots, 288$ (ou seja, controle de duração cada 5 minutos em 24 horas);
- $T_h^{(bm)}$ banda morta (°C) de cada unidade consumidora;
- $T_h^{(des)}$ temperatura interna (°C) desejada de cada unidade consumidora;
- $T_t^{(ext)}$ temperatura externa (°C) no instante de tempo t ;
- $T_{t,h}^{(in)}$ temperatura interna (°C) no instante de tempo t e em cada unidade consumidora.

A expressão (5) apresenta algumas considerações relevantes, apresentada por (Constantopoulos, P. *et al.*, 1991). Para utilizá-la existem seis pressupostos: i) cada unidade consumidora será considerada como uma das muitas do edifício comercial, portanto, interage com o exterior/interior por meio de sua própria parede, e está em equilíbrio térmico com os espaços condicionados adjacentes; ii) cada unidade consumidora é isolada por um invólucro com condutividade térmica (A_h). A casca, a massa de ar e os outros conteúdos de cada espaço tem uma massa térmica total m_c ; iii) nenhum armazenamento térmico independente é acoplado ao equipamento principal de aquecimento ou resfriamento, além disso, assume-se um único equipamento geral, neste artigo será adotado o *chiller*; iv) o controle da umidade é negligenciado; v) o efeito de ciclagem do termostato (i.e., o processo de ligar e desligar o sistema de aquecimento ou resfriamento de acordo com a temperatura definida no termostato) é desprezado devido a banda morta, eliminando a

não linearidade; vi) as fontes internas de calor são desprezadas.

Para incorporar o conceito de conforto térmico de uma maneira simplificada, é possível definir uma temperatura desejada para o ambiente e estabelecer uma faixa de temperatura aceitável, conhecida como "banda morta". Essa banda morta serve como parâmetro para permitir variações permitidas de temperatura sem que o conforto do ambiente seja comprometido. Na abordagem foi fixado um ponto inicial de partida conforme a equação (6). Ela também define o valor limite para a $T_{t,h}^{(in)}$, conforme a banda morta escolhida, com a finalidade de avaliar o método na condição de atingir o conforto térmico.

Cada vez que o processo de otimização é acionado, os dados de entrada são atualizados: temperatura externa, fator de inércia, COP, condutividade térmica, potência de cada equipamento, temperatura desejada, banda morta e o tempo de uso de cada equipamento. Em seguida, o mecanismo de otimização utilizando as equações (4), (5) e (6) é aplicado para encontrar a melhor sequência de controle (variável de decisão), ou seja, a energia diária de consumo para cada aparelho térmico, a fim de minimizar a conta de eletricidade ao longo do horizonte de tempo T , conforme as funções objetivo (1), (2) ou (3). Na seção seguinte é apresentado o estudo de caso.

3. ESTUDO DE CASO

É fundamental controlar o *Chiller* para atender à demanda de conforto térmico da ocupação de acordo com a mudança do ambiente externo, evitando a saída excessiva de resfriamento e economizando o consumo de energia. Visto isso, foi aplicado no ambiente comercial mostrado na Fig. 1, a análise de 12 unidades consumidoras distribuídas no estabelecimento. Os consumidores foram numerados de A1 a A12, para melhor identificação de posição no empreendimento.

A capacidade total instalada do *Chiller* para suprir o estabelecimento é de 150 TR (527,4 kW), dos quais 48,83 TR (171,69kW) são necessários para suprir as unidades analisadas. A potência frigorífica dos equipamentos analisados dos consumidores variou entre 2TR e 7TR. Estes valores foram escolhidos, neste trabalho, conforme TR compatíveis com condicionadores de ar comerciais em BTU (*British Thermal Unit*), sendo que, 1TR = 12.000BTUs.

Para avaliar a abordagem proposta, um perfil de carga de 5 minutos foi desenvolvido durante uma semana considerando as temperaturas externas da cidade de Cuiabá-MT, aplicado nos cenários de TFX, TFP e TFD. Os dados de temperatura foram extraídos dos relatórios do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023), no período de 22/01/2023 – 28/01/2023.

O local comercial em questão é um estabelecimento que necessita manter uma temperatura interna constante para preservar a qualidade dos seus produtos e garantir o conforto térmico dos seus clientes e colaboradores. Para isso, é desejável manter a temperatura próxima a 18°C dentro de

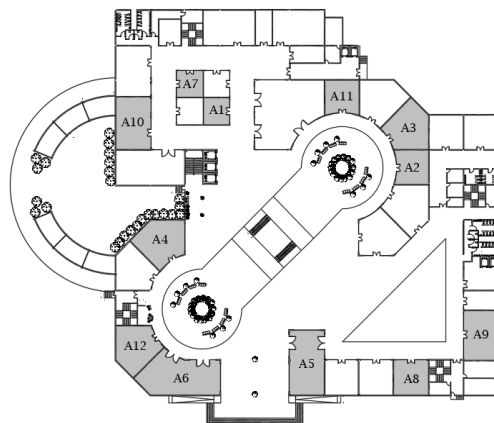


Fig. 1. Planta arquitetônica do empreendimento comercial.

Tabela 1. Dados das Unidades Consumidoras

Unidade Consumidora (UC)	Área (m ²)	Potência Frigorífica (TR)	Potência (kW)	A (kW/°C)	COP	ϵ
A1	30,3	2,00	7,032	1,10	2,8	0,99
A2	44,8	3,00	10,548	1,63	2,2	0,97
A3	60,1	4,00	14,064	2,15	2,3	0,95
A4	72,0	5,00	17,58	2,91	2,8	0,94
A5	76,0	5,83	20,50	3,89	2,8	0,92
A6	84,5	6,67	23,45	5,04	2,8	0,90
A7	33,2	2,50	8,79	1,67	2,8	0,99
A8	47,2	3,50	12,306	1,95	2,8	0,95
A9	66,0	4,50	15,822	2,81	2,8	0,94
A10	68,4	4,83	16,982	2,86	2,8	0,94
A11	45,0	3,00	10,548	1,63	2,8	0,97
A12	58,7	4,00	14,064	2,75	2,8	0,91

uma banda morta de $\pm 4^\circ\text{C}$ durante todo o dia, o que exige um sistema de refrigeração eficiente. Além disso, o valor máximo definido para p_t^h é a potência do equipamento.

O fator de inércia, pode ser formulado conforme $\epsilon = e^{-t/TC}$. Onde, $TC = mc/A$ é a constante de tempo do sistema, t é a duração de período de controle [hr] e mc é a massa térmica total [kWh/°C]. Mediante essa expressão, a condutividade térmica (A_h), foi calculada para cada espaço condicionado. Nesse cálculo houve a necessidade de supor os valores de mc (i.e., capacidade de cada ambiente de absorver e armazenar calor). Nesta aplicação duração do período (t) de controle considerado foi de 24 horas.

Na Tabela 1 são apresentados os seguintes dados de cada UC: área, potência do ar-condicionado, coeficiente de performance, condutividade térmica e fator de inércia. As informações expostas são coerentes com as premissas mencionadas na seção acima.

O custo em R\$/kWh para os cenários de tarifação fixa, de ponta e fora de ponta foram obtidos do Grupo Energisa (Energisa, 2023), referentes ao Grupo B3, classe "Comercial Serviços e Outros", para garantir a aplicação coerente do estudo de caso na cidade de Cuiabá-MT. No cenário de TFP apenas a tarifa fora de ponta é aplicada no final de semana. Os custos são representados na formulação por γ , α , β e

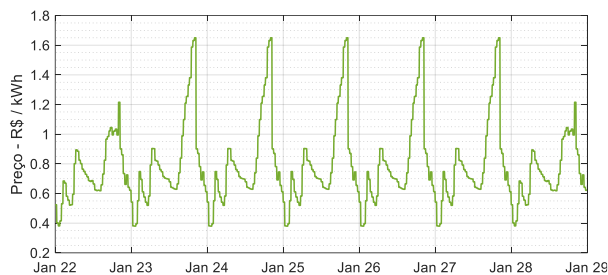


Fig. 2. Proposta de tarifação dinâmica – TFD.

possuem os respectivos valores neste estudo: 0,88291, 1,79211, 0,72835.

No entanto, para o cenário de tarifação dinâmica, foram definidos valores de R\$/kWh para cada intervalo de tempo. Houve a consideração de preços diferentes para os dias úteis e o final de semana, como ilustrado na Fig. 2. Na próxima seção, serão apresentados os resultados do estudo de caso realizado neste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão expostos os resultados e análises mais relevantes obtidos a partir da simulação do problema formulado, que teve como objetivo alcançar a economia de energia elétrica em um sistema de climatização de um ambiente comercial através de otimização, sem inviabilizar o conforto térmico.

4.1 Avaliação do comportamento do consumo de energia dos consumidores durante o período de 168 horas

Neste cenário base, que é objeto de análise neste artigo, a abordagem proposta foi testada. A simulação foi realizada para o estabelecimento comercial descrito na seção V.

Os dados obtidos para cada um dos cenários propostos (TFX, TFP e TFD) são apresentados na Tabela 2. A partir desses dados, é possível observar que a quantidade de energia elétrica consumida (kWh) apresentou pequena variação na maioria das unidades consumidoras, independentemente do cenário analisado. Também é possível notar as flutuações de custos em cada cenário, sendo perceptível que o caso TFP apresenta o custo mais baixo quando os valores de todas as unidades são somados. Seguido dos casos TFD e TFX, respectivamente.

A Tabela 3 exibe os custos obtidos em uma condição de operação não otimizada do sistema (TF0). Nessa condição, é observado um consumo de energia elétrica maior do que nos casos simulados com otimização, devido ao desperdício de energia elétrica resultante do sistema não levar em conta o custo da eletricidade, mas sim apenas manter a variação da temperatura interna dentro do intervalo pré-definido. Esta operação não otimizada se caracteriza pela variação contínua da temperatura interna, oscilando entre 18°C e 22°C, realizando um ciclo consistindo em diminuir a temperatura até 18°C e, em seguida, permitir que ela atinja 22°C novamente. Essa condição foi proposta para fins comparativos. Na situação em questão, primeiramente foi determinada a demanda de potência requerida para a variação

Tabela 2. Análise de Desempenho – Custo e Consumo nos Três Cenários de Operação no Período de 168 horas.

UC	Caso TFX		Caso TFP		Caso TFD	
	kWh	R\$	kWh	R\$	kWh	R\$
A1	302,93	267,46	304,00	228,30	337,22	226,22
A2	448,90	396,34	449,48	337,56	456,63	358,35
A3	592,14	522,81	592,27	444,82	594,83	475,04
A4	801,53	707,68	801,66	602,08	802,93	643,54
A5	1071,71	946,22	1071,77	804,93	1072,56	860,85
A6	1389,13	1226,48	1389,15	1043,29	1389,77	1116,00
A7	459,91	406,06	461,34	346,46	504,62	347,21
A8	537,05	474,17	537,18	403,44	539,64	430,78
A9	773,98	683,35	774,11	581,38	775,37	621,40
A10	787,75	695,52	787,89	591,73	789,15	632,47
A11	448,90	396,34	449,48	337,56	456,63	358,35
A12	757,51	668,81	757,58	568,97	758,32	608,45

Tabela 3. Análise de Desempenho – Custo em Cada Cenário na Condição de Operação Não Otimizada no Período de 168 horas.

UC	Caso TF0 com custo TFX		Caso TF0 com custo TFP		Caso TF0 com custo TFD	
	kWh	R\$	kWh	R\$	kWh	R\$
A1	437,13	385,95	437,13	377,00	437,13	352,65
A2	637,31	562,69	637,31	515,88	637,31	509,25
A3	827,48	730,59	827,48	666,45	827,48	667,54
A4	1132,45	999,85	1132,45	919,72	1132,45	904,87
A5	1525,54	1346,91	1525,54	1224,18	1525,54	1230,77
A6	2005,00	1770,23	2005,00	1589,49	2005,00	1602,15
A7	672,44	593,70	672,44	579,94	672,44	542,49
A8	755,8	667,30	755,8	614,88	755,8	603,94
A9	1091,75	963,92	1091,75	872,35	1091,75	880,78
A10	1110,93	980,85	1110,93	882,78	1110,93	887,69
A11	637,33	562,70	637,33	511,00	637,33	514,17
A12	1082,92	956,12	1082,92	873,40	1082,92	865,32

da temperatura interna do ambiente de acordo com a descrição do caso TF0, seguida pelo cálculo do consumo de energia e aplicação desse consumo em cada cenário de tarifação proposto, ou seja, TFX, TFP e TFD.

Para facilitar a compreensão dos resultados obtidos e do estudo de caso realizado, é possível verificar a Fig. 3, na qual estão apresentados gráficos que mostram a temperatura externa, a temperatura interna e a demanda de potência elétrica para os três cenários de tarifação formulados, ao longo dos 7 dias analisados para a unidade consumidora A1.

Ao analisá-la, é possível obter informações relevantes. No contexto de TFX, a temperatura interna permanece constante e igual à temperatura desejada acrescida de uma banda morta predefinida, e deve ser mantida independentemente da temperatura externa. Como resultado, a demanda de potência necessária segue o padrão do gráfico de temperatura externa.

No cenário de TFP, é possível identificar flutuações na demanda durante os dias úteis, especificamente antes das 17h20, antecedendo o período de ponta em Mato Grosso, que compreende o horário das 17h30 às 20h29, período em que o preço da energia é mais elevado nesse contexto. Fora desse intervalo, o gráfico segue de forma semelhante ao cenário TFX, acompanhando a temperatura externa. A temperatura interna, por sua vez, se mantém praticamente constante, com ligeira variação nos momentos em que ocorrem as variações de demanda.

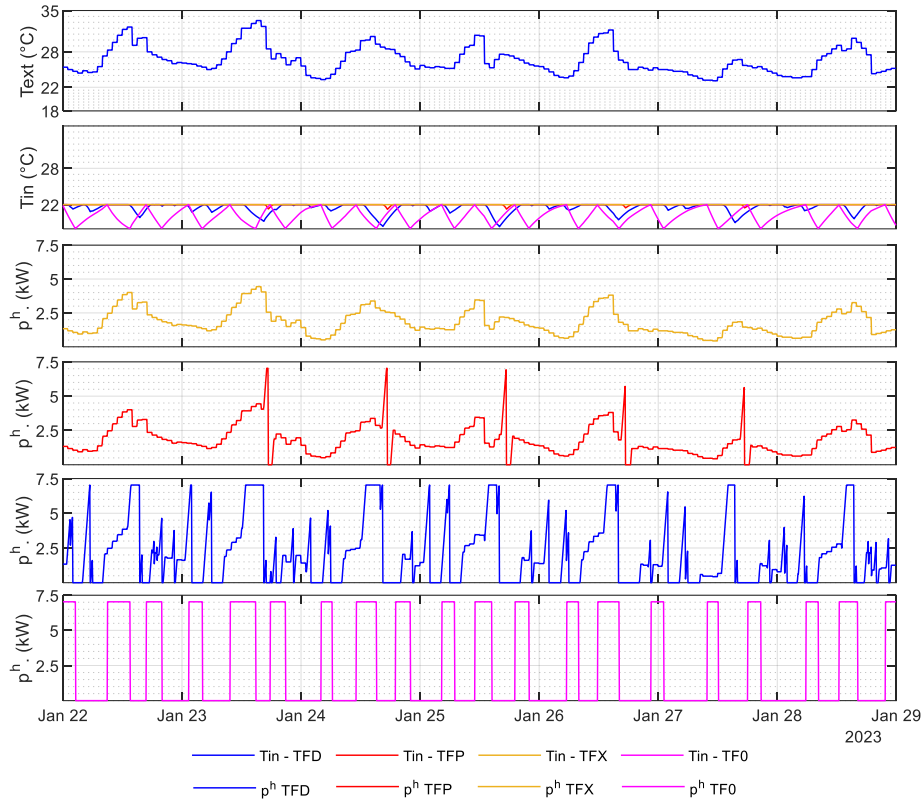


Fig. 3. Simulação do estudo de caso: resultados para a unidade consumidora A1 ao longo de uma semana.

No cenário de TFD, são observadas mudanças mais evidentes, uma vez que a otimização procura evitar os horários de eletricidade mais caros, que serão abordadas a seguir. Por outro lado, no cenário TF0, é ilustrada a execução do ciclo de temperatura entre 18°C e 22°C, juntamente com a demanda de potência elétrica necessária para esse cenário.

4.2 Análise do comportamento da temperatura interna em relação a demanda de potência na unidade consumidora A7 durante o período de 24 horas na TFD

Neste caso, verifica-se a variação da temperatura interna e do comportamento de demanda de potência da unidade A7 em relação a uma tarifação dinâmica. A Fig. 4 ilustra a resposta obtida por meio da simulação dessa aplicação.

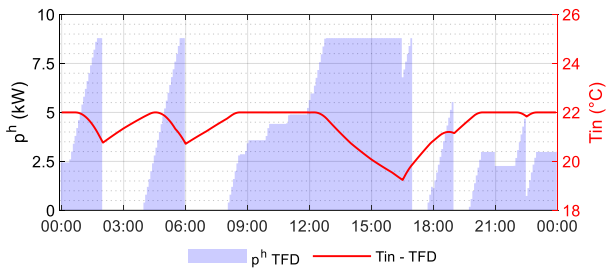


Fig. 4. Variação da demanda de potência e temperatura interna na unidade consumidora A7 ao longo de 24 horas em TFD.

Em resposta a TFD, a abordagem permite evitar os horários de pico de custo de energia, deslocando a demanda para os

instantes em que a energia é mais barata. Para atingir o conforto térmico, a temperatura interna é reduzida para permitir que o equipamento fique desligado até que a temperatura chegue novamente a 22°C, momento em que é reativado, resultando em variações mais significativas nas temperaturas internas e, por conseguinte, uma redução nos custos de eletricidade, especialmente em comparação com o cenário TFX.

4.3 Comparação da demanda de potência nos três cenários propostos, TFX, TFP e TFD na unidade consumidora A6 durante o período de 24 horas

Foi selecionado para a comparação o consumidor com a posição menos favorável, que possui maior área e potência frigorífica, representado pela unidade A6. Em seguida, foram aplicadas as três condições estabelecidas no presente artigo, considerando as temperaturas externas do dia 23/01/2023.

Nesta comparação, na maior parte do dia, as curvas de demanda se comportam de maneira semelhante. No entanto, há particularidades nas curvas TFD e TFP em relação às variações nos preços em determinados horários. No caso TFD, ao evitar os preços mais elevados dentro de sua formulação, há uma maior economia de energia, enquanto no caso TFP, o consumidor A6 precisa utilizar o horário de ponta, ainda que com menor consumo, para garantir o conforto térmico. A Tabela 4 e a Fig. 5 apresentam os resultados de consumo e valores obtidos por meio de simulação nesta condição.

5. CONCLUSÕES

Um controle de condicionamento de espaço modelado como um problema de otimização iterativo para economia energia elétrica, sujeito a restrições de equações termodinâmicas e de conforto térmico foi proposto neste artigo. O método proposto aplicado em um ambiente comercial considera a tarifação fixa, de ponta e fora de ponta, e dinâmica, alcançando reduções na conta de eletricidade quando comparado um sistema otimizado com um sistema não otimizado, sem violar a preferência de temperatura interna.

Os resultados revelam a importância da otimização, aliada a uma automatização do sistema, reduzindo as ocorrências de decisões inconsistentes de engenharia e desperdício significativo de energia. Portanto, pode-se obter um consumo de energia minimizado para o *Chiller* ao prever os momentos ideais de ativação e evitar os preços elevados durante os horários de ponta.

Como trabalho futuro, sugere-se a aplicação da abordagem proposta em um estudo de caso com dados reais e históricos, utilizando conhecimentos sobre os aspectos construtivos, materiais utilizados, grau de isolamento térmico e espessura dos elementos para realizar uma estimativa precisa da condutividade térmica e do fator de inércia.

REFERÊNCIAS

- Associação Nacional dos Consumidores de Energia. *Energia elétrica subiu 230% em 18 anos, enquanto inflação foi de 189%, diz ANEEL*. 2019.
- Bisschop, J., & Roelofs, M. *Aimms-User's Guide*. Bellevue, WA, USA. 2006.
- Chakraborty, D., Alam, A., Chaudhuri, S., Başığaoğlu, H., Sulbaran, T., Langar, S. Scenario-based prediction of climate change impacts on building cooling energy consumption with explainable artificial intelligence. *Applied energy*, vol. 291, pp. 116807, 2021.
- Chen, Y., Yang, C., Pan, X., Yan, D. Design and operation optimization of multi-chiller plants based on energy performance simulation. *Energy and Buildings*, vol. 222, pp. 110100, 2020.
- Constantopoulos, P., Schweppe, F. C., Larson, R. C. ESTIA: A real-time consumer control scheme for space conditioning usage under spot electricity pricing. *Computers & operations research*, vol. 18, no. 8, pp. 751-765, 1991.
- Energisa. *Tipos de Tarifa, Modalidade Tarifária Convencional – Baixa Tensão, Modalidade Tarifária Branca – Baixa Tensão*. 2023.
- Hong, Y. Y., Lin, J. K., Wu, C. P., & Chuang, C. C. Multi-objective air-conditioning control considering fuzzy parameters using immune clonal selection programming. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1603-1610, 2012.
- Instituto Nacional de Meteorologia. *Históricos de Dados Meteorológicos*. 2023.
- Liao, Y., Huang, G., Ding, Y., Wu, H., Feng, Z. Robustness enhancement for chiller sequencing control under uncertainty. *Applied Thermal Engineering*, vol. 141, pp. 811-818, 2018.

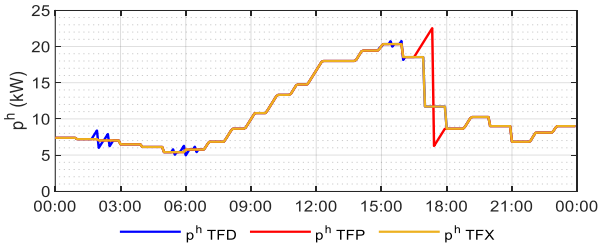


Fig. 5. Demanda de potência na unidade consumidora A6 em resposta a modelos de tarifação propostos ao longo de 24 horas.

Tabela 4. Análise de Desempenho – Custo e Consumo nos Três Cenários de Operação da Unidade A6 no Período de 24 horas.

UC	Caso TFX		Caso TFP		Caso TFD	
	kWh	R\$	kWh	R\$	kWh	R\$
A6	257,77	227,59	259,97	218,88	257,87	209,83

4.4 Análise do efeito de pré-resfriamento nas unidades consumidoras A1, A2 e A3 durante o período de 24 horas

Os consumidores foram selecionados com uma posição estratégica específica para o efeito de pré-resfriamento, de forma que os valores de ϵ fossem variados entre 0,99, 0,97 e 0,95. A simulação foi aplicada considerando as temperaturas externas do dia 23/01/2023, sob o cenário de TFP. Na Fig. 6, é possível observar o resultado encontrado.

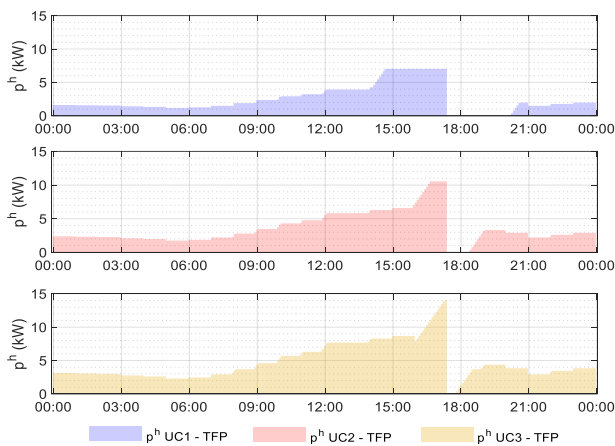


Fig. 6. Impacto do pré-resfriamento no cenário de TFP.

Às 17:20, os três consumidores possuíam seus respectivos valores máximos de p^h , cinco minutos após esse período, os equipamentos se encontraram desligados. Entretanto, pode-se observar a variação de consumo iniciou em momentos distintos, interferindo no momento de retorno dos equipamentos, porém sem violar a restrição de variação de demanda. O consumidor A1 evitou completamente o horário de ponta, ao passo que A2 e A3 apresentaram uma redução parcial na demanda nesse horário. Este comportamento se deve a alta capacidade de resposta a mudanças na demanda de resfriamento do consumidor A1, devido ao alto valor de ϵ , destacando, assim, que o fator de inércia é uma variável relevante a ser considerada nos estudos de climatização e conforto térmico, visando à economia de energia.