



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

THALES AUGUSTO SANCHES BECKER

**UMA ABORDAGEM PARA ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA NO USO DE
CHILLER PARA REFRIGERAÇÃO DE CLIENTES DE GRANDE PORTE.**

CUIABÁ – MT
MAIO, 2023

THALES AUGUSTO SANCHES BECKER

**UMA ABORDAGEM PARA ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA NO USO DE
CHILLER PARA REFRIGERAÇÃO DE CLIENTES DE GRANDE PORTE.**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Drº. Fillipe Matos de Vasconcelos

CUIABÁ – MT
MAIO, 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

B396a Becker, Thales Augusto Sanches.

Uma abordagem para economia de energia elétrica no uso de chiller para refrigeração de clientes de grande porte [recurso eletrônico] / Thales Augusto Sanches Becker. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 24 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Fillipe Matos de Vasconcelos.

TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2023.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Chiller, Climatização, Controle otimizado, Redução do custo de energia elétrica, Tarifação dinâmica. I. Vasconcelos, Fillipe Matos de, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.037201/2023-64

Interessado: THALES AUGUSTO SANCHES BECKER

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA:

UMA ABORDAGEM PARA ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA NO USO DE CHILLER PARA REFRIGERAÇÃO DE CLIENTES DE GRANDE PORTE

ALUNO: THALES AUGUSTO SANCHES BECKER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 29 de maio de 2023.

Nota: 10,00

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fillipe Matos de Vasconcelos - Orientador

Prof. Dr. Leandro Tolomeu Marques - Examinador(a)

Prof. Dr. José Mateus Rondina - Examinador(a)



Documento assinado eletronicamente por **FILLIPE MATOS DE VASCONCELOS, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 29/05/2023, às 17:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE MATEUS RONDINA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 29/05/2023, às 18:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEANDRO TOLOMEU MARQUES, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 29/05/2023, às 18:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **THALES AUGUSTO SANCHES BECKER, Usuário Externo**, em 29/05/2023, às 18:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5808327** e o código CRC **544634B0**.

*Aos meus pais, Ceno e Maria Aldemira, a
minha irmã Thainá, por todo apoio,
incentivo e paciência nessa jornada.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado forças em todos os momentos da minha vida, especialmente nos momentos de fraqueza.

Aos meus pais, Ceno e Maria Aldemira, pelo apoio, amor, educação, paciência que me proporcionaram em toda vida.

A minha irmã, Thainá, pelo incentivo e cobrança, a minha namorada Ingrid Fernanda, pelo amor, companheirismo, presença, entendimento, encorajamento e ajuda nessa jornada. Aos meus amigos de longa data, pelo apoio, conversas e motivação.

A todos os meus colegas de curso que ficaram ao lado nessa caminhada de graduação, especialmente: Ana Assis, Andreiv Yuri, Ellian Victor, Fernando Cuchi, Gabriel Felipe, Gustavo Rondon, Jeferson Modesto, João Lucas, Juliano Fachim, Juliano José, Pedro Bernardo, Rafael dos Anjos, Vander Silva, Vicente Kohler; e a todos que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica pelos ensinamentos que me proporcionaram durante o curso de graduação, pelas discussões, aulas e auxílio no desenvolvimento profissional. Em especial ao meu orientador Prof. Dr. Fillipe Matos de Vasconcelos, por sua presença constante, disponibilidade e dedicação em oferecer conselhos, sugestões e orientações, mesmo diante de sua sobrecarga de tarefas e compromissos. Tendo manifestado sincero interesse pelo desenvolvimento pessoal e profissional de seus orientados, o que me tem motivado a buscar continuamente aprimoramento.

RESUMO

BECKER, T. A. S. **Uma Abordagem para Economia de Energia Elétrica no Uso de Chiller para Refrigeração de Clientes de Grande Porte**. 2023. 24f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2023.

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.

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

ABSTRACT

BECKER, T. A. S. **An Approach for Electrical Energy Saving in the Use of Chiller for Large-Scale Customer Refrigeration.** 2023. 24f. Final Graduation Project (Graduation in Electrical Engineering) Federal University of Mato Grosso. Cuiabá, 2023.

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.

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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Fig. 1. Planta arquitetônica do empreendimento comercial.	20
Fig. 2. Proposta de tarifação dinâmica – TFD.....	21
Fig. 3. Simulação do estudo de caso: resultados para a unidade consumidora A1 ao longo de uma semana.	22
Fig. 4. Variação da demanda de potência e temperatura interna na unidade consumidora A7 ao longo de 24 horas em TFD..	22
Fig. 5. Demanda de potência na unidade consumidora A6 em resposta a modelos de tarifação propostos ao longo de 24 horas.	23
Fig. 6. Impacto do pré-resfriamento no cenário de TFP.....	23

LISTA DE TABELAS

TABELA I: Categorização de Metodologias para Economia de Energia e Otimização de Sistemas de Climatização	17
TABELA II: Dados das Unidades Consumidoras	20
TABELA III: Análise de Desempenho – Custo em Cada Cenário na Condição de Operação Não Otimizada no Período de 168 horas.....	21
TABELA IV: Análise de Desempenho – Custo e Consumo nos Três Cenários de Operação no Período de 168 horas	21
TABELA V: Análise de Desempenho – Custo e Consumo nos Três Cenários de Operação da Unidade A6 no Período de 24 horas	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIMMS	Software de Modelagem Multidimensional Integrada Avançada
ANACE	Associação Nacional dos Consumidores de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BTU	Unidade Térmica Britânica
COP	Coefficiente de Performance
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MIP	Programação Linear Inteira Mista
TE	Tarifas de Energia Elétrica.
TF0	Operação Não Otimizada.
TFD	Tarifação Dinâmica.
TFP	Tarifação Ponta e Fora de Ponta.
TFX	Tarifação Fixa.
TR	Tonelada de Refrigeração.
UC	Unidade Consumidora.

LISTA DE SÍMBOLOS

A_h	Condutividade térmica de cada unidade consumidora.
α	Custo do kWh em R\$ no horário de ponta.
β	Custo do kWh em R\$ no horário fora de ponta.
γ	Custo do kWh em R\$ na tarifa fixa.
ε_h	Fator de inércia de cada unidade consumidora.
h	Índice de cada equipamento e de cada unidade consumidora.
H	Conjunto de equipamentos e de unidades consumidoras.
mc	Massa térmica total.
p_t^h	Demanda de potência no instante de tempo t e para cada equipamento h .
$p_t^{(total)}$	Demanda de potência total no instante de tempo t .
$R\$_t$	Custo do kWh no instante de tempo t .
t	Índice de tempo.
T	Conjunto de tempo em um horizonte de um único dia.
$T_h^{(bm)}$	Banda morta de cada unidade consumidora.
$T_h^{(des)}$	Temperatura interna desejada de cada unidade consumidora.
$T_t^{(ext)}$	Temperatura externa em no instante de tempo t .
$T_{t,h}^{(in)}$	Temperatura interna no instante de tempo t e em cada unidade consumidora.
TC	Constante de tempo do sistema.

SUMÁRIO

I.	INTRODUÇÃO	15
II.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
III.	CONCEITOS DE REFRIGERAÇÃO	17
IV.	OTIMIZAÇÃO APLICADA À REFRIGERADORES DE AR CENTRAL	18
	A. Considerações Iniciais.....	18
	B. Formulação e Resolução do Problema.....	18
	<i>Funções Objetivo</i>	18
	<i>Restrição de Desigualdade</i>	19
	<i>Restrições de Igualdade</i>	19
	C. Ferramenta Computacional AIMMS	20
V.	ESTUDO DE CASO	20
VI.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
	A. Avaliação do comportamento do consumo de energia dos consumidores durante o período de 168 horas.....	21
	B. Análise do comportamento da temperatura interna em relação a demanda de potência na unidade consumidora A7 durante o período de 24 horas na TFD.....	22
	C. Comparação da demanda de potência nos três cenários propostos, TFX, TFP e TFD na unidade consumidora A6 durante o período de 24 horas	22
	D. Análise do efeito de pré-resfriamento nas unidades consumidoras A1, A2 e A3 durante o período de 24 horas	23
VII.	CONCLUSÃO	23

UMA ABORDAGEM PARA ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA NO USO DE CHILLER PARA REFRIGERAÇÃO DE CLIENTES DE GRANDE PORTE

Thales Augusto Sanches Becker
Departamento de Engenharia Elétrica
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal de Mato Grosso
Cuiabá, 78060-900 MT - Brasil
Email: thales.becker@sou.ufmt.br

Fillipe Matos de Vasconcelos
Departamento de Engenharia Elétrica
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal de Mato Grosso
Cuiabá, 78060-900 MT - Brasil
Email: fillipe.vasconcelos@ufmt.br

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.

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

AN APPROACH FOR ELECTRICAL ENERGY SAVING IN THE USE OF CHILLER FOR LARGE- SCALE CUSTOMER REFRIGERATION

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.

Keywords - Air conditioning. Chiller. Dynamic pricing. Optimized control. Reduction of electricity cost.

I. 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. Segundo a Associação Nacional dos Consumidores de Energia (ANACE) [1], a tarifa média nominal de energia elétrica sofreu um aumento de 230% nos últimos 18 anos, segundo cálculos da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), 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 [2][3]. É indubitável 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 [4]. Mediante essa probabilidade, e ciente que o consumo de energia dos resfriadores representa mais de 40% do sistema de ar-condicionado [5], 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.

Quando o assunto é a economia de energia para as plantas de refrigeração com utilização de *Chillers* (i.e., equipamentos do sistema de condicionamento de ar por compressão de gás de forma centralizada), pode ser dividido em *retrofit* do sistema [6] e otimização da operação [7]. O *retrofit* é aplicado com o objetivo de reduzir o consumo de energia do sistema, baseado na troca por equipamentos com maior eficiência energética, como o uso de *Chillers* de velocidade variável [8], ou para diminuir a demanda de carga com a melhoria do desempenho da planta analisada [9]. O *retrofit* é eficaz em certa medida, porém é preciso investir mais recursos quando é colocado em prática, sendo capaz de interferir no uso normal do edifício. É possível reduzir o custo na conta de energia dos edifícios de maneira menos invasiva, com condições mais adequadas para os seus usuários, incluindo plantas operacionais que funcionam 24 horas por dia [10].

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 [16]. Práticas de engenharia com essas características são responsáveis por elevar os custos de operação e de energia elétrica na conta final dos consumidores.

Este trabalho, portanto, apresenta uma abordagem baseada na resolução de um problema de otimização linear inteira mista (MIP) aplicada para um sistema de climatização de um cliente comercial refrigerado por um único *chiller*, sendo o objetivo obter economia energia elétrica controlando a temperatura interna de uma planta 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). Foram consideradas no estudo termodinâmico: temperatura externa, coeficiente de performance, fator de inércia, condutividade térmica e a potência de cada equipamento, a fim de calcular a temperatura interna. Os resultados obtidos comprovaram a redução nos custos, sem afetar negativamente o conforto térmico, por meio da formulação proposta. Logo,

este trabalho tende a contribuir para o aprimoramento do desenvolvimento científico-tecnológico 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) [15].

A organização do trabalho é dividida em sete seções. Na seção II é apresentada a revisão bibliográfica sobre otimização direcionada a economia de energia em sistemas de refrigeração, aperfeiçoamento operacional e análises de trabalhos presentes na literatura científica. Na seção III tem-se uma exposição sobre o tema refrigeração, com foco nos conceitos utilizados na formulação deste artigo, na seção IV, por sua vez, é apresentada a metodologia proposta neste trabalho, a formulação e resolução do problema. Na seção V, é descrito o estudo de caso, e posteriormente, na seção VI, são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, as conclusões são apresentadas na seção VII.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Há uma ampla variedade de estudos que tratam do controle, modelagem e otimização de sistemas de HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) [17]. Nesses sistemas, o *chiller* assume um papel fundamental, sendo responsável pelo resfriamento da água ou solução refrigerante que circula pelos dutos do sistema. Em parte desses estudos, as aplicações de HVAC, incluindo o *Chiller*, foram examinadas quanto a aspectos econômicos e de economia de energia [21]. Além disso, foram propostos diferentes métodos de análise e otimização de sistemas de HVAC com o objetivo de se determinar a eficiência dos sistemas existentes [22][30].

Em [30], é conduzida uma análise de esquemas de *retrofit* com o objetivo de melhorar a eficiência energética de sistemas de HVAC em edifícios de escritórios já existentes. Essa análise foi realizada por meio do uso do método do bin modificado. Enquanto em [28] é proposto um método para usar a programação dinâmica para ligar/desligar os *Chillers* sucessivamente em resposta a mudanças na demanda, considerando a economia de energia, o desempenho, a vida útil do equipamento e o tempo de operação.

No estudo voltado à redução do consumo de energia do equipamento de resfriamento *Chiller*, foram desenvolvidas diversas técnicas de otimização. O autor em [18], empregou a técnica de otimização aprimorada do algoritmo de vaga-lumes (*Firefly Algorithm*), enquanto em [19], foi utilizada a técnica de otimização aprimorada invasiva de ervas daninhas (*Invasive Weed Optimization Algorithm*), ambas com o objetivo de otimizar a operação e o carregamento ótimo do *Chiller*. Já em [20], um modelo integrado composto por redes neurais e algoritmo de otimização de enxame de partículas foi investigado, com o intuito de construir um modelo de consumo de energia do *Chiller* e otimizar o seu carregamento.

Alguns estudos abordaram a temática utilizando dados históricos como fonte de informação. Um desses estudos, descrito em [25], propôs uma técnica baseada em big data e aprendizado de máquina para otimizar o intervalo de tempo de acionamento do *Chiller*, visando reduzir seu consumo de energia. Por outro lado, em [23], foram utilizadas abordagens

TABELA I
Categorização de Metodologias para Economia de Energia e Otimização de Sistemas de Climatização

Ref.	Ano	Metodologia
[12]	1991	Definição da temperatura interna de um edifício nas próximas 24 horas usando previsões de preços de varejo e temperaturas externas.
[13]	2012	Programação de seleção imune clonal para controlar a temperatura do condicionador de ar
[18]	2013	Otimização da operação e carga ótima do <i>Chiller</i> , baseado em otimização aprimorada do algoritmo de vaga-lumes.
[19]	2018	Otimização da operação e carga ótima do <i>Chiller</i> , baseado em otimização aprimorada invasiva de ervas daninhas.
[20]	2014	Otimização do carregamento e consumo de energia do <i>Chiller</i> , baseado em redes neurais e algoritmo de otimização de enxame de partículas.
[23]	2018	Técnicas baseadas em dados e mapas auto-organizados para analisar o COP em diversas circunstâncias operacionais e destacar o potencial de economia de energia.
[25]	2019	Melhoria do consumo de energia do <i>Chiller</i> por meio da análise de big data e uso de aprendizado de máquina para otimizar o tempo de ativação.
[28]	2006	Sequenciamento ótimo do <i>Chiller</i> , baseado em programação dinâmica.
[30]	2014	Análise de <i>retrofit</i> em sistemas HVAC, baseado no método do bin modificado.

que se fundamentam em dados e mapas auto-organizados para analisar o coeficiente de performance (COP) em diferentes circunstâncias operacionais e evidenciar o potencial de economia de energia.

Em [12], 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, em [13] é apresentado um método diferente, desenvolvido a partir da programação de seleção imune clonal (*Clonal Immune Selection Programming*) para controlar a temperatura de um condicionador de ar. No entanto, esta abordagem não é aplicada a residências de grande consumo de energia.

Considerando que o consumo de energia elétrica na planta do *Chiller* pode aumentar significativamente se esse equipamento for operado 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. Como exposto, esses algoritmos podem ser baseados em técnicas de aprendizado de máquina, inteligência artificial ou modelagem matemática, permitindo o controle de variáveis do sistema. Na TABELA I, consta um resumo sobre alguns desses estudos presentes na literatura, realizando uma breve categorização das metodologias utilizadas para alcançar a economia de energia e otimização dos sistemas de climatização.

Para aprimorar o desempenho operacional do sistema de refrigeração com *Chiller*, resultando em economia de energia, este estudo, baseado em [12][13], propõe a formulação de um

problema de otimização da demanda de potência do *Chiller* em cada intervalo de tempo, utilizando técnicas de programação linear inteira mista (MIP), por meio da análise da temperatura externa, fator de inércia, COP e condutividade térmica, 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. 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.

Para a compreensão da proposta, é importante lembrar alguns conceitos de refrigeração e climatização, bem como entender o cenário em que um *Chiller* é inserido. Será apresentado, na próxima seção, os conceitos de fator de inércia, condutividade térmica e COP, além de, comentar a função do equipamento *Chiller*.

III. CONCEITOS DE REFRIGERAÇÃO

Com o propósito de preservar a estabilidade de ambientes que requerem um alto nível de controle não apenas da temperatura, mas também da umidade, filtragem, movimentação e renovação de ar em grandes ambientes, o *Chiller* é um dispositivo utilizado para essa finalidade. Trata-se de um equipamento que realiza o resfriamento da água, removendo o calor do líquido e dissipando-o para o ambiente externo por meio do condensador. Essa água resfriada percorre serpentinas, promovendo o resfriamento do ar ambiente ou de equipamentos. O *Chiller* opera com base no ciclo de refrigeração a vapor, no qual o fluido de trabalho retira calor de um determinado meio através da mudança de fase. Esses dispositivos são compostos por evaporadores, compressores, condensadores, válvulas de expansão, reservatório, bombas e painéis de controle. De forma geral, existem três principais tipos de *Chillers*: de condensação a ar, de condensação a água e de absorção. Em todos os modelos, a capacidade de refrigeração é medida em toneladas de refrigeração (TR).

A refrigeração do *Chiller* é o principal processo de consumo de energia do sistema de refrigeração [26]. Portanto, é pertinente avaliar o desempenho operacional desse equipamento. Nesse sentido, o COP é comumente utilizado como um sistema de avaliação, sendo a relação entre a capacidade de refrigeração e a potência de entrada do resfriador de água em condições nominais. Logo, quanto maior a proporção, maior a eficiência do sistema de refrigeração, resultando em maior economia de energia.

O fator de inércia em refrigeração refere-se à quantidade de energia térmica armazenada em um sistema antes que a temperatura comece a diminuir. Em certas aplicações, o fator de inércia pode ser normalizado em uma escala de 0 a 1, com o objetivo de comparação ou avaliação. Nesse contexto, um fator de inércia de 0 indicaria a ausência de capacidade térmica no sistema, resultando em uma mudança instantânea de temperatura. Por outro lado, um fator de inércia de 1 indicaria uma capacidade térmica significativa no sistema, levando mais tempo para ocorrer uma alteração na temperatura.

A condutividade térmica, refere-se à capacidade de um material de conduzir o calor. Trata-se da propriedade que

determina a taxa de transferência de calor através de um material quando há uma diferença de temperatura entre suas duas extremidades. No caso específico da refrigeração de ambientes, a condutividade térmica é um fator importante a ser considerado ao selecionar os materiais de isolamento, como paredes, pisos e tetos, que visam reduzir a transferência de calor do ambiente externo para o interior refrigerado. Materiais com alta condutividade térmica permitem maior transferência de calor, enquanto materiais com baixa condutividade térmica oferecem maior resistência à transferência de calor, contribuindo para a eficiência do sistema de refrigeração ao manter o ambiente interno com a temperatura desejada.

Anteriormente, a estimativa da demanda de carga de resfriamento era uma tarefa desafiadora para os seres humanos devido a diversas incertezas complexas, como as mudanças climáticas. Como resultado, os engenheiros costumavam ajustar os *Chillers* antes das 8h para evitar ligá-los durante os horários de pico. No entanto, essa abordagem pode resultar em um desperdício significativo de energia, pois os horários de pico coincidem com altas temperaturas e maior demanda de carga de resfriamento. É possível alcançar um consumo de energia ideal para o resfriador ao prever os momentos ideais de ativação, evitando os preços elevados durante os horários de pico [25]. Na seção seguinte, será apresentada uma metodologia de otimização de sistemas de condicionamento de espaço com *Chiller*, capaz de alcançar economia de energia.

IV. OTIMIZAÇÃO APLICADA À REFRIGERADORES DE AR CENTRAL

A. Considerações Iniciais

Um sistema de controle de temperatura interna é composto por três elementos fundamentais, a saber: o edifício, o equipamento e os usuários [12]. Visto isso, a abordagem e modelagem a seguir contempla a descrição desses três componentes.

A estrutura de um edifício é constituída por uma diversidade de espaços distintos e separados, cada um apresentando diferentes valores de temperatura e umidade. Nesse contexto, a transferência de calor e de massa de ar ocorre tanto entre os diferentes espaços do edifício como entre estes e o meio exterior. Observa-se uma troca global de energia térmica e de massa de ar, bem como uma circulação interna desses processos físicos. As cargas térmicas, por sua vez, são provenientes tanto de fontes externas, como temperatura, ventos e radiação solar, quanto de fontes internas, como pessoas, luzes, motores, entre outras. É importante ressaltar que todas essas fontes apresentam um grau de aleatoriedade variável.

Com o propósito de lidar com essa imprevisibilidade, esta seção apresenta a modelagem do *Chiller* como aparelho térmico com a finalidade de realizar o controle da temperatura interna no ambiente, assim como, as equações propostas para os cenários de TFX, TFP e TFD.

Nessa abordagem, assume-se que:

1. O método proposto utiliza dados de temperatura externa realistas, medidos pelo órgão, empresa ou instituto responsável pelas medições do local no qual

se localiza o edifício a ser abordado. Não realizando a previsão desses valores.

2. Será considerado um efeito de pré-resfriamento (*i.e.*, grande fator de inércia, $\varepsilon = 0,99$), para unidades consumidoras situadas exclusivamente ao redor de ambientes climatizados, sem paredes em contato com a temperatura externa do estabelecimento, local onde existe uma menor transferência de calor e de massas de ar, além de grande capacidade de armazenar energia térmica.
3. Neste artigo a condutividade térmica dos ambientes será pequena, devido ao ambiente comercial ser construído com características e materiais com alto grau de isolamento térmica (*i.e.*, projetados para minimizar a transferência de calor).
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, mantendo a coerência da análise. A tarifação dinâmica proposta será modificada de [12].
7. As influências provenientes de fontes de calor internas não são levadas em consideração.

B. Formulação e Resolução do Problema

A formulação do problema de otimização pode ser expressa por meio de um problema de programação linear inteira mista (MIP).

Funções Objetivo

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. Antes disso, é definida a demanda total de energia ($p_t^{(total)}$) no instante de tempo t :

$$p_t^{(total)} = \sum_{h \in H} p_t^h \quad (1)$$

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.

H conjunto de equipamentos e de unidades consumidoras.

1. Tarifa Fixa – TFX

$$Min: \gamma \times \sum_{t \in T, h \in H} \frac{1}{12} \times p_t^{(total)} \quad (2)$$

Onde:

γ custo do kWh em R\$ na tarifa fixa.

T conjunto de tempo em um horizonte de um único dia.

2. Tarifa Ponta e Fora de Ponta – TFP

$$\begin{aligned} \text{Min: } & \alpha \times \sum_{t=210}^{246} \frac{1}{12} \times p_t^{(total)} \\ & + \beta \times \sum_{t < 210}^{t > 246} \frac{1}{12} \times p_t^{(total)} \end{aligned} \quad (3)$$

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

$$\text{Min: } \sum_{t \in T, h \in H} R\$_t \times \frac{1}{12} \times p_t^{(total)} \quad (4)$$

Onde:

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

Restrição de Desigualdade

A equação (5) 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.

$$p_{t+1}^h - p_t^h \leq 0,4 \text{ kW} \quad (5)$$

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 (6) e na equação da temperatura inicial (7).

$$\begin{aligned} T_{t+1}^{(in)} = \varepsilon_h T_{t,h}^{(in)} + (1 - \varepsilon_h) \left(T_t^{(ext)} \pm \frac{COP \cdot p_t^h}{A_h} \right) \\ \forall t \in T, h \in H \\ (+, \text{aquecimento}; -, \text{resfriamento}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$T_{t,h}^{(in)} = T_h^{(des)} \pm T_h^{(bm)} \quad (7)$$

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.

Algoritmo 1 – Processo iterativo da verificação de tempo final e inicial

- 1: Para – Defina os parâmetros iniciais (t, h) e uma função para tempo de partida do equipamento.
- 2: Se – Verifique se o tempo de início é menor que o tempo final.
 - Se sim, verificar se o tempo está dentro do intervalo;
 - Então, definir limites superiores e inferiores da temperatura interna com base nas temperaturas desejadas e na banda morta;
- 3: Caso contrário – Verifique se o tempo de início é maior que o tempo final.
 - Se sim, verificar se o tempo atual está dentro do intervalo desejado;
 - Então, definir limites superiores e inferiores da temperatura interna com base nas temperaturas desejadas e na banda morta.
- 4: Fim Para.
- 5: Retorna às temperaturas internas.

A expressão (6) apresenta algumas considerações relevantes, sendo utilizada em [14] e apresentada por Constantopoulos *et al.* em [12]. 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 mc ; iii) nenhum armazenamento térmico independente é acoplado ao equipamento principal de aquecimento ou resfriamento, além disso, assume-se um único equipamento geral, neste estudo 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. É importante lembrar que a definição da temperatura desejada e da banda morta deve levar em consideração o tipo de ambiente e a atividade realizada no local, visando sempre garantir o conforto térmico dos ocupantes e a eficiência energética do sistema de climatização. Na abordagem foi fixado um ponto inicial de partida conforme a equação (7). 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.

O Algoritmo 1 resume o processo iterativo formulado no AIMMS para verificar o tempo inicial e final da utilização do

equipamento e definir os limites superiores e inferiores da temperatura interna, com base na temperatura interna desejada e com a flexibilidade da banda morta definida.

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 (5), (6) e (7) 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 (2), (3) ou (4).

C. Ferramenta Computacional AIMMS

O AIMMS (*Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software*) é um *software* de otimização para modelagem e resolução de problemas complexos. Foi desenvolvido pela AIMMS BV em 1989 e tem sido amplamente utilizado em áreas como logística, transporte, planejamento financeiro, planejamento de produção e cadeia de suprimentos.

O *software* suporta várias técnicas de otimização, incluindo programação linear, programação inteira mista, programação quadrática, programação não linear e programação estocástica. Além disso, permite a integração com outras ferramentas de *software*, como Excel, MATLAB e Python, facilitando sua utilização em diferentes plataformas.

O AIMMS é baseado em uma interface gráfica de usuário intuitiva, que permite aos usuários modelar e solucionar problemas complexos de forma eficiente e eficaz. Em resumo, é uma ferramenta poderosa para modelagem e otimização de problemas complexos em diversas áreas de aplicação.

Neste trabalho o *software* é utilizado para simular o sistema de condicionador de ar central de um edifício comercial, refrigerado por um único *Chiller*, analisando a demanda e o custo de energia de diferentes consumidores. Em particular foi utilizado o *solver* CPLEX 22.1, para resolver o problema de MIP. Na seção seguinte é apresentado o estudo de caso.

V. 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 [27]. 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 (*i.e.*, o índice

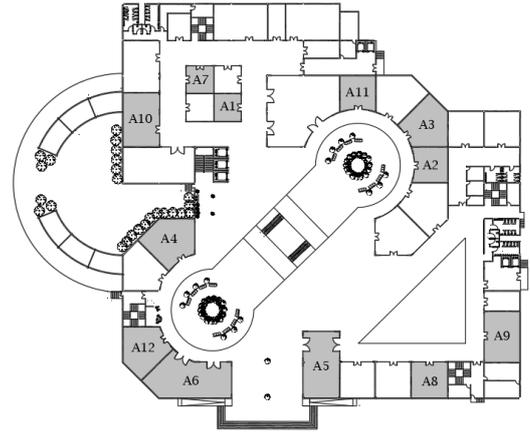


Fig. 1. Planta arquitetônica do empreendimento comercial.

TABELA II
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

de tempo t , referente a formulação do problema será $t = 7 \times 288 = 2016$), 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) [29], 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 uma banda morta de 4°C durante todo o dia, o que exige um sistema de refrigeração eficiente e bem dimensionado. Além disso, o valor máximo definido para p_t^h é a potência do equipamento.

O fator de inércia, pode ser formulado conforme $\varepsilon = e^{-t/TC}$. 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 II são apresentados os seguintes dados de cada UC: área, potência do ar-condicionado, coeficiente de performance, condutividade térmica e fator de inércia. As

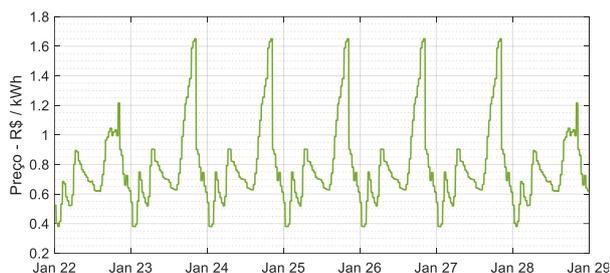


Fig. 2. Proposta de tarifação dinâmica – TFD.

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 site Grupo Energisa [24], 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 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, modificado de [12]. 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.

VI. 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.

A. 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, que possui 12 unidades consumidoras independentes. Os dados obtidos para cada um dos cenários propostos (TFX, TFP e TFD) são apresentados na TABELA IV.

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. No entanto, houve uma maior variação nas unidades em que o fator de inércia ϵ foi definido como 0,99, o que pode ser explicado pela alta capacidade de resposta do sistema de refrigeração a mudanças na demanda de resfriamento, quando este fator é expresso em uma escala de 0 a 1. 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 III exhibe os custos obtidos em uma condição de operação não otimizada do sistema (TF0), com base no consumo de energia. Nessa condição, é observado um

TABELA III
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

TABELA IV
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

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. A 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 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.

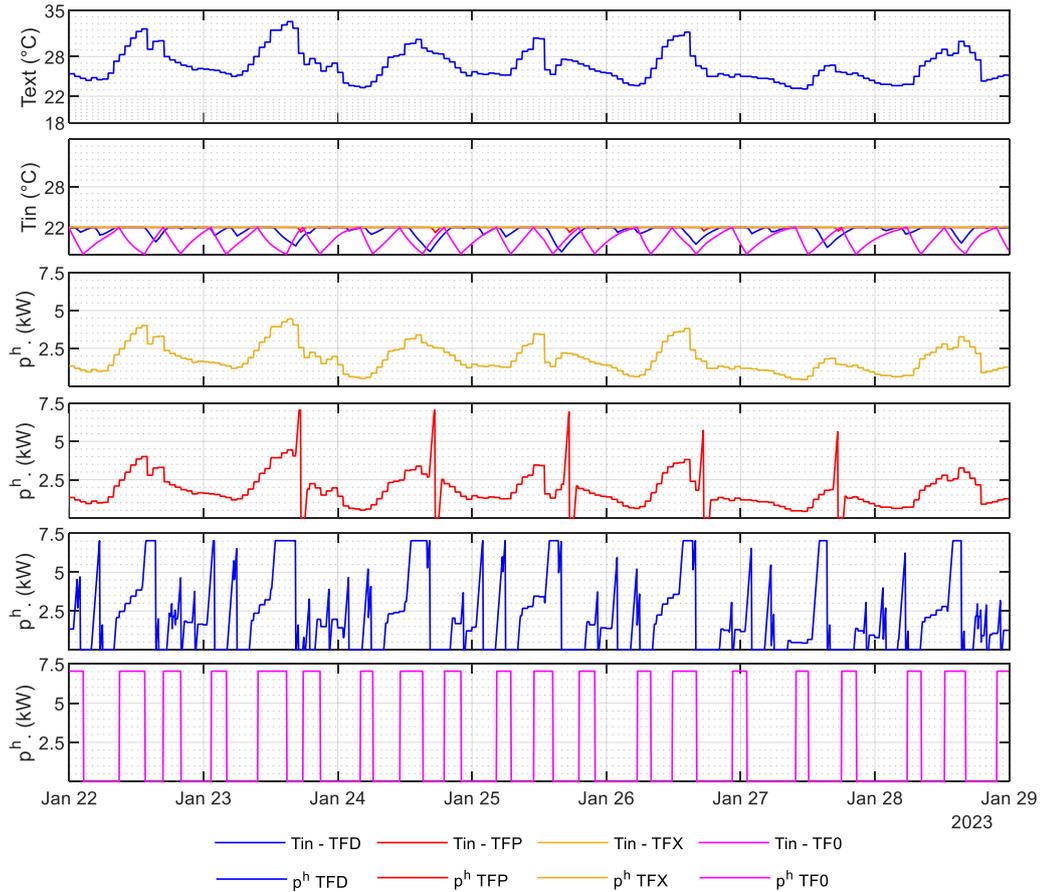


Fig. 3. Simulação do estudo de caso: resultados para a unidade consumidora A1 ao longo de uma semana.

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.

No cenário de TFD, são observadas mudanças mais evidentes, uma vez que a otimização procura evitar os horários de eletricidade mais caros, deslocando a demanda para os períodos de menor custo. Isso resulta em variações mais significativas nas temperaturas internas e, por conseguinte, em uma redução nos custos de eletricidade, especialmente em comparação com o cenário TFX.

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.

B. 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.

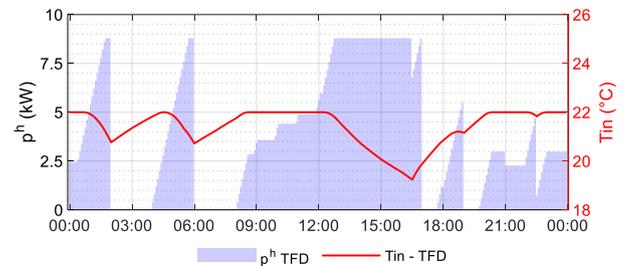


Fig. 4. Variação da demanda de potência e temperatura interna na unidade consumidora A7 ao longo de 24 horas em TFD.

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.

C. 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,

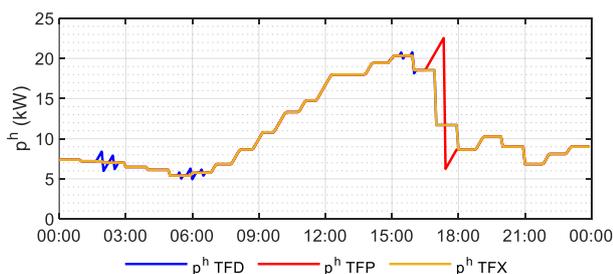


Fig. 5. Demanda de potência na unidade consumidora A6 em resposta a modelos de tarifação propostos ao longo de 24 horas.

TABELA V

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

considerando as temperaturas externas do dia 23/01/2023, com o objetivo de analisar o desempenho da abordagem.

Nesta comparação, é possível notar que, em grande 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 da 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 V e a Fig. 5. apresentam os resultados de consumo e valores obtidos por meio de simulação nesta condição.

D. 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.,

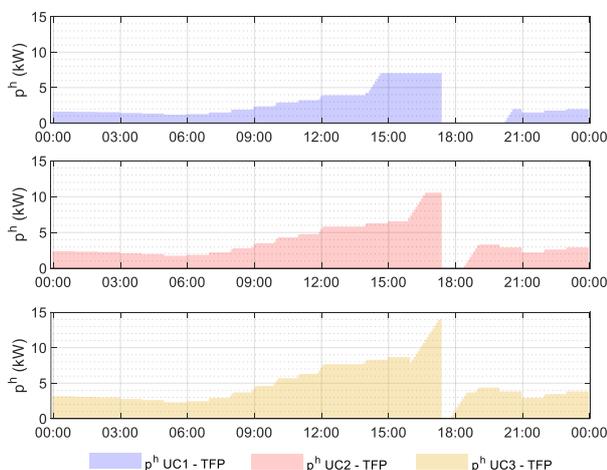


Fig. 6. Impacto do pré-resfriamento no cenário de TFP.

é possível observar o resultado esperado do efeito desta condição.

Às 17:20, os três consumidores atingiram seus respectivos valores máximos de p^h . Cinco minutos após esse período, os equipamentos de cada consumidor foram desligados. Entretanto, pode-se observar que cada um dos consumidores iniciou a variação de consumo 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 período de pico, ao passo que os consumidores A2 e A3 apresentaram uma redução parcial na demanda nesse horário. O motivo para o comportamento do consumidor A1 está relacionado 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.

VII. CONCLUSÃO

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 pico.

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, fator de inércia, assim como, a análise da influência do COP na economia de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Associação Nacional dos Consumidores de Energia ANACE (2019). *Energia elétrica subiu 230% em 18 anos, enquanto inflação foi de 189%, diz ANEEL*. Acesso em 20 de Fevereiro de 2023, em: <https://www.anacebrasil.org.br/energia-eletrica-subiu-230-em-18-anos-enquanto-inflacao-foi-de-189-diz-aneel/>.
- [2] 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.
- [3] Lee, D., Lin, C. J., Lai, C. W., Huang, T., “Smart-valve-assisted model-free predictive control system for chiller plants,” *Energy and Buildings*, vol. 234, pp. 110708, 2021.
- [4] Chakraborty, D., Alam, A., Chaudhuri, S., Başağaoğlu, 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.
- [5] Fan, C., Zhou, X., “Model-based predictive control optimization of chiller plants with water-side economizer system. *Energy and Buildings*,” vol. 278, pp. 112633, 2023.
- [6] Ho, W. T., Yu, F. W., “Measurement and verification of energy performance for chiller system retrofit with k nearest neighbour regression,” *Journal of Building Engineering*, vol. 46, pp. 103845, 2022.
- [7] Jia, L., Wei, S., Liu, J., “A review of optimization approaches for controlling water-cooled central cooling systems,” *Building and Environment*, vol. 203, pp. 108100, 2021.
- [8] Karami, M., Wang, L., “Particle Swarm optimization for control operation of an all-variable speed water-cooled chiller plant,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 962-978, 2018.
- [9] Bienvenido-Huertas, D., Sánchez-García, D., Rubio-Bellido, C., “Comparison of energy conservation measures considering adaptive thermal comfort and climate change in existing Mediterranean dwellings,” *Energy*, vol. 190, pp. 116448, 2020.
- [10] Niu, J., Zhou, R., Tian, Z., Zhu, J., Lu, Y., Ma, J., “Energy-saving potential analysis for a 24-hour operating chiller plant using the model-based global optimization method,” *Journal of Building Engineering*, vol. 69, pp. 106213, 2023.
- [11] Handbook, A. S. H. R. A. E., “Product Directory, 1977 Fundamentals,” American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, vol. 345, pp. 25.4, 1977.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Ilic, M., Black, J. W., Watz, J. L., “Potential benefits of implementing load control,” In: 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37309). IEEE, 2002. pp. 177-182.
- [15] Bisschop, J., & Roelofs, M., “Aimms-User's Guide,” Bellevue, WA, USA, 2006.
- [16] 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.
- [17] Koru, M., “The Controlling, Modeling and Optimization in the HVAC Systems,” M. Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Suleyman Demirel University, Turkey, 2000.
- [18] dos Santos Coelho, L., Mariani, V. C., “Improved firefly algorithm approach applied to chiller loading for energy conservation,” *Energy and Buildings*, vol. 59, pp. 273-278, 2013.
- [19] Zheng, Z. X., Li, J. Q., “Optimal chiller loading by improved invasive weed optimization algorithm for reducing energy consumption,” *Energy and Buildings*, vol. 161, pp. 80-88, 2018.
- [20] Chen, C. L., Chang, Y. C., Chan, T. S., “Applying smart models for energy saving in optimal chiller loading,” *Energy and Buildings*, vol. 68, pp. 364-371, 2014.
- [21] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Coronel, J. F., Maestre, I. R., “A review of HVAC systems requirements in building energy regulations,” *Energy and buildings*, vol. 43, no. 2-3, pp. 255-268, 2011.
- [22] Zhang, L., Liu, X., Jiang, Y., “Application of entransy in the analysis of HVAC systems in buildings,” *Energy*, vol. 53, pp. 332-342, 2013.
- [23] Cirera, J., Quiles, M., Carino, J. A., Zurita, D., Ortega, J. A., “Data-driven operation performance evaluation of multi-chiller system using self-organizing maps,” In: 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, 2018. pp. 2099-2104.
- [24] Grupo Energisa (2023). *Tipos de Tarifa*. Acesso em 30 de Abril de 2023, em: <https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>.
- [25] Tsai, Y. C., Chien, C. F., Chen, Y. J., Hsieh, M. K., “Optimizing Chiller Switch-on Time Interval for Chiller Power Consumption Saving Via Big Data Analytics and Machine Learning Framework,” In: 2019 Joint International Symposium on e-Manufacturing & Design Collaboration (eMDC) & Semiconductor Manufacturing (ISSM). IEEE, 2019. pp. 1-4.
- [26] Li, J., Wang, X., Ji, Y., “Energy Consumption Evaluation of Water Chiller in Cooling Station,” In: 2021 11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE). IEEE, 2021. pp. 170-174.
- [27] Sun, F., Yu, J., Zhao, A., Zhou, M., “Optimizing multi-chiller dispatch in HVAC system using equilibrium optimization algorithm,” *Energy Reports*, vol.7, pp. 5997-6013, 2021.
- [28] Chang, Y. C., “An outstanding method for saving energy-optimal chiller operation. *IEEE transactions on energy conversion*,” vol. 21, no. 2, pp. 527-532, 2006.
- [29] Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2023). *Históricos de Dados Meteorológicos*. Acesso em 02 de Abril de 2023, em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>.
- [30] Wang, Z., Ding, Y., Geng, G., Zhu, N., “Analysis of energy efficiency retrofit schemes for heating, ventilating and air-conditioning systems in existing office buildings based on the modified bin method,” *Energy Conversion and Management*, vol. 77, pp. 233-242, 2014.