

YEYNER ALVEIRO CARRILLO PABON

**APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE
BASEADO NO COMPORTAMENTO DO USUÁRIO EM
UM REFRIGERADOR COMERCIAL DE BEBIDAS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2023

YEYNER ALVEIRO CARRILLO PABON

**APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE
BASEADO NO COMPORTAMENTO DO USUÁRIO EM
UM REFRIGERADOR COMERCIAL DE BEBIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Área de concentração: Transferência de calor e Mecânica dos fluidos

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho.

UBERLÂNDIA – MG

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

P113 2023	<p>Pabon, Yeyner Alveiro Carrillo, 1996- Aplicação de um sistema de controle baseado no comportamento do usuário em um refrigerador comercial de bebidas [recurso eletrônico] / Yeyner Alveiro Carrillo Pabon. - 2023.</p> <p>Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho . Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.332 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. , Enio Pedone Bandarra Filho, 1970-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 635, PPGEM				
Data:	30/06/2023	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	00 : 00
Matrícula do Discente:	12112EMC007				
Nome do Discente:	Yeyner Alveiro Carrillo Pabon				
Título do Trabalho:	APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE BASEADO NO COMPORTAMENTO DO USUÁRIO EM UM REFRIGERADOR COMERCIAL DE BEBIDAS				
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos				
Linha de pesquisa:	Geração e Conservação de Energia				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Roberto Mendes Finzi Neto - FEMEC/UFU; Christian Johann Losso Hermes - UFSC; e Enio Pedone Bandarra Filho - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Christian Hermes, Usuário Externo**, em 30/06/2023, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Enio Pedone Bandarra Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/06/2023, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Mendes Finzi Neto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/06/2023, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso=0, informando o código verificador **4600373** e o código CRC **8BC22312**.

DEDICATÓRIA

Agradeço a Deus, à minha tia Cándida Rosa Pabon Tarazona, que Deus a tenha em sua santa glória, aos meus pais e à minha família.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço o suporte financeiro ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Apoio Universitário (FAU) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Além disso, agradeço a empresa MEMO pelo fornecimento de equipamentos.

Também expresso meus agradecimentos à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), especialmente ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e ao Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LESTnano).

CARRILLO PABON, Y. A. **Aplicação de um sistema de controle baseado no comportamento do usuário em um refrigerador comercial de bebidas.** 2023. 123 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Os sistemas de refrigeração possuem elevada importância na área industrial, comercial e residencial, sendo essenciais para a conservação de alimentos, resfriamento de bebidas, conforto térmico, medicamentos, entre outros. É notável que esses sistemas apresentam um elevado consumo de energia elétrica para manter uma temperatura controlada e, assim, garantir a qualidade dos produtos. Atualmente, a maioria dos sistemas de refrigeração não apresentam controles baseados no comportamento do usuário. Desse modo, a otimização dos sistemas de controle é fundamental para que os sistemas de refrigeração possam ter uma redução do consumo de energia elétrica. Desta forma, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma estratégia de controle *ON/OFF* que reduza o consumo de energia elétrica de um sistema de refrigeração de bebidas com base no comportamento de consumo do usuário. Para a realização deste trabalho, foram coletados dados de um resfriador de bebidas ao longo de três meses. Com base nesses dados, foi desenvolvida uma estratégia de controle *ON/OFF* com referência variável, a qual modificava o *Setpoint* de controle, baseado na previsão realizada pelo modelo multiplicativo, que identificava o padrão de consumo do usuário. Ao comparar os sistemas de controle, observou-se uma redução da frequência de ciclagem e do consumo de energia elétrica do refrigerador em até 100 % e 41,4 %, respectivamente, durante o período em que não houve o consumo de bebida. Além disso, obteve-se uma redução da ciclagem e do consumo de energia elétrica mensal de 50 % e 18,4 %, respectivamente, ao utilizar o sistema de controle proposto de forma contínua. Essa redução no consumo de energia elétrica tem impacto direto nos custos operacionais do sistema, além de reduzir os impactos indiretos e diminuir os picos de corrente, aumentando a vida útil do equipamento. Nessas condições, conclui-se que, em comparação com o sistema *ON/OFF* convencional, a metodologia proposta neste trabalho mostrou melhor desempenho em relação ao consumo de energia elétrica, além dos resultados, sugerirem o aumento da vida útil dos sistemas de refrigeração de bebidas.

Palavras-Chave: Refrigerador de bebidas, Controle ON/OFF, Série Temporal.

CARRILLO PABON, Y. A. **Application of a user behavior-based control system in a commercial beverage cooler.** 2023. 123 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Refrigeration systems are of great importance in industrial, commercial, and residential areas, being essential for food preservation, beverage cooling, thermal comfort, and medicines, among others. It is notable that these systems have a high consumption of electricity to maintain a controlled temperature and thus guarantee the quality of the products. Currently, most refrigeration systems do not have controls based on user behavior. Thus, the optimization of the control systems is fundamental for the refrigeration systems to have a reduction in the consumption of electric energy. In this way, this work aims to develop an *ON/OFF* control strategy that reduces the consumption of electricity in a beverage refrigeration system based on the user's consumption behavior. To carry out this work, data were collected from a beverage cooler over three months. Based on these data, an *ON/OFF* control strategy with variable reference was developed, which modified the control Setpoint, based on the prediction made by the multiplicative model, which identified the user's consumption pattern. When comparing the control systems, there was a reduction in the cycling frequency and in the refrigerator's electricity consumption by up to 100% and 41.4%, respectively, during the period when there was no beverage consumption. In addition, a reduction in cycling and monthly electricity consumption of 50% and 18.4%, respectively, was obtained when using the proposed control system continuously. This reduction in electricity consumption has a direct impact on the operating costs of the system, in addition to reducing indirect impacts and reducing current peaks, increasing the useful life of the equipment. Under these conditions, it is concluded that, in comparison with the conventional *ON/OFF* system, the methodology proposed in this work showed better performance in relation to the consumption of electrical energy, in addition to the results suggesting an increase in the useful life of beverage refrigeration systems.

Keywords: *Direct type beverage cooler, ON/OFF control system, Time Series*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Classificação dos tipos de refrigeradores de bebidas. Fonte: (MARCUCCI PICO, 2023)	24
Figura 2.2 – Algoritmos de previsão para análise de séries temporais. Fonte: adaptado de CHOU; TRAN,(2018).	27
Figura 2.3 Número de publicações feitas na área de refrigeradores de bebida nos últimos 10 anos. Fonte:ScienceDirect. ¹	28
Figura 3.1 – Desenho esquemático bancada experimental. Fonte: Autor.	34
Figura 3.2 – Refrigerador de bebidas do tipo direto. Fonte: Autor.	36
Figura 3.3 – (A) Diagrama geral do refrigerador de bebidas do tipo direto; (B) Sistema de aquisição de dados; (C) Base de dados. Fonte: Autor	37
Figura 3.4 – Estrutura da tabela de armazenamento dos dados experimentais. Fonte: Autor.	46
Figura 3.5 – Sistema de codificação baseado no consumo de bebida. Fonte: Autor.	53
Figura 3.6 – Matriz de confusão. Fonte: Autor.	54
Figura 3.7 – Representação gráfica de um sistema de controle <i>ON/OFF</i> convencional. Fonte: Autor.	55
Figura 3.8 – Estratégia de controle <i>ON/OFF</i> com mudança de referência proposta. Fonte: Autor.	56
Figura 3.9 – Estratégia de controle com mudança na referência de hora em hora. Fonte: Autor.	57
Figura 4.1 – Temperatura de evaporação do teste de Pulldown. Fonte: Autor.	64
Figura 4.2 – Evolução da temperatura da bebida no teste de capacidade padrão. Fonte: Autor. ⁵	67
Figura 4.3 – Temperatura média de cada bebida extraída no teste casual de temperatura ³ . Fonte: Autor.	68
Figura 4.4 – Consumo de energia elétrica do teste de <i>Standby</i> . Fonte: Autor.	69
Figura 4.5 – Evolução do consumo de água durante o período de 12/09/2022 até 08/12/2022. Fonte: Autor.	72
Figura 4.6 – Comparação de média semanais. Fonte: Autor.	74
Figura 4.7 – Treinamento dos modelos de previsão baseado em séries temporais. Fonte: Autor. ⁶	76

Figura 4.8 – A) Matriz de confusão para períodos com consumo de bebidas. B) Matriz de confusão para períodos sem consumo de bebida. Fonte: Autor.	80
Figura 4.9 – Comparação do sinal de pressão filtrada e sem filtrar. Fonte: Autor.....	81
Figura 4.10 – Validação estatística para as referências de pressão propostas. Fonte: Autor ...	83
Figura 4.11 – Evolução do sinal de pressão para diferentes <i>Setpoint s</i> . Fonte Autor.....	84
Figura 4.12 – Evolução do sinal de pressão com o sistema de controle proposto. Fonte: Autor	85
Figura 4.13 – Comparação do consumo bebida e B) Comparação do consumo de energia elétrica entre o sistema de controle proposto e o sistema convencional, durante um dia da semana. Fonte: Autor.....	86
Figura 4.14 – A) Comparação do consumo bebida e B) Comparação do consumo de energia elétrica entre o sistema de controle proposto e o sistema convencional, durante um final de semana. Fonte: Autor.....	87
Figura 4.15 – Comparação de corrente dos sistemas de controle em períodos de ciclagem. Fonte: Autor.....	89
Figura 4.16 – A) Dados de treinamento e B) dados de validação, para o controle convencional. Fonte: Autor.....	91
Figura 4.17 – A) Dados de treinamento e B) dados de validação, para os dias de segunda-feira até sexta-feira para com o controle proposto. Fonte: Autor	92
Figura 4.18 – A) Dados de treinamento e B) dados de validação, para os finais de semana com o controle proposto. Fonte: Autor.....	94
Figura 4.19 – Comparação dos custos do RB, entre o controle convencional e controle proposto para diferentes regiões do país. Fonte: Autor.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais referências bibliográficas usadas nesta pesquisa. Fonte: Autor.....	32
Tabela 3.1 – Características principais do refrigerador de bebidas do tipo direto. Fonte: (MEMO, 2022).	35
Tabela 3.2 – Características principais da instrumentação e do sistema de aquisição de dados do refrigerador de bebidas do tipo direto. Fonte: Autor.	39
Tabela 3.3 – Condições padrões de teste. Fonte: (ASHRAE, 2018)	42
Tabela 3.4 – Procedimento de média móvel centralizada (2 k MA). Fonte: Autor.....	50
Tabela 3.5 – Parâmetros para determinar o TEWI. Fonte: (IPCC, 2007; AIRAH, 2012; PANATO; PORTO; BANDARRA FILHO, 2017).	58
Tabela 3.6 – Tarifas médias do por região. Fonte: (BRASIL, 2022).	59
Tabela 4.1 – Modelos matemáticos dos sensores usados no sistema de instrumentação. Fonte: Autor.	62
Tabela 4.2 – Resumo do teste de Pulldown. Fonte: Autor.	63
Tabela 4.3 – Resumo do teste de capacidade padrão. Fonte: Autor	66
Tabela 4.4 – Resumo do teste casual de temperatura. Fonte: Autor.	69
Tabela 4.5 – Resumo do teste de <i>Standby</i> . Fonte: Autor.....	70
Tabela 4.6 – Métricas estatísticas por semana. Fonte: Autor.	73
Tabela 4.7 – Métricas estatísticas do conjunto de dados agrupados por semanas. Fonte: Autor.	73
Tabela 4.8 – Métricas para avaliação do modelo baseado em séries temporais. Fonte: Autor.77	77
Tabela 4.9 – Métricas de avaliação modelo multiplicativo. Fonte: Autor ⁷	78
Tabela 4.10 – Referências de pressão. Fonte: EES® (<i>Engineering Equation Solver</i>).	82
Tabela 4.11 – Resumo de consumo de energia elétrica com diferentes referências. Fonte: Autor	82
Tabela 4.12 – Comparação dos sistemas de controles em períodos de ciclagem. Fonte: Autor ⁸	88
Tabela 4.13 – Comparação do consumo de energia elétrica anual através do primer método. Fonte: Autor.....	95
Tabela 4.14 – Comparação do consumo de energia elétrica anual, através do segundo método. Fonte: Autor.....	96
Tabela 4.15 – Comparação dos impactos indiretos e TEWI para o controle proposto e controle convencional. Fonte: Autor.	97

Tabela 4.16 – Valor em Reais dos custos de operação mensal do RB para diferentes regiões do país. Fonte: Autor.	98
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Arábicos

A	Acurácia
CT	Categorização de período
E	Especificidade
E_{anual}	Energia elétrica consumida anualmente
E_{TCP}	Energia elétrica consumida no teste de capacidade padrão
E_{TSB}	Energia elétrica consumida no teste de <i>Standby</i> em horas
E_{TPD}	Energia elétrica consumida no teste de <i>pulldown</i>
E_{Tcasual}	Energia elétrica consumida no teste casual de temperatura
E_{DST}	Consumo nominal de energia elétrica por dia do teste em <i>Standby</i>
E_{DT}	Energia elétrica diária total
E_{ST}	Energia consumida durante o teste de <i>Standby</i>
FN	Falso negativo
FP	Falso positivo
FT	Transmissor de fluxo ou vazão
fdp	Fator de potência
FZ_t	Fator sazonal
IAC	Corrente alterna consumida
IC	Intervalo de confiança
It	Irregularidades da série temporal
k	Período da série temporal
L_{anual}	Taxa de vazamentos anual
m	Valor da largura média
Mf	Massa do fluido refrigerante.
M_A	Modelo aditivo
MA	Médias móveis
M_M	Modelo Multiplicativo
n	Número de amostras
NT_{BCP}	Número total de bebidas do teste capacidade padrão
NT_{BPM}	Número total de bebidas por minuto
P	Pulsos por segundos

PA	Pressão de alta ou descarga do compressor
PB	Pressão de baixa ou sucção do compressor
PT	Transmissor de pressão
R_{NTC}	Resistência do termistor
R^2	Coeficiente de determinação
S	Sensibilidade
SP ₁	Referência de pressão 1
SP ₂	Referência de pressão 2
T _A	Temperatura ambiente.
T _c	Temperatura de condensação
T _e	Temperatura de evaporação
T _B	Temperatura da bebida liberada
TM	Temperatura medida pelo termistor
TT ₁	Temperatura liberada pela torneira um
TT ₂	Temperatura liberada pela torneira dois
t _{TCP}	Duração do teste de capacidade padrão
t _{TST}	Duração do teste de <i>Standby</i>
T _{Sat}	Temperatura de Saturação
t _{TPD}	Duração do teste de <i>pulldown</i>
T _t	Tendência da série temporal
t _{TCP}	Tempo de duração do teste padrão
VA	Vazão de água
VAC	Tensão de corrente alternada
VB _{T1}	Volume liberado pela torneira um
VB _{T2}	Volume liberado pela torneira dois
VDC	Tensão de corrente contínua de saída
VIN	Tensão de corrente contínua de entrada
VN	Verdadeiro negativo
V _n	Vazão nominal estabelecida pelo fabricante
VP	Verdadeiro positivo
V _P	Volume padrão
V _{PCP}	Volume padrão de bebida do teste capacidade padrão
V _{TCP}	Volume total de bebida do teste capacidade padrão

Y_t	Valor da série temporal predita
Z_t	Sazonalidade da série temporal

Gregos

β	Fator de emissão indireto
η	Tempo de vida útil do sistema de refrigeração
α_{rec}	Razão do Fator de recuperação e a reciclagem do fluido no final da vida útil

Siglas

ASHRAE	Sociedade Americana de Engenheiros do Setor de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado
CE	Consumo de energia elétrica
COP	Coefficiente de desempenho
GWP100	Potencial de aquecimento global relativo ao CO ₂ em um horizonte de 100 anos
MAE	Erro Absoluto Médio
NTC	Termistor de coeficiente negativo
PCM	Material de mudança de fase
R-22	Refrigerante clorodifluorometano
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
RB	Refrigerador de Bebidas do tipo Direto.
TEWI	Potencial total equivalente de aquecimento global
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
VPST	Valor predito pela série temporal

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO I – Introdução	19
1.1 Objetivos.....	21
1.2 Estrutura da dissertação	21
2. CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica.....	23
2.1 Refrigeradores de bebidas.....	23
2.2 Algoritmos de previsão usados em sistemas de refrigeração.	26
3. CAPÍTULO III – Metodologia	33
3.1 Bancada experimental.....	33
3.2 Instrumentação e sistema de aquisição	36
3.3 Métodos de teste para dispensadores de bebidas	40
3.4 Processamento de dados	46
3.5 Análise de séries temporais.....	47
3.6 Estratégia de controle proposta.....	55
3.7 Análise dos impactos indiretos e análise custos	57
4. CAPÍTULO IV – Resultados e Discussões.....	60
4.1 Validação da bancada experimental	60
4.2 Validação dos testes para dispensadores de bebidas	61
4.3 Processamento de dados	71
4.4 Análise de séries temporais.....	75
4.5 Implementação do sistema de controle proposto.....	80
4.6 Análise dos impactos indiretos e análise de custos.....	94
5. CAPÍTULO V Conclusões	100
5.1 Trabalhos futuros	101

REFERÊNCIAS	102
APÊNDICE	106

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Atualmente, uma das maiores preocupações da sociedade e governo é o aquecimento global e como reduzi-lo. Por isso, a maioria das indústrias tem tentado utilizar o avanço da tecnologia para melhorar o desempenho de seus equipamentos, reduzindo o consumo de energia e o impacto no aquecimento global. De acordo com um relatório apresentado pelo Instituto Internacional de Refrigeração (IIR), aproximadamente 20% da eletricidade total utilizada em todo o mundo é consumida pelo setor de refrigeração, incluindo o de ar-condicionado (DUPONT; DOMANSKI; ZIEGLER, 2019). Por isso, o IIR propôs as seguintes ações para combater o aquecimento global: (i) redução das emissões diretas de fluidos refrigerantes fluorados para a atmosfera, por meio de uma melhor contenção, redução da carga, desenvolvimento de fluidos alternativos de baixo impacto e treinamento e certificação de técnicos; (ii) redução do uso de energias primárias através do aumento da eficiência energética dos sistemas de refrigeração. O IIR estima que com essas ações espera-se limitar significativamente o aumento do consumo de energia previsto para 2050.

Dentro dos sistemas de refrigeração, uma aplicação que se destaca pela quantidade de sistemas envolvidos são os refrigeradores de bebidas, encontrados em bares, restaurantes, casas noturnas, entre outros (AFONSO; GABRIEL, 2014). Apesar desses equipamentos terem um amplo campo de aplicação, poucas pesquisas têm sido realizadas nessa área. As pesquisas recentes encontradas estão focadas nas ações propostas pelo IIR, buscando diminuir a contribuição do impacto direto causado pelos fluidos refrigerantes, por meio de comparações com novos refrigerantes visando um melhor desempenho e aumentando a eficiência energética dos equipamentos (VISEK; ELBEL; HRNJAK, 2016; SÁNCHEZ et al., 2022, 2023).

Existem diferentes métodos para reduzir o consumo de energia elétrica nos sistemas de refrigeração, como modificação do compressor e isolamento, novos sistemas que operam com material de mudança de fase (PCM), otimização dos sistemas de controle entre outros (LIU et al., 2021). Uma das metodologias importantes na redução do consumo de energia elétrica nos sistemas de refrigeração é por meio da otimização dos sistemas de controle.

Conforme a literatura a otimização dos sistemas de controle apresenta resultados satisfatórios, entre os métodos de otimização dos sistemas de controle encontra-se, a modulação da velocidade do compressor, controle da abertura do dispositivo de expansão, modificação dos parâmetros principais do controlador baseado no status da porta, modificação da velocidade no ventilador do evaporador e modificação da sequência de execução do sistema de controle (EKREN; SAHIN; ISLER, 2010; BELMAN-FLORES et al., 2019; CHOU et al., 2022; KAPICI; KUTLUAY; IZADI-ZAMANABADI, 2022; RODRÍGUEZ-VALDERRAMA et al., 2023). Esses estudos demonstraram a importância da otimização dos sistemas de controle nos sistemas de refrigeração e deixam em evidência como mediante estas metodologias é possível ter uma redução no consumo de energia elétrica, mantendo e melhorando as condições de trabalho (temperatura dos compartimentos, temperatura da bebida, entre outros).

Com base na revisão bibliográfica realizada, não foram encontrados trabalhos que utilizem um sistema de controle baseado no comportamento do usuário específico para refrigeradores de bebidas do tipo direto. Os estudos disponíveis concentram-se principalmente em bebedouros e geladeiras, ou não exploram o uso de um controlador que leve em consideração os dados de consumo do usuário.

Dessa forma, com base nos argumentos mencionados acima e visando contribuir com as ações propostas pelo IIR, este trabalho visa modificar as metodologias convencionais disponíveis na literatura para serem aplicadas em um refrigerador de bebidas do tipo direto. Nesse sentido, o presente trabalho tem como principal objetivo, projetar um sistema de controle para um refrigerador de bebidas do tipo direto baseado no comportamento do usuário. Para isso, será realizado um levantamento de dados reais para identificação de padrões de uso, visando a implementação de uma estratégia de controle que incorpore o padrão de consumo do usuário e finalmente realizar uma comparação do consumo de energia elétrica quando o refrigerador opera com o sistema de controle proposto em relação ao sistema *ON/OFF* convencional.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar experimentalmente o desempenho energético de um refrigerador de bebidas do tipo direto (RB) operando com um sistema de controle baseado no comportamento do usuário. Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um levantamento das diferentes técnicas de previsão que identifiquem os padrões de consumo de água em um RB, com base no comportamento do usuário;
- Coletar dados relacionados ao consumo de bebida e de energia elétrica do sistema *ON/OFF* convencional usando um sistema de monitoramento para coletar os dados em tempo real.
- Desenvolver uma estratégia de controle baseada no comportamento do usuário;
- Comparar os resultados obtidos com o controle proposto e o controle convencional.

1.2 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, nos quais é apresentado o passo a passo dos tópicos realizados neste estudo, visando atingir o objetivo principal. Desta forma, os capítulos foram organizados da seguinte forma:

O capítulo I, encontram-se as motivações para realizar este trabalho, com os objetivos planejados, com o intuito de ter uma redução no consumo de energia de um refrigerador de bebidas comercial do tipo direto.

O capítulo II menciona as revisões bibliográficas relacionadas a sistemas de controle aplicados em refrigeradores comerciais de bebidas, além disso, são apresentadas as novas pesquisas em equipamentos que trabalham com o ciclo de compressão de vapor e que usam sistemas de controle baseado no comportamento do usuário e controles inteligentes.

O capítulo III lista a descrição da bancada experimental, componentes e instrumentação, além disso, é apresentado o procedimento exigido pela norma ASHRAE 32.2 de 2018 (ASHRAE, 2018), para refrigeradores de bebidas. Em seguida é mostrada a análise de séries temporais para prever o comportamento do usuário desde o ponto de vista clássico.

Continuando, é apresentada a nova metodologia de controle proposta e é finalmente exibido o procedimento relacionado aos cálculos dos impactos indiretos e análises de custos.

O capítulo IV expõe os resultados obtidos ao aplicar a norma (ASHRAE, 2018), como também apresenta a previsão do comportamento e consumo do usuário e sua respectiva validação, após disso, é realizada a comparação entre o sistema de controle de fábrica e o sistema de controle proposto.

Por fim, é mostrado o cálculo dos impactos indiretos como o TEWI e a comparação dos sistemas de controle é feito com respeito aos custos de operação nas principais regiões do Brasil.

O capítulo V exhibe as principais conclusões obtidas neste trabalho, como também é planteado os possíveis trabalhos que poderiam ser realizados, para continuar enriquecendo esta área tão pouco explorada.

Nos anexos é mostrado graficamente a validação da instrumentação e o comportamento dos sensores usados no RB. Além disso, é apresentado as constantes dos modelos de séries temporais, como também os dados usados para validação e é finalmente é exibido o consumo de energia elétrica para as diferentes referências em estudo.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Refrigeradores de bebidas

O refrigerador de bebidas é um equipamento projetado para manter bebidas geladas e prontas para o consumo ou para ser usado em um determinado processo que requer a baixa temperatura de um líquido. Esses aparelhos podem ser utilizados tanto ao nível industrial como comercial e estão disponíveis em diferentes capacidades e tamanhos. Podem ser encontrados modelos de grande porte, como *chillers*, para o uso em estabelecimentos comerciais, e modelos compactos, como refrigeradores de bebidas verticais, diretos e indiretos, para uso doméstico, bares e restaurantes (MARCUCCI PICO, 2023).

Conforme está ilustrado na Figura 2.1, os refrigeradores de bebidas podem ser classificados em três tipos: refrigeração, sistema e produto. O tipo refrigeração pode ser realizado de várias formas, como compressão mecânica de vapor, termoelétrica e métodos não convencionais como, magnéticos acústicos. O tipo de sistema pode ser de direto ou indireto, enquanto o tipo de produto pode ser pré-mix, pós-mix ou expositores.

Atualmente, foi encontrado na literatura pesquisas relacionadas com refrigeradores de bebidas como: refrigerador por compressão mecânica de vapor do tipo indireto, refrigerador de bebidas termoelétrico, refrigerador magnético do tipo indireto, expositor, refrigerador de bebidas por compressão mecânica a vapor do tipo indireto, para produtos pós-mix e refrigerador de bebidas por compressão mecânica a vapor do tipo indireto, para produtos pré-mix (AFONSO; GABRIEL, 2014; EZAN et al., 2017; VISEK; ELBEL; HRNJAK, 2016; POURHEDAYAT, 2018; MAĐERIC; PAVKOVIĆ; LENIĆ, 2019; NAKASHIMA et al., 2021; SÁNCHEZ et al., 2023;). Entretanto, não foi encontrado pesquisas relacionadas com

refrigerador de bebidas por compressão mecânica de vapor do tipo direto para produtos pré-mix, que será o foco deste estudo, pelo que torna esta pesquisa pioneira nesta área.

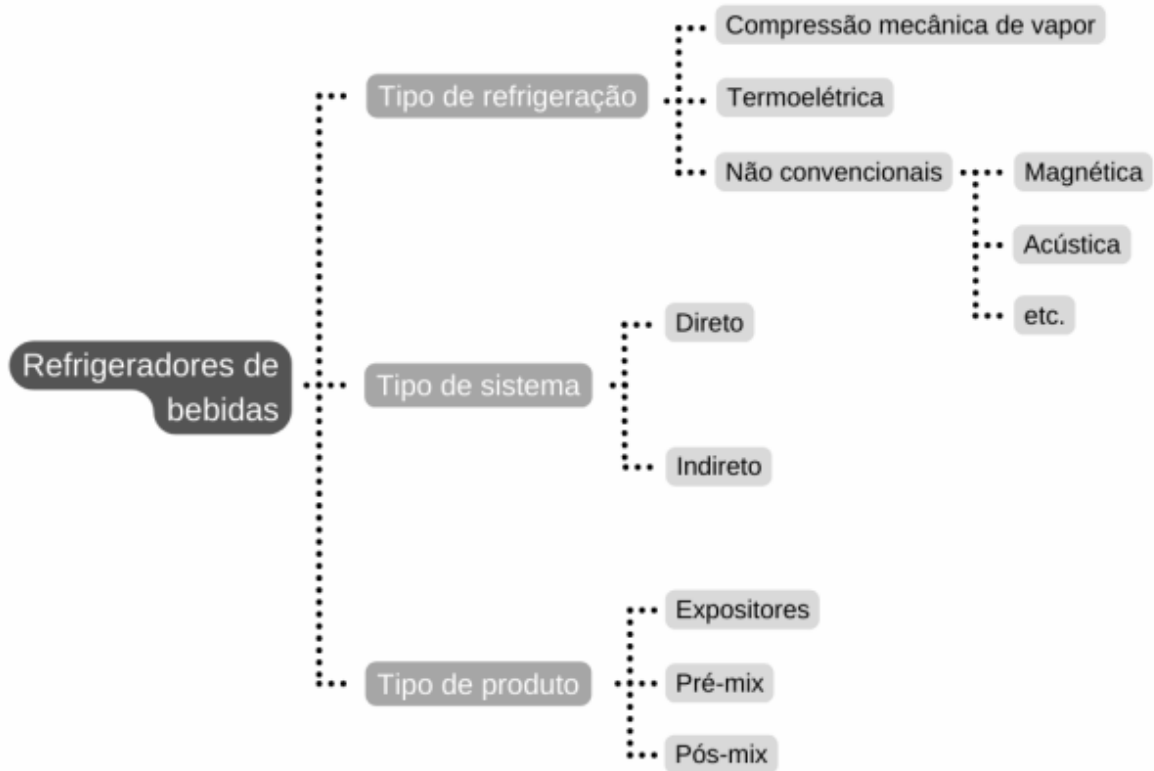


Figura 2.1 – Classificação dos tipos de refrigeradores de bebidas. Fonte: (MARCUCCI PICO, 2023)

Os refrigeradores de bebidas que trabalham com refrigeração mecânica de vapor são os mais usados na indústria, cujo ciclo de refrigeração é baseado em quatro etapas:

1. Na primeira etapa, o compressor realiza a mudança da pressão do fluido refrigerante até atingir a pressão de saturação.
2. Na segunda etapa, o condensador, realiza a mudança de fase do fluido refrigerante, dissipando o calor absorvido durante o funcionamento (retirado da bebida e o calor gerado pelo compressor).
3. Na terceira etapa, o dispositivo de expansão realiza o estrangulamento do fluido refrigerante até atingir a pressão de evaporação.
4. Na quarta e última etapa, o evaporador é responsável por evaporar o fluido refrigerante que sai do dispositivo de expansão. Essa é a etapa que diferencia o refrigerador de bebidas de tipo direto do indireto. No refrigerador de bebidas indireto, ocorre a refrigeração indireta da bebida por meio de um fluido refrigerante secundário, como, por exemplo, refrigeradores a gelo e *chillers*.

No refrigerador de bebidas direto, a refrigeração é realizada pela troca de calor direta entre o fluido refrigerante e a bebida. Esse processo é possível pela forma construtiva do evaporador, em que, uma serpentina de aço, pela qual circula a bebida, encontra-se imersa em fluido refrigerante na fase líquida. Essa configuração permite a transferência de calor e conseqüentemente, a redução da temperatura da bebida durante o funcionamento do compressor. Além disso, o evaporador armazena energia térmica mesmo quando o refrigerador está desligado, evitando ciclos de refrigeração frequentes.

Os autores AFONSO; GABRIEL, (2014) apresentam um dos primeiros trabalhos relacionado com sistemas de refrigeração de bebidas de tipo indireto. Neste trabalho foi analisado o funcionamento do refrigerador de bebidas para encontrar as possíveis ineficiências no projeto e na operação da máquina. Para isso, os pesquisadores, realizam uma análise das principais propriedades termodinâmicas, além disso, foi medido o consumo de energia elétrica do refrigerador de bebidas, trabalhando com as características configuradas pelo fabricante. Além disso, os autores analisaram e modelaram o processo de formação e derretimento do gelo para diferentes padrões típicos de consumo de bebida. Dentre os padrões utilizou-se o caso de um pequeno restaurante e um bar, alterando as configurações de tamanho da camada de gelo formada no evaporador de 25 kg (configuração de fábrica) para 21 kg e 10 kg. Os autores identificaram que a mudança da espessura da camada de gelo não afetava consideravelmente o consumo de energia elétrica durante o funcionamento normal do equipamento, porém, se for considerado a sugestão de desligar o equipamento em períodos de fechamento dos estabelecimentos o consumo de energia elétrica seria reduzido, por outro lado, os pesquisadores indicaram que, como o uso da camada de 10 kg seria suficiente para atingir um pico extra de consumo de bebida. Outras recomendações propostas pelos pesquisadores foram: melhorar a eficiência do trocador de calor interno, aperfeiçoar o isolamento térmico na parte inferior do reservatório e isolar o motor agitador, isso reduziria o consumo de energia elétrica em todo o sistema.

Conforme MAĐERIĆ; PAVKOVIĆ; LENIĆ, (2019), poucas pesquisas fizeram-se para saber ao funcionamento e eficiência energética destes equipamentos. Os autores são pioneiros neste tipo de pesquisa. Nesse trabalho foi realizado um estudo abrangente, focado no consumo de energia e medição da eficiência energética em um refrigerador de bebidas do tipo indireto, com armazenamento de calor latente (banco de gelo). Para realizar os testes, os autores efetuaram testes de redução de temperatura e de modo de espera, com base na norma ASHRAE 32.2. Além disso, os autores substituíram o termostato por um, relé de banco de gelo e

implementaram um controle intermitente no agitador. A implementação do banco de gelo trouxe uma redução do número de ciclos realizados pelo compressor, tendo um consumo de energia menor de até 15 %. Além disso, ao trabalhar em conjunto o controle intermitente no misturador e o relé de banco de gelo, foram obtidas reduções no tempo de *pulldown* e no consumo de energia durante o dia, em até 10 % e 48%, respectivamente. Os autores também sugeriram usar as pesquisas realizadas em sistemas de refrigeração por compressão mecânica a vapor (refrigeradores domésticos, bebedouros de água, bombas de calor entre outros) relacionadas com a eficiência energética e tentar adaptar as informações aos refrigeradores de bebidas do tipo direto e indireto, já que são os equipamentos mais próximos aos refrigeradores de bebidas.

2.2 Algoritmos de previsão usados em sistemas de refrigeração.

O uso de sistemas de inteligência artificial no campo de refrigeração e ar condicionado está aumentando gradualmente para resolver problemas complexos e mal definidos (MOHANRAJ; JAYARAJ; MURALEEDHARAN, 2012). Os sistemas com inteligência artificial incluem algoritmos como: lógica *fuzzy*, redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, algoritmos estatísticos e vários sistemas híbrido, que combinam duas ou mais técnicas (KALOGIROU, 2003; MELLIT; KALOGIROU, 2008).

Uma das abordagens que está em constante crescimento é o controle baseado no comportamento do usuário e em algoritmos de previsão. Neste tipo de abordagem são criadas estratégias para tentar diminuir o consumo de energia elétrica, com base no consumo e na demanda do usuário (BELMAN-FLORES et al., 2019; CHOU et al., 2022; KAPICI; KUTLUAY; IZADI-ZAMANABADI, 2022; RODRÍGUEZ-VALDERRAMA et al., 2023)

Na Figura 2.2 são apresentados os algoritmos de previsão mais utilizados para identificar os padrões de consumo, nos quais podem ser usados modelos únicos ou modelos híbridos para desenvolver as estratégias de redução de consumo de energia elétrica tanto em sistemas de refrigeração como em outras áreas, tendo resultados satisfatórios.

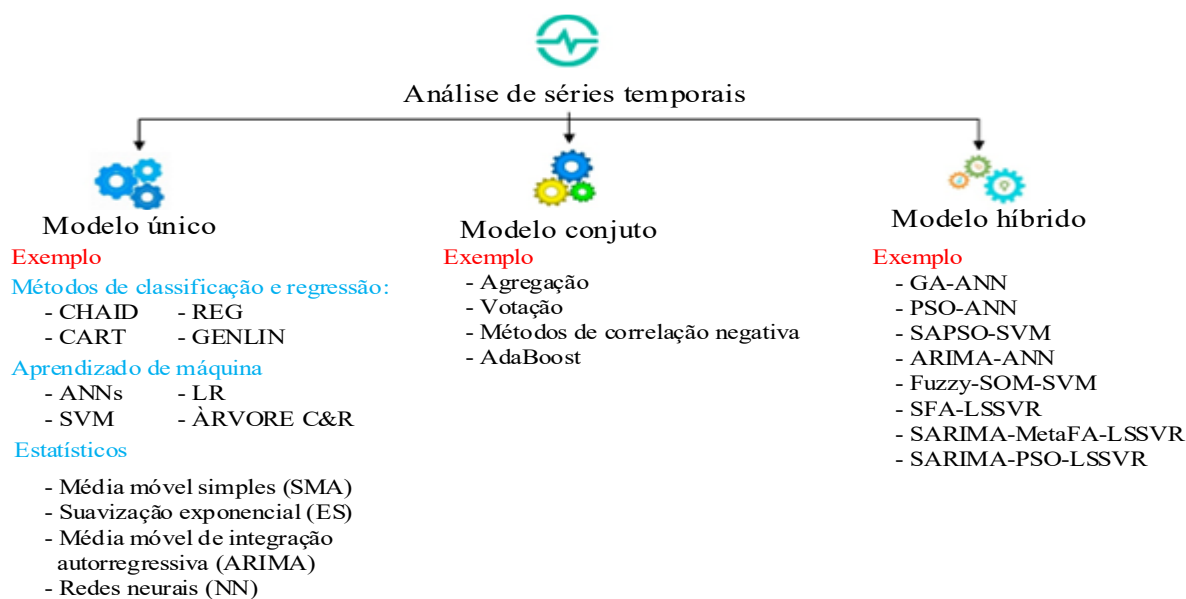


Figura 2.2 – Algoritmos de previsão para análise de séries temporais. Fonte: adaptado de CHOU; TRAN,(2018).

Na Figura 2.3 é apresentado o número de publicações realizadas nos últimos dez anos na área de refrigeradores de bebida, incluindo as palavras-chave: refrigeradores de bebida e eficiência energética, aplicando o filtro de informação nas áreas de “engenharia” e “energia”. Pode ser observado como o número trabalhos feitos nesta área é pouca e não supera as 50 publicações por ano, nos últimos 8 anos, além disso, nos últimos três anos o número de artigos publicados está em constante crescimento, isso pode ser explicado, pelo aumento de pesquisas em busca de novas estratégias de controle, novos materiais e novos fluidos refrigerantes para tentar diminuir o consumo de energia elétrica nestes equipamentos. Os trabalhos achados que involucram eficiência energética em refrigeradores de bebida do tipo direto ou indireto são poucos, sendo o primeiro trabalho encontrado no ano 2014 e outro 2019. Ditos trabalhos identificam as possíveis ineficiências de projeto e propuseram técnicas para tentar diminuir o consumo de energia elétrica. Os trabalhos atuais encontrados na área de refrigeradores de bebida, são relacionados com a análise do impacto energético de diferentes fluidos refrigerantes, estudo da formação da camada de gelo no evaporador do refrigerador de bebidas e implementação de matérias de mudança de fase (EZAN et al., 2017; MADERÍĆ et al., 2021; SÁNCHEZ et al., 2022), pelo que ficam fora do escopo deste trabalho, por isso foi usado como referências as pesquisas relacionadas com eficiência energética, efetuadas em refrigeradores domésticos e bebedouros de água, a qual são os equipamentos mais próximos do sistema usado nesta pesquisa.

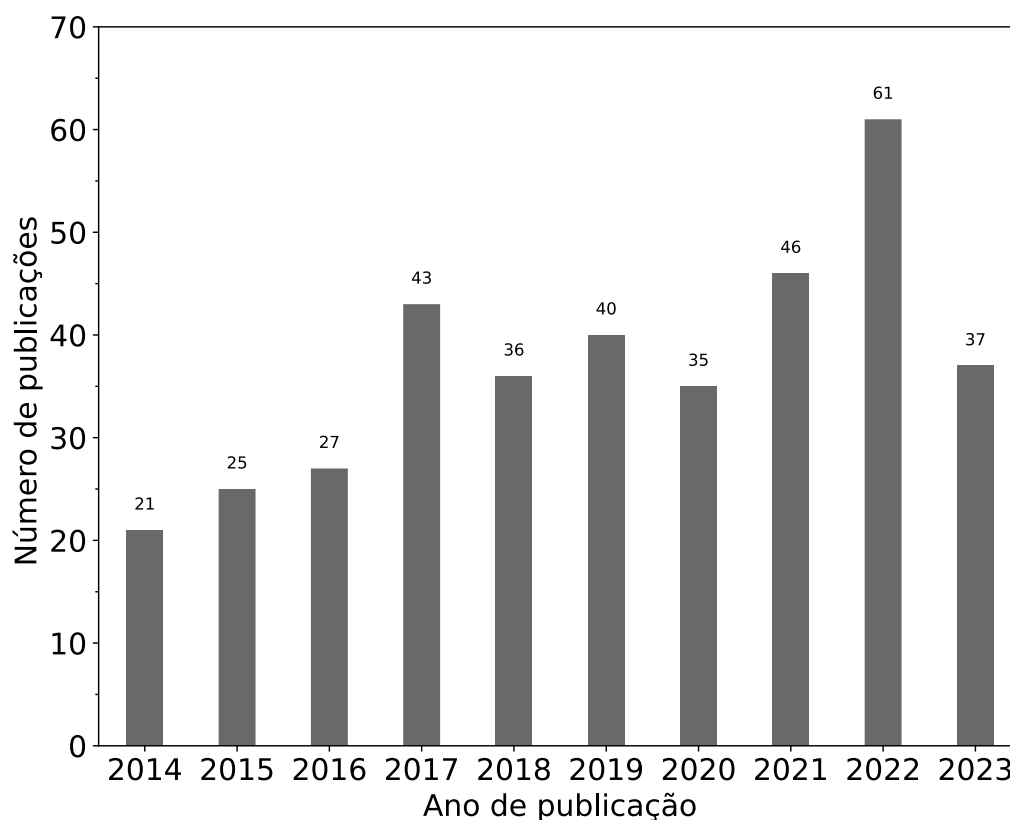


Figura 2.3 Número de publicações feitas na área de refrigeradores de bebida nos últimos 10 anos. Fonte: ScienceDirect.¹

UNDERWOOD (2015) realizou um controle multivariável difuso aplicado em bombas de calor domésticas. O pesquisador teve como referência os estudos baseados em refrigeradores domésticos e realizou uma adaptação para uma bomba de calor. O pesquisador implementou uma estratégia de controle baseada em regras *fuzzy* as quais permitiram controlar o superaquecimento do evaporador e a capacidade da planta, visando ter uma redução no consumo de energia elétrica. Os principais resultados encontrados pelo autor foram a validação experimental da estratégia de controle e incrementos de até 20% no coeficiente de desempenho do sistema, quando comparado com o sistema operando com o controle convencional. O autor concluiu que é preciso realizar, mais pesquisas nesta área para avaliar este tipo de controladores, uma vez que, esse campo apresenta resultados promissórios em termos de redução do consumo de energia elétrica.

BANDARRA FILHO et al., (2016) desenvolveram um estudo sobre a conservação de energia para sistemas de refrigeração por meio de técnicas de controle adaptativo híbrido *fuzzy*. Os autores aplicaram essas técnicas de controle em um sistema de refrigeração atuando através da velocidade do compressor e da abertura da válvula de expansão. Na qual, o principal objetivo

¹ Acesso em: 27 de maio 2023.

dá modulação dessas duas variáveis era que o sistema sempre se opera com o maior COP possível. Conforme os pesquisadores, ao usar o controle adaptativo híbrido, com trajetória otimizada, era possível obter o maior COP do sistema de 3,03 em média. Além disso, como o controlador funcionava a partir da resposta ao coeficiente global de transferência de calor, o sistema operava em zonas de alto COP. Por último, foi concluído que, o sistema proposto contribuiu significativamente para uma conservação geral de energia em sistemas de refrigeração.

BELMAN-FLORES et al., (2019), realizaram uma pesquisa do uso de controladores de lógica difusa para redução do consumo de energia elétrica em um refrigerador doméstico utilizado como variável de controle o *status* da porta. O objetivo principal deste trabalho consistiu em manter a temperatura do compartimento de alimentos o mais próximo do ponto de ajuste e, desta forma, tentar diminuir o consumo de energia elétrica. Na implementação das regras de lógica *fuzzy* foi incorporada a frequência e a duração da abertura da porta do gabinete. Estas condições visam reduzir a velocidade do compressor a um valor mínimo, diminuindo o número de vezes que o compressor é desligado quando a porta se encontra aberta. De acordo com os pesquisadores, o sistema obteve uma redução no consumo de energia elétrica de cerca de 3 %. Conclusivamente, os autores destacaram que, as reduções do consumo de energia podem ser intensificadas com a adição de outras variáveis e informações às regras fuzzy do controlador.

Em trabalho recente, apresentado por CHOU et al., (2022), foi proposto um sistema para reduzir o consumo de energia elétrica de um bebedouro baseado no comportamento do usuário. Os pesquisadores aplicaram uma estratégia de controle baseada em várias etapas, entre as principais têm-se: (i) coleta de dados históricos para analisar o consumo de água; (ii) aplicar um método de aprendizado de máquina fundamentado no algoritmo de redes neurais recorrentes com memória de longo-curto prazo, para prever o consumo de água e (iii) apoiado na previsão do consumo de bebida, os autores projetaram uma sequência de controle para ativar o modo de aquecimento, resfriamento e espera do bebedouro. Com a sequência projetada foi possível obter uma redução de consumo de energia elétrica mensal de até 28 % mantendo um nível de satisfação do usuário de até 97 %. Por último, uma das principais conclusões foi que, a redução pode aumentar se, modelos de maior complexidade foram considerados.

KAPICI; KUTLUAY; IZADI-ZAMANABADI (2022) aplicaram um novo método de controle inteligente para refrigeradores domésticos com base no comportamento do usuário. Essa pesquisa investigou diferentes técnicas de aprendizado de máquina (redes neurais,

regressão logística e árvore de decisão), para realizar a previsão da abertura da porta do gabinete, e posteriormente, integrar a previsão em um sistema de controle de lógica difusa. O controle permitiu regular os parâmetros de configuração no controlador principal do refrigerador baseado no comportamento do usuário e conseqüentemente, ter uma redução no consumo de energia elétrica. No experimento foram utilizados dados provenientes de 18 usuários para determinar os padrões. A técnica de aprendizado de máquina que melhor desempenho apresentou foi a regressão logística. Os resultados mostraram precisão de 80 % na fase de treinamento. O sistema projetado foi validado por meio de simulação, tendo diferentes temperaturas de referência (16 °C, 25 °C e 32 °C) e diferentes tipos de usuários, ativo e inativo. Os resultados exibiram que foi possível obter uma diminuição no consumo de energia elétrica de até 2,5% e 4,5% para este tipo de perfis de usuário. Por último, os autores concluíram e demonstraram a importância das técnicas de aprendizado de máquina e sistemas de controle para melhorar a eficiência energética de sistemas de refrigeração domésticos.

RODRÍGUEZ-VALDERRAMA et al., (2023), realizaram um controle baseado em lógica fuzzy, em um refrigerador doméstico convencional (controle *ON/OFF*). Os autores projetaram o controle de lógica fuzzy com três variáveis de entrada, temperatura do compartimento de alimentos, temperatura do freezer e a carga térmica. Os pesquisadores aplicaram o controle de lógica fuzzy para variar a velocidade de rotação do ventilador localizado no evaporador, controlar o fluxo de ar do compartimento de alimentos e controlar os ciclos *ON/OFF* do compressor. Os resultados relatados foram favoráveis, mostrando que o controle fuzzy permitiu manter as condições térmicas do refrigerador, ao mesmo tempo que permitiu reduzir o consumo de energia elétrica, quando foi comparado com o sistema original (*ON/OFF*). Os principais resultados relatados foram a redução de energia elétrica de até 9,5 % com baixa carga térmica e de 1,7 % com a geladeira vazia. Finalmente, os autores concluíram que o comportamento do usuário tem um alto impacto na redução de energia elétrica, nos sistemas de refrigeração e pode ser implementado nos sistemas de controle sem ter que realizar muitas alterações no equipamento.

Na Tabela 2.1 é apresentado os principais trabalhos experimentais usados como guia nesta pesquisa. Além disso, é mostrado os principais resultados obtidos por cada pesquisador na área de refrigeradores de bebidas e refrigeradores domésticos, o qual são os equipamentos com maior semelhança ao aparelho desta pesquisa. Também são mostrados os principais resultados obtidos no presente trabalho, para posicionar o trabalho com os disponíveis na literatura.

Após revisar a literatura disponível sobre refrigeradores de bebidas, foi identificado que existem poucas pesquisas relacionadas com o desempenho energético destes equipamentos. Além disso, as pesquisas relacionadas com eficiência energética em equipamentos semelhantes (como, refrigeradores de bebida e bebedouros de água), nos quais foram modificados o sistema de controle, relataram ter resultados satisfatórios na redução do consumo de energia elétrica. Com estas considerações, este trabalho adapta estas metodologias para desenvolver uma metodologia baseada na estratégia de controle *ON/OFF* convencional, porém, considerando o comportamento do usuário, para ser aplicada em um refrigerador de bebidas do tipo direto, visando minimizar o consumo de energia elétrica e assim atender uma das considerações que o IIR propõe para os sistemas de refrigeração.

Tabela 2.1 – Principais referências bibliográficas usadas nesta pesquisa. Fonte: Autor.

Autor	Tipo de sistema	Sistema de controle	Principais resultados
Afonso; Gabriel (2014).	Refrigerador de bebidas do tipo indireto (Banco de gelo)	<ul style="list-style-type: none"> ● Controle <i>ON/OFF</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ Camada de gelo de 25 kg -10 kg ↓ CE Controle de forma intermitente
Belman-flores et al (2019).	Refrigerador doméstico	<ul style="list-style-type: none"> ● Controle tecnologia inverter ● Controle adaptativo híbrido fuzzy 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ 3 % CE² ↓ Corrente de partida ↓ 10 % tempo pulldown
Maderić; Pavković;Lenić (2019).	Refrigerador de bebidas do tipo indireto (Banco de gelo)	<ul style="list-style-type: none"> ● Controle <i>ON/OFF</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ 48 % CE modo <i>Standby</i> ↓ 15 % CE com relé de banco de gelo
Chou et al (2022).	Refrigerador de bebida (bebedouro)	<ul style="list-style-type: none"> ● Controle <i>ON/OFF</i> baseado no usuário. ● Redes neurais recorrentes 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ 28 % CE ↑ 97 % Nível de serviço
Kapici; Kutluay; Izadi-zamanabadi (2022).	Refrigerador doméstico	<ul style="list-style-type: none"> ● Controle com tecnologia inverter ● Machine Learning ● Controle <i>ON/OFF</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ 2,5 % CE Ativo ↓ 4,5 % CE Inativo
Rodríguez-Valderrama et al (2023).	Refrigerador doméstico	<ul style="list-style-type: none"> ● Controle logica fuzzy no ventilador do evaporador. 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ 1,7 % CE (vazia) ↓ 9,5 % CE (carga térmica)
Presente trabalho (2023).	Refrigerador de bebidas do tipo direto	<ul style="list-style-type: none"> ● Controle <i>ON/OFF</i> com referência variável baseado no usuário. 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ 18,4 % CE ↓ 18,2 % Custos ↓17, 7% TEWI³ ↓~100 N° de ligações

²CE refere-se ao consumo de energia elétrica.³TEWI é o impacto total do aquecimento global.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada uma descrição geral da bancada experimental, sua localização em campo, instrumentação e sistema de aquisição de dados usadas para atingir os objetivos propostos neste estudo, na sequência, é apresentado o método de teste para avaliação da capacidade e eficiência energética de equipamentos de distribuição de pré-misturas e pós-misturas de bebidas proposto pela norma 32.2 de 2018 (ASHRAE, 2018). Além disso, é exibida a metodologia aplicada pelo autor (CHOU et al., 2022) a qual foi parcialmente usada como referência neste trabalho. Por fim, é apresentada a nova estratégia de controle proposta com o intuito de ter uma redução de consumo de energia no refrigerador de bebida do tipo direto (RB), o método para determinar os impactos diretos e indiretos do RB e finalmente os custos que consumiria o RB, se trabalhasse com o controle convencional e o controle proposto nas regiões do Brasil.

3.1 Bancada experimental

Na Figura 3.1 é apresentado o desenho esquemático da bancada experimental, nesta figura é mostrado os principais componentes do RB (compressor, condensador, evaporador e dispositivo de estrangulação) e a instrumentação (sensores de temperatura, pressão, corrente, tensão e vazão) utilizada para o monitoramento do sistema. Esta bancada foi modificada no Laboratório de Energia, Sistema Térmicos e Nanotecnologia (LESTnano) da Universidade Federal de Uberlândia.

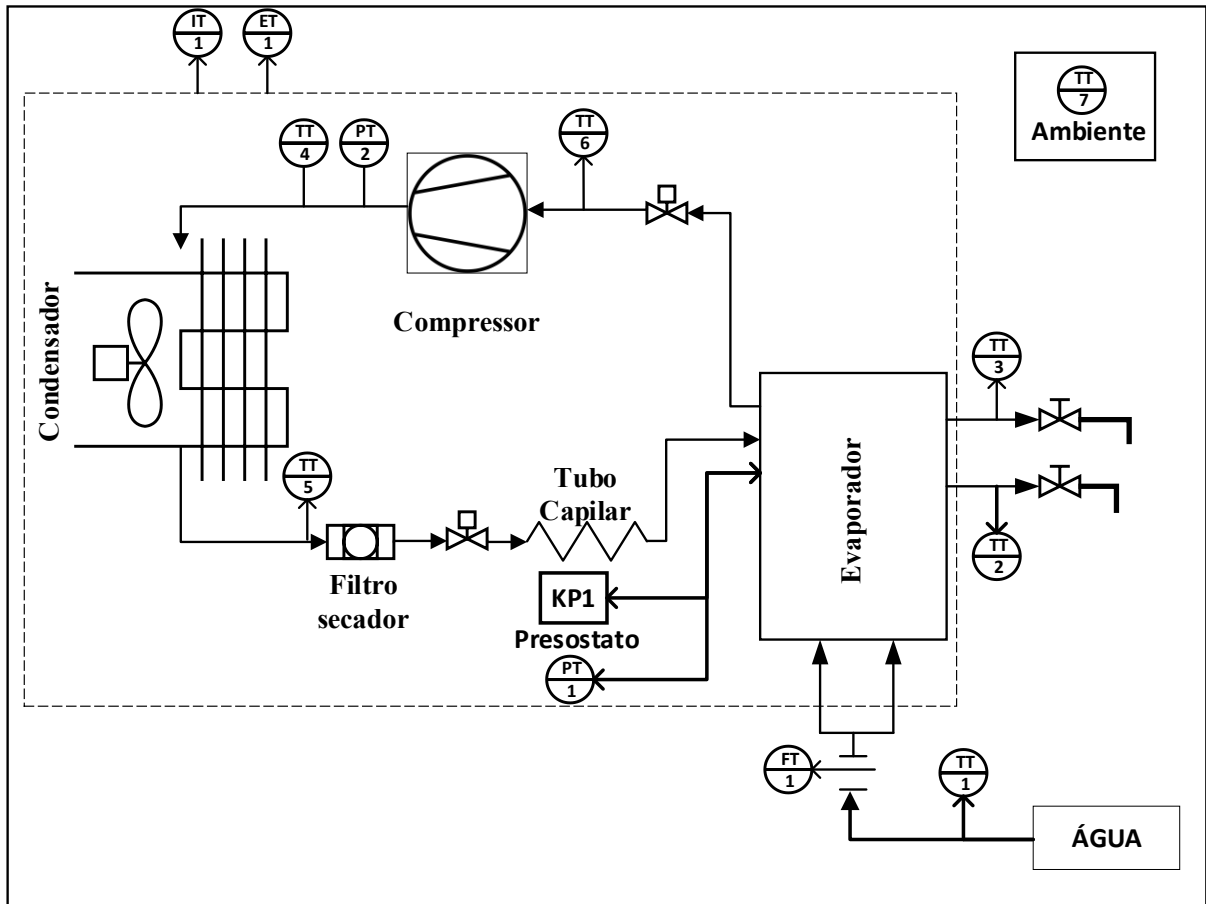


Figura 3.1 – Desenho esquemático bancada experimental. Fonte: Autor.

Um dos principais componentes da bancada experimental é o compressor alternativo de tipo hermético (AE4470E-ES3C, *Tecumseh*) o qual é encarregado de fazer o incremento da pressão de evaporação até a de condensação. Este compressor foi projetado para trabalhar com um único fluido refrigerante (R-22) em uma faixa de temperatura de evaporação (T_e) e condensação (T_c) de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

O condensador é encarregado de realizar a mudança de fase do fluido refrigerante e rejeitar o calor absorvido durante o funcionamento (calor retirado da bebida e calor do compressor). O sistema de refrigeração também é composto por um condensador refrigerado a ar do tipo tubo-aleta e a vazão de ar necessária para o funcionamento desse componente foi induzida através do ventilado (N20/834, ELCO). Além disso, o RB usa um tubo capilar como dispositivo de estrangulamento, encarregado de reduzir a pressão do fluido refrigerante até a pressão de evaporação a baixa temperatura.

O refrigerador de bebidas do tipo direto faz parte da família dos resfriadores de expansão direta e sua principal diferença é o evaporador do tipo inundado, em que uma serpentina de aço, pela qual circula a bebida, encontra-se imersas num fluido refrigerante na fase líquida, esta construção tem duas funções: (1) realizar a troca de calor entre o fluido refrigerante e a bebida e (2) armazenar energia térmica no evaporador durante o estado de desligado, evitando assim uma taxa de funcionamento elevada.

Tabela 3.1 – Características principais do refrigerador de bebidas do tipo direto. Fonte: (MEMO, 2022).

Características do refrigerador de bebidas	Referência
Refrigerante	R-22
Tensão	220 V
Consumo nominal	1450 W
Controle	Pressostato
<i>Setpoint</i> trabalho	4,57 bar (pressão manométrica)
Vazão nominal	70 l·h ⁻¹
Evaporador	Tipo inundado
Quantidade torneiras	2

Na Figura 3.2 é apresentado o RB usado para coletar os dados em campo. A bancada ficou localizada no primeiro andar do bloco 1M da Universidade Federal de Uberlândia. O refrigerador de bebidas foi instalado neste lugar, porque é a parte do prédio onde tem um maior fluxo de pessoas, e devido à proximidade do local de armazenamento de dados.

O sistema de aquisição de dados coleta e salva as informações do RB de: consumo de energia elétrica, consumo de bebida, hora e a data em que a bebida foi liberada, pressões, temperaturas (internas do RB, ambiente e da bebida).

A coleta de dados foi efetuada desde o dia 12/09/2022 até 07/12/2022, incluindo dias, feriados e finais de semana. Na Tabela 3.1 estão descritas as principais características do RB com as quais o sistema trabalhou.



Figura 3.2 – Refrigerador de bebidas do tipo direto. Fonte: Autor.

3.2 Instrumentação e sistema de aquisição

O RB foi totalmente instrumentado com objetivo de conhecer seu comportamento durante o tempo de funcionamento. Para isso, foram necessários 7 sensores temperatura de tipo termistores (NTC), localizados da seguinte forma: NTC1 na entrada da bebida, NTC2 na saída da torneira um, NTC3 na saída da torneira dois, NTC4 na descarga do compressor, NTC5 na saída do condensador, NTC6 na sucção do compressor e NTC7 monitora a temperatura ambiente. Além disso, o sistema tem um sensor de vazão, para medir a quantidade de bebida liberada, além de dois sensores de pressão localizados na sucção e descarga do compressor e por último, um sensor de corrente e tensão para monitorar o consumo de energia elétrica da máquina, conforme pode ser observado no esquema da Figura 3.1.

O sistema de aquisição de dados foi realizado no *software* Arduino, no qual foi implementado o código que permitiu a leitura dos dados dos sensores mencionados acima. Foi utilizado o método de programação baseado em máquinas de estado, em que dependendo das condições, o programa executa uma rotina, cuja estrutura e sequência de execução é mostrada no Apêndice I.

O sistema de aquisição usado para coletar as informações da bancada experimental foi uma placa de referência Arduino Mega 2560, trabalhando em conjunto com uma placa ESP32 e conectadas via comunicação serial. Estas placas coletam a informação proveniente do refrigerador de bebidas (Arduino mega) e envia os dados de forma codificada para um servidor

local por meio do protocolo WIFI (ESP32). No caso de ter um erro no envio da informação no protocolo de comunicação, a informação é salva em um armazenamento auxiliar (MicroSD). Neste servidor local foi criada uma base de dados para armazenar as informações dos sensores e a informação sobre o sistema de controle. Este sistema de aquisição de dados é mostrado na Figura 3.3, em que pode ser observado que o fluxo de informação é enviado bidireccionalmente, do RB (parte A) para as placas de aquisição (parte B) e base de dados (parte C) ou vice-versa, dependendo das condições do sistema.

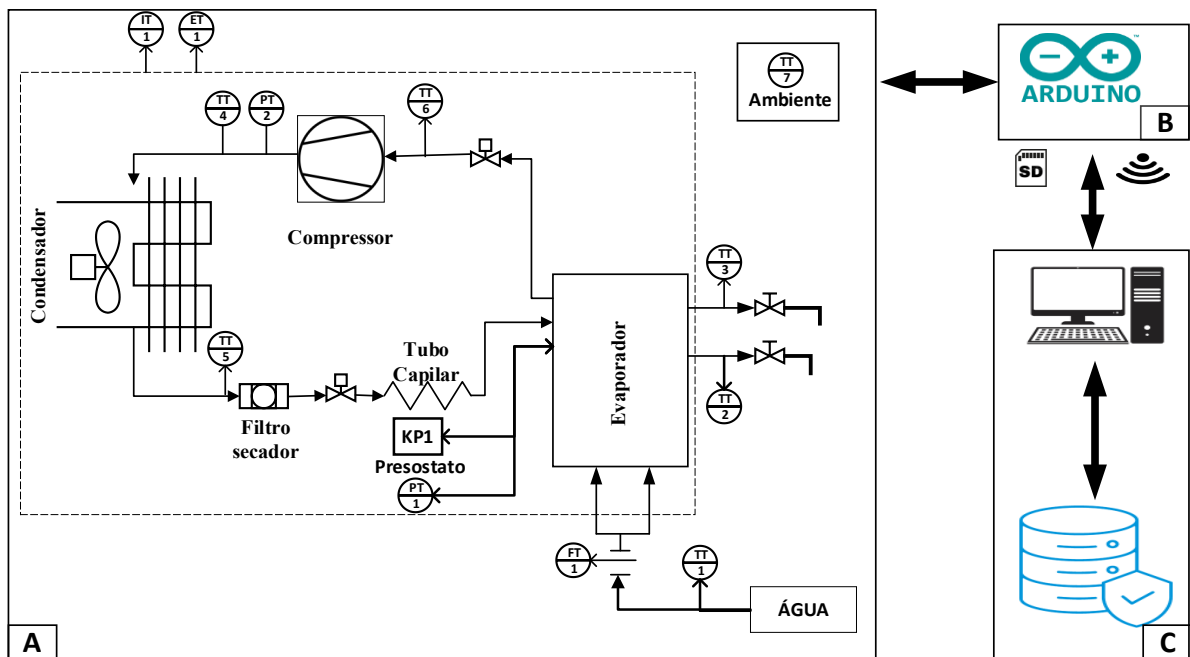


Figura 3.3 – (A) Diagrama geral do refrigerador de bebidas do tipo direto; (B) Sistema de aquisição de dados; (C) Base de dados. Fonte: Autor

O *software* que permitiu criar o servidor local e a base de dados foi a plataforma XAMPP, de acesso livre. Dentro desta plataforma encontram-se vários módulos (Apache, MySQL, FileZilia, Mercury e Tomcat), sendo cada um encarregado de uma tarefa diferente. Na base de dados foram criadas três tabelas, cada uma com uma finalidade diferente. A primeira para armazenar todos os dados adquiridos da bancada experimental, a segunda para armazenar os dados do sistema de controle e a terceira para configurar o *Setpoint* de trabalho do refrigerador de bebidas do tipo direto.

Todas as características dos sensores instalados no RB são apresentadas na Tabela 3.2. Nesta tabela é mostrada a referência de cada sensor, alimentação, tipo de sinal, faixa de trabalho e incerteza determinadas através do *software* EES®. Além disso, são exibidas as principais características das placas usadas para a aquisição de dados e a quantidade de entradas utilizadas.

3.2.1 Caracterização de sensores

A maioria dos sensores usados para coletar os dados da bancada experimental tem comportamento linear, para sua respectiva faixa de trabalho, de acordo como as informações fornecidas pelo fabricante. Foi realizada uma caracterização para verificar esta linearidade e encontrar uma correlação que represente dito comportamento. Todos os modelos serão avaliados pela métrica de coeficiente de correlação (R^2), que apresenta valores entre 0 e 1, quanto maior o valor, melhor o modelo se ajusta aos dados. Este coeficiente é determinado pela Eq.(3.1). Além disso, foram avaliadas as correlações com métricas baseadas no erro do modelo com o Erro Absoluto Médio (MAE), calculado com a Eq.(3.8) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) determinada pela Eq.(3.9).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})} \quad (3.1)$$

em que \hat{y}_i é o valor medido, \bar{y} refere-se média do valor medido, y_i é o valor predito e n refere-se ao número de amostras.

Os sensores de temperatura (termistores) tem um comportamento não linear devido às características do termistor, por isso a equação de calibração deve seguir um modelo matemático adequado com um número específico de parâmetros individuais (RUDTSCH; VON ROHDEN, 2015). Neste estudo foi utilizada uma equação recomendada por muitos fabricantes e proposta por (STEINHART; HART, 1968), conforme a Eq.(3.2). É recomendado usar $n = 3$ como constante ($C=0$, $A, B, D \neq 0$), uma vez que o desempenho do modelo apresenta resultados satisfatórios para essa configuração. O procedimento para determinar as constantes restantes (A, B e D) é apresentado no Apêndice V.

$$\frac{1}{TM} = A + B \cdot \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) + C \cdot \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)^2 + D \cdot \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)^3 + \dots + K_n \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)^n \quad (3.2)$$

em que A, B e D referem-se as constantes do modelo de Steinhart-Har, derivados de três pontos de ensaio, TM (K) temperatura medida, e a relação R/R_0 é a resistência medida durante cada ensaio.

Tabela 3.2 – Características principais da instrumentação e do sistema de aquisição de dados do refrigerador de bebidas do tipo direto. Fonte: Autor.

Instrumentação					
Tipo de sensor	Referência	Tipo de sinal	Alimentação	Faixa de trabalho	Incerteza
Temperatura	NTC 10K	Analógica	3,3 ou 5 VDC	-20 – 120 °C	$\pm 1,11^{\circ}\text{C}$
Vazão de água	YF – S402	Digital	5 – 12 VDC	0,3 – 6 $l \cdot \text{min}^{-1}$	$\pm 0,23 l \cdot \text{min}^{-1}$
Corrente	ACS712	Analógica	5 – 8 VDC	$\pm 20 \text{ A}$	$\pm 0,25 I_{AC}$
Tensão	AC ZMPT101B	Analógica	5 VDC	0 – 250 VAC	$\pm 10,23 V_{AC}$
Pressão	SPKT0013R0	Analógica	0 – 5 VDC	1 – 9,3 bar	0,14 bar
Pressão	SPKT0043R0	Analógica	0 – 5 VDC	0 – 17,3 bar	0,17 bar
Placas de aquisição de dados					
Tipo de placa	Referência	Quantidade entradas usadas	Quantidade saídas usadas	Alimentação	
Arduino mega	ATmega2560	11 Analógicas 4 Digitais	8 Digitais	7 – 12 VDC	
ESP	ESP-WROOM-32	0	2 Digitais	4,5 – 12 VDC	

3.3 Métodos de teste para dispensadores de bebidas

Na atualidade, os refrigeradores de bebidas possuem normas para serem avaliados, com o objetivo de conhecer sua capacidade de refrigeração e eficiência. Uma de estas normas é a proposta pela Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado (ASHARE, do inglês American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). A norma 32.2-2018 especifica métodos uniformes de teste para classificar a capacidade e eficiência energética de equipamentos de bebida do tipo pré-mix e pós-mix (ASHRAE, 2018).

O tipo de dispensador é definido pela forma que a bebida é fornecida no refrigerador, quando a bebida entra em forma de xarope e é misturada no aparelho com água ou água carbonata, o sistema é conhecido como refrigerador de bebidas pós-mix, quando a bebida entra no refrigerador pronta para o consumo, fornecida por um fabricante o sistema é conhecido como refrigerador de bebidas pré-mix, que é o alvo de estudo.

A norma 32.2-2018 inicialmente apresenta as condições de teste padrão para realizar os testes, tais como temperatura ambiente, temperatura da sala, umidade relativa. Em seguida, é proposto o teste de consumo de energia em modo de espera, cujo objetivo é conhecer o consumo de energia quando o refrigerador não tem liberação de bebida. Na sequência, são ilustrados os procedimentos para realizar os testes padrão de desempenho da máquina, tais como: teste *Pulldown*, teste de capacidade padrão, teste de capacidade pico, teste casual de temperatura da bebida e um teste opcional para o teste de capacidade padrão, quando não pode ser alcançado as condições específicas do teste principal. A norma ainda apresenta tabelas com os dados principais de cada teste para serem preenchidas, com o intuito de ter um relatório dos equipamentos testados com base na norma ANSI/ASHARE STANDARD 32.2. Os testes mencionados acima vão ser descritos detalhadamente, em seguida conforme a norma ASHRAE 32.2. (2018).

3.3.1 Condições iniciais dos testes de desempenho para refrigeradores de bebidas do tipo direto

A norma ASHRAE 32.2, apresenta as especificações que devem ser consideradas para realizar cada tipo de teste as quais são exibidas na Tabela 3.3.

3.3.2 Teste de consumo de energia elétrica em STANDBY

O objetivo deste teste é conhecer o consumo de energia elétrica diária de um RB, quando trabalha em modo espera, cujo procedimento está resumido abaixo.

1. Medir a temperatura da bebida na entrada do RB;
2. Encher o RB e aguardar até que o equipamento fique estável. O sistema é considerado estável quando o sistema de refrigeração tiver três ciclos completos sucessivos.
3. Uma vez alcançada a estabilidade, o teste começa após do corte do compressor. O sistema deve registrar pelo menos uma vez por minuto durante pelo menos quatro horas consecutivas os seguintes dados: temperatura ambiente, umidade relativa, temperatura do produto, consumo de energia elétrica, tensão de entrada, porcentagem de tempo de execução e duração do teste;
4. O cálculo do consumo de energia elétrica diário do RB em modo Standby é calculado pela Eq.(3.3);

$$E_D = \frac{E_{ST}}{t_{ST}} \cdot 24 \quad (3.3)$$

em que E_{DST} (kVAh) refere-se ao consumo nominal de energia elétrica por dia, E_{ST} (kVAh) é a energia elétrica consumida durante o teste, t_{ST} (h) é a duração do teste e 24 é o número de horas diárias.

5. Por último, é realizado um relatório com os seguintes dados: temperaturas médias do ambiente e da bebida, umidade relativa, energia elétrica consumida duração do teste e consumo nominal de energia por dia.

Tabela 3.3 – Condições padrões de teste. Fonte: (ASHRAE, 2018)

Condições de teste	Teste de consumo de energia em espera (<i>Standby</i>)	Teste padrão de descida inicial (Pulldown)	Teste de desempenho em alta temperatura	Teste de desempenho de temperatura ambiente	Teste de desempenho para uma temperatura extremamente alta
Temperatura ambiente					
Temperatura da. sala (A)	$23,9 \pm 1^\circ\text{C}$	$23,9 \pm 1^\circ\text{C}$	$32,2 \pm 1^\circ\text{C}$	$23,9 \pm 1^\circ\text{C}$	$40 \pm 1^\circ\text{C}$
Temperatura alta. (B)	$32,2 \pm 1^\circ\text{C}$	$32,2 \pm 1^\circ\text{C}$			
Umidade relativa	$45 \pm 5\%$ (A)	$75 \pm 5\%$	$75 \pm 5\%$	$45 \pm 5\%$	$75 \pm 5\%$
	75% (B)				
Temperatura média pré-mix, água e xarope	$2,2 \pm 1^\circ\text{C}$	$23,9 \pm 1^\circ\text{C}$ (A)	$32,2 \pm 1^\circ\text{C}$	$23,9 \pm 1^\circ\text{C}$	$40 \pm 1^\circ\text{C}$
		Temperatura de entrada			

3.3.3 *Teste de desempenho do refrigerador de bebidas do tipo direto.*

Nesta etapa, a norma ASHRAE 32.2 indica como determinar o consumo de energia do RB durante o desligamento inicial, conhecido como teste de *Pulldown*. Além disso, são propostos os testes de capacidade padrão, capacidade pico e teste casual de temperatura da bebida. Esta série de testes tem o intuito de conhecer o consumo de energia e a capacidade do RB.

3.3.3.1 *Teste padrão de decida inicial (Pulldown)*

1. O equipamento tem que ser preenchido com a bebida e se deve permitir estabilizar o sistema com as condições de teste estipuladas na Tabela 3.3;
2. Com o sistema estabilizado, o teste inicia e deve ser registrado os seguintes dados: temperatura ambiente, estado de controle de refrigeração, tensão de entrada e consumo de energia elétrica. O registro dos dados deve ser feito como período máximo de um minuto;
3. O teste de pulldown deve ser considerado completo quando o RB realiza o primeiro desligamento pelo sistema de controle. No corte inicial o tempo até o primeiro desligamento deve ser registrado;
4. Apresentar um relatório com os seguintes dados: média da temperatura ambiente e da umidade relativa, configuração do sistema de controle, tempo desde o início do teste até o primeiro desligamento do RB, média da tensão de entrada e energia elétrica consumida durante o teste.

3.3.3.2 *Teste de capacidade padrão*

O teste de capacidade padrão estabelece uma vazão de $44,4 \pm 2,2 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$ para o RB pré-mix. Devido à falta de um equipamento capaz de fornecer esta vazão, foi preciso realizar o teste opcional proposto pela norma.

No teste alternativo, foi definido um novo tamanho da bebida padrão (300 ml), calculado com base na vazão máxima ($24,5 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$) disponível no laboratório, para atingir a capacidade estipulada pelo fabricante $19,44 \text{ ml/s}$ ($70 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$). O procedimento para realizar o teste é mostrado em seguida.

1. Após pelo menos duas horas de operação em modo espera ou três ciclos de refrigeração completos (o que tiver maior duração) e após de verificar as

condições estabelecidas na Tabela 3.3, é iniciado o teste depois do ciclo normal de refrigeração. A taxa de liberação deve ser de quatro bebidas padrão por minuto. No início do teste tem que ser registrado os seguintes dados, pelo menos uma vez por minuto até que o teste seja concluído: temperatura ambiente, umidade relativa, estado de controle do RB, tensão de entrada e consumo de energia elétrica;

2. A liberação da bebida deve para quando as temperaturas das quatro bebidas liberadas em um minuto alcançarem 7,2 °C ou no caso dos resfriadores a gelo, após de dez sequências de liberação. A quantidade de bebidas à temperatura de 4,4 °C ou mais frias deverá ser registrada. Para unidades que tem mais de um circuito, a sequência de liberação será 1, 2, 3, 4, ..., N, 1, 2, 3, 4, ..., N, sendo N número de circuitos do RB. No presente trabalho, o sistema possui dois circuitos, por isso a sequência de liberação é 1, 2, 1, 2, ...;
3. A quantidade total de bebida liberada deve ser medida e tem que ficar dentro de $\pm 2\%$ do volume total, determinado pela Eq.(3.4);

$$V_{TCP} = V_{PCP} \cdot NT_{BCP} \quad (3.4)$$

em que, V_{TCP} (ml) refere-se ao volume total de bebida, V_{PCP} (ml) é o volume padrão da bebida e NT_{BCP} é o número total de bebidas.

4. Para finalizar, os seguintes dados devem ser relatados: média da temperatura ambiente, média da umidade relativa, número de bebidas extraídas, volume total extraído, número de bebidas padrão com temperatura menor ou igual a 4,4 °C, consumo de energia elétrica durante o teste, tempo de liberação da bebida e o tempo de recuperação.

3.3.3.3 Teste casual de temperatura da bebida

Neste teste o objetivo é medir a temperatura da bebida quando é liberada ocasionalmente e assim verificar se fica no limite estabelecido pela norma ASHRAE 32.2. O procedimento é descrito abaixo.

1. Após de pelo menos duas horas de trabalhar em modo espera ou três ciclos de refrigeração (o que tiver maior duração), é escolhido um circuito para fazer a liberação da bebida, no caso circuito 1;

2. É liberada uma bebida padrão do circuito selecionado. Após de 15 minutos, mais uma bebida é liberada do mesmo circuito. 30 minutos depois que a segunda bebida for liberada, uma bebida adicional é extraída do mesmo circuito e finalmente 60 minutos depois da terceira bebida extraída, uma bebida final é retirada do mesmo circuito;
3. Por fim, é realizado um relatório com os seguintes dados: média da temperatura ambiente e média da umidade relativa, temperatura de cada bebida liberada e energia elétrica consumida durante o teste.

3.3.4 Métrica de eficiência energética

A norma ASHARE 32.2, apresenta a Eq.(3.5) que estima o consumo de energia diária total (E_{DT}) conforme o consumo de energia elétrica dos testes apresentados anteriormente.

$$E_{DT} = 2 \cdot EC_{TCP} + EC_{TSB} \cdot (24 - 2 \cdot t_{TCP}) \quad (3.5)$$

em que EC_{TCP} refere-se à energia consumida no teste de capacidade padrão, EC_{TSB} é a energia consumida no teste de *Standby* por hora e t_{TCP} é o tempo de duração do teste de capacidade padrão em horas.

3.3.5 Intervalo de confiança

O intervalo de confiança (IC) é uma medida de imprecisão do efeito real na população de interesse. Quanto menor é o intervalo de confiança, maior é a certeza de que a estimativa baseada na amostra de estudo representa o verdadeiro tamanho do efeito na população de interesse. O intervalo de confiança mais usado na literatura é de 95 %, no entanto, é possível escolher outro intervalo para ter maior ou menor confiança (PATINO; FERREIRA, 2015).

Antes de determinar o intervalo de confiança é preciso verificar a normalidade do conjunto de dados analisados, para isso é realizado o teste estatístico de Shapiro-Wilk, o teste realiza o cálculo do “valor p” de um determinado conjunto de dados e com base neste valor é decidido se a amostra segue uma distribuição normal ou não (SHAPIRO; WILK, 1965).

O teste estatístico de SHAPIRO-WILK realiza a toma da decisão baseado em um teste de hipótese, onde a hipótese de nulidade é que os dados seguem uma distribuição normal e a hipótese alternativa é que os dados não seguem uma distribuição normal. Se o “valor p” calculado é maior que o nível de significância (α) é aceita a hipótese de nulidade, pelo que se

teria um nível de confiança para afirmar que, os dados seguem, aproximadamente, uma distribuição normal.

O teste de SHAPIRO-WILK, foi realizado a traves de *python* e o intervalo de confiança foi determinado de acordo como o procedimento apresenatdo no Apêndice II.

3.4 Processamento de dados

Como o intuito deste trabalho é desenvolver uma estratégia de controle baseada no comportamento do usuário, é fundamental selecionar o conjunto de dados adequado que represente dito comportamento. Para esse procedimento, conforme foi mencionado na seção 3.2, os dados adquiridos da bancada experimental são armazenados em uma tabela localizada em uma base de dados, criada por meio de um servidor local, cuja configuração é apresentada na Figura 3.4 e contém o registro dos dados desde o dia 12/setembro/2022 até o dia 08/dezembro/2022, tendo um total de 151453 registros salvos de forma cronológica.

Na tabela apresenta na Figura 3.4 tem-se a variável, data e hora em que os dados foram salvos, vazão da água ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) que circula através do RB no momento da liberação da bebida, os dados referentes à corrente e a tensão da máquina quando estava em operação, os dados de pressão do compressor tanto de sucção (PB) como de descarga (PA) e o registro dos dados de temperaturas da bebida, temperatura ambiente e temperaturas do sistema de refrigeração.

#	Nome	Tipo	Agrupamento (Collation)	Atributos	Nulo	Predefinido	Comentários	Extra	Acções
<input type="checkbox"/>	1 No	int(11)			Não	Nenhum		AUTO_INCREMENT	Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	2 DATA	text	utf8_general_ci		Não	Nenhum	DD/MM/AA		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	3 HORA	text	utf8_general_ci		Não	Nenhum	HH:MM:SS		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	4 VAZÃO DE ÁGUA	float			Não	Nenhum	ml/s		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	5 CORRENTE	float			Não	Nenhum	A_RMS		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	6 TENSÃO	float			Não	Nenhum	V_RMS		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	7 PB	float			Não	Nenhum	bar		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	8 PA	float			Não	Nenhum	bar		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	9 NTC1	float			Não	Nenhum	°C		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	10 NTC2	float			Não	Nenhum	°C		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	11 NTC3	float			Não	Nenhum	°C		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	12 NTC4	float			Não	Nenhum	°C		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	13 NTC5	float			Não	Nenhum	°C		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	14 NTC6	float			Não	Nenhum	°C		Muda Eliminar Mais
<input type="checkbox"/>	15 NTC7	float			Não	Nenhum	°C		Muda Eliminar Mais

Figura 3.4 – Estrutura da tabela de armazenamento dos dados experimentais. Fonte: Autor.

Para conhecer o comportamento do usuário referente ao consumo de bebida, é imprescindível saber o horário e a quantidade de bebida liberada. Para isso, foi escolhido de todo o conjunto de dados mencionados anteriormente as variáveis data, hora e vazão de água, além, das variáveis de corrente e tensão para calcular consumo de energia da máquina durante todo o tempo de trabalho. Os demais dados ficaram disponíveis para futuras pesquisas, que permitam otimizar o funcionamento do refrigerador de bebidas do tipo direto.

O novo subconjunto de dados foi salvo de hora em hora seguindo a metodologia de (CHOU et al., 2022) e posteriormente empregado para identificar o padrão de consumo do usuário.

3.5 Análise de séries temporais

Considera-se uma série temporal um conjunto de observações sobre uma variável de interesse ordenada no tempo com registros em períodos regulares (PICKERING et al., 2018). Neste estudo será realizada a análise da série temporal desde o ponto de vista clássico, com o objetivo de encontrar um período, em que o RB não tenha liberação de bebida (consumo de bebida igual zero) e que seja um período repetitivo, pois, com esta informação pretende-se desenvolver uma estratégia de controle que permita diminuir o consumo energia elétrica.

Em uma análise clássica, a série temporal está conformada de quatro padrões: tendência (T) que representa o comportamento a longo prazo, variações cíclicas (C), flutuações nos valores da variável de interesse que possuem duração superior a um ano e se repetem com certa periodicidade, variações sazonais ou sazonalidade (Z) que representa as flutuações na variável de estudo com duração inferior de um ano e que se repetem periodicamente e por último, as variações irregulares (I) as quais são as flutuações de característica desconhecida e inesperada presentes na variável estudada (PICKERING et al., 2018). Cabe ressaltar que não sempre são encontrados todos os quatro padrões na análise da série temporal, por depender de como foi feito o registro de dados. Neste estudo, como os dados foram coletados em um período inferiores a um ano, não estará presente a componente de variações cíclicas (C).

Os modelos clássicos podem ser analisados de duas formas: modelo aditivo (M_A) ou modelo multiplicativo (M_M). No modelo aditivo todas as componentes da série são somadas conforme ao mostrado na Eq.(3.6), enquanto, no modelo multiplicativo todas as componentes são multiplicadas conforme o exibido na Eq.(3.7). Para saber qual modelo aplicar, deve-se

conhecer quais padrões a série temporal possui, pois, nem sempre a série apresenta os componentes citados acima.

Desta forma, foi realizado o processo de decomposição sazonal presente no *software* SPSS (do inglês, Statistical Package for the Social Science), para identificar os padrões da série e escolher o modelo com menor erro.

A literatura de análise de séries temporais recomenda usar medidas de acuracidade estáticas e assim avaliar o ajuste de uma previsão aos dados reais, por meio de cálculos de médias das diferenças (erros) (MAKRIDAKIS; WHEELWRIGHT; HYNDMAN, 1998). As métricas de avaliação usadas neste estudo foram o Erro Absoluto Médio (MAE), calculado com a Eq.(3.8) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), determinada pela Eq.(3.9). O melhor modelo será o que apresenta o valor mais próximo de zero.

$$Y_t = T_t + Z_t + I_t \quad (3.6)$$

$$Y_t = T_t \cdot Z_t \cdot I_t \quad (3.7)$$

em que, Y_t representa o valor da série temporal predita, T_t é a componente de tendência, Z_t é o componente de sazonal ou índice sazonal e I_t refere-se as variações irregulares da série temporal.

$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n |e_t| \quad (3.8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (3.9)$$

em que e_t é a diferença entre o valor real e o valor predito pela série.

3.5.1 Análise de séries temporais no SPSS

O *software* estatístico SPSS tem uma opção para a análise de séries temporais. Dentre as ferramentas que o *software* oferece, será utilizada a decomposição sazonal para determinar as componentes presentes na série e o método de médias móveis (MA) para determinar a tendência. O procedimento realizado pelo *software* pode ser descrito da seguinte forma.

3.5.1.1 Método de médias móveis

O método de médias móveis (MA do inglês, Moving Averages) calcula a média de um período em específico, excluindo a observação mais antiga e incluído a próxima observação. O MA calcula a média dos períodos da série de forma cronológica até que o ciclo seja computado em cada observação para todos os elementos disponíveis. Neste procedimento sempre serão descartados os dados no início e o final da série calculada, e a quantidade de valores ausentes dependerá do período (k) definida pelos dados observados. Se k for par, o número de valores omitidos será de $k/2$, se k for ímpar os valores ausentes seriam de $(k-1)/2$. O valor do período da série k define a ordem da série, por isso, uma análise feita através do método de médias móveis, para um período determinado, pode ser denotada como kMA . Sendo k a ordem da série e MA o método de médias móveis. Quando o período k é ímpar, o valor da tendência em um período específico é determinado pela Eq.(3.10) (MAKRIDAKIS; WHEELWRIGHT; HYNDMAN, 1998).

$$T_t = \frac{1}{k} \sum_{j=-m}^m Y_{t+j} \quad (3.10)$$

em que T_t faz referência ao valor da tendência em um determinado tempo (t), k é o valor do período em estudo, m é definido como a largura média e indica os valores da série observada que serão usados para calcular o valor do instante de tempo (t) e Y_{t+j} indica o valor da série observada a ser usada para o cálculo. O valor da largura média (m) é determinado pela Eq.(3.11).

$$m = \frac{(k - 1)}{2} \quad (3.11)$$

Se o período k é par, não existirá um período central que coincida com os dados da série observada. Para poder encontrar este período, é calculado uma média móvel adicional de dois períodos. O procedimento é apresentado na Tabela 3.4 e é conhecido na literatura como média móvel centralizada, cujo acrônimo é $2 \cdot kMA$. (MAKRIDAKIS; WHEELWRIGHT; HYNDMAN, 1998).

Na Tabela 3.4 é apresentado um exemplo para uma MA de ordem 4 (4MA), onde a terceira coluna é determinada através da Eq.(3.12). Pode ser observado que o primeiro cálculo

($T_{2,5}$) não tem equivalência com os períodos da série observada, porém, fica entre o período dois e três. Para esse caso, é usada uma segunda média móvel de dois períodos (2 4MA), para encontrar o período equivalente no valor observado, aplicando a Eq.(3.13). Este procedimento é realizado iterativamente até determinar todos os valores presentes na série temporal.

$$T_{2,5} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{4} \quad (3.12)$$

$$T_3 = \frac{T_{2,5} + T_{3,5}}{2} \quad (3.13)$$

Tabela 3.4 – Procedimento de média móvel centralizada (2 k MA). Fonte: Autor.

Dados observados	Período	k MA	$2 \cdot k \cdot MA$
Y_1	1	-----	-----
-----	1,5	-----	-----
Y_2	2	-----	-----
-----	2,5	$T_{2,5}$	-----
Y_3	3	-----	T_3
-----	3,5	$T_{3,5}$	-----
Y_4	4	-----	T_4
-----	4,5	$T_{4,5}$	-----
Y_5	5	-----	T_5
-----	5,5	$T_{5,5}$	-----
Y_6	6	-----	T_6
-----	6,5	$T_{6,5}$	-----
Y_7	7	-----	T_7
-----	7,5	$T_{7,5}$	-----
Y_8	8	-----	T_8
-----		
....
....

3.5.1.2 Decomposição sazonal

A decomposição sazonal é um procedimento que retira as componentes presentes em uma série temporal para saber se existe influência das componentes cíclicas ou sazonais. Uma vez obtida a tendência da série temporal, é determinado o tipo modelo a usar (Eq.(3.6) ou Eq.(3.7)) para realizar a decomposição sazonal, pois, a interpretação dos índices sazonais difere e o procedimento de cálculo depende do modelo selecionado.

Para o modelo multiplicativo da Eq.(3.7) o índice sazonal é um fator pelo qual a série é ajustada sazonalmente e multiplicada para gerar a previsão. O valor 1 indica que não existe sazonalidade no período concreto. O *software* SPSS realiza a determinação dos índices sazonais usando o método de *ratio-to-moving-average* cujo procedimento é o seguinte:

1. Determinar a componente de tendência conforme a seção 3.5.1.1;
2. Computar a relação (R_t) entre a valor observado e o valor da tendência conforme a Eq.(3.14);

$$R_t = \frac{Y_t}{T_t} = \frac{Z_t \cdot T_t \cdot I_t}{T_t} = Z_t \cdot I_t \quad (3.14)$$

3. Calcular a mediana de cada período (exemplo, se tem uma série temporal com um período semanal separado por horas da semana (168 h), determinar a mediana da relação R_t de cada hora ao longo de todo o conjunto de dados);
4. Determinar a média total de todas as medianas presentes na série. No caso do exemplo anterior, deve-se determinar a média de todas a medianas dos 168 períodos conforme a Eq.(3.15);

$$Média_{total} = \frac{Mediana_{h1} + Mediana_{h2} + \dots + Mediana_{h167} + Mediana_{h168}}{k} \quad (3.15)$$

em que $Mediana_{h_x}$ representa a mediana de cada período presente na série e k é o número de períodos ou ordem da série;

5. Computar o fator sazonal (FZ_t) de cada período de acordo com a Eq.(3.16).

$$FZ_t = \frac{Mediana_t}{Média_{total}} \quad (3.16)$$

em que FZ_t refere-se ao fator sazonal em um período t específico.

Os valores das componentes sazonais são assumidos constantes ao longo do ano. A soma dos fatores sazonais no método multiplicativo tem que ser igual ao período em estudo, no caso do exemplo, igual ou aproximadamente 168. (IBM, 2021; MAKRIDAKIS; WHEELWRIGHT; HYNDMAN, 1998).

Para a determinação os fatores sazonais através do modelo aditivo proposto na Eq.(3.6), o procedimento é semelhante ao método multiplicativo, com a diferença que os fatores sazonais são somados ou subtraídos da série temporal. Um valor de zero indica que aquele período não possui componente sazonal. O procedimento para determinar os fatores sazonais é mencionado a continuação.

1. Determinar a componente de tendência de acordo com a seção 3.5.1.1;
2. Subtrair a componente de tendência dos valores observados de acordo como a Eq. (3.17);

$$Y_t - T_t = Z_t + I_t \quad (3.17)$$

3. Na análise clássica assume-se que todos os fatores sazonais são constantes ao longo do ano. Portanto, só é preciso calcular a média dos fatores sazonais para cada período da série. Usando o mesmo exemplo do método multiplicativo, deve-se determinar a média de cada hora específica da semana através da Eq. (3.18);

$$Média_{total} = \frac{(Z_t + I_t)_{Z1} + (Z_t + I_t)_{Z2} + (Z_t + I_t)_{Z3} + (Z_t + I_t)_{Z4} + \dots}{k} \quad (3.18)$$

4. Computar a média total por período usando os dados determinados no passo anterior, no caso do exemplo, calcular a média da semana (168 h) por meio da Eq.(3.19);

$$Média_{total} = \frac{Média_{t1} + Média_{t2} + Média_{t3} + \dots + Média_{t167} + Média_{t168}}{k} \quad (3.19)$$

5. Calcular o fator sazonal (FZ_t) de cada período através da Eq.(3.20).

$$FZ_t = \frac{Média_t}{Média_{total}} \quad (3.20)$$

A soma de todos os índices sazonais no método aditivo tem que ser aproximadamente zero. (IBM, 2021; MAKRIDAKIS; WHEELWRIGHT; HYNDMAN, 1998).

3.5.2 Validação do modelo baseado em horários de consumo e não consumo.

Uma vez determinado o tipo de modelo a ser utilizado (M_M ou M_A), deve-se realizar a fase de validação do modelo. Como o modelo realizou a previsão em períodos semanais (168 h), foi codificação o valor predito pela série temporal (VPST), em valores de 1 (não tem consumo) e 0 (tem consumo) de acordo com o procedimento da Figura 3.5. Os valores são codificados desta forma com o intuito de aplicar métricas de classificação, pois, o objetivo é encontrar um período repetitivo durante o transcurso da semana em que o sistema não tenha consumo de bebida. O mesmo sistema de codificação foi usado para os dados de validação e foram empregadas as métricas de acurácia, sensibilidade e especificidade para validar o modelo e categorizar o período do dia.

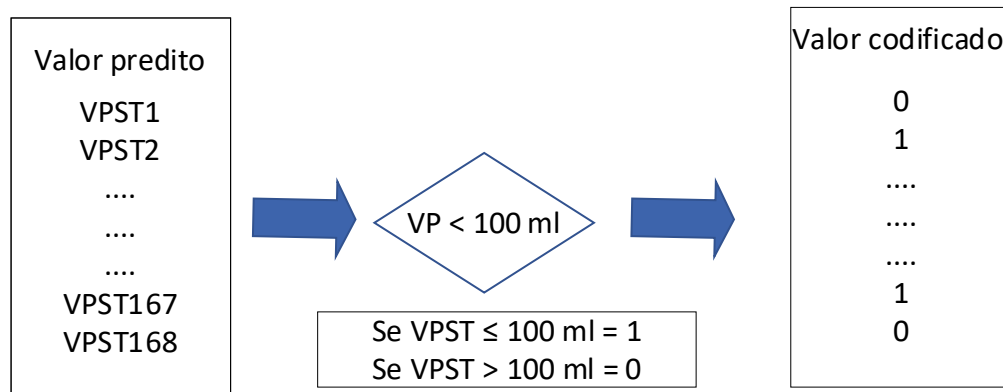


Figura 3.5 – Sistema de codificação baseado no consumo de bebida. Fonte: Autor.

Para visualizar os resultados do modelo em relação à categorização do período, foi usada a matriz de confusão apresentada na Figura 3.6. Esta é uma forma gráfica de representar o resultado da previsão. Desta figura é inferido as métricas de validação: acurácia (Eq.(3.21)) que avalia a porcentagem que o modelo acertou, de forma geral, sensibilidade (Eq.(3.22)) que mede a capacidade do modelo para classificações positivas, e a métrica de especificidade (Eq.(3.23)) que avalia a capacidade do modelo para detectar resultados negativos.

$$Acurácia = \frac{VP + VN}{Total\ de\ amostras} \quad (3.21)$$

$$Sensibilidade = \frac{VP}{VP + FN} \quad (3.22)$$

$$Especificidade = \frac{VN}{VN + FP} \quad (3.23)$$

em que VP refere-se ao verdadeiro positivo, VN é verdadeiro negativo, FN é falso negativo e FP refere-se ao falso positivo.

Estas métricas são usadas para categorizar se o período tem o não consumo de bebida, pois, se o modelo tem uma alta acurácia e sensibilidade, mas uma baixa especificidade, significa que o período não tem consumo, pois, o modelo estaria atingindo à classe positiva (1). Por outro lado, se o modelo apresenta uma alta acurácia e especificidade, mas uma sensibilidade oscilante, significa que aquele período tem consumo, pois o modelo estaria acertando os valores negativos (0).

		Valor predito		
		Falso	Verdadeiro	
Valor observado	Falso	VN	FP	
	Verdadeiro	FN	VP	
		Falso	Verdadeiro	

Figura 3.6 – Matriz de confusão. Fonte: Autor.

A matriz de confusão da Figura 3.6, apresenta quatro quadrantes, em que as linhas fazem referência aos valores observados e as colunas identificam os valores preditos e possuem a seguinte nomenclatura: VN refere-se a um verdadeiro negativo, que tem como significado uma classe negativa que foi predita verdadeiramente, FP é um falso positivo interpretado como uma classe negativa que foi classificado erroneamente, FN refere-se a um falso negativo, que expressa uma classe positiva que foi classificada erroneamente pelo modelo preditor, e VP que

é um verdadeiro positivo, interpretado como uma classe positiva que foi classificada corretamente (HAGAN et al., 2014).

3.6 Estratégia de controle proposta

Na atualidade, muitos sistemas de refrigeração usam compressores de velocidade fixa para realizar o ciclo de refrigeração. Usualmente, neste tipo de sistema, utiliza-se o método de controle *ON/OFF* convencional, por ser um controle simples e de fácil implementação em comparação com os outros sistemas de controle (MAIORINO; DEL DUCA; APREA, 2022).

Esta lógica de controle é geralmente realizada por um sistema mecânico chamado termostato ou pressostato, sendo este último o usado pelo RB. Na Figura 3.7, é representado graficamente o funcionamento de um pressostato mecânico trabalhando na linha de sucção de um sistema de refrigeração. O sistema fica ligando e desligando em torno de uma referência de pressão (SP). Quando a pressão atinge o limite inferior (LI) o sistema é desligado e a pressão começa a aumentar até chegar no SP, então, liga-se o sistema e o ciclo inicia novamente.

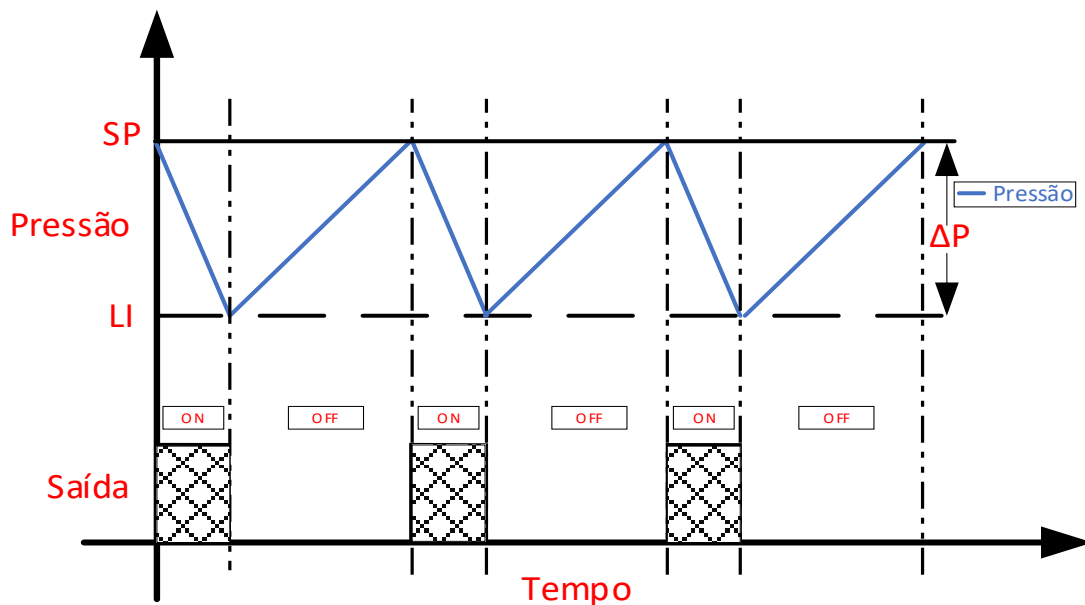


Figura 3.7 – Representação gráfica de um sistema de controle *ON/OFF* convencional. Fonte: Autor.

Geralmente, todos os sistemas *ON/OFF* convencionais que usam pressostato mecânico, trabalham com uma referência durante o tempo de funcionamento do equipamento. A nova estratégia de controle propõe usar duas referências durante o funcionamento do RB, alternado a referência dependendo do horário (hora do dia) ou do uso (liberação de bebida) do RB.

Na Figura 3.8, é exibido o esquema de o novo controle proposto, a qual é baseada em uma estratégia de controle em malha fechada, como duas retroalimentações, cujo funcionamento pode ser descrito da seguinte forma. O RB inicia trabalhando com a referência um (SP_1), durante um determinado período do dia, após de este período o RB trabalha com a nova referência (SP_2) por um determinado tempo predefinido (tempo determinado com base na análise da série temporal). O sistema volta a trabalhar com SP_1 , baseado em duas condições: se, (1) o tempo predefinido é alcançado ou (2) tem liberação de bebida.

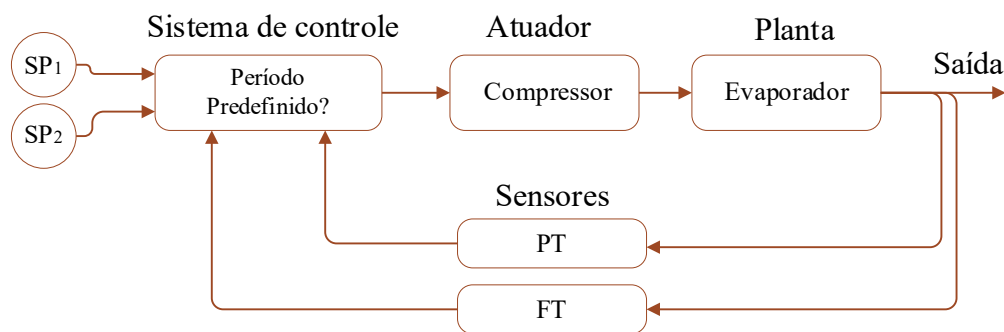


Figura 3.8 – Estratégia de controle *ON/OFF* com mudança de referência proposta. Fonte: Autor.

Inicialmente será implementada a estratégia de controle proposta na Figura 3.8, em que será realizada a mudança da referência em um período específico de acordo como comportamento do usuário. Se os resultados forem considerados satisfatórios, será projetada esta estratégia para trabalhar durante o dia todo, fazendo a modificação na sequência de execução, mudando de um período em específico, para uma referência a cada hora. Esta modificação pode ser observada na Figura 3.9. O princípio de funcionamento é semelhante no proposto inicialmente, com a diferença que o sistema de controle mudara do SP_1 para o SP_2 de hora em hora, e se não tem liberação de bebida o RB trabalhará com a SP_2 .

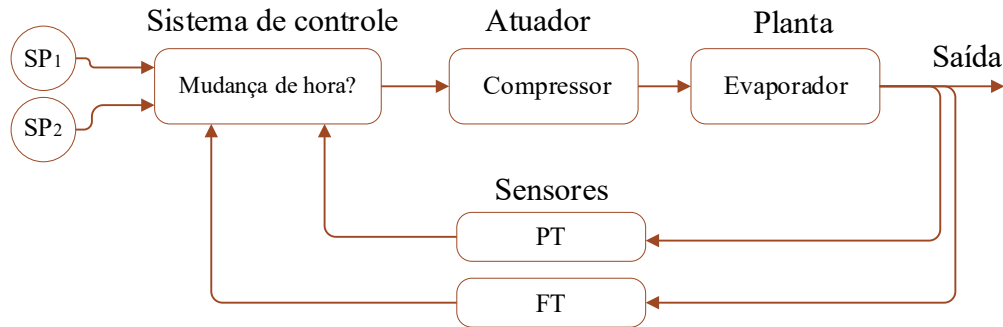


Figura 3.9 – Estratégia de controle com mudança na referência de hora em hora. Fonte: Autor.

3.6.1 Teste de hipóteses

Como o intuito é verificar se com a mudança da referência o consumo de energia elétrica diminuíra, foi utilizado um teste de hipótese, onde a hipótese alternativa H_1 : o consumo de energia elétrica da referência SP_2 é menor ao consumo de energia elétrica com a referência SP_1 e a hipótese de nulidade H_0 : o consumo de energia elétrica da referência SP_2 é maior ou igual ao consumo de energia elétrica com a referência SP_1 . O procedimento para realizar o teste de hipótese é apresentado no Apêndice III.

3.7 Análise dos impactos indiretos e análise custos

O método TEWI determina o impacto que um sistema de refrigeração pode causar no efeito estufa. Esta estimativa é calculada por meio de duas parcelas, sendo: os impactos diretos, relacionados com a liberação de fluidos refrigerantes na atmosfera e os impactos indiretos, referentes à poluição causada na produção de energia elétrica utilizada pelo sistema de refrigeração (refrigerador de bebidas do tipo direto). Na Eq.(3.24) é apresentada a equação para a determinação do impacto no aquecimento global em um sistema de refrigeração. Neste estudo, a parcela do impacto direto será constante, porque a massa e o fluido refrigerante (R22) não foi modificada, a qual foi a mesma carregada pelo fabricante (4,5 kg).

$$\frac{TEWI = GWP_{100} \cdot mf \cdot L_{anual} \cdot n + GWP_{100} \cdot mf \cdot (1 - \alpha_{rec})}{\text{Impacto direto}} + \frac{(E_{anual} \cdot \beta \cdot n)}{\text{Impacto indireto}} \quad (3.24)$$

em que GWP_{100} se refere ao potencial de aquecimento global relativo ao CO_2 em um horizonte de 100 anos, mf (kg) é a massa de fluido refrigerante no sistema, L_{anual} (%) é vazamento anual, α_{rec} (%) representa a taxa de recuperação ou reciclagem do fluido refrigerante no fim da vida

útil, E_{anual} (kWh/ano) refere-se à energia consumida anualmente pelo sistema, n (ano) é tempo de vida útil do sistema e β (kgCO₂/kWh) é o fator de emissão indireto.

Para o cálculo do impacto direto é usado os valores da Tabela 3.5. Nesta tabela é exibido o potencial de aquecimento global relativo ao R-22 em um horizonte de 100 anos, o valor do vazamento anual, o tempo de vida útil do sistema de refrigeração e o fator de recuperação ou reciclagem do fluido. Com os parâmetros mencionados acima e com a massa do fluido refrigerante (4,5 kg) foi calculado a parcela equivalente ao impacto direto que é igual a 12624,75 kgCO₂.

Tabela 3.5 – Parâmetros para determinar o TEWI. Fonte: (IPCC, 2007; AIRAH, 2012; PANATO; PORTO; BANDARRA FILHO, 2017).

Parâmetros	Valores adotados
GWP_{100_R22}	1810
L_{anual}	12,5 %
n	10 anos
α_{rec}	70 %
β_{Brasil}	73 kgCO ₂ kWh ⁻¹

3.7.1 Impactos indiretos

Os impactos indiretos causados pelo consumo de energia do RB, serão determinados para o controle proposto e para o controle convencional, com o intuito de ter uma comparação. Como a parcela do impacto indireto depende da matriz energética de onde o sistema esteja trabalhando, será calculada só com a matriz energética do Brasil indicada na Tabela 3.5.

Outro parâmetro a determinar é a energia consumida anualmente pelo sistema. Para esse cálculo será usada a Eq.(3.5) para determinar o consumo diário do RB. Para determinar o consumo anual é usada a Eq.(3.25) e finalmente pode ser calculada a parcela referente aos impactos indiretos apresentada na Eq.(3.24).

$$E_{\text{anual}} = E_D \cdot 365 \quad (3.25)$$

3.7.2 *Análise de custos.*

Com o intuito de ter uma estimativa do custo que consumiria o RB, ao trabalhar com o sistema de controle proposto e o sistema convencional, será realizado a análise nas principais regiões do Brasil. O custo do kWh nestas regiões é apresentado na

Tabela 3.6 e será usada a Eq.(3.26) para determinar o preço equivalente em Reais.

Tabela 3.6 – Tarifas médias do por região. Fonte: (BRASIL, 2022).

Média Brasil	Tarifas médias (R\$/kWh)
Norte	0,6451
Centro Oeste	0,6215
Sudeste	0,6166
Sul	0,5809
Nordeste	0,5688

$$Custo_{mensal} = \frac{Tarifa\ média \cdot CE_{semanal} \cdot 30}{7} \quad (3.26)$$

em que (R\$/kWh) refere-se ao preço do kWh em cada região, $CE_{semanal}$ (kVAh) é o consumo de energia elétrica em uma semana, e a constante 30/7 é o número de semanas equivalentes num mês, considerando um mês de 30 dias.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão exibidas as análises e discussões dos resultados. As etapas apresentadas têm a mesma ordem da metodologia apresentada no capítulo III. Inicialmente é mostrada a validação da bancada experimental, incluído a caracterização dos sensores que fazem parte do sistema de instrumentação do refrigerador de bebidas do tipo direto. Depois, é apresentado o método de teste para avaliar a capacidade e eficiência energética de equipamentos dispensadores de bebida do tipo pré-mix proposto pela ASHRAE 32.2. Em seguida, é realizada a análise de séries temporais baseada nos modelos aditivo e multiplicativo, em que são identificadas as componentes presentes na série temporal e é realizado o modelo de previsão do consumo de bebida. Posteriormente, é implementada a estratégia de controle da Figura 3.8, em que foi possível obter resultados satisfatórios, por isso, foi possível implementar a estratégia durante o dia todo da Figura 3.9. Na sequência foi determinada a parcela de impactos indiretos quando o RB trabalha com o sistema de controle proposto e com o convencional (*ON/OFF* de fábrica). Por fim, é apresentada análise de custos que consumiria o refrigerador nas diferentes regiões do país, funcionando com o controle proposto e o convencional.

4.1 Validação da bancada experimental

Para a validação da bancada experimental, foi indispensável caracterizar os sensores que fazem parte do sistema de instrumentação e assim corroborar a características de cada instrumento, geralmente especificadas pelo fabricante. Para cada sensor foi realizada uma calibração de acordo com a variável a medir e encontrada uma correlação para representar o respectivo comportamento. A lista dos sensores usados neste trabalho foi mostrada na Tabela 3.2. Estes sensores têm comportamento linear, com exceção dos sensores de temperatura NTC modelados pela equação logarítmica proposta por (STEINHART; HART, 1968).

No Apêndice V é possível observar a validação dos sensores usados na coleta de dados da bancada experimental, em que foi usado um modelo de regressão linear simples para os sensores com comportamento linear (Tensão, Corrente, Pressão e Vazão de água), no quais apresentaram um coeficiente de explicabilidade acima de 99 % para todos os modelos lineares e um MAE e RMSE relativamente baixos. Isso indica que os modelos encontrados para os sensores têm uma alta explicabilidade da variável medida na faixa linear de trabalho.

No caso do sensor de temperatura o comportamento não é linear conforme é exibido na Figura 7 do Apêndice V, pois, a resistência do sensor diminui rapidamente conforme aumenta a temperatura e chega um ponto em que ela tende a se estabilizar. Desta forma, foi usada a equação proposta por (STEINHART; HART, 1968) descrita na Eq.(3.2) para modelar o comportamento, em que foram obtidos resultados satisfatórios, com um R^2 de 0,97, MAE de 0,014 e RMSE de 0,019, para uma ampla faixa de operação.

Os modelos de todos os sensores são exibidos na Tabela 4.1 sendo usados para criar o banco de dados com todas as informações da bancada experimental. Cabe ressaltar que todos os modelos são expressos em termos do tipo de saída do sensor (tensão VDC para os analógicos e Pulsos para os digitais), com o intuito de facilitar a inserção das equações na hora de criar o código no *software* de aquisição.

4.2 Validação dos testes para dispensadores de bebidas

Os testes de validação da eficiência energética do refrigerador de bebidas do tipo direto tem três propósitos, (1) conhecer consumo de energia diário do RB através da Eq.(3.5), (2) verificar se a temperatura da bebida ficou nos limites estabelecidos pela norma ASHRAE 32.2, (3) verificar se o sistema gerou dados confiáveis, pois, os testes foram feitos em espaços controlados com o intuito de criar um intervalo de confiança para cada teste proposto pela norma ASHRAE 32.2. Cabe ressaltar que os intervalos de confiança para todos os testes foram criados a partir de 5 amostras, de acordo com procedimento apresentado na seção 3.3.5 e mantendo as condições de entrada da Tabela 3.3. Além disso, foi estabelecido um nível de significância de 5 % para calcular o intervalo de confiança e para aplicar o teste de normalidade Shapiro-Wilk.

Tabela 4.1 – Modelos matemáticos dos sensores usados no sistema de instrumentação. Fonte: Autor.

Tipo de sensor	Correlações	R ²	MAE	RMSE	Tipo de Modelo
Tensão	$V_{AC} = 245,44 \cdot V_{DC} - 2,5664$	0,998	0,016 (V_{RMS})	0,019 (V_{RMS})	Regressão linear
Corrente	$I_{AC} = 10,0 \cdot V_{DC}$	0,999	0,001 (I_{RMS})	0,002 (I_{RMS})	Regressão linear
Pressão (SPKT0013R0)	$PB = 2,575 \cdot V_{DC} - 2,288$	0,999	0,001 (bar)	0,001 (bar)	Regressão linear
Pressão (SPKT0043R0)	$PA = 0,2312 \cdot V_{DC} + 0,5$	0,999	0,001 (bar)	0,001 (bar)	Regressão linear
Vazão de água	$VA = 0,519 \cdot P$	0,998	2,875 ($ml \cdot s^{-1}$)	3,227 ($ml \cdot s^{-1}$)	Regressão linear
Temperatura ⁴	$TM = \frac{1}{0,00066 + 0,00028 \cdot \ln(R_{NTC}) + 4,06 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(R_{NTC})^3}$	0,999	0,014 (°C)	0,019 (°C)	Equação de Steinhart-Hart

em que P (pulsos/s) é a quantidade de pulsos em um segundo, VA ($ml \cdot s^{-1}$) refere-se à vazão da água, V_{AC} (V_{RMS}) é tensão de entrada, I_{AC} (A_{RMS}) é a corrente consumida, PB (bar) pressão de evaporação, PA (bar) é pressão de condensação, R_{NTC} é a resistência no NTC, V_{DC} (V_{DC}) refere-se a saída de tensão de cada sensor e TM (°C) é temperatura medida pelo sensor NTC.

⁴O valor R_{NTC} da equação do sensor de temperatura da Tabela 4.1, pode ser expressa em termos de tensão V_{DC} usando a Eq. (7).

4.2.1 Teste inicial de Pulldown

O teste de Pulldown foi realizado para uma temperatura ambiente padrão de 24 °C estabelecidos pela norma ASHRAE 32.2. Este teste tem como finalidade determinar quanto tempo leva a máquina para ter o primeiro desligamento, para a bebida passar da temperatura ambiente (24 °C) até a temperatura desejada (3,56 °C).

Tabela 4.2 – Resumo do teste de Pulldown. Fonte: Autor.

Parâmetro	Valor	Unidade	Valor-p
Média da temperatura ambiente	22,82 ± 0,70	°C	0,25
Média da umidade relativa	29,04 ± 3,87	%	0,10
Configuração do sistema de controle (pressostato)	4,57	bar	0,66
Configuração sistema de controle diferencial (pressostato)	0,6	bar	---
Tempo inicial do primeiro desligamento	3,31 ± 0,12	min	0,24
Média da tensão de entrada	218,37 ± 1,43	V	0,42
Média do consumo de energia elétrica	0,073 ± 0,003	kVAh	0,71

Na Tabela 4.2, é apresentado um resumo do teste de *Pulldown*. Pode ser observado que o tempo de desligamento do RB é de $3,31 \pm 0,12$ min e que tem uma média de consumo de energia elétrica de $0,0648 \pm 0,003$ kWh. Por outro lado, é comprovado que a temperatura da sala permaneceu nos limites estabelecidos pela norma ASHRAE 32.2, apresentados na Tabela 3.3. Não foi possível manter a umidade na faixa estabelecida devido às limitações no laboratório, pois a sala não tinha ambiente controlado para esta variável.

Na Figura 4.1 é apresentada a temperatura de evaporação durante o teste de *Pulldown*. Conforme pode ser observado, a temperatura diminui conforme avança o tempo, alcançando o valor mínimo (aproximadamente 0 °C) em um tempo aproximado de 204 s (3,4 min). Este valor de temperatura é o mínimo valor que o RB pode trabalhar, pois, abaixo desta temperatura a bebida (água) congelaria ocasionando um entupimento no evaporador que em consequência impediria a liberação da bebida. Cabe ressaltar que os valores apresentados na Tabela 4.2 possuem um intervalo de confiança de 95 %.

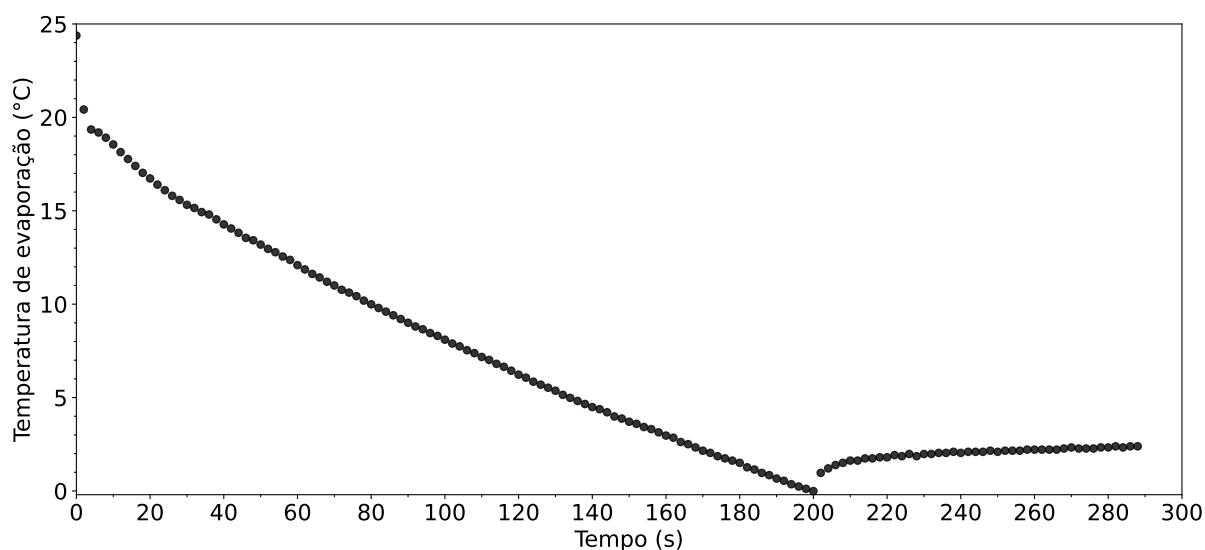


Figura 4.1 – Temperatura de evaporação do teste de Pulldown. *Fonte: Autor.*

4.2.2 Teste de capacidade padrão

Neste teste foi verificado a capacidade de refrigeração do RB estipulado pelo fabricante. Além disso, foram analisadas as temperaturas das bebidas com o intuito de saber se a temperatura máxima de cada liberação ficava nos limites estabelecidos pela norma ASHRAE 32.2. Para isso foi seguido o procedimento apresentado na seção 3.3.3.2.

Na Tabela 4.3, é apresentado um resumo dos parâmetros que a norma ASHRAE 32.2 sugere relatar. Como é evidenciado, a temperatura média da sala ($24,0 \pm 0,66$ °C), fica nos limites estabelecidos pela norma ASHRAE 32.2. No entanto, a umidade relativa é relatada, mas não ficou dentro dos limites estabelecidos, pois, não se tem controle desta variável.

O número de bebidas extraído durante o teste foi de 100, 50 do circuito primário e 50 do circuito secundário, pois, o RB possui dois torneiras. O número de bebidas abaixo ou igual a $4,4$ °C que a norma sugere relatar foi de aproximadamente de 11 ± 5 bebidas, com um IC de 95 %. A norma ASHRAE 32.2 estabelece parar a liberação da bebida quando a média das temperaturas das quatro bebidas extraídas em um minuto fiquem acima de $7,2$ °C, mas, conforme é mostrado na Figura 4.2, a temperatura das bebidas não supera este limite, as quais tendem a estabilizar aproximadamente depois da vigésima bebida para as duas torneiras, alcançando uma média de $5,75 \pm 0,57$ °C e $6,62 \pm 0,55$ °C, para as torneiras uma e duas respectivamente. Isso indica que a capacidade de refrigeração do refrigerador de bebidas do tipo direto é alta e pode trabalhar durante um período de liberação longo, mantendo a temperatura da bebida abaixo do limite estabelecido pela norma ASHRAE 32.2. Como a temperatura das bebidas não superaram o limite estabelecido pela norma, foi escolhida uma

liberação de 100 bebidas para finalizar o teste, e assim poder criar um intervalo de confiança para o teste de capacidade padrão.

Conforme é apresentado na Figura 4.2, o número de bebidas liberadas foi de 100, em que a temperatura mínima foi de aproximadamente de 3 °C na torneira um (TT1) para a terceira liberação. Depois disso, a temperatura das bebidas tende a aumentar até alcançar a estabilidade. Foi possível identificar que a temperatura da bebida extraída pela torneira um tende a ser mais gelada que a extraída pela torneira dois (TT2), isso pode ser explicado devido à construção do evaporador, por serem circuitos independentes. Mesmo assim, poder ser considerado no intervalo de confiança de cada torneira.

De acordo com a norma ASHRAE 32.2(ASHRAE, 2018), a quantidade de bebida extraída tem que ser medida e deve ficar dentro dos limites de $\pm 2\%$ do volume total calculado pela Eq.(3.4). Como o total de bebidas extraídas foi 100 e o volume da bebida é 300 ml, o volume total é de $30 \pm 0,6$ l considerando o, 2 % de limite. Conforme evidenciado na Tabela 4.3 o volume total experimentalmente ficou dentro dos limites estabelecidos, obtendo um valor de $30,003 \pm 0,621$ l.

Para verificar se a vazão nominal reportada pelo fabricante (70 l·h⁻¹) foi atingida, foi utilizada a Eq.(4.1). Este valor é calculado usando os parâmetros exibidos na Tabela 4.3

Com o intuito de ter um valor mais próximo da realidade foi determinado a média do volume da bebida extraído pelas duas torneiras e determinada a vazão nominal experimental que foi de $71,93$ l·h⁻¹. Isso evidencia que a capacidade da máquina foi alcançada e que o RB tem uma boa capacidade de refrigeração, pois, todas as bebidas ficaram abaixo da temperatura máxima permitida.

$$V_n = 0,06 \cdot V_P \cdot N_{BPM} \quad (4.1)$$

em que V_n (l·h⁻¹) refere-se à vazão nominal, V_P é volume padrão usado no teste de capacidade padrão, N_{BPM} representa o número de bebidas extraídas em um minuto e 0,06 é o fator de conversão de ml·s⁻¹ para l·h⁻¹.

Tabela 4.3 – Resumo do teste de capacidade padrão. Fonte: Autor

Parâmetro	Valor	Unidade	Valor-p
Média da temperatura ambiente	24,0 ± 0,66	°C	0,06
Média da umidade relativa	25,6 ± 4,62	%	0,71
Número de bebidas extraídas por minuto	4	Bebidas	---
Número de bebidas extraídas	100	Bebidas	---
Volume total das bebidas extraídas	30,003 ± 0,621	l	0,67
Número de bebidas extraídas < 4,4 °C	11 ± 5	Bebidas	0,15
Energia consumida durante o teste	0,568 ± 0,014	kVAh	0,49
Tempo de duração da liberação	12,2	s	
Tempo de duração para recuperação	2,8	s	
Média de tempo de teste	26,54 ± 0,14	min	0,45
Média da temperatura da bebida da torneira um	5,75 ± 0,57	°C	0,49
Média da temperatura da bebida da torneira dois	6,62 ± 0,55	°C	0,74
Volume da bebida da torneira um	294,07 ± 5,15	ml	0,56
Volume da bebida da torneira dois	305,41 ± 14,28	ml	0,88

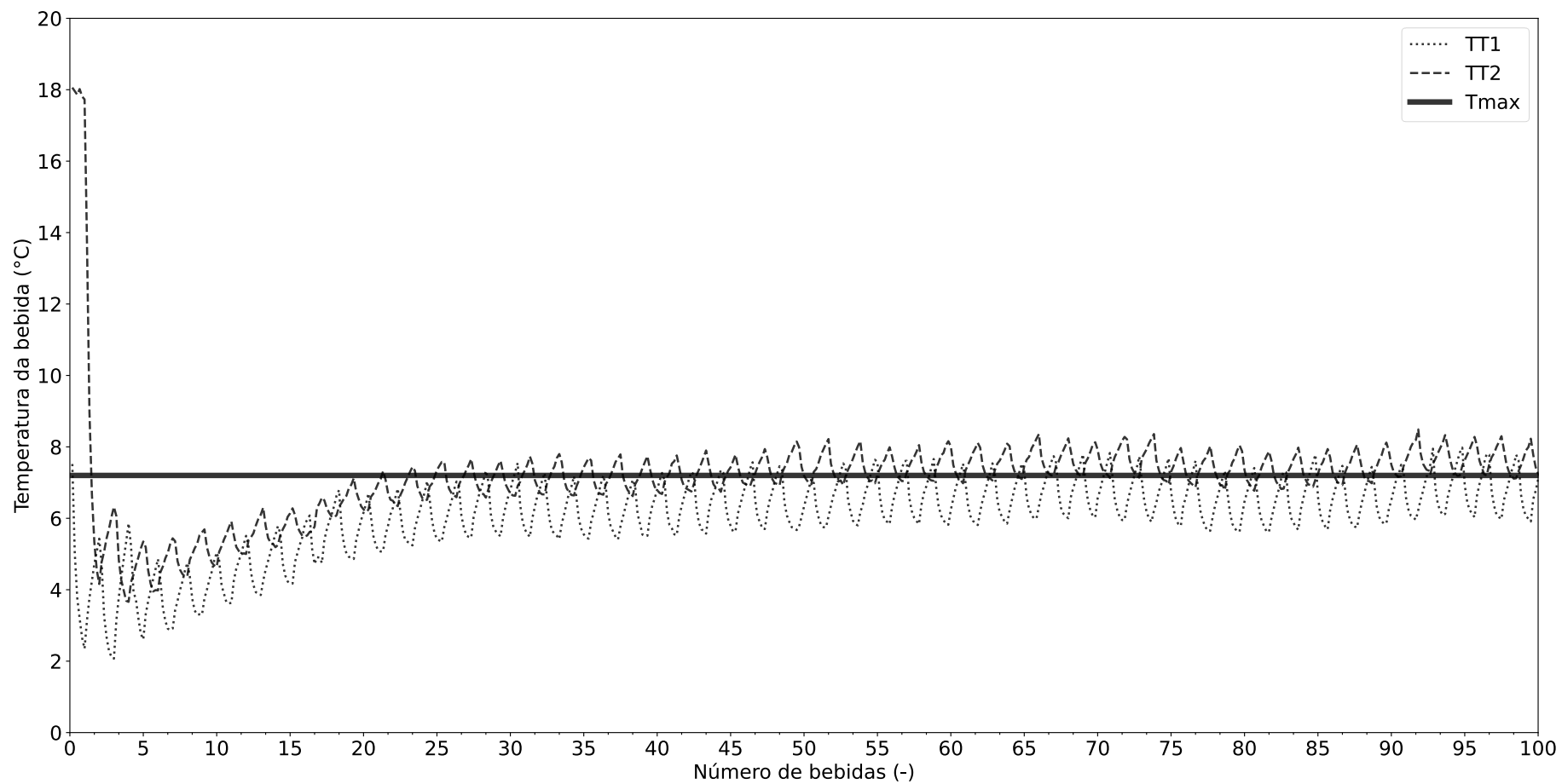


Figura 4.2 – Evolução da temperatura da bebida no teste de capacidade padrão. Fonte: Autor.⁵

⁵Nota: TT1 refere-se à temperatura da bebida liberada pela torneira um, TT2 refere-se à temperatura da bebida liberada pela torneira dois e Tmax é temperatura máxima estabelecida pela norma ASHRAE 32.2.

4.2.3 Teste casual de temperatura

Este teste tenta simular a liberação da bebida ocorrida ocasionalmente, com o intuito de verificar se a temperatura da bebida fica abaixo do limite estabelecido pela norma ASHRAE 32.2, a qual é $7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para realizar este teste foi seguido o procedimento mencionado na seção 3.3.3.3. Na Figura 4.3, pode ser observado que a temperatura máxima da bebida foi obtida na primeira bebida extraída, tendo uma média de $6,56 \pm 0,63\text{ }^{\circ}\text{C}$, ficando perto do limite máximo permitido. Este valor é comum, pois, a bebida é aquecida ao passar pela torneira, que está em contato com a temperatura ambiente. A temperatura mais baixa foi obtida na bebida dois, alcançando uma média de $4,5 \pm 0,53\text{ }^{\circ}\text{C}$. A partir desta bebida a temperatura aumenta devido ao tempo de espera entre cada liberação, alcançando uma média de $5,11 \pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $5,98 \pm 0,24\text{ }^{\circ}\text{C}$ para as bebidas três e quatro, respectivamente. Fica evidente como as temperaturas das bebidas ficaram abaixo do limite máximo exigido pela norma ASHRAE 32.2, isso nos indica que o RB tem uma alta capacidade de refrigeração. Destaca-se também que todas as temperaturas apresentam um IC de 95 % de confiabilidade. Além disso, na Tabela 4.4 é mostrado um resumo dos parâmetros que a norma ASHRAE 32.2 sugere relatar.

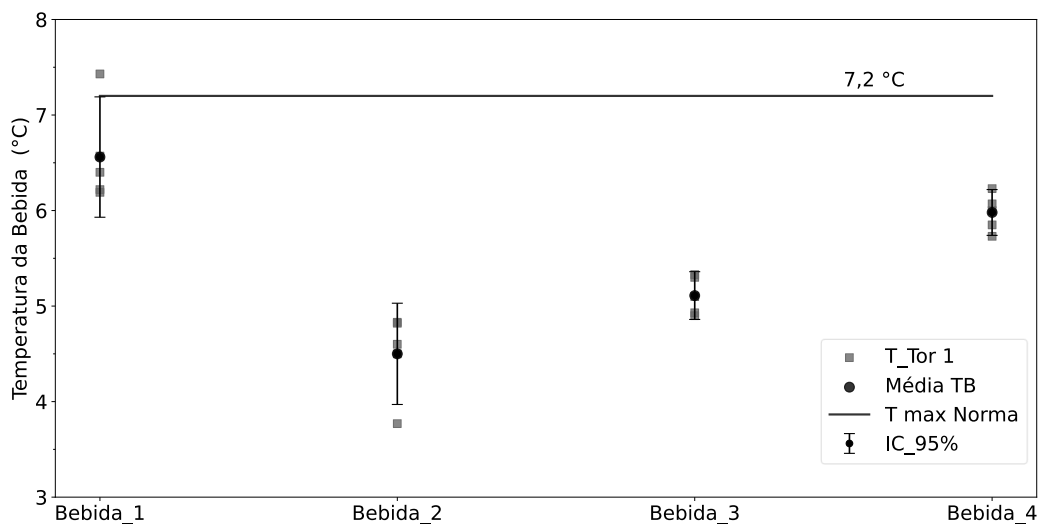


Figura 4.3 – Temperatura média de cada bebida extraída no teste casual de temperatura³. Fonte: Autor.

Na Tabela 4.4 pode ser observado como a temperatura da sala e o volume de cada bebida extraída ficaram dentro dos limites estabelecidos pela norma (ASHRAE, 2018). Além disso, é apresentado o consumo de energia elétrica para o teste, cuja média foi de $0,041 \pm 0,002\text{ kVAh}$, para um IC de 95 %. Todos os parâmetros foram mantidos conforme o exigido pela norma

ASHRAE 32.2, exceto a umidade relativa, que foi medida e relatada, mas não foi possível ter um controle desta variável por limitantes no laboratório e ainda, é apresentado o valor-p para cada variável de acordo com o teste estatístico de normalidade de Shapiro e Wilk (1965).

Tabela 4.4 – Resumo do teste casual de temperatura. Fonte: Autor.

Parâmetro	Valor	Unidade	Valor- p	
Média da temperatura ambiente	$24,54 \pm 1,40$	°C	0,19	
Média da umidade relativa	$52,32 \pm 17$	%	0,44	
Temperaturas das bebidas	Bebida 1	$6,56 \pm 0,63$	°C	0,08
	Bebida 2	$4,50 \pm 0,53$	°C	0,10
	Bebida 3	$5,11 \pm 0,25$	°C	0,28
	Bebida 4	$5,98 \pm 0,24$	°C	0,97
Energia elétrica consumida	$0,041 \pm 0,002$	kVAh	0,77	
Volume de cada bebida	$350,64 \pm 9,98$	ml	0,09	

4.2.4 Teste de consumo de energia em Standby

Como o sistema de controle proposto tenta reduzir o consumo de energia elétrica em horário sem consumo de bebida, o teste de quantifica este valor é o teste de *Standby*, por isso foi necessário fazer o teste para os dois controles (convencional e proposto) e assim quantificar a energia elétrica consumida pelo RB nessas condições.

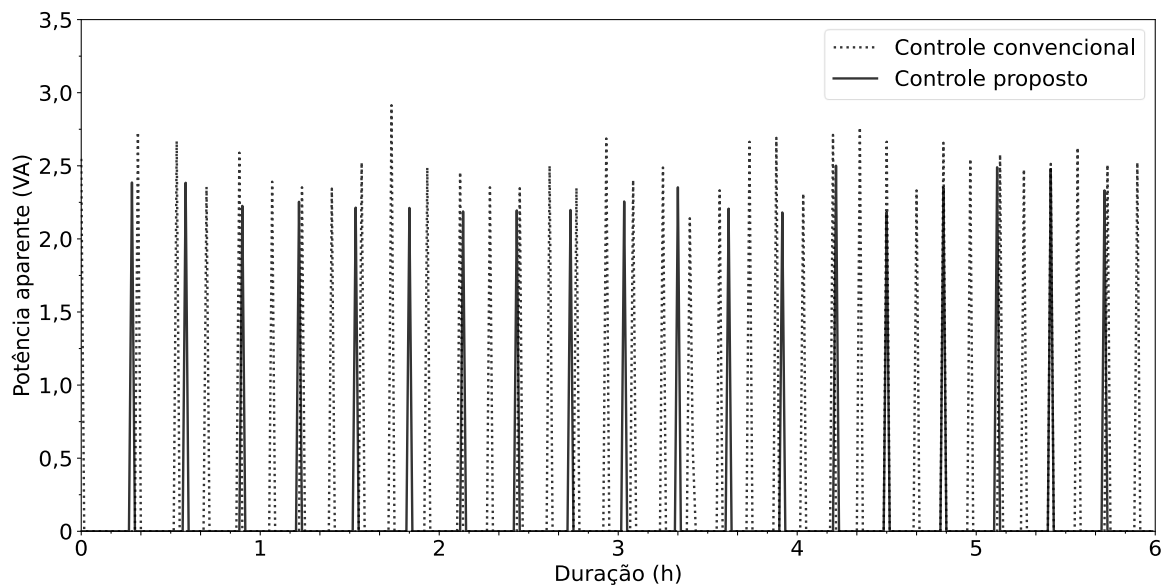


Figura 4.4 – Consumo de energia elétrica do teste de *Standby*. Fonte: Autor.

Na Figura 4.4, é exibida a evolução do consumo de energia elétrica durante o teste de *Standby* (6 h) para os dois controles. Nesta figura percebe-se que o RB liga mais vezes com controle *ON/OFF* convencional que com o controle proposto (aproximadamente o dobro), por isso, o consumo de energia elétrica é maior para controle convencional em comparação com o controle proposto, tendo em média um consumo de energia elétrica por hora de $17,06 \pm 1,93$ VAh e $7,26 \pm 0,93$ VAh, para o controle convencional e o controle proposto, respectivamente. Isso pode ser explicado devido às diferenças nas referências de controle, entre mais baixo for o *Setpoint* do sistema de controle mais vezes tem que ligar o RB para manter a referência, acarretado maior consumo de energia elétrica. Por isso o consumo de energia é maior para o sistema convencional e relação ao controle proposto, pois a sinais de controle são de 4,57 bar e 6,88 bar, respectivamente.

Tabela 4.5 – Resumo do teste de *Standby*. Fonte: Autor.

Parâmetro	Valor	Unidade	Valor-p
Média da temperatura ambiente	$24,68 \pm 1,09$	°C	0,46
Média da umidade relativa	$47,32 \pm 16$	%	0,21
Média da temperatura de entrada da bebida	$23,13 \pm 0,59$	°C	0,07
Média da temperatura de saída da bebida	$0,91 \pm 0,17$	°C	0,26
Média da tensão de entrada	$227,47 \pm 2,71$	V _{RMS}	0,22
Média do CE elétrica por hora com o controle convencional	$17,06 \pm 1,93$	VAh	0,34
Média do CE por hora com o controle proposto	$7,26 \pm 0,93$	VAh	0,06
Tempo do teste	6	h	---
CE durante um dia usando a referência ou controle convencional	$0,409 \pm 0,002$	kVA·Dia ⁻¹	0,34
CE durante um dia usando a referência ou controle proposto	$0,174 \pm 0,002$	kVA·Dia ⁻¹	0,06

CE refere-se ao consumo de energia elétrica.

Na Tabela 4.5 é mostrado um resumo do teste em *Standby* que sugere a norma ASHRAE 32.2 relatar. Pode ser observado que a temperatura da sala ficou dentro dos limites estabelecidos

pela norma ASHRAE 32.2. Além disso, é apresentado o consumo de energia elétrica diário que consumiria o RB se trabalhasse o dia todo em modo *Standby*, tanto para o controle convencional quanto para proposto, tendo uma média de $0,409 \pm 0,002 \text{ kVA} \cdot \text{Dia}^{-1}$ e $0,174 \pm 0,002 \text{ kVA} \cdot \text{Dia}^{-1}$, respectivamente. É evidente que, com o uso do controle de referência variável proposto, o RB, tem uma redução no consumo de energia elétrica por hora em modo de *Standby* de aproximadamente 57,5 %. Cabe ressaltar que os dados apresentados na Tabela 4.5 foram criados com um IC do 95 % sendo verificado a normalidade dos dados conforme o teste de Shapiro e Wilk (1965).

4.3 Processamento de dados

Como um dos objetivos é determinar uma equação para representar o consumo de água, baseando-se no comportamento do usuário, um novo subconjunto de dados foi criado conforme o mencionado na seção 3.4. Desta forma, foi verificado que este conjunto de dados fosse adequado para a análise baseado em séries temporais.

Na Figura 4.5 é exibido o comportamento do consumo de água durante o período de 12/setembro/2022 até 08/dezembro/2022. Os dados são apresentados semanalmente, em que foi possível perceber que o consumo de água aumentou ao longo do tempo. Durante as duas primeiras semanas (12/setembro/2022 até 26/setembro/2022) foi identificado um consumo menor. Este comportamento pode ser explicado pelo processo de adequação dos usuários ao equipamento. Após a segunda semana (26/setembro/2022) o consumo começou a aumentar até alcançar uma estabilidade por volta da sexta semana (17/setembro/2022 até 24/setembro/2022). Apesar do sistema apresentar uma aleatoriedade no consumo de bebida, percebe-se que existe um período de sazonalidade que se repete de semana em semana. Este comportamento é comum em dados baseados no comportamento do usuário, de acordo com (CHOU et al., 2022).

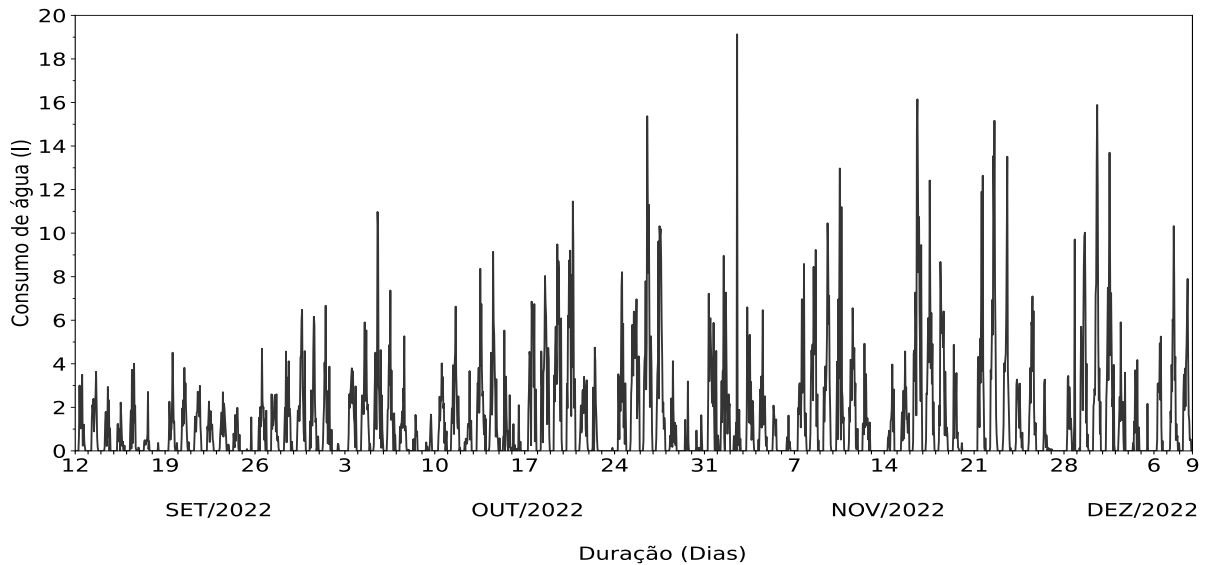


Figura 4.5 – Evolução do consumo de água durante o período de 12/09/2022 até 08/12/2022.
Fonte: Autor.

Como foi mencionado na seção 3.5, este padrão de consumo foi modelado por análise de séries temporais, porém, foi necessário verificar que o conjunto de dados apresentaram comportamento estacionário, ou seja, suas características estatísticas (média, variância e autocorrelação) foram aproximadamente constantes ao longo do tempo (MORETTIN; TOLOI, 2006). Conforme pode ser observado na Figura 4.5, nas primeiras semanas o consumo de bebida é baixo em comparação as outras semanas, isso é verificado na Tabela 4.6 onde é apresentado a média e o desvio padrão de todas as semanas que fazem parte do conjunto geral de dados.

Identificou-se que existe uma diferença considerável entre as médias das semanas 1 e 2 (0,507 l e 0,617 l) em comparação as outras semanas. Por estas médias serem baixas, faziam com que a média global do conjunto de dados diminuísse e a dispersão do conjunto de dados aumentasse, o que conseqüentemente reduzia a precisão do modelo de previsão. Por isso, foram eliminadas as duas primeiras semanas de dados, com o intuito de ter um modelo mais representativo para o padrão de consumo de água.

Foi realizada uma relação entre a média global (média das semanas 1^a até 12^a) e seu respectivo desvio padrão (semanas 1^a até 12^a) em comparação com outro subconjunto de dados excluindo a 1^a e 2^a semana. Esta comparação é exibida na Tabela 4.7 e exposta de forma gráfica na Figura 4.6. Conforme pode ser observado, ao excluir as duas primeiras semanas, a relação entre a média e o desvio padrão diminuiu de 35,2 % para 21,4 % e a média global aumentou de 1,377 l para 1,540 l. Portanto, fica evidente que eliminando as duas primeiras semanas o

conjunto de dados apresentou comportamento estacionário, pois, as médias entre cada período ficaram mais próximas, e a variação do conjunto de dados diminuiu.

Tabela 4.6 – Métricas estatísticas por semana. Fonte: Autor.

Nº Semana	Média (<i>l</i>)	Desvio padrão (<i>l</i>)
1	0,507	0,893
2	0,617	0,897
3	0,106	1,518
4	1,159	1,778
5	1,201	1,724
6	1,913	2,642
7	1,885	2,899
8	1,267	2,277
9	1,719	2,535
10	1,797	2,950
11	1,629	2,946
12	1,768	3,030

Tabela 4.7 – Métricas estatísticas do conjunto de dados agrupados por semanas. Fonte: Autor.

Conjunto de dados	Média (<i>l</i>)	Desvio padrão (<i>l</i>)	Relação (%)	Valor-p
Semana 1 ^a até 12 ^a	1,377	0,484	35,2	0,079
Semana 3 ^a até 12 ^a	1,540	0,330	21,4	0,031

Para verificar a estacionalidade da série temporal ou conjunto de dados foi aplicado o teste de Disckey–Fuller, o qual é um teste estatístico que analisa a existência de estacionalidade em um conjunto de dados. O teste é baseado no parâmetro “Valor-p” e o nível de significância escolhido pelo usuário. O teste tem como base duas hipóteses: hipótese de nulidade: ausência de estacionariedade e hipótese alternativa: presença de estacionariedade. Se o “Valor-p” é menor que o nível de significância, pode ser rejeitada a hipótese de nulidade, o que significaria que a série é estacionária, caso contrário, (“Valor-p” maior que o nível de significância) não é possível rejeitar a hipótese de nulidade, pois, a série seria não estacionária (SILVEIRA et al., 2022).

O teste de Disckey–Fuller foi aplicado aos dois conjuntos de dados mencionados na Tabela 4.7 sendo definido um nível de significância de 5 %. O “Valor-p” para o primeiro conjunto de dados foi de 0,0791 e para o segundo de 0,0314. Pode-se afirmar, que se tem a confiança estatística para aceitar a hipótese de nulidade do primeiro conjunto de dados e rejeitar a hipótese de nulidade do segundo conjunto de dados, ou seja, ao eliminar as duas primeiras semanas o conjunto de dados passa a ter um comportamento estacionário, por isso, foi utilizado esse conjunto de dados para ter uma eficácia maior no modelo de série temporal analisado na seção seguinte.

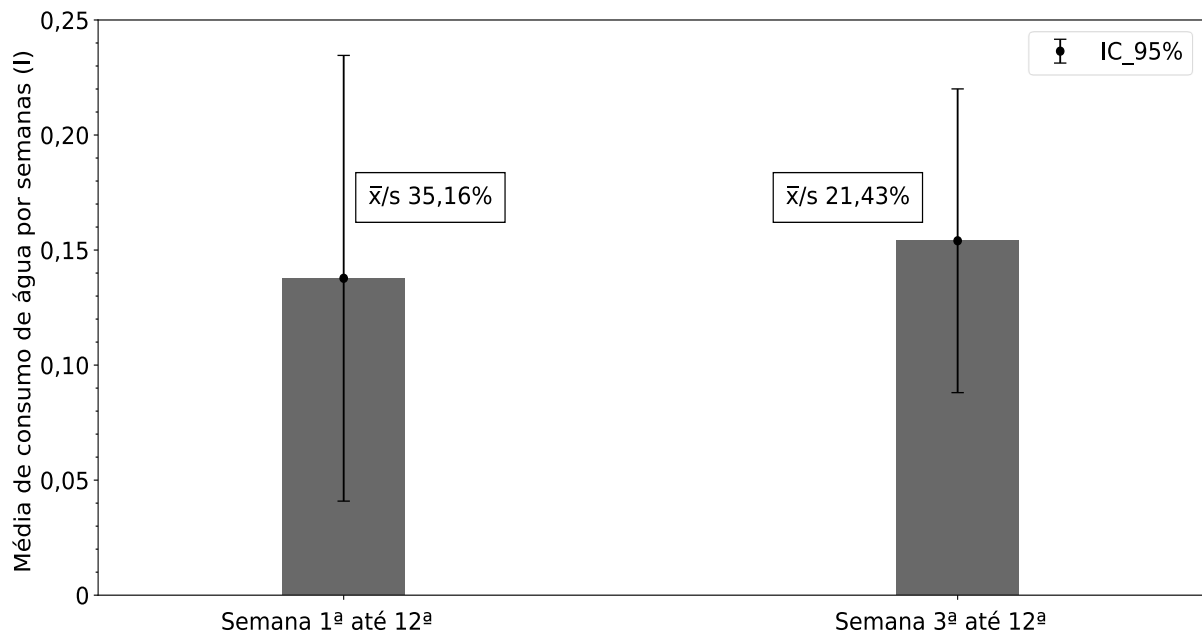


Figura 4.6 – Comparação de média semanais. Fonte: Autor.

Analisando a Figura 4.5 foi determinado que existe uma periodicidade nos dados, pois, o consumo de água aumenta durante os primeiros dias da semana e diminui nos finais de semana. Esse padrão de consumo foi repetido semana após semana, ou seja, é definida uma periodicidade semanal (168 h). Esse período é muito importante de definir, pois, a análise posterior precisa de uma periodicidade fixa para realizar a análise. Cabe ressaltar que as semanas definidas neste estudo tem como início todas as segundas-feiras, a partir das 00 h e finalizam os domingos as 23 h 59 min 59 s. Além disso, os dados do consumo de água foram salvos de hora em hora, criando um conjunto de dados por semanas, compostos de 168 horas por semana.

O conjunto de dados restante (semana 3^a até 12^a) foi distribuído da seguinte forma: semanas 3^a até 7^a (26/setembro/2022 até 30/outubro/2022), usadas para treinar ou determinar o modelo matemático que represente o padrão de consumo de água, semana 8^a até 9^a (31/outubro/2022 até 13/novembro/2022), utilizadas para validar o modelo matemático, semanas 10^a até 11^a (14/novembro/2022 até 27/novembro/2022) usadas para determinar as referências de controle e finalmente a semana 12^a (28/novembro/2022 até 5/dezembro/2022) empregada para implementar o sistema de controle proposto de forma contínua.

4.4 Análise de séries temporais

De acordo com a seção 3.5, a análise de séries temporais foi realizada do ponto de vista clássico, em que se tem dois modelos (M_A e M_M) para representar o consumo de água, baseado no comportamento do usuário. Para isso foi utilizado o conjunto de dados da semana 3^a até 7^a para ajustar o modelo e com ajuda do *software* SPSS encontrar as componentes que compõem cada modelo proposto pelas Eq.(3.6) e Eq.(3.7).

Na Figura 4.7 é apresentado o treinamento dos modelos de previsão baseados em análise de séries temporais. Pode ser observado graficamente que existe uma similitude nos valores preditos pelo M_A e o M_M , com diferença que o modelo aditivo prediz valores negativos (sem explicação física), o que faz que o erro do modelo aumente (Tabela 4.8) em relação ao M_M . Os dois modelos são baseados em uma série de constantes que compõem os índices sazonais e uma componente de tendência. Todos os parâmetros foram determinados no *software* SPSS, usando o método de decomposição sazonal para calcular os índices sazonais e o método de médias móveis com período semanal (168 h) para determinar a tendência. Os parâmetros são apresentados no Apêndice VI e foram determinados de acordo com o procedimento mencionado na seção 3.5.1, conforme os modelos descritos nas Eq.(3.6) e Eq.(3.7). Existe uma componente de irregularidade (I_t), que sempre estará presente nos modelos, mas não pode ser modelada, por fazer parte das flutuações inexplicáveis ou fatos inesperados que ocorrem na variável de interesse.

Para avaliar os modelos encontrados, foram usadas as métricas estatísticas apresentadas na seção 3.5. O modelo que apresentou menor valor de erro na fase de treinamento foi o modelo multiplicativo, com um erro médio absoluto de 0,765 *l*, e o modelo aditivo com um valor de 1,385 *l* para a raiz do erro quadrático médio, conforme pode ser observado na Tabela 4.8. De acordo com as métricas, os dois modelos gerariam aproximadamente os mesmos resultados, mas, como o objetivo é usar o modelo para encontrar os horários que não tem consumo de bebida (consumo igual a zero), o modelo que mais se adapta é o modelo multiplicativo, pois não gera valores negativos.

Tabela 4.8 – Métricas para avaliação do modelo baseado em séries temporais. Fonte: Autor.

Modelo	MAE (<i>l</i>)	RMSE (<i>l</i>)
Aditivo	0,806	1,385
Multiplicativo	0,765	1,418

4.4.1 Validação dos dados previstos

Com o intuito de encontrar o período em que o sistema não tinha consumo de bebida (consumo de bebida igual a zero) foi realizada a validação do modelo baseado em horário de consumo e não consumo. Foi aplicado o procedimento de codificação mencionado na Figura 3.5 para os dados das semanas 8^a e 9^a e para o modelo de predição baseado no modelo multiplicativo da Eq.(3.7). Esta codificação pode ser encontrada no Apêndice VII. Para este conjunto de dados foram aplicadas as métricas de avaliação de modelos de classificação expostas na seção 3.5.2 e criada a matriz de confusão entre o valor observado e valor predito para cada hora do dia (0 h até 23 h) durante as duas semanas de validação, cujos valores são mostrados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Métricas de avaliação modelo multiplicativo. Fonte: Autor⁷.

Nº	H	A (%)	S (%)	E (%)	CT	Nº	H	A (%)	S (%)	E (%)	CT
8a	0	100,0	100,0	0,0	1	8a	11	85,7	0,0	85,7	0
9a		100,0	100,0	0,0	1	9a		100,0	100,0	100,0	0
8a	1	100,0	100,0	0,0	1	8a	12	85,7	50,0	100,0	0
9a		100,0	100,0	0,0	1	9a		100,0	100,0	100,0	0
8a	2	100,0	100,0	0,0	1	8a	13	85,7	0,0	85,7	0
9a		100,0	100,0	0,0	1	9a		100,0	100,0	100,0	0
8a	3	100,0	100,0	0,0	1	8a	1	7,43	0,0	83,3	0
9a		100,0	100,0	0,0	1	9a		100,0	100,0	100,0	0
8a	4	100,0	100,0	0,0	1	8a	15	85,7	0,0	85,7	0
9a		100,0	100,0	0,0	1	9a		100,0	100,0	100,0	0
8a	5	100,0	100,0	0,0	1	8a	16	85,7	0,0	100,0	0
9a		100,0	100,0	0,0	1	9a		85,7	0,0	100,0	0
8a	6	85,7	85,7	0,0	1	8a	17	100,0	100,0	100,0	0
9a		57,2	80,0		---	9a		85,7	100,0	83,3	0
8a	7	100,0	100,0	0,0	0	8a	18	7,43	3,3	100,0	0
9a		100,0	100,0	0,0	0	9a		100,0	100,0	100,0	0
8a	8	85,7	50,0	100,0	0	8a	19	85,7	66,67	100,0	0
9a		100,0	100,0	100,0	0	9a		85,7	100,0	83,3	0
8a	9	85,7	50,0	100,0	0	8a	20	57,1	25,00	100,0	---
9a		100,0	100,0	100,0	0	9a		57,1	25,00	75,00	---
8a	10	85,7	0,0	85,7	0	8a	21	57,1	40,0	100,0	---
9a		100,0	100,0	100,0	0	9a		57,1	3,3	50,0	---
8a	11	85,7	0,0	85,7	0	8a	22	42,9	40,0	50,0	---
9a		100,0	100,0	100,0	0	9a		42,9	40,0	50,0	---
8a	12	85,7	50,0	100,0	0	8a	23	100,0	100,0	100,0	1
9a		100,0	100,0	100,0	0	9a		85,7	87,7	0,0	1

⁷ Nº, H, A, S, E e CT, referem-se ao Número da semana, Hora do dia, Acurácia, Sensibilidade, Especificidade, e à categorização do período, respectivamente.

A partir das métricas apresentadas na Tabela 4.9, pode ser inferido que o modelo de previsão tem uma acurácia, sensibilidade e especificidade acima de 85 %, para quase todos os períodos do dia, o que nos indica que o modelo multiplicativo tem uma explicabilidade relativamente alta dos horários de consumo e não consumo do sistema. Além disso, pode ser deduzido que existiu três períodos repetitivos durante as duas semanas de validação. O primeiro das 23 horas até as 5 horas, em que a acurácia e a sensibilidade ficam acima de 85,0 % e o valor da especificidade de 0,0 %, isso indica que o modelo acertou quase um 100% nos valores positivos “1”. Pode-se concluir que nesta faixa de horas (23h até 5h) o sistema não tem consumo de bebida.

O segundo período repetitivo foi das 7 horas até a 19 horas, em que a acurácia e a especificidade ficaram acima de 85 %, para quase todos os períodos e a sensibilidade ficou oscilando entre 0 e 100 %. Isso indica que o modelo teve uma alta taxa de acerto nos valores negativos “0”. Portanto, pode-se afirmar que durante o período das 7 horas até 19 horas, existe liberação de bebida no sistema.

No período das 20 horas até 22 horas, as métricas de avaliação não apresentaram um padrão de repetição fixo de uma semana para outra, pois, o modelo de previsão tem uma acurácia e sensibilidade baixa de cerca de 50 % com uma especificidade relativamente alta, por isso, neste período não foi possível afirmar se o sistema tem ou não consumo de bebida.

Na Figura 4.8 é exibida a matriz de confusão para um período com liberação de bebida parte A e para um período que não tem consumo de bebida parte B. Baseado nestas matrizes foi construída a Tabela 4.9, em que para a parte A, o modelo apresenta um valor de 6 no primeiro quadrante, que significa, de seis valores observados negativamente “0” o modelo preditor acertou todos os valores, e de um valor observado verdadeiramente “1” o modelo acertou o valor. Nesse caso todas as medidas de avaliação são 100 %, mas como foi acertado seis valores negativos e só um valor positivo dito período é categorizado como período com liberação de bebida, de acordo com a codificação da Figura 3.5.

A parte B tem uma interpretação semelhante, só que nesta matriz o valor de 6 está presente no quarto quadrante, o que indica que de sete observações verdadeiras “1” o modelo acertou seis e existe uma observação no terceiro quadrante da matriz que indica que o valor observado era positivo “1”, porém, o modelo realizou a previsão falsa “0”, denominada como um falso negativo, que faz com que a sensibilidade e a acurácia diminuam para 87,7 % e 85,7 %, respectivamente, mesmo assim, as métricas, tem valores relativamente altos, portanto, o

período pode ser categorizado como um período sem consumo de bebida, de acordo com a codificação da Figura 3.5.

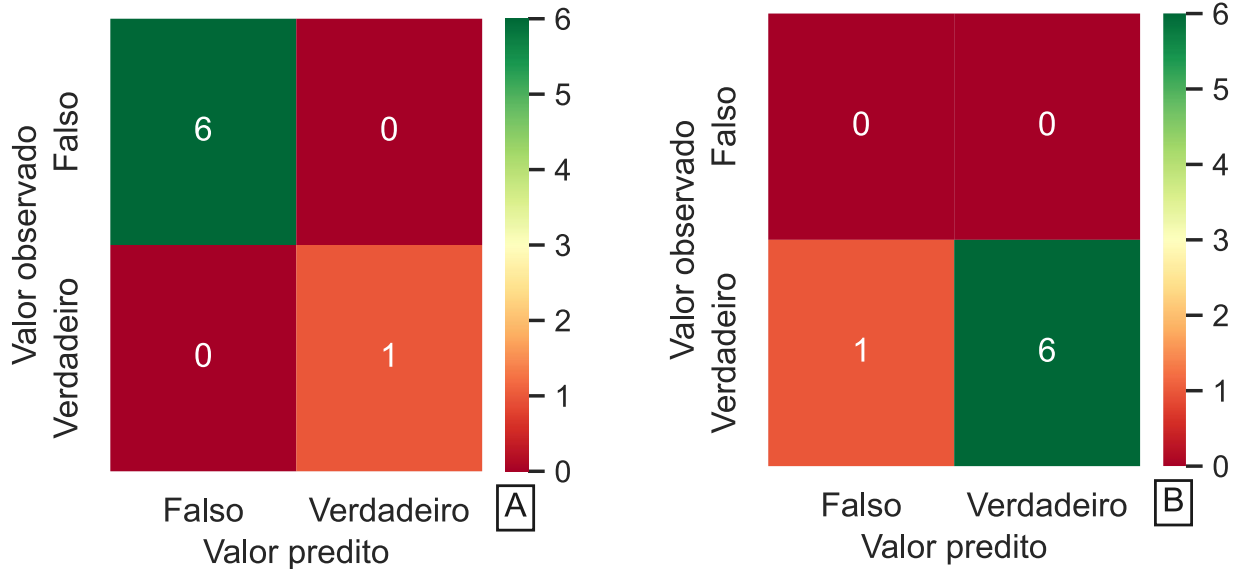


Figura 4.8 – A) Matriz de confusão para períodos com consumo de bebidas. B) Matriz de confusão para períodos sem consumo de bebida. Fonte: Autor.

4.5 Implementação do sistema de controle proposto

4.5.1 Implementação do controlador on off digital

Como o ajuste da referência do pressostato mecânico era totalmente manual (por meio de um parafuso), foi necessário trocar o pressostato por um controlador digital e assim garantir a repetibilidade no sistema na hora de realizar a mudança da referência. Como foi exibido na Figura 3.8, o sistema de controle usou um sensor de pressão localizado no evaporador para realizar o controle de pressão do RB. Mas, como a saída do sensor é analógica, foi facilmente contaminada com ruídos presentes no ambiente de instalação. Estas interferências ocasionavam que o sistema de controle ligava o compressor antes da referência fora alcançada.

Na Figura 4.9, é mostrada o sinal de pressão antes e após da implementar de um filtro para eliminar a componente de ruído. Conforme pode ser observado, o sinal está contaminado com um componente de ruído que oscila periodicamente sobre o sinal do sensor, cuja frequência foi determinada experimentalmente mediante um osciloscópio de alta precisão, em que foi descoberta a frequência de 60 Hz. Desta forma, foi necessário implementar um filtro passa baixa (filtro RC) com frequência de corte em aproximadamente 5 Hz para eliminar a

componente do ruído que interferia no sistema de controle. A segunda sinal (PB_filtrada) foi registrado depois da implementação do filtro RC na saída do sensor de pressão, percebe-se que a componente de ruído foi eliminada do sistema, apresentado um sinal sem oscilações, o que permitiu que o sistema de controle enviara o sinal de ligar o compressor, quando realmente a referência era atingida.

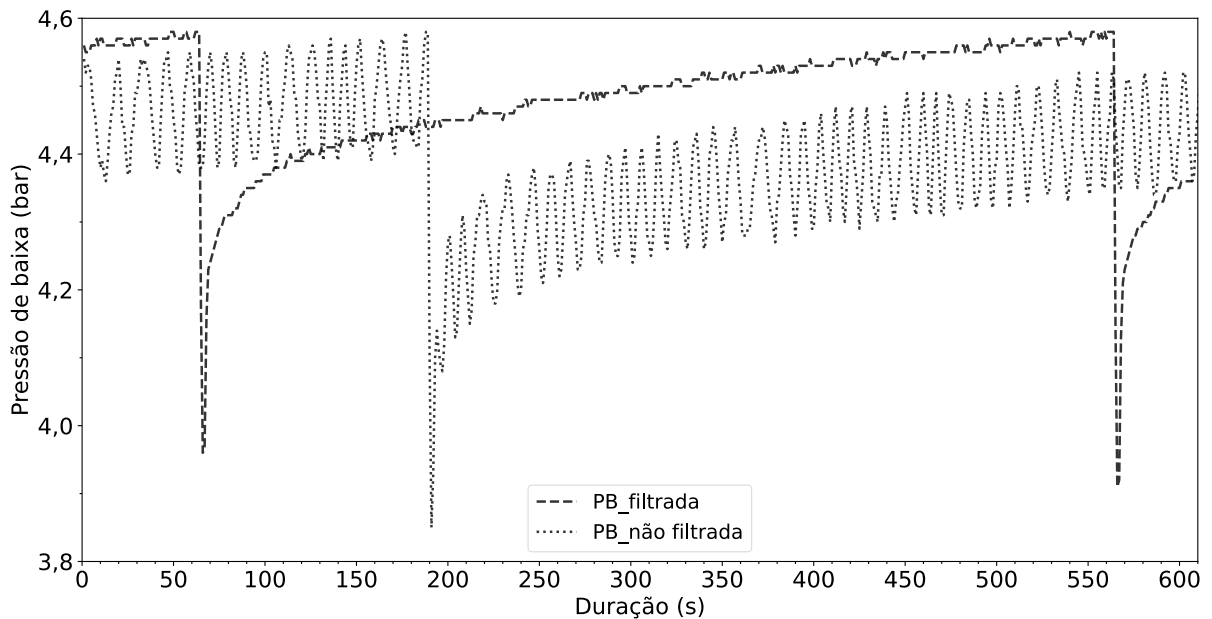


Figura 4.9 – Comparação do sinal de pressão filtrada e sem filtrar. Fonte: Autor.

4.5.2 Implementação da mudança de referência no sistema de controle

De acordo com a análise realizada na seção 4.4.1, foi encontrado um horário (23 h até 5 h) onde o refrigerador de bebidas permanece sem liberação de bebida. Nesse período foi implementada a metodologia proposta na seção 3.6, com o intuito, de avaliar o consumo de energia elétrica e determinar se é viável a implementação da nova estratégia de controle proposta.

As novas referências foram escolhidas de acordo com a faixa de trabalho do compressor. Inicialmente foi determinada a temperatura de evaporação do sistema de acordo com a pressão configurada no pressostato que era de 4,57 bar, a qual tem como equivalente uma temperatura de saturação de 3,56 °C para o refrigerante R-22. Para este estudo foi proposto duas referências novas acima da referência do trabalho apresentadas na Tabela 4.10. Essas referências são implementadas no período das 23 h até 05 h 59 min 59, ao longo de uma semana para cada referência e assim analisar a influência que tem no consumo de energia elétrica do RB.

Tabela 4.10 – Referências de pressão. Fonte: EES® (*Engineering Equation Solver*).

Pressão manométrica (bar)	Temperatura de saturação (°C)
4,57	3,54
5,80	9,99
6,88	14,98

Inicialmente o sistema de controle foi configurado para trabalhar com a mesma pressão do pressostato mecânico (4,57 bar, pressão manométrica) e foi registrado o consumo de energia elétrica durante o período das 23 h até 05 h 59 min 59 s. Posteriormente foi implementada as novas referências propostas da Tabela 4.10 e registrado o consumo de energia elétrica para cada referência. Além disso, para garantir uma comparação justa, foi verificado que o consumo de bebida fosse exatamente zero. No Apêndice VIII é mostrado o consumo de energia elétrica para as diferentes referências em estudo, ao longo de uma semana (7 amostras) no período estabelecido. Com estes dados foi determinada uma média de consumo de energia elétrica para cada referência, cujos dados são apresentados na Tabela 4.11. Foi possível identificar que à medida que era aumentada a referência, o consumo de energia elétrica diminuiu, tendo uma redução de aproximadamente 12,7 % e 41,4 % para a referência de 5,80 bar e 6,88 bar, respectivamente. Cabe ressaltar que o IC foi criado baseado no procedimento da seção 3.3.5.

Tabela 4.11 – Resumo de consumo de energia elétrica com diferentes referências. Fonte: Autor

<i>Setpoint</i> (bar)	Média de consumo de energia elétrica (kVAh)	Desvio padrão (kVAh)	± IC (kVAh)	Redução (%)	Valor-p
4,57	0,0714	0,004	0,003	0*	0,64
5,80	0,0623	0,002	0,002	12,7	0,05
6,88	0,0418	0,003	0,003	41,4	0,07

*Valor de referência.

Para confirmar que com o aumento do *Setpoint* diminuiu o consumo de energia elétrica, foi realizado o teste de hipótese apresentado na seção 3.6.1, em que o parâmetro a comparar foi o consumo de energia do RB quando trabalha com o *Setpoint* de 4,57 bar em relação aos outros *setpoints* (5,80 bar e 6,88 bar). O nível de confiança usado foi de 95 %, resultando em um valor de significância α de 0,05 com 6 graus de liberdade. Na Figura 4.10 pode ser observado o valor

de t_α (-1,9432) e o valores de t_{obs} (-13,9480 e -21,6402) determinados para o *Setpoint* de 5,80 bar e 6,88 bar respectivamente. Foi observado que para as duas referências o valor de t_{obs} está na região de rejeição de H_0 , ou seja, tem-se a confiança estatística para dizer que ao trabalhar com as novas referências propostas o RB vai ter redução no consumo de energia no período estabelecido.

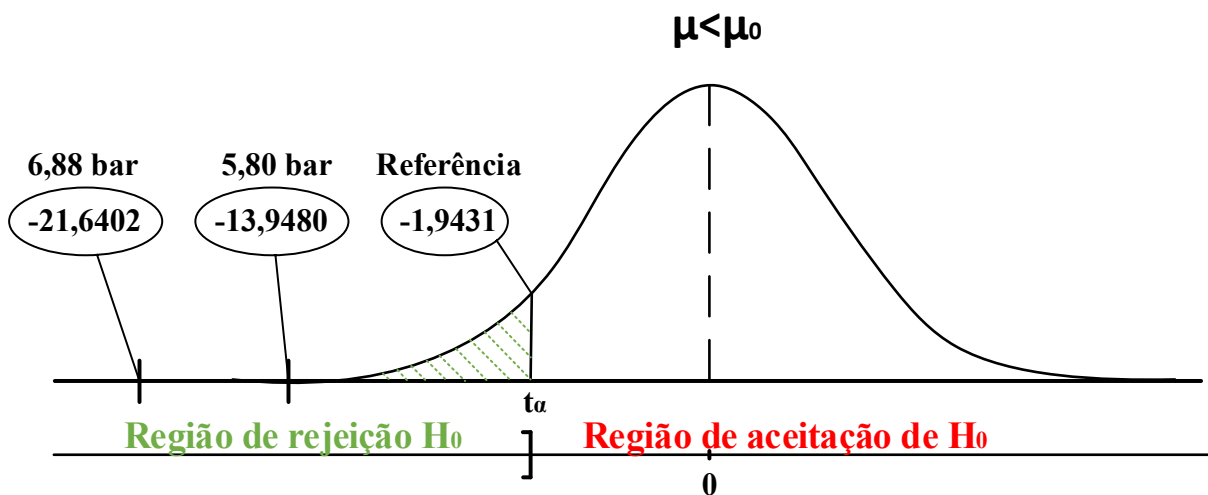


Figura 4.10 – Validação estatística para as referências de pressão propostas. Fonte: Autor

Na Figura 4.11 é mostrada a evolução do sinal de controle (pressão de baixa) no período das 23 h até 5 h 59 min 59 s para os diferentes *setpoints* em estudo (SP_{5,80} bar e SP_{6,88} bar) e para o *Setpoint* de trabalho (SP_{4,57}bar), além disso, é apresentada a temperatura de saturação (T_Sat) equivalente para cada referência. Pode ser observado que a pressão aumenta à medida que avança o tempo. Por outro lado, quando a pressão do sistema atinge o *Setpoint*, o RB liga o compressor e faz a redução da pressão, até alcançar o limite inferior configurado no sistema de controle, posteriormente, o sistema inicia o ciclo novamente, tendo assim um comportamento cíclico durante o período de funcionamento.

Pode-se inferir que o RB tem uma ciclagem de aproximadamente seis ciclos por hora quando trabalha com o *Setpoint* de 4,57 bar e de quatro ciclos por hora para o *Setpoint* de 5,80 bar, enquanto para o *setpoint* de 6,88 bar a ciclagem foi de um, no final do período em estudo. Fica evidente que à medida que se aumenta o *Setpoint*, a ciclagem do refrigerador de bebidas diminui, tendo uma redução de aproximadamente 60 % e 100 % para os *Setpoint* de 5,80 bar e 6,88 bar, respectivamente, em relação ao *Setpoint* de 4,57 bar.

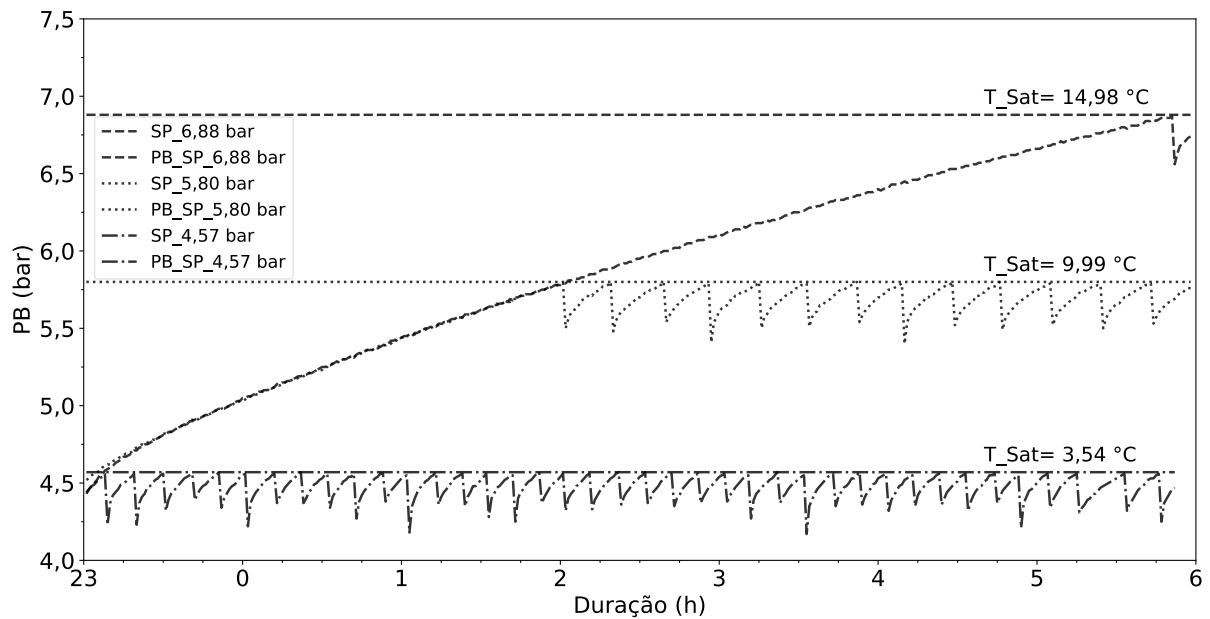


Figura 4.11 – Evolução do sinal de pressão para diferentes *Setpoint* s. Fonte Autor.

Como foi apresentado anteriormente, com a mudança de *Setpoint* o RB tem redução do consumo de energia elétrica, por isso, foi escolhido o *Setpoint* com maior redução no consumo de energia elétrica (6,88 bar), posto que, nestes períodos a temperatura da bebida fornecida não seria afetada, por ser um período categorizado sem consumo de bebida. Por isso foi implementado o sistema de controle da Figura 3.9, onde o *Setpoint* 1 (SP₁) refere-se ao valor de pressão de 4,57 bar (controle convencional) e o SP₂ é o valor de pressão de 6,88 bar (controle proposto). Baseado nestas referências o RB trabalhou de forma contínua, trocando o *Setpoint* de hora em hora de SP₂ para SP₁ e vice-versa, quando existia liberação de bebida.

Na Figura 4.12 é apresentada a evolução do sinal de controle (PB) durante um dia normal de trabalho. Pode ser observado que aproximadamente no período das 6 h até 15 h o RB trabalhou com o SP₁ de forma contínua. O sistema de controle realizava a mudança a cada hora e retornava para SP₁ quando o sistema detectava liberação de. Além disso, foi possível identificar que o RB trabalhou com o SP₂ no período das 16 h até 18 h. Isso indica que naquela hora não houve liberação de bebida. O sistema identificou que existiu um consumo de bebida no período das 18 horas, isso ocasionou a mudança no *Setpoint* de controle para o SP₁. Depois das 19 h observou-se que o *Setpoint* de trabalho permaneceu em 6,88 bar, ou seja, não houve liberação de bebida. A segunda estratégia de controle se destaca com respeito à primeira, em que, permite poupar energia em períodos do dia que não tem consumo de bebida (16 h até 18

h) e permite iniciar a trabalhar com a segunda referência antes do período predefinido, isso leva a ter uma maior redução no consumo de energia elétrica.

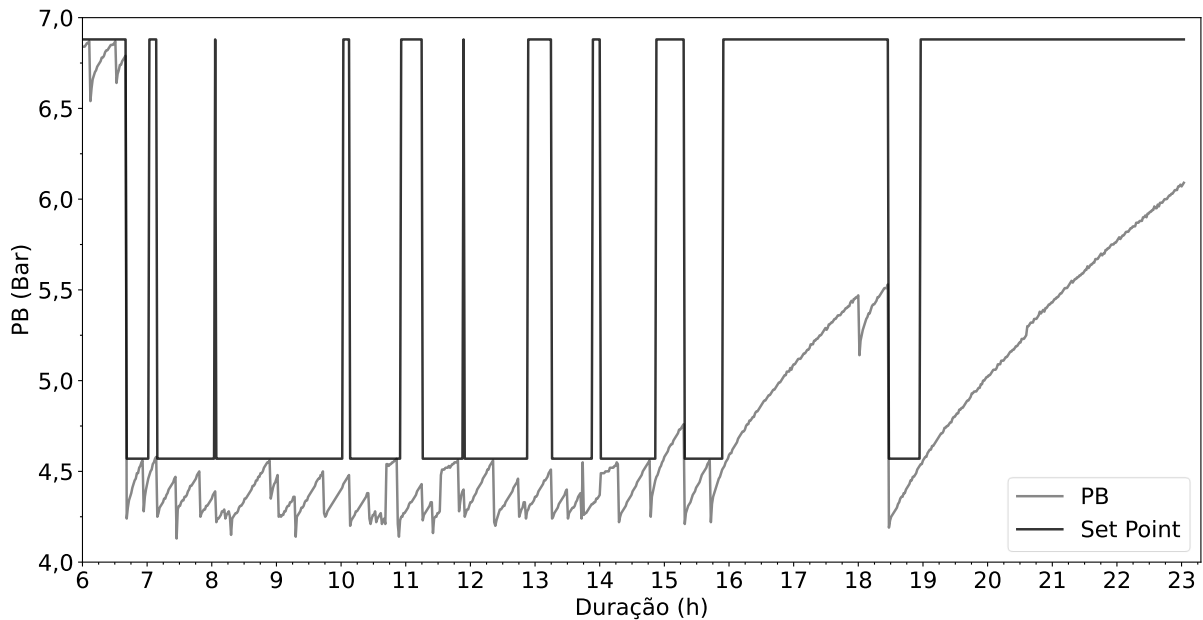


Figura 4.12 – Evolução do sinal de pressão com o sistema de controle proposto. Fonte: Autor

De acordo como a análise dos resultados, foi identificado que o consumo de energia elétrica do RB tem uma relação diretamente proporcional com o consumo de bebida, conforme é mostrado na Figura 4.13 e Figura 4.14, em que é apresentado o comportamento do sistema durante um dia da semana e um final de semana, respectivamente. Fica evidente que uma elevada liberação de bebida acarreta um consumo de energia elétrica maior. Além disso, pode ser observado que o consumo de bebida em um final de semana (Figura 4.14 parte A) é menor em comparação ao consumo de bebida durante um dia da semana (Figura 4.13 parte A) ocasionando que o consumo de energia elétrica seja maior durante a semana em comparação com o final de semana.

Existem vários períodos do dia em que a liberação de bebida é zero. Nesses períodos o consumo de energia foi maior para o controle convencional em comparação com o controle proposto, cujo comportamento pode ser explicado pelo fato que o RB precisa ligar mais vezes para manter a pressão de controle, o que ocasionou um aumento no consumo de energia elétrica, mesmo que a liberação de bebida seja zero.

Quando o RB realiza a mudança na referência de controle de SP_1 para SP_2 , uma energia térmica permaneceu no evaporador, a qual permitiu manter o sinal de controle menor que o SP_2

por aproximadamente sete horas. Nesse período, o consumo de energia elétrica é zero para o controle proposto, conforme pode ser observado na Figura 4.13 parte B, para o período das 0 h até as 6 h e na Figura 4.14 parte B nos períodos das 21 h até 3 h do sábado para o domingo e das 13 h até 19 h do domingo. Após esse período, o RB inicia o processo de ciclagem para manter o sinal de controle, porém, ainda assim, o consumo de energia elétrica é inferior ao apresentado pelo controle convencional.

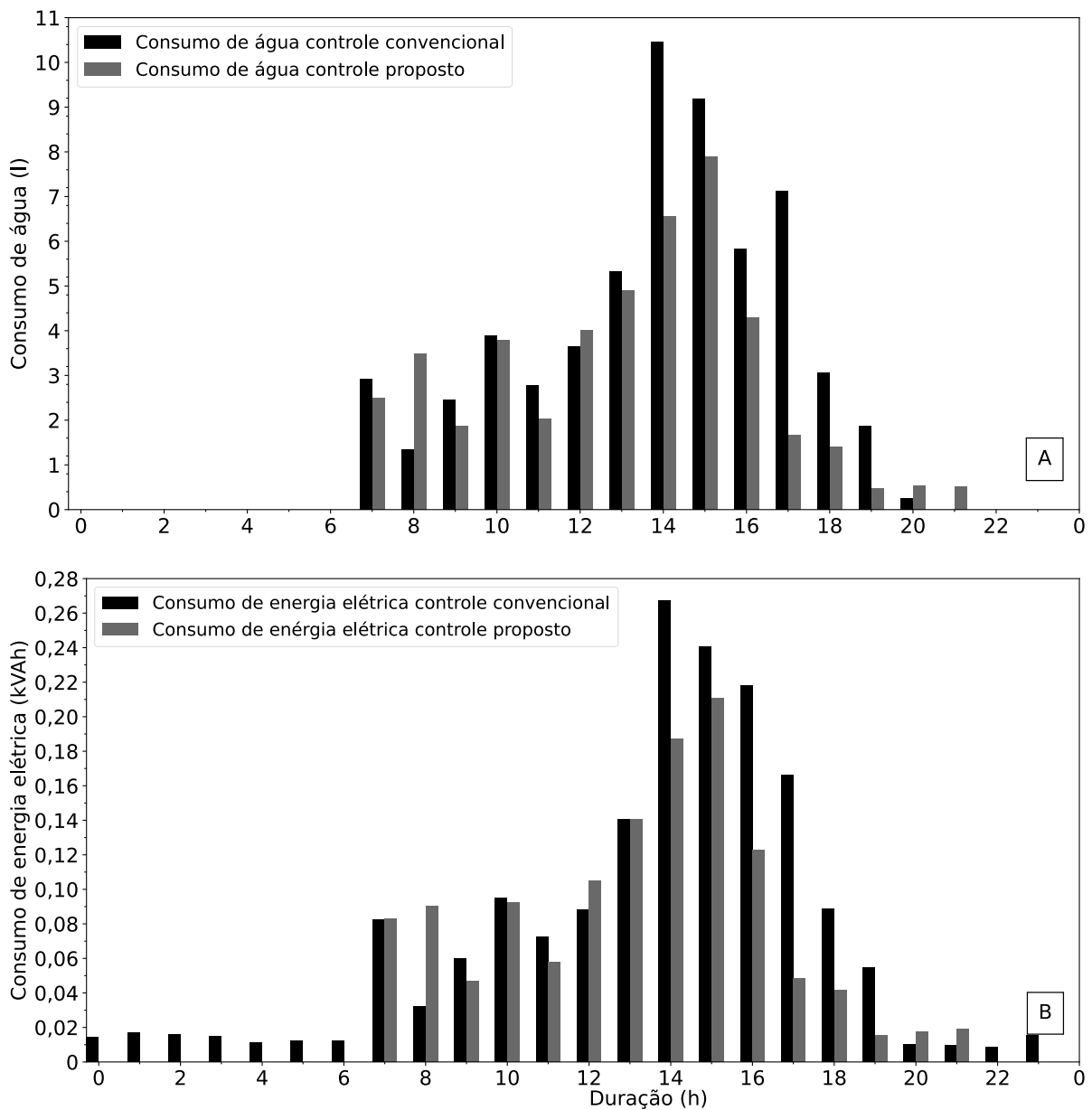


Figura 4.13 – Comparação do consumo bebida e B) Comparação do consumo de energia elétrica entre o sistema de controle proposto e o sistema convencional, durante um dia da semana.

Fonte: Autor.

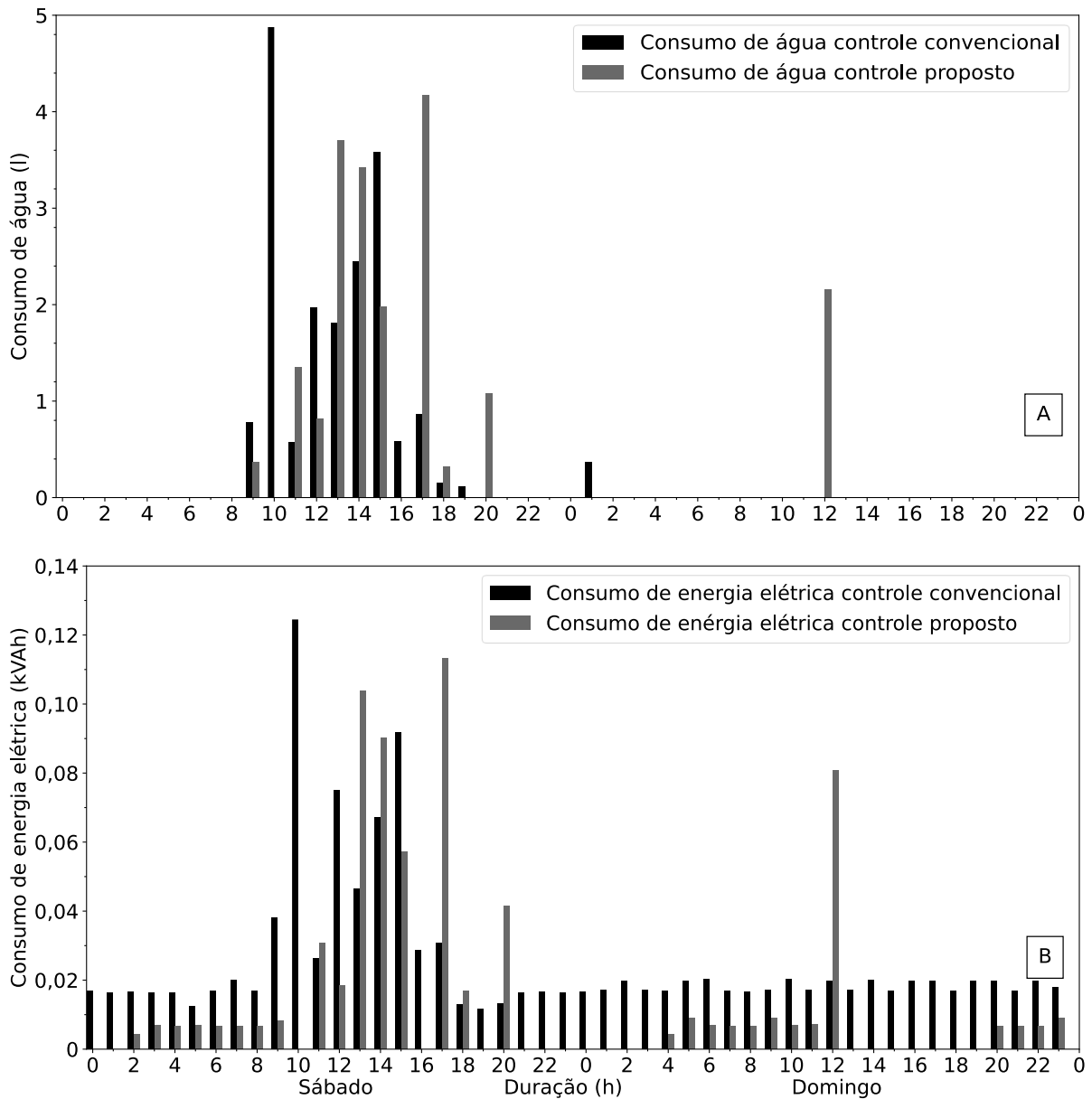


Figura 4.14 – A) Comparação do consumo bebida e B) Comparação do consumo de energia elétrica entre o sistema de controle proposto e o sistema convencional, durante um final de semana. Fonte: Autor.

Depois que os dois sistemas de controle iniciam o processo de ciclagem para manter a referência, foi realizada uma comparação baseada no consumo de energia elétrica nos períodos sem liberação de bebida. Os valores são apresentados na Tabela 4.12, na primeira coluna é mostrado a hora, onde os dois sistemas de controle tem consumo de energia elétrica e não tem consumo de bebida de acordo com a Figura 4.14, as duas colunas restantes tem a quantidade de energia elétrica consumida para cada sistema de controle, em que se tem uma média do

consumo de energia elétrica por hora de $17,615 \pm 0,932$ VAh e $6,889 \pm 0,583$ VAh para o controle convencional e o controle proposto, respectivamente, para um IC de 95 %. Portanto, houve uma redução de aproximadamente 60,9 % no consumo de energia elétrica ao utilizar o controle proposto em relação ao controle convencional, nos períodos em que os dois controles realizam o processo de ciclagem e que não tem liberação de bebida.

Tabela 4.12 – Comparação dos sistemas de controles em períodos de ciclagem. Fonte: Autor⁸

Hora do dia	Consumo energia elétrica	Consumo energia elétrica
	controle convencional (VAh)	controle proposto (VAh)
2-Sab	16,56	4,43
3-Sab	16,43	6,88
4-Sab	16,46	6,63
5-Sab	12,47	6,85
6-Sab	16,88	6,64
7-Sab	19,99	6,58
8-Sab	16,89	6,75
4-Dom	16,80	4,43
5-Dom	19,67	9,07
6-Dom	20,21	7,00
7-Dom	16,88	6,69
8-Dom	16,51	6,58
9-Dom	17,17	9,00
10-Dom	20,21	7,03
11-Dom	17,10	7,30
20-Dom	19,73	6,64
21-Dom	16,93	6,80
22-Dom	19,75	6,61
23-Dom	18,04	8,98
Média (VAh)	17,615	6,889
Desvio padrão (VAh)	1,934	1,211
\pm IC (VAh)	0,932	0,583

⁸Sab refere-se ao dia sábado e Dom é o dia domingo.

Na Figura 4.15 é ilustrado a evolução da corrente do RB em período de ciclagem para os dois sistemas de controle. Pode ser observado que os valores de corrente são relativamente altos, cujo comportamento pode ser explicado pelo acionamento do compressor, que exige uma corrente maior no momento da partida. Além disso, é exibido que se tem aproximadamente seis e três ligações do compressor por hora para o controle convencional e o controle proposto, respectivamente, ou seja, uma redução da ciclagem de aproximadamente 50 %.

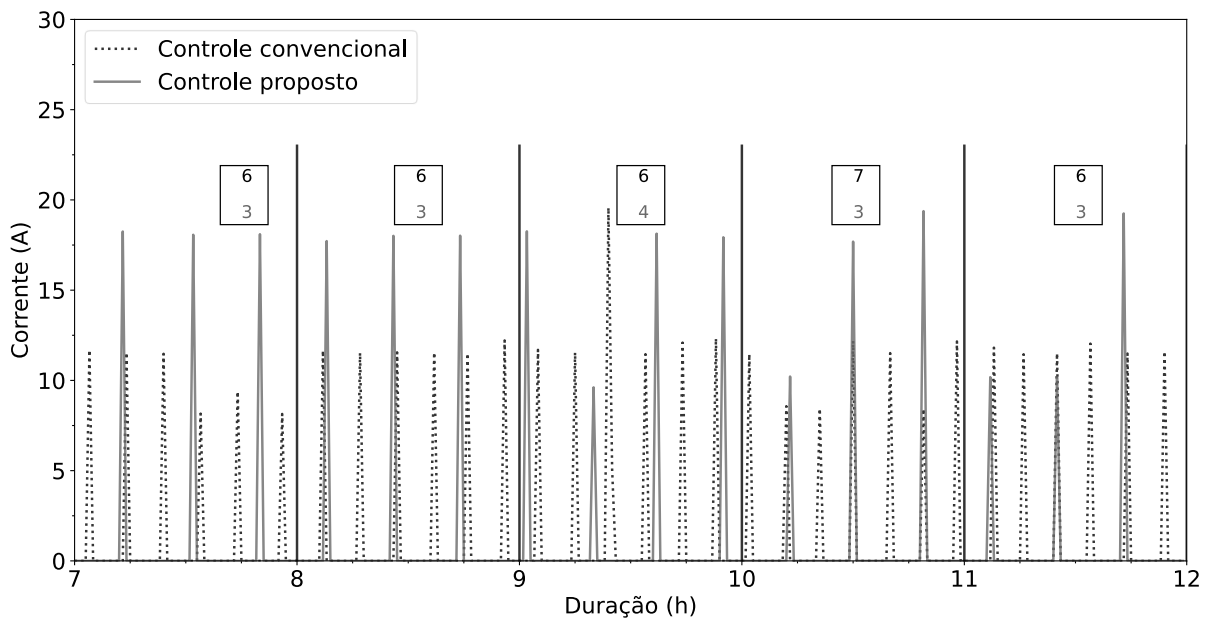


Figura 4.15 – Comparação de corrente dos sistemas de controle em períodos de ciclagem. Fonte: Autor

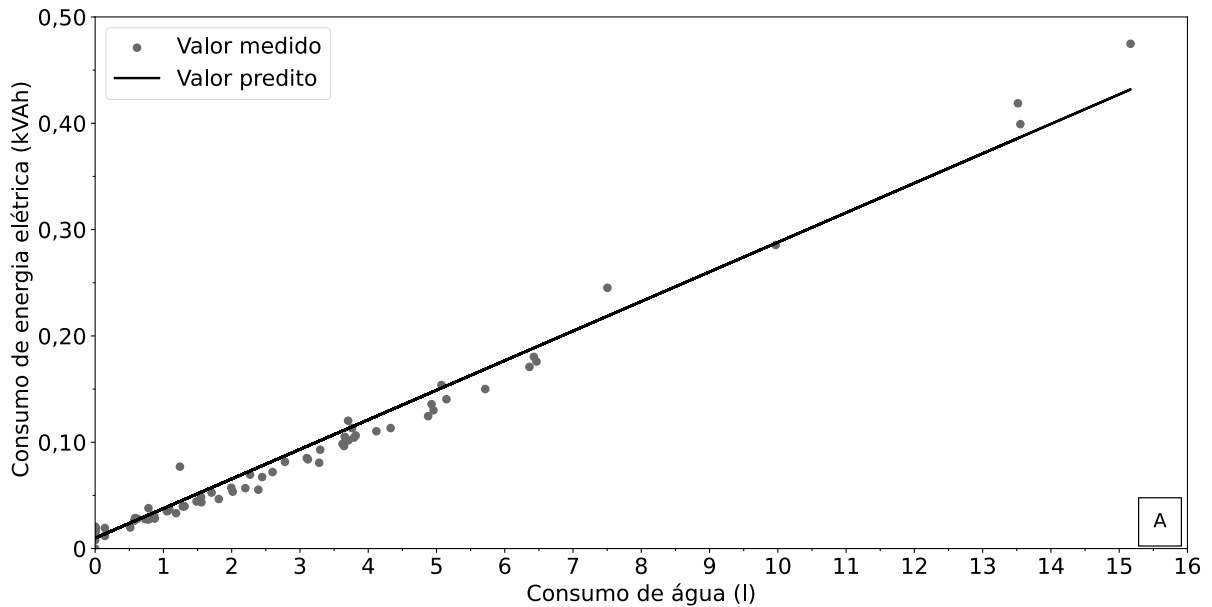
Conforme foi apresentado na Figura 4.13 e Figura 4.14, o consumo de energia elétrica é diretamente proporcional à liberação da bebida. Além disso, foi identificado que o consumo de bebida é menor nos finais de semana (sábado e domingo) do que nos dias da semana (segunda-feira até sexta-feira). Com estas observações, foi encontrada uma correlação para representar o consumo de energia elétrica em função do consumo de bebida para o sistema de controle convencional e o sistema de controle proposto.

Inicialmente foi determinada a correlação para o sistema de controle convencional. Para isso, foi separado o conjunto de dados geral em dados de treinamento e dados de validação, usando uma codificação disponível em *python*. Na Figura 4.16, parte A, é mostrada a fase de treinamento e na parte B, a fase de validação, usando um modelo de regressão linear simples, codificado em *python*. Pode ser inferido que o modelo de regressão tem uma alta

explicabilidade do conjunto de dados, por apresentar um R^2 de 0,981 na fase de treinamento e 0,987 na fase de validação. Além disso, os erros do modelo são relativamente baixos, tendo um MAE de $8,97 \cdot 10^{-3}$ kVAh e $8,63 \cdot 10^{-3}$ kVAh e um RMSE de $11,22 \cdot 10^{-3}$ kVAh e $10,02 \cdot 10^{-3}$ kVAh, para a fase de treinamento e validação, respectivamente. O modelo matemático que representa esta correlação é apresentado na Eq.(4.2) e será usada para determinar o consumo de energia elétrica semanal para o sistema de controle convencional.

$$CE = 0,027822 \cdot 10^{-3} \cdot CA + 9,859931 \cdot 10^{-3} \quad (4.2)$$

em que CE (kVAh) refere-se ao consumo de energia elétrica e CA (l) é consumo de água.



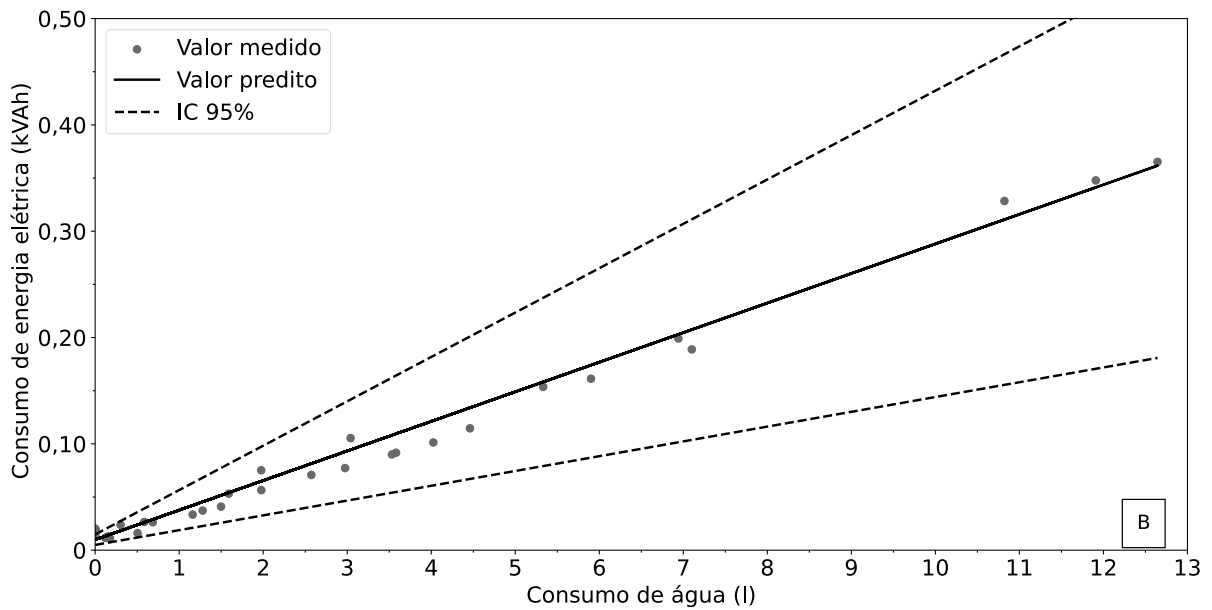


Figura 4.16 – A) Dados de treinamento e B) dados de validação, para o controle convencional.

Fonte: Autor.

A equação que descreve o comportamento do refrigerador de bebidas quando trabalha com o controle proposto foi dividida em duas partes. Uma equação para modelar o comportamento de segunda-feira até sexta-feira e outra para os finais de semana. Esse procedimento foi realizado com o intuito de ter um comportamento mais aproximado aos dados experimentais, pois, os finais de semana o RB, realiza os processos de ciclagens causados pela pouca liberação de bebida, gerando um consumo de energia elétrica em períodos sem consumo de bebida. Por outro lado, nos dias entre segunda-feira até sexta-feira, o RB tem maior frequência de liberação de bebida, pelo que o consumo de energia elétrica é igual a zero nos períodos sem liberação de bebida.

Na Figura 4.17 é mostrada a fase de treinamento (parte A) e a fase de validação (parte B) para o sistema de controle proposto. Essa figura representa o comportamento durante os dias da semana de segunda-feira até sexta-feira. Foi possível perceber que o comportamento pode ser modelado com uma equação linear, a qual apresentou um R^2 de 0,984 e de 0,985 para os dados de treinamento e validação, respectivamente, ou seja, o modelo tem uma alta explicabilidade dos dados e é um modelo adequado para determinar o consumo de energia elétrica em função do consumo de bebida. Além disso, as métricas baseadas nos erros do modelo apresentaram valores relativamente baixos, tendo um MAE de $7,48 \cdot 10^{-3}$ kVAh e $5,57 \cdot 10^{-3}$ kVAh e um RMSE de $11,32 \cdot 10^{-3}$ kWh e $10,10 \cdot 10^{-3}$ kWh, para a fase de treinamento

e validação, respectivamente. Dita correlação é mostrada na Eq.(4.3) e será usada para determinar o consumo de energia elétrica para o sistema de controle proposto nos dias de segunda-feira até sexta-feira.

$$CE = 0,027305 \cdot 10^{-3} \cdot CA \quad (4.3)$$

em que CE (kVAh) refere-se ao consumo de energia elétrica e CA (l) é consumo de água.

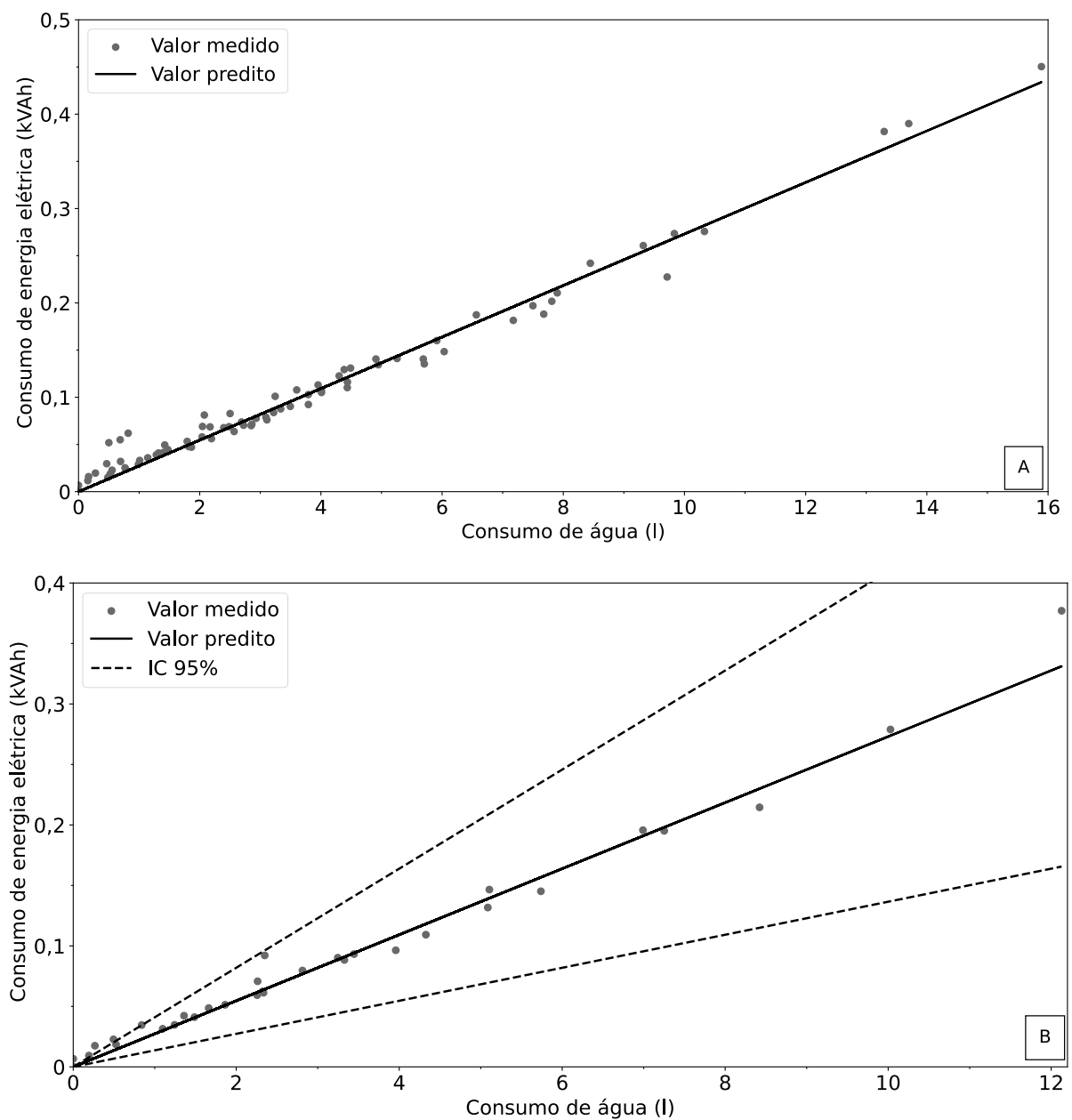
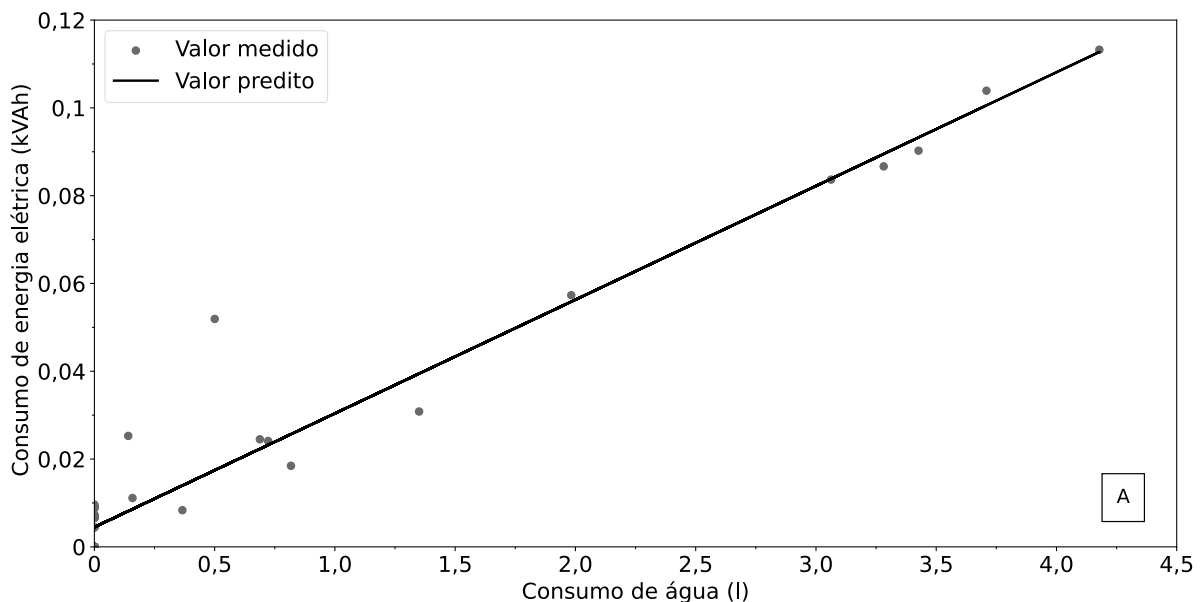


Figura 4.17 – A) Dados de treinamento e B) dados de validação, para os dias de segunda-feira até sexta-feira para com o controle proposto. Fonte: Autor

Na Figura 4.18 são exibidos os dados de consumo de energia elétrica durante um final de semana em função do consumo de bebida para a fase de treinamento (parte A) e para a fase de validação (parte B). Conforme foi mencionado anteriormente, nos finais de semana, a liberação de bebida era baixa, ocasionando consumo de energia elétrica em períodos sem consumo de bebida, conforme foi ilustrado na Figura 4.14. Conquanto, o comportamento é linear e pode ser representado por uma equação linear de primeira ordem apresentada na Eq.(4.4), com a qual foi obtido erros relativamente baixos, de $4,14 \cdot 10^{-3}$ kVAh e $4,47 \cdot 10^{-3}$ kVAh para o MAE e de $5,85 \cdot 10^{-3}$ kVAh e $5,98 \cdot 10^{-3}$ kVAh para o RMSE, além disso, o R^2 foi de 0,942 e 0,903, na fase de treinamento e validação, respectivamente. Isso indica que o modelo tem uma boa explicabilidade dos dados, mesmo tendo uma redução do R^2 para a fase de validação em comparação com a fase de treinamento. Os dados ficaram no intervalo de confiança de 95 %, conforme é mostrado na parte B da Figura 4.18. Dita correlação será usada para determinar o consumo de energia elétrica para o controle proposto nos finais de semana.

$$CE = 0,025901 \cdot 10^{-3} \cdot CA + 4,487857 \cdot 10^{-3} \quad (4.4)$$

em que CE (kVAh) refere-se ao consumo de energia elétrica e CA (l) é consumo de água.



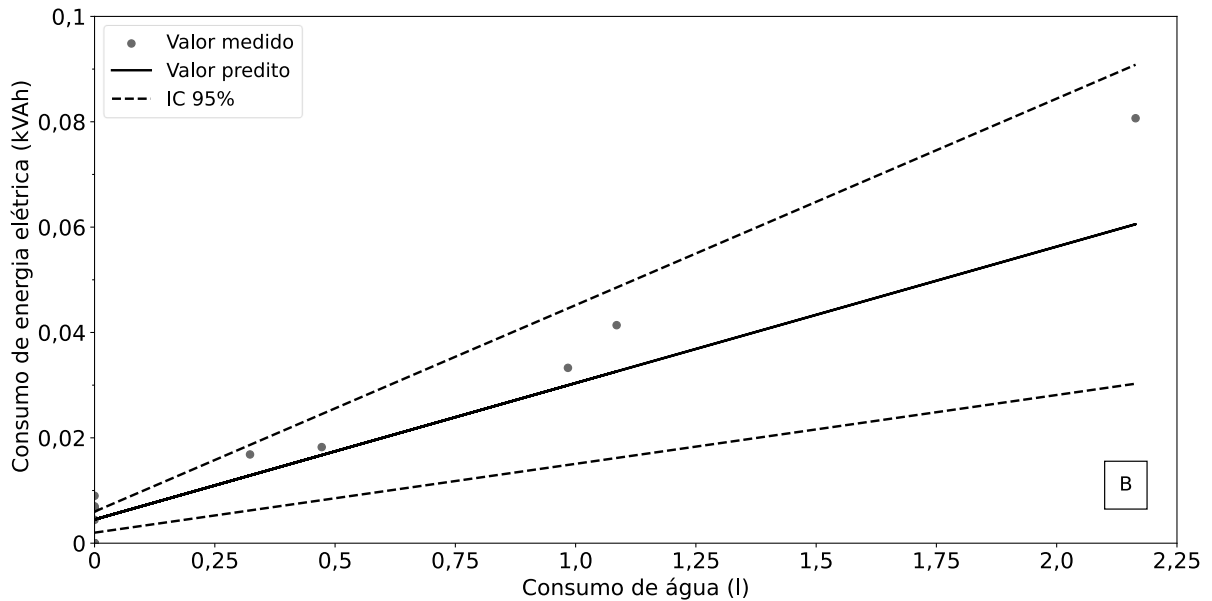


Figura 4.18 – A) Dados de treinamento e B) dados de validação, para os finais de semana com o controle proposto. Fonte: Autor

4.6 Análise dos impactos indiretos e análise de custos

Conforme foi apresentado, nesta seção será determinada a parcela correspondente aos impactos indiretos do RB ao trabalhar com o controle convencional e o controle proposto. Além disso, será determinado o custo que consumiria o RB funcionando em cada região do país, operando com os dois sistemas de controle.

Nesta seção, para quantificar a parcela referente aos impactos indiretos, valor do TEWI e custos foi preciso realizar uma conversão da unidade referente à energia elétrica de “kVA” para “kW”, para isso, foi usado o fator de potência (fdp) determinado experimentalmente em diferentes testes de laboratório, onde o valor foi aproximadamente de 0,89 e empregada a Eq.(4.5) para a respectiva conversão.

$$Energia\ elétrica_{kW} = Energia\ elétrica_{KVA} \cdot fdp \quad (4.5)$$

4.6.1 Análise dos impactos indiretos

Para realizar uma comparação dos impactos indiretos que o RB geraria ao trabalhar com o controle proposto e com o controle convencional foi preciso calcular o consumo de energia elétrica anual, conforme foi mencionado na sessão 3.7.1. Para isso, foi determinado o consumo de energia elétrica para o controle convencional e o controle proposto empregando dois métodos: o primeiro, por meio da Eq.(3.5) sugerida pela norma ASHRAE 32.2, para determinar

o consumo de energia elétrica diário e usando a Eq.(3.25) para determinar a quantidade de energia elétrica anual, e a segunda, baseada nas correlações encontradas na seção anterior e empregando o padrão de consumo do usuário, modelado pela Eq.(3.7).

Na Tabela 4.13 é apresentado um resumo dos parâmetros necessários para determinar o consumo de energia elétrica anual aplicando o primeiro método. Para os dois controles, o consumo de energia elétrica no teste de capacidade padrão é igual, pois, sempre que tem liberação de bebida, o sistema trabalha com o *Setpoint* de 4,57 bar, da mesma forma que o tempo de duração do teste. A diferença entre os dois controles é evidenciada no consumo de energia elétrica em modo *Standby*, por ter uma redução 57,4 % do consumo de energia elétrica por hora entre o controle proposto e o controle convencional, fazendo com que o consumo de energia elétrica anual tenha uma diminuição de 14,8 % ao usar o controle proposto em relação com o controle convencional.

Tabela 4.13 – Comparação do consumo de energia elétrica anual através do primer método.

Fonte: Autor

Tipo de controle	EC_{TCP} (kWh)	EC_{TSB} (Wh)	t_{TCP} (h)	E_{DT} (kWh·Dia ⁻¹)	E_{anual} (kWh·ano ⁻¹)	Redução (%)
Convencional		15,18		1,363	497,52	---
Proposto	0,506	6,47	0,44	1,161	424,05	14,8

Para determinar o consumo de energia elétrica anual através do segundo método, é assumida as hipóteses de que o refrigerador de bebidas trabalha durante o ano todo com o padrão de consumo identificado na análise de séries temporais e modelado através do método multiplicativo. Com esta previsão de consumo de bebida e com as correlações das Eq. (4.2), (4.3) e (4.4), foi determinado o consumo de energia elétrica semanal, para os dois sistemas de controle. Para determinar o consumo de energia elétrica do controle convencional foi utilizada a Eq.(4.6), que determina a somatória do consumo energia elétrica, para cada previsão realizada pelo M_M ao longo de uma semana (168h). Já para o sistema de controle proposto foi empregada a Eq.(4.7) em que foi determinado o consumo de energia elétrica por meio de duas somatórias, a primeira, com valores previstos de segunda-feira até sexta-feira (0h até120 h) e a segunda com os dados previstos no final de semana (121 h até 168 h).

Na Tabela 4.14 é apresentada a comparação entre os dois sistemas de controle, o consumo de energia anual foi de aproximadamente 400,63 kWh·ano⁻¹ e 326,87 kWh·ano⁻¹, para o

controle convencional e o controle proposto, respectivamente, alcançando uma redução de 18,4 % no consumo de energia elétrica. Cabe ressaltar que o consumo de energia elétrica anual foi calculado através da Eq.(4.8), onde a fração $365/7$ faz referência aos dias do ano dividido pelo número total de dias de uma semana.

$$EC_{Semanal_SP_1} = \left(\sum_{i=0}^{168} 0,027822 \cdot 10^{-3} \cdot VPST_i + 9,859931 \cdot 10^{-3} \right) \cdot fdp \quad (4.6)$$

$$EC_{Semanal_SP_2} = \left(\sum_{i=0}^{120} 0,027305 \cdot 10^{-3} \cdot VPST_i + \sum_{i=121}^{168} 0,025901 \cdot 10^{-3} \cdot VPST_i + 4,487857 \cdot 10^{-3} \right) \cdot fdp \quad (4.7)$$

$$E_{anual} = \frac{EC_{Semanal} \cdot 365}{7} \quad (4.8)$$

em que $VPST_i$ (1) refere-se ao valor previsto no período i pelo modelo multiplicativo, $EC_{Semanal}$ é o consumo de energia elétrica semanal expressada em $kVAh \cdot semana^{-1}$ e fdp é o fator de potência.

Tabela 4.14 – Comparação do consumo de energia elétrica anual, através do segundo método.

Fonte: Autor

Tipo de controle	$EC_{semanal}$ ($kWh \cdot Semana^{-1}$)	EC_{anual} ($kWh \cdot ano^{-1}$)	Redução (%)
Convencional	7,68	400,63	---
Proposto	6,26	326,87	18,4

Fica evidente que através dos dois métodos, o consumo de energia elétrica anual para o RB é menor para o controle proposto. Por outro lado, quando é determinado o consumo de energia elétrica pelo primeiro método, com a Eq. (3.5), foi assumido que o consumo de energia elétrica em modo *Standby* era constante durante os períodos que o sistema não tem liberação de bebida. Essa afirmação não aplica para o controle proposto, porque, conforme foi relatado, o RB não apresenta consumo de energia elétrica em determinados períodos quando não teve

liberação de bebida. Essa afirmação faz com que o consumo de energia elétrica aumente para o controle proposto através do método um.

Para determinar o impacto indireto foram utilizados os parâmetros mostrados na Tabela 3.5, em que foi empregado um tempo de vida útil do equipamento de 10 anos e um fator de emissão indireto de $73 \text{ kgCO}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}$, baseado na matriz energética de Brasil. O consumo de energia elétrica anual foi de $497,52 \text{ kW} \cdot \text{ano}^{-1}$ e $424,05 \text{ kW} \cdot \text{ano}^{-1}$ usando o método um e de $400,63 \text{ kW} \cdot \text{ano}^{-1}$ e $326,87 \text{ kW} \cdot \text{ano}^{-1}$ empregando o método dois, para o sistema de controle convencional e o controle proposto, respectivamente. A partir desses parâmetros foram determinados os impactos indiretos e o valor do TEWI apresentados na Tabela 4.15, onde foi possível obter uma redução de aproximadamente 14,8 % e 18,4 % nos impactos indiretos e de aproximadamente 14,3 % e 17,7 % no valor do TEWI, para o controle proposto em relação com o controle convencional respectivamente.

Cabe ressaltar que a parcela equivalente ao impacto direto é constante, pois, não foi alterada a carga do fluido refrigerante (R-22) do RB. De acordo com (THE AUSTRALIAN INSTITUTE OF REFRIGERTION AIR CONDITIONING AND HEATING, 2012), para considerar uma redução de um sistema de refrigeração no aquecimento global o valor TEWI, calculado deve ser acima de 10 %, quando é realizada a comparação entre os sistemas. Abaixo deste valor é considerado na faixa de incerteza. Pelo que pode ser inferido que independentemente do método usado para determinar o consumo de energia elétrica anual, o RB ao trabalhar com o controle proposto, apresentaria uma redução significativa nos gases de efeito estufa em comparação com o sistema de controle convencional.

Tabela 4.15 – Comparação dos impactos indiretos e TEWI para o controle proposto e controle convencional. Fonte: Autor.

Método	Tipo de controle	Impacto indireto tCO ₂	Redução (%)	TEWI tCO ₂	Redução (%)
1	Convencional	363,18	---	375,80	---
	Proposto	309,55	14,8	322,17	14,3
2	Convencional	292,46	---	305,08	---
	Proposto	238,57	18,4	251,19	17,7

4.6.2 Análise de custos

Para determinar o custo relacionado ao consumo de energia elétrica do RB, foi utilizado o valor do kWh, reportado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no anuário estático de energia elétrica referente ao ano 2021 (BRASIL, 2022), cujos valores foram apresentados na

Tabela 3.6 e classificados por regiões do país. Cabe ressaltar que os valores do kWh são tarifas médias por regiões e sem imposto. Uma vez que os custos totais terão um incremento de acordo como o imposto de cada região e da empresa distribuidora de energia elétrica.

O custo de energia elétrica foi calculado mensalmente, o qual é o formato que usam as empresas distribuidoras de energia elétrica para realizar a cobrança ao usuário. O custo mensal do RB foi calculado através da Eq.(3.26) utilizando o custo da tarifa média ($R\$ \cdot kWh^{-1}$) da

Tabela 3.6 e a quantidade de energia elétrica semanal consumida pelo RB determinada na seção anterior empregando o segundo método. Cabe ressaltar que foi assumido um mês com 30 dias para realizar o cálculo do consumo mensal de energia elétrica. Os valores são apresentados na Tabela 4.16 e de forma gráfica na Figura 4.19, em que os maiores custos foram obtidos para a região Norte do país, com valores de R\$ 21,29 e R\$ 17,42 para o sistema de controle convencional e proposto, respectivamente, enquanto para a região nordeste tem-se o menor custo com R\$18,77 e R\$ 15,36. Para todas as regiões do país os custos de operações relacionados ao consumo de energia elétrica foram menores quando o RB trabalhou com o sistema de controle proposto, tendo uma redução de aproximadamente 18,2 % em relação com o controle convencional.

Tabela 4.16 – Valor em Reais dos custos de operação mensal do RB para diferentes regiões do país. Fonte: Autor.

Tipo de controle	Norte (\$R)	Centro-Oeste (\$R)	Sudeste (\$R)	Sul (\$R)	Nordeste (\$R)
Convencional	21,29	20,51	20,35	19,17	18,77
Proposto	17,42	16,78	16,65	15,68	15,36
Redução (%)	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2

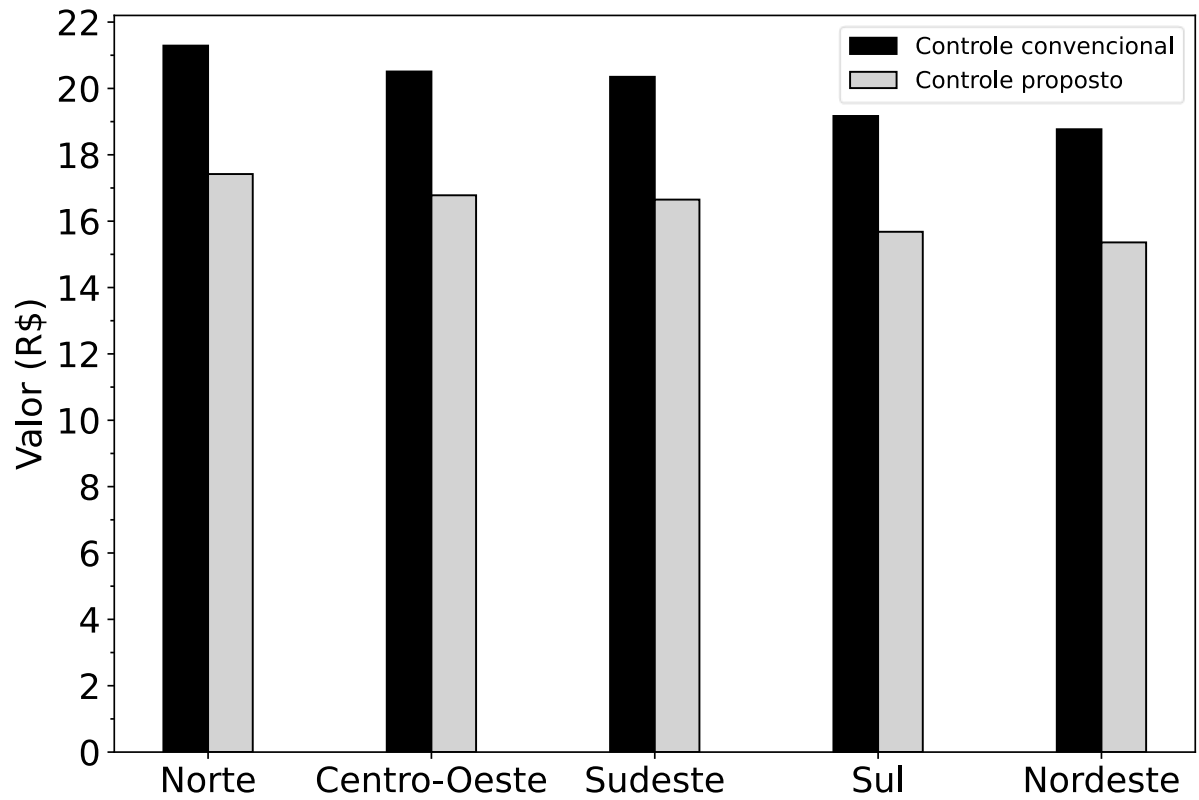


Figura 4.19 – Comparação dos custos do RB, entre o controle convencional e controle proposto para diferentes regiões do país. Fonte: Autor.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Com o uso da análise de séries temporais foi possível modelar a liberação de bebida de acordo com o comportamento do usuário, através do modelo multiplicativo. Adicionalmente, esse modelo conseguiu identificar os momentos em que houve ou não o consumo de bebida, cujos resultados apresentam precisão, sensibilidade e especificidade superiores a 85 %, em quase todos os períodos do dia.

Ao alterar o *Setpoint* da referência um para a referência dois, a energia térmica armazenada permanece no evaporador do refrigerador de bebidas do tipo direto. Essa energia térmica mantém o sinal de controle abaixo da referência por cerca de sete horas, o que permite reduzir o consumo de energia elétrica e a ciclagem do compressor em 41,4 % e 100 %, respectivamente, comparado com o sistema convencional, para períodos sem liberação de bebida.

Na comparação do consumo de energia elétrica em modo *Standby*, foi possível alcançar uma diminuição por hora de 57,4 % do sistema de controle proposto em comparação ao controle convencional. Além disso, quando os dois sistemas executam o processo de ciclagem, foi obtida uma queda de cerca de 50 % nas ligações do refrigerador de bebidas, por consequência os picos de corrente no início do compressor são reduzidos, acarretando o aumento da vida útil dos componentes do aparelho.

Como o consumo de energia elétrica diminuiu ao implementar o sistema de controle proposto, o consumo de energia elétrica anual também apresenta uma redução. Isso reduz os impactos indiretos em 18,4 %, consequentemente o TEWI decresce em 17,7 %. Portanto, o impacto no efeito estufa tende a ser menor quando o refrigerador de bebidas trabalha como o controle proposto em comparação com o controle convencional.

Em qualquer região do Brasil onde o refrigerador de bebidas do tipo direto seja instalado, os custos de operação serão menores com o controle proposto em comparação ao controle convencional, independentemente do preço do kWh de cada região e da empresa distribuidora de energia elétrica.

Conforme apresentado, o sistema de controle proposto conseguiu atingir o alvo do estudo. Foi identificada uma redução no consumo de energia elétrica do refrigerador de bebida do tipo direto através do controle desenvolvido com base no padrão de consumo do usuário. A redução do consumo de energia mensal identificada foi de aproximadamente 18,4 %, acarretando uma redução dos custos de operação em aproximadamente 18,2 % em comparação com o sistema de controle *ON/OFF* convencional.

5.1 Trabalhos futuros

- Pesquisar o efeito no consumo de energia elétrica do refrigerador de bebidas se o controle trabalhasse como diferentes referências de controle, de acordo com a demanda do usuário.

- Implementar novas estratégias de controle baseado em outros algoritmos de previsão como *Machine Learning*, modelos Arima, redes neurais e entre outros, que permitam ter uma melhor previsão no consumo de bebida.

- Instalar o refrigerador de bebidas do tipo direto com o sistema de controle proposto em lugares onde o equipamento possa trabalhar com o fluido projetado de fábrica (cerveja) e pesquisar se atinge os requisitos exigidos pelos usuários.

- Projetar novas estratégias de controle que possam incluir novas variáveis, nas malhas de controle, tais como temperatura ambiente, temperatura da bebida, temperatura de condensação ou evaporação, para criar um sistema de controle mais robusto e preciso.

REFERÊNCIAS

AFONSO, C.; GABRIEL, J. Study and analysis of a cooling system for draught drinks. **International Journal of Refrigeration**, v. 45, p. 198–209, 1 set. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.06.006>>.

ASHRAE, A. H. Methods Of Testing For Rating Premix And Postmix Beverage Dispensing Equipment. **American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers, Atlanta**, p. 14, 2018.

BANDARRA FILHO, E. P. et al. Energy conservation for refrigeration systems by means of hybrid fuzzy adaptive control techniques. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 38, n. 6, p. 1753–1766, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40430-016-0538-2>>.

BELMAN-FLORES, J. M. et al. Energy optimization of a domestic refrigerator controlled by a fuzzy logic system using the status of the door. **International Journal of Refrigeration**, v. 104, p. 1–8, ago. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.04.025>>.

BRASIL, M. DE M. E E. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022 ano base 2021. p. 30, 2022.

CHOU, J. S.; TRAN, D. S. Forecasting energy consumption time series using machine learning techniques based on usage patterns of residential householders. **Energy**, v. 165, p. 709–726, 15 dez. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.144>>.

CHOU, S.-Y. et al. An automatic energy saving strategy for a water dispenser based on user behavior. **Advanced Engineering Informatics**, v. 51, p. 101503, jan. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101503>>.

DUPONT, J. L.; DOMANSKI, P.; ZIEGLER, F. The Role of Refrigeration in the Global Economy (2019), 38th Note on Refrigeration Technologies. **IIF-IIR**, p. 1–12, 2019.

EKREN, O.; SAHIN, S.; ISLER, Y. Comparison of different controllers for variable speed compressor and electronic expansion valve. **International Journal of Refrigeration**, v. 33, n. 6, p. 1161–1168, 1 set. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.05.005>>.

EZAN, M. A. et al. A numerical study on the usage of phase change material (PCM) to prolong compressor off period in a beverage cooler. **Energy Conversion and Management**, v. 142, p. 95–106, 15 jun. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.032>>.

HAGAN, M. T. et al. **Neural Network Design**. 2. ed. [s.l: s.n.].

IBM. **IBM SPSS Forecasting 28**. Disponível em: <https://www.ibm.com/docs/en/SSLVMB_28.0.0/pdf/pt/BR/IBM_SPSS_Forecasting.pdf>.

IPCC, A. R. Climate change 2007: the physical science basis. **Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**, 2007. KALOGIROU, S. A. Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 29, n. 6, p. 515–566, 1 jan. 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(03\)00058-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(03)00058-3)>.

KAPICI, E.; KUTLUAY, E.; IZADI-ZAMANABADI, R. A novel intelligent control method for domestic refrigerators based on user behavior. **International Journal of Refrigeration**, v. 136, p. 209–218, 19 abr. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.01.017>>.

LIU, W. et al. Experimental study of a novel cool-storage refrigerator with controllable two-phase loop thermosyphon. **International Journal of Refrigeration**, v. 129, p. 32–42, set. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.04.009>>.

MADERIĆ, D. et al. Experimental and numerical study on water ice forming on pipe columns in a limited-volume storage. **Applied Thermal Engineering**, v. 194, p. 117080, 25 jul. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117080>>.

MADERIĆ, D.; PAVKOVIĆ, B.; LENIĆ, K. An experimental research on energy efficiency of a beverage cooler with the latent heat storage. **Applied Thermal Engineering**, v. 148, p. 270–277, 5 fev. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.026>>.

MAIORINO, A.; DEL DUCA, M. G.; APREA, C. ART.I.CO. (ARTificial Intelligence for COoling): An innovative method for optimizing the control of refrigeration systems based on Artificial Neural Networks. **Applied Energy**, v. 306, p. 118072, 15 jan. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118072>>.

MAKRIDAKIS, S. G.; WHEELWRIGHT, S. C.; HYNDMAN, R. J. **Forecasting: Methods and Applications**. 3 rd ed. New York: [s.n.].

MARCUCCI PICO, D. F. **Desenvolvimento de refrigeradores de líquido ambientalmente sustentáveis para a indústria de bebidas**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/37701>>.

MELLIT, A.; KALOGIROU, S. A. Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, n. 5, p. 574–632, 1 out. 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.01.001>>.

MEMO. ALEMAN. Disponível em: <<https://www.lojasmemo.com.br/chopeiras-eletricas>>.

MOHANRAJ, M.; JAYARAJ, S.; MURALEEDHARAN, C. Applications of artificial neural networks for refrigeration, air-conditioning and heat pump systems—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 2, p. 1340–1358, 1 fev. 2012. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.10.015>>.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **ESTATÍSTICA APLICADA E PROBABILIDADE PARA ENGENHEIROS**. 4 ed ed. [s.l: s.n.].

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS**. 2 ed ed. [s.l: s.n.].

NAKASHIMA, A. T. D. et al. A magnetic wine cooler prototype. **International Journal of Refrigeration**, v. 122, p. 110–121, 1 fev. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.11.015>>.

PANATO, V. H.; PORTO, M. P.; BANDARRA FILHO, E. P. Experimental performance of an R-22-based refrigeration system for use with R-1270, R-438A, R-404A and R-134a. **International Journal of Refrigeration**, v. 83, p. 108–117, 1 nov. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.07.010>>.

PATINO, C. M.; FERREIRA, J. C. Confidence intervals: a useful statistical tool to estimate effect sizes in the real world. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 41, n. 6, p. 565–566, dez. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1806-37562015000000314>>.

PICKERING, E. M. et al. Building electricity consumption: Data analytics of building operations with classical time series decomposition and case based subsetting. **Energy and Buildings**, v. 177, p. 184–196, 15 out. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.056>>.

POURHEDAYAT, S. Application of thermoelectric as an instant running-water cooler; experimental study under different operating conditions. **Applied Energy**, v. 229, p. 364–374, 1 nov. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.009>>.

RODRÍGUEZ-VALDERRAMA, D. A. et al. Implementation of fuzzy control in a domestic refrigerator considering the influence of the thermal load. **International Journal of Refrigeration**, v. 149, p. 23–34, maio 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.12.018>>.

RUDTSCH, S.; VON ROHDEN, C. Calibration and self-validation of thermistors for high-precision temperature measurements. **Measurement**, v. 76, p. 1–6, 1 dez. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.028>>.

SÁNCHEZ, D. et al. Energy impact evaluation of different low-GWP alternatives to replace R134a in a beverage cooler. Experimental analysis and optimization for the pure refrigerants R152a, R1234yf, R290, R1270, R600a and R744. **Energy Conversion and Management**, v. 256, p. 115388, 15 mar. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115388>>.

SÁNCHEZ, D. et al. Alternative blends of CO₂ for transcritical refrigeration systems. Experimental approach and energy analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 279, p. 116690, 1 mar. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116690>>.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 13 jul. 1965. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>>.

SILVEIRA, A. G. et al. Análise do Valor p Determinado pela Estatística τ na Aplicação do Teste de Dickey-Fuller Aumentado. **Trends in Computational and Applied Mathematics**, v. 23, n. 2, p. 283–298, 27 jun. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.5540/tcam.2022.023.02.00283>>.

STEINHART, J. S.; HART, S. R. Calibration curves for thermistors. **Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts**, v. 15, n. 4, p. 497–503, 1 ago. 1968. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0011-7471\(68\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0011-7471(68)90057-0)>.

THE AUSTRALIAN INSTITUTE OF REFRIGERTION AIR CONDITIONING AND HEATING. Best practice guidelines Methods of calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI). In: [s.l: s.n.]. p. 21.

UNDERWOOD, C. P. Fuzzy multivariable control of domestic heat pumps. **Applied Thermal Engineering**, v. 90, p. 957–969, nov. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.068>>.

WISEK, M.; ELBEL, S.; HRNJAK, P. **Conversion of cold beverage dispenser's refrigeration system to R744 refrigerant**. INTERNATIONAL REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING CONFERENCE. **Anais...2016**. Disponível em: <<https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2793&context=iracc>>.

APÊNDICE

Apêndice I Estrutura do código de aquisição de dados e sistema de controle do RB.

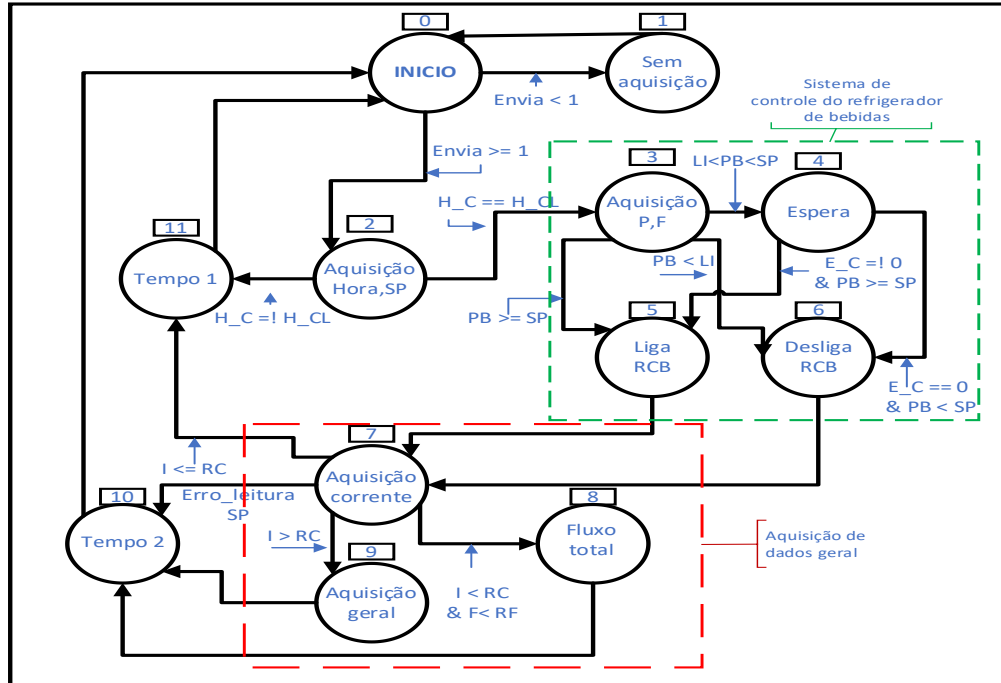


Figura – 1 Estrutura de programação baseada em máquinas de estado aplicada no refrigerador de bebidas do tipo direto. Fonte: Autor.

Na Figura – 1 é apresentada a lógica do algoritmo usado para controlar e coletar as informações do RB, o qual está composto por 12 estados, em que além de ter as rotinas de aquisição de dados encontra-se os estados que permitem simular o sistema de controle *ON/OFF* do refrigerador de bebidas.

A sequência de execução é a seguinte: O algoritmo inicia no estado 0, continua para o estado 2 se o sistema detecta um alto (1) no sinal de enviar dados, no entanto, se o sistema detecta um sinal baixo (0) vai para o estado 1 e fica movimentando entre o estado 0 e 1, até detectar uma mudança no sinal de enviar dados. Uma vez o algoritmo chega no estado 2, realiza a aquisição da hora, se a hora adquirida difere da hora salvada na rotina, o algoritmo realiza a leitura do *Setpoint* (SP), vai para o estado 1 e volta no estado 0, para iniciar de novo o ciclo. Se a hora é igual vai para o estado 3 onde adquire os dados do sensor de pressão (PB) e vazão.

Neste estado o algoritmo tem 3 formas de sair, (1) saindo para o estado 4, se a PB é maior que o limite inferior de pressão (LI) e PB é menor que o SP estabelecido, (2) saindo para o estado 5, se a PB é maior o igual que LI e (3) saindo para o estado 6, se PB é menor que o LI. Neste sentido, quando o algoritmo chega nestes estados, realiza o sistema de controle, ligando

(estado 5) ou desligando (estado 6) o RB. Posteriormente, o algoritmo chega no estado 7 e realiza a aquisição da corrente (I), neste ponto, o algoritmo decide se: (1) realizar a aquisição geral de dados (estados 8 e 9), quando a I é maior que uma referência de corrente (RC) estabelecida pelo usuário, vai para o estado 11, se o consumo de corrente é menor que RC e finaliza o ciclo voltando para o estado 0 ou (2) vai para o estado 10, se teve algum erro na leitura do SP. Portanto, quando o algoritmo chega no estado 10 realiza uma nova leitura no SP e finaliza o ciclo voltando para o estado 0.

Apêndice II Procedimento para determinar o intervalo de confiança.

Para calcular o intervalo de confiança de um determinado conjunto de dados, o procedimento é descrito abaixo.

1. Determinar o número de amostras (n);
2. Calcular a média e o desvio padrão da amostra através das Eq.(1) e Eq.(2);

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

3. Determinar os graus de liberdade (GL) de acordo com a Eq.(3);

$$GL = n - 1 \quad (3)$$

4. Definir o nível de significância ou confiança (no caso 95 %);
5. Escolher o valor observado (t_{obs}) da tabela de distribuição t- Student, de acordo como os GL;
6. Calcular o IC baseado na Eq. (4);

$$IC = \pm \frac{t_{obs} \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

7. Expressar o resultado de acordo com a Eq.(5)

$$Resultado = \bar{y} \pm IC \quad (5)$$

em que \bar{y} refere-se à média da amostra, y_i é o valor medido, s é o desvio padrão da amostra e n tamanho da amostra.

Apêndice III Procedimento para determinar um teste de hipótese.

O teste de hipótese é usado para tomar uma decisão de uma população baseada na informação obtida de uma amostra. O teste de hipótese é baseado em duas hipóteses, uma chamada de hipótese de nulidade (H_0) e a outra chamada de hipótese alternativa (H_1). Geralmente, a negação do fato a considerar está relacionada com a hipótese de nulidade e o fato a ser comprovado como a hipótese alternativa. Neste sentido, existem três possíveis testes para ser aplicados conforme as hipóteses de nulidade e a alternativa: primeiro, com as hipóteses $H_0: \eta_B \leq \eta_A$, $H_1: \eta_B > \eta_A$ denominada unicaudal para direita, segunda, $H_0: \eta_B \geq \eta_0$, $H_1: \eta_B < \eta_A$ chamada de unicaudal para a esquerda e a terceira quando $H_0: \eta_B = \eta_A$, $H_1: \eta_B \neq \eta_A$ usada para inferir se existem diferenças entre populações (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Como o intuito é verificar se com a mudança da referência o consumo de energia elétrica diminui, foi utilizada a segunda possibilidade, em que a hipótese alternativa H_1 : o consumo de energia elétrica da referência SP_2 é menor ao consumo de energia elétrica com a referência SP_1 e a hipótese de nulidade H_0 : o consumo de energia elétrica da referência SP_2 é maior ou igual ao consumo de energia elétrica com a referência SP_1 . O procedimento para realizar o teste de hipótese é o seguinte.

1. Definir o nível de significância (α);
2. Calcular as métricas estatísticas (média e desvio padrão) das duas amostras a comparar;
3. Determinar os graus de liberdade.
4. Calcular o valor do t_α usando a tabela de distribuição t- Student do, de acordo como os GL;
5. Computar o valor de t observado (t_{obs}) de acordo com a Eq.(6);

$$t_{obs} = \frac{\bar{y} - \eta_A}{s/\sqrt{n}} \quad (6)$$

em que \bar{y} refere-se à média na amostra B, η_A é média da amostra A, s refere-se ao desvio padrão da amostra B e n é o número de amostras.

6. Determinar se o valor de t_{obs} está dentro ou fora da região de rejeição de H_0 ;
7. Inferir sobre a população de acordo com os resultados da análise das amostras (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Apêndice IV Determinação constantes de Steinhart-Hart, para um sensor de temperatura tipo NTC.

O processo para identificar as constantes do modelo do termistor apresentado na Eq.(3.2) é baseado em três ensaios à diferentes temperaturas e preferivelmente bem espaçados na faixa de usos do termistor. Com a informação das três resistências nas três temperaturas estabelecidas, foi obtido um modelo de três equações e três incógnitas. Resolvendo este modelo linear foram obtidas as constantes de Steinhart-Hart. O procedimento de caracterização do termopar está descrito na Tabela 1

Tabela 1 – Modelo matemático do termistor e cálculo das constantes de Steinhart-Hart. Fonte: Autor.

Nº ensaio	Temperatura(K)	Resistência (Ω)	Equação
1	TM_1	R_1	$A + B \cdot \ln(R_1) + D \cdot \ln(R_1)^3$
2	TM_2	R_2	$A + B \cdot \ln(R_2) + D \cdot \ln(R_2)^3$
3	TM_3	R_3	$A + B \cdot \ln(R_3) + D \cdot \ln(R_3)^3$

O sinal resistivo do termistor é convertido a tensão DC para poder ser adquirida como sinal analógico. Para isso foi utilizada a Eq.(7), a qual é uma configuração de divisor de tensão que usa uma fonte de alimentação constante (5V) e uma resistência de referência (10 k Ω) para realizar a conversão.

$$VDC = \frac{VIN \cdot R_{NTC}}{R_{NTC} + R_{ref}} \quad (7)$$

em que VIN (VDC) refere-se a fonte de alimentação, R_{NTC} (Ω) é a resistência do termistor, R_{ref} (Ω) é a resistência de referência e VDC é o sinal de saída do termistor.

Apêndice V – Caracterização da instrumentação do RB

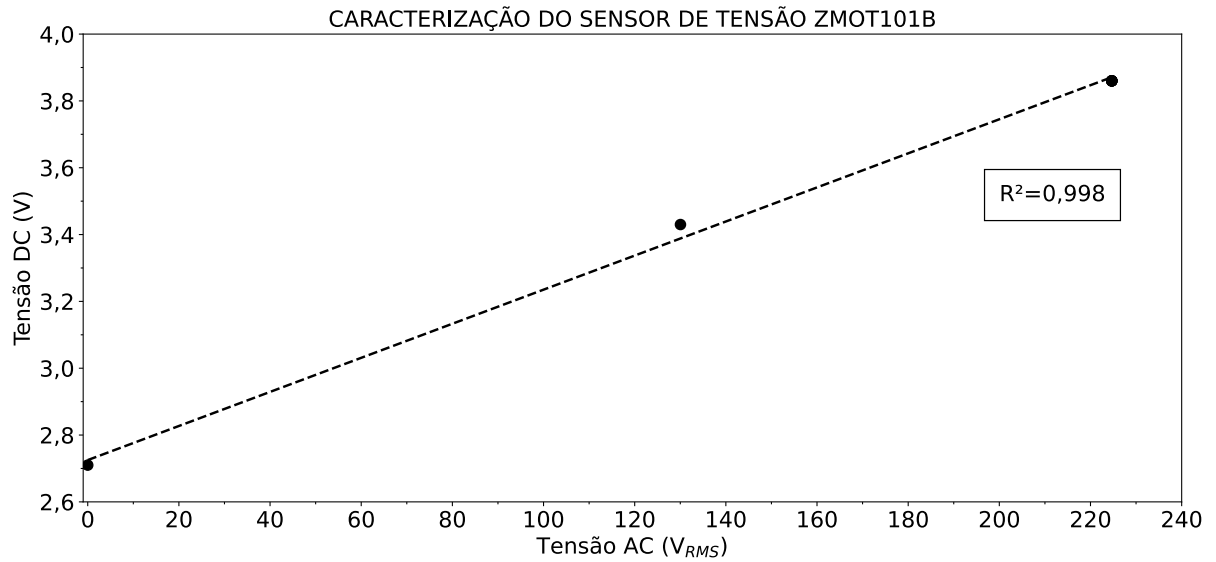


Figura 2 – Caracterização do sensor de tensão. Fonte: Autor.

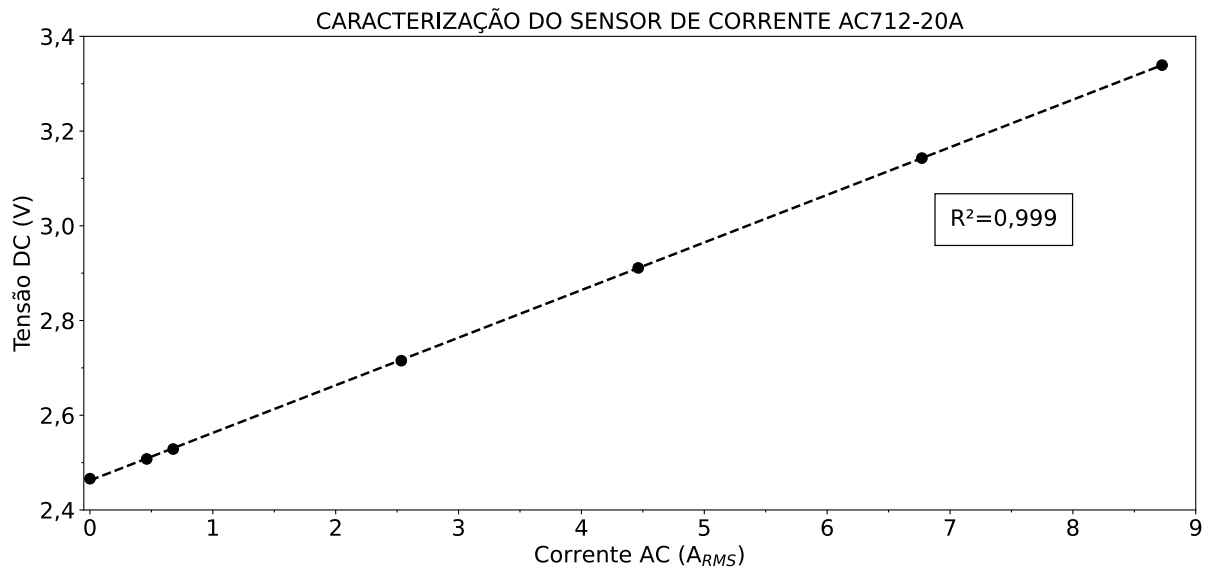


Figura 3 – Caracterização do sensor de corrente. Fonte: Autor.

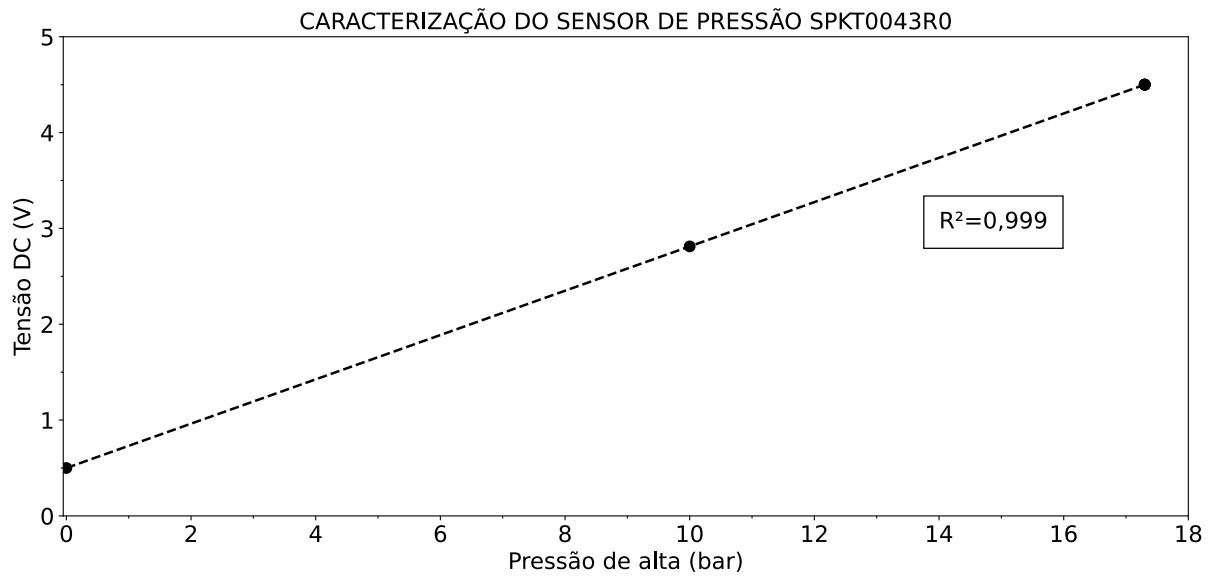


Figura 4 – Caracterização do sensor de pressão da descarga do compressor. Fonte: Autor

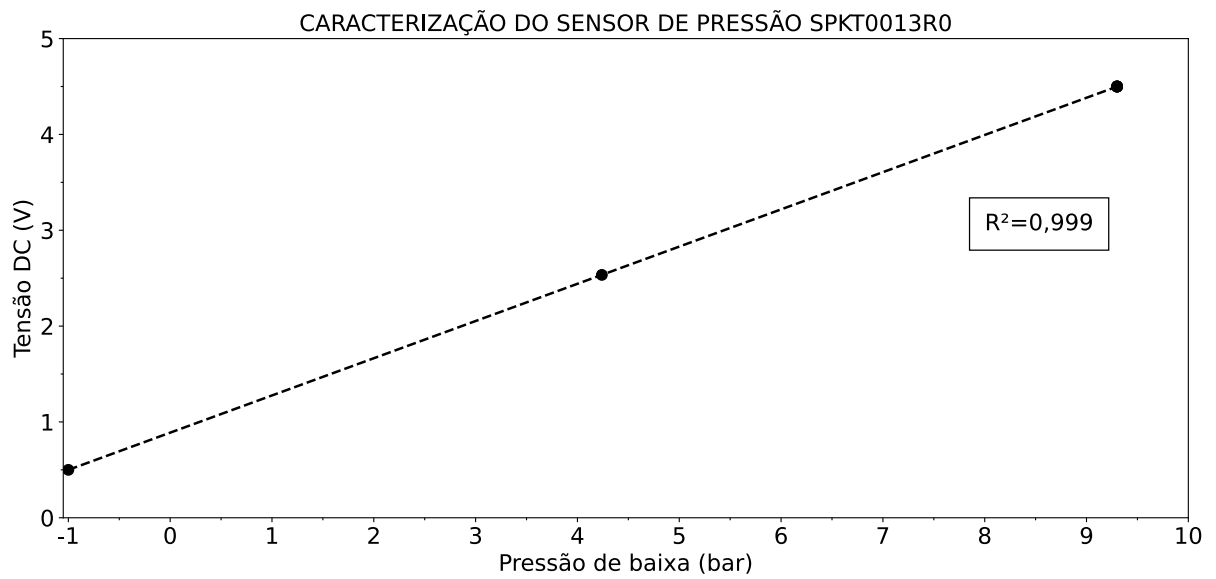


Figura 5 – Caracterização do sensor de pressão de sucção do compressor. Fonte: Autor

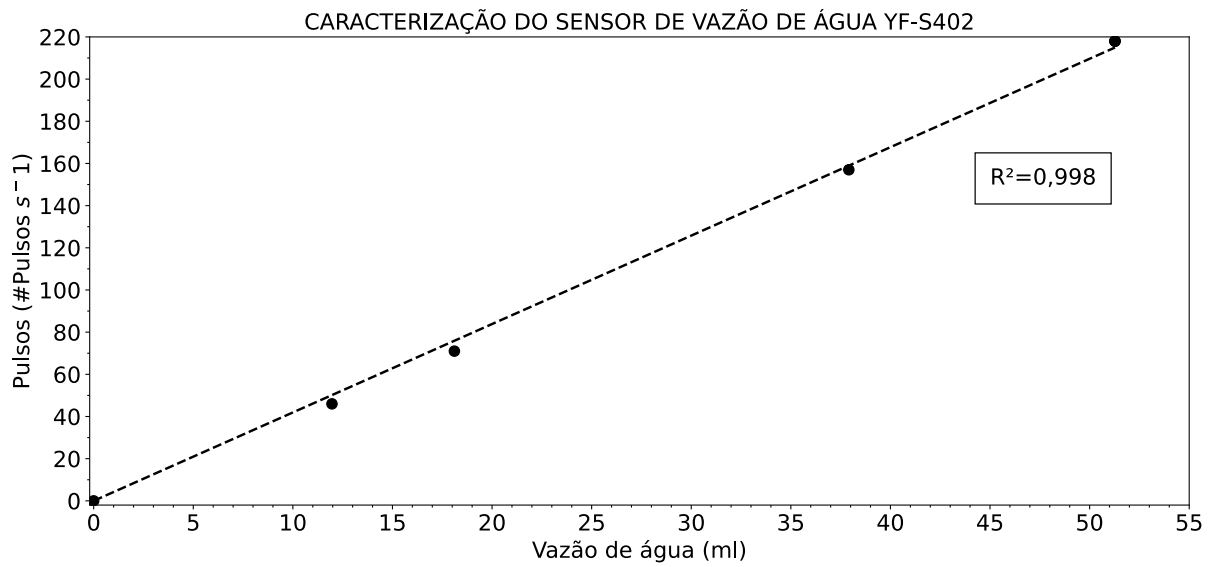


Figura 6 – Caracterização do sensor de vazão de água. Fonte: Autor

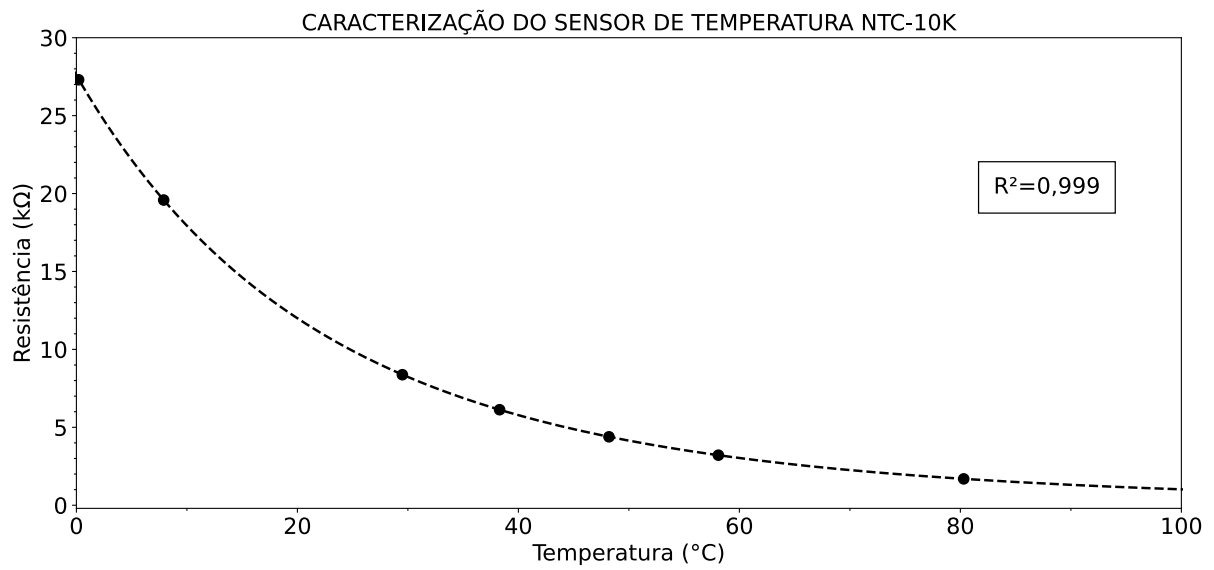


Figura 7 – Caracterização do sensor de temperatura NTC. Fonte: Autor

Apêndice VI – Componentes de tendência e fatores de sazonais da análise de séries temporais.

Hora da semana	Fator de tendência (Tt)	Índices sazonais método multiplicativo (Zt)	Índices sazonais método aditivo (Zt)
1	1574,89	0,00	-1645,13
2	1585,28	0,00	-1655,53
3	1593,77	0,00	-1664,01
4	1600,19	0,00	-1670,44
5	1601,82	0,00	-1672,07
6	1602,34	0,00	-1672,58
7	1603,06	0,00	-1673,31
8	1603,83	0,88	54,59
9	1605,26	1,29	514,81
10	1603,38	1,81	712,43
11	1601,25	1,81	1261,95
12	1601,39	1,56	586,44
13	1601,39	2,27	864,03
14	1601,39	3,54	3893,66
15	1601,39	2,78	3072,00
16	1601,39	2,73	2092,55
17	1601,39	2,50	2499,16
18	1601,39	1,26	250,19
19	1601,39	1,18	1137,21
20	1600,50	0,18	-1118,67
21	1600,02	1,00	84,99
22	1598,54	0,89	-150,43
23	1596,78	0,00	-1441,04
24	1596,44	0,00	-1666,69
25	1594,77	0,00	-1665,02
26	1593,20	0,00	-1663,44
27	1589,61	0,00	-1659,86

28	1582,73	0,00	-1652,97
29	1577,58	0,00	-1647,82
30	1576,11	0,00	-1646,35
31	1575,19	0,02	-1507,29
32	1575,16	1,21	744,82
33	1575,87	1,69	1039,16
34	1575,22	1,61	1371,11
35	1574,24	1,90	967,29
36	1573,73	1,81	1152,09
37	1573,73	2,49	2076,63
38	1573,74	3,40	3605,13
39	1573,74	3,12	3126,58
40	1573,74	3,09	3725,87
41	1573,74	3,18	3485,53
42	1573,74	2,33	2542,22
43	1573,74	0,99	-159,27
44	1573,48	1,46	700,90
45	1572,18	2,16	1469,58
46	1569,64	1,71	1028,47
47	1565,10	0,17	-476,73
48	1559,68	0,07	-1507,68
49	1553,38	0,00	-1623,63
50	1547,6	0,00	-1617,84
51	1545,14	0,00	-1615,39
52	1542,71	0,00	-1612,96
53	1540,62	0,00	-1610,87
54	1541,63	0,00	-1611,87
55	1542,94	0,10	-1437,25
56	1540,14	1,65	513,43
57	1536,84	1,69	918,66
58	1536,43	2,41	1807,42
59	1536,43	2,53	2516,11

60	1535,70	1,19	468,63
61	1534,98	2,13	1473,93
62	1534,98	6,59	7480,81
63	1534,98	4,60	5576,49
64	1534,98	3,52	3652,51
65	1534,98	3,36	4257,49
66	1534,97	2,56	2174,34
67	1534,98	0,79	-99,92
68	1534,98	1,19	870,26
69	1534,98	1,99	1615,49
70	1535,67	1,17	129,81
71	1536,52	0,24	-1144,09
72	1536,42	0,00	-1498,48
73	1535,96	0,00	-1606,21
74	1535,75	0,00	-1606,00
75	1535,87	0,00	-1606,11
76	1535,98	0,00	-1606,23
77	1536,07	0,00	-1606,32
78	1536,16	0,00	-1606,41
79	1537,38	0,00	-1455,67
80	1539,24	1,34	325,37
81	1539,87	1,75	1007,66
82	1539,88	2,32	2185,57
83	1539,88	3,27	4136,29
84	1539,88	2,83	2829,93
85	1333,95	2,83	2256,26
86	1333,95	5,60	5899,53
87	1333,95	2,75	2090,73
88	1333,95	4,42	3111,25
89	1333,95	3,67	3535,32
90	1333,95	2,06	1352,82
91	1333,95	2,13	2885,24

92	1335,78	0,98	1470,66
93	1338,12	0,83	-179,61
94	1339,02	1,31	907,00
95	1340,45	0,80	-139,46
96	1342,01	0,00	-1042,63
97	1344,49	0,00	-1414,73
98	1348,58	0,00	-1418,83
99	1355,13	0,00	-1425,38
100	1359,74	0,00	-1429,98
101	1362,79	0,00	-1433,03
102	1366,07	0,00	-1436,31
103	1367,57	0,00	-1386,73
104	1368,5	0,90	-439,64
105	1370,67	0,43	-566,14
106	1372,61	1,79	1214,29
107	1372,24	1,54	693,61
108	1372,24	1,12	-9,65
109	1372,24	1,51	663,38
110	1372,24	3,36	3433,71
111	1372,24	3,18	2573,23
112	1372,24	4,31	3509,55
113	1372,24	1,84	1052,28
114	1372,24	1,36	586,74
115	1372,59	0,70	-422,08
116	1372,95	0,25	-409,41
117	1374,56	0,47	-320,07
118	1379,56	0,36	-1002,25
119	1384,85	0,22	-1123,53
120	1388,18	0,00	-1443,57
121	1392,74	0,00	-1455,95
122	1398,6	0,00	-1321,83
123	1402,64	0,00	-1472,89

124	1407,13	0,00	-1477,38
125	1412,28	0,00	-1482,53
126	1418,94	0,00	-1489,19
127	1424,4	0,00	-1494,65
128	1426,48	0,04	-1370,56
129	1430,63	0,81	-119,14
130	1436,72	0,23	-827,95
131	1442,9	1,88	1136,75
132	1445,84	1,25	477,14
133	1445,84	1,82	2092,23
134	1445,84	1,59	767,04
135	1445,84	0,92	-208,10
136	1445,84	0,68	-225,31
137	1445,84	0,12	-1335,45
138	1445,84	0,00	-1129,79
139	1446,19	0,12	-1206,24
140	1448,22	0,06	-507,34
141	1451,54	0,22	-740,07
142	1455,34	0,00	-1432,27
143	1459,93	0,00	-1530,18
144	1464,15	0,00	-1290,15
145	1467,14	0,00	-1500,11
146	1477,36	0,00	-1547,61
147	1493,77	0,00	-1564,01
148	1504,15	0,00	-1265,25
149	1514,14	0,00	-1584,39
150	1524,23	0,00	-1522,54
151	1527,70	0,00	-1552,33
152	1530,38	0,00	-1600,63
153	1536,45	0,00	-1506,86
154	1542,76	0,00	-1613,01
155	1545,98	0,03	-1537,76

156	1546,64	0,00	-1534,27
157	1546,64	0,04	-1510,79
158	1546,64	0,00	-1090,09
159	1546,64	0,00	-1616,88
160	1546,64	0,00	-1506,63
161	1546,64	0,12	-1207,65
162	1546,64	0,00	-1199,05
163	1547,09	0,00	-1409,07
164	1548,59	0,00	-1618,84
165	1550,88	0,00	-1584,90
166	1553,99	0,00	-1624,24
167	1561,49	0,00	-1631,74
168	1567,88	0,00	-1638,13

Apêndice VII – Dados para validação do modelo multiplicativo, baseado em horários de consumo e não consumo. Fonte Autor

Semana	Hora do dia	Segunda- feira	Terça- feira	Quarta- feira	Quinta- feira	Sexta- feira	Sábado	Domingo
0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	2	1	1	1	1	1	1	1
0	3	1	1	1	1	1	1	1
0	4	1	1	1	1	1	1	1
0	5	1	1	1	1	1	1	1
0	6	1	1	0	1	1	1	1
0	7	0	0	0	0	0	1	1
0	8	0	0	0	0	0	0	1
0	9	0	0	0	0	0	0	1
0	10	0	0	0	0	0	0	1
0	11	0	0	0	0	0	0	1
0	12	0	0	0	0	0	0	1
0	13	0	0	0	0	0	0	1
0	14	0	0	0	0	0	0	1
0	15	0	0	0	0	0	0	1
0	16	0	0	0	0	0	0	0
0	17	0	0	0	0	0	1	1
0	18	0	0	0	0	0	0	1
0	19	0	0	0	0	0	1	1
0	20	0	0	0	0	0	0	1
0	21	0	0	0	0	0	1	1
0	22	1	0	0	0	0	1	1
0	23	1	0	1	1	1	1	1
8	0	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	0	1	1	1	1	1
8	2	1	0	1	1	1	1	1
8	3	1	1	1	1	1	1	1

8	4	1	1	1	1	1	1	1
8	5	1	1	1	1	0	1	1
8	6	1	1	1	1	1	1	1
8	7	0	0	0	0	0	1	1
8	8	0	0	1	0	0	0	1
8	9	0	0	1	0	0	0	1
8	10	0	0	0	0	0	0	0
8	11	0	0	0	0	0	0	0
8	12	0	0	1	0	0	0	1
8	13	0	0	0	0	0	0	0
8	14	0	1	0	0	0	0	0
8	15	0	0	0	0	0	0	0
8	16	0	0	0	0	0	1	0
8	17	0	0	0	0	0	1	1
8	18	0	0	1	0	0	1	1
8	19	1	0	0	0	0	1	1
8	20	1	0	1	0	0	1	1
8	21	0	0	1	1	1	1	1
8	22	0	0	1	1	1	1	1
8	23	1	0	1	1	1	1	1
9	0	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1
9	2	1	1	1	1	1	1	1
9	3	1	1	1	1	1	1	1
9	4	1	1	1	1	1	1	1
9	5	1	1	1	1	1	1	1
9	6	1	0	1	1	0	1	1
9	7	0	0	0	0	0	1	1
9	8	0	0	0	0	0	0	1
9	9	0	0	0	0	0	0	1
9	10	0	0	0	0	0	0	1
9	11	0	0	0	0	0	0	1

9	12	0	0	0	0	0	0	1
9	13	0	0	0	0	0	0	1
9	14	0	0	0	0	0	0	1
9	15	0	0	0	0	0	0	1
9	16	0	0	0	0	0	0	1
9	17	0	0	0	0	0	0	1
9	18	0	0	0	0	0	0	1
9	19	0	0	0	0	0	0	1
9	20	0	1	0	0	1	1	1
9	21	0	0	1	1	0	0	1
9	22	0	1	1	1	0	1	1
9	23	1	1	1	1	1	1	1

Nota: O valor zero da coluna “Semana”, faz referência aos dados preditos por meio do modelo multiplicativo. A codificação dos dados foi feita da seguinte forma: Categorizado como zero (0), quando tem liberação de bebida no período específico (hora do dia) e categorizado como um (1), quando não tem liberação de bebida (Consumo de bebida é menor a 100ml).

Apêndice VIII – Consumo de energia elétrica para diferentes referências. Fonte: Autor.

Data	Consumo de bebida (l)	Consumo de energia elétrica (VAh)	Setpoint (bar)
19/10/2022	0	67,08	4,57
20/10/2022	0	75,17	4,57
25/10/2022	0	69,44	4,57
03/11/2022	0	71,79	4,57
04/11/2022	0	77,75	4,57
05/11/2022	0	70,63	4,57
06/11/2022	0	68,28	4,57
12/11/2022	0	48,60	6,88
13/11/2022	0	37,79	6,88
14/11/2022	0	41,87	6,88
15/11/2022	0	39,48	6,88
16/11/2022	0	38,22	6,88
17/11/2022	0	39,27	6,88
18/11/2022	0	42,07	6,88
19/11/2022	0	62,44	5,80
20/11/2022	0,36	64,02	5,80
21/11/2022	0	62,45	5,80
22/11/2022	0	62,94	5,80
23/11/2022	0	63,87	5,80
24/11/2022	0	62,21	5,80
25/11/2022	0,01	58,85	5,80