

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO LEONARDO VICTOR ZANIN

CHILLER: PROJETO E CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA
REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA EM DESTILADORES LABORATORIAIS

PALOTINA

2024

MARCELO LEONARDO VICTOR ZANIN

CHILLER: PROJETO E CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA
REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA EM DESTILADORES LABORATORIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao curso de Graduação em Engenharia de Energia Setor de Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Wilson de Aguiar Beninca

PALOTINA

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

Aos dezessete dias do mês de junho do ano de 2024, das 19h30min às 19:00, na UFPR - Setor Palotina, Sala de Reuniões da Direção, Bloco Seminário, Térreo:, compareceram para defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso, requisito obrigatório para a obtenção do título de Engenheiro de Energia o aluno Marcelo Leonardo Victor Zanin, tendo como Título do Trabalho de Conclusão de Curso "Chiller: projeto e construção de equipamento para e aproveitamento de água em destiladores laboratoriais". Constituíram a Banca Examinadora os professores: Prof. Dr. Wilson de Aguiar Beninca (Orientador e Presidente da Banca), Prof^a. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin e a Engenheiro Mecânico Oscar Luis Pereira Roque. O orientador e Presidente da Banca concedeu a palavra ao discente, para exposição do seu trabalho. A seguir, foi concedida a palavra em ordem sucessiva aos membros da Banca de Exame, os quais passaram a arguir o discente. Ultimada a defesa, que se desenvolveu nos termos normativos, a Banca de Exame, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo atribuído ao discente as seguintes notas: **Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin, nota: 90 (noventa)**, **Engenheiro Mecânico Oscar Luis Pereira Roque, nota: 90 (noventa)**, e **Prof. Wilson de Aguiar Beninca, nota: 95 (noventa e cinco)**. A nota final do discente, após a média aritmética dos três membros da banca de exame, foi **92 (noventa)** considerando o discente **APROVADO**. As considerações e sugestões feitas pela Banca de Exame deverão ser atendidas pelo discente sob acompanhamento de seu orientador. Nada mais havendo a tratar foi lavrada a presente ata, que, lida e aprovada, vai por todos assinada eletronicamente.



Documento assinado eletronicamente por **WILSON DE AGUIAR BENINCA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/07/2024, às 14:36, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/07/2024, às 14:45, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **6454034** e o código CRC **426F6D8D**.

Referência: Processo nº 23075.010846/2024-65

SEI nº 6454034



Documento assinado digitalmente

OSCAR LUIS PEREIRA ROQUE

Data: 23/07/2024 19:25:45-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Com imensa gratidão e carinho, dedico este trabalho ao meu irmão e à minha família. Obrigado por sempre acreditarem em mim e me encorajarem a seguir em frente. Este é nosso sucesso compartilhado.

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso encerra um importante ciclo da minha vida acadêmica, e nada disso seria possível sem o apoio e o incentivo de diversas pessoas às quais gostaria de expressar minha sincera gratidão.

Primeiramente, agradeço à minha família, que foi o alicerce fundamental durante toda essa jornada. Aos meus pais, agradeço pelo amor incondicional, pelas palavras de incentivo e pela confiança depositada em mim. Vocês sempre acreditaram no meu potencial e me deram forças para superar os desafios. Ao meu irmão, sou profundamente grato pelo apoio financeiro e emocional.

Aos meus colegas de curso, agradeço pela camaradagem e pelas trocas de conhecimento ao longo desses anos. Juntos, enfrentamos dificuldades, com matérias impossíveis de serem realidade, e celebramos conquistas, saibam que cada um de vocês contribuíram para tornar essa jornada mais rica e significativa a mim.

Aos meus professores, expresso minha profunda gratidão. Cada aula, cada orientação e cada conselho foram importantes para a minha formação acadêmica e pessoal. Em especial, agradeço aos Professores: Beninca, Burin e Joel pelos seus ensinamentos e conversas que foram de valiosa importância para a formação desse eterno estudante.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta etapa da minha vida, meu sincero muito obrigado. Este TCC é um reflexo do esforço coletivo de muitas pessoas que acreditaram em mim e me apoiaram ao longo dessa caminhada.

Obrigado!

“O dado mais importante que separa o ser humano de todos os seus irmãos e primos na escala filogenética é o conhecimento; só o conhecimento liberta o homem, só através do conhecimento o homem é livre e em sendo livre: ele pode aspirar uma condição melhor de vida para ele e todos os seus semelhantes. Só consigo entender uma sociedade na qual o conhecimento seja a razão de ser precípua que o governo dá para a formação do cidadão. Minha mensagem é positiva, é de que o homem tem de saber, conhecer e em conhecendo ele é livre”. (Dr. *Enéas Ferreira Carneiro*, 1938 – 2007)

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi projetar e construir um equipamento capaz de propiciar que águas residuais decorrentes do processo de resfriamento de destiladores laboratoriais pudessem ser reaproveitadas. Foi verificado que um destilador como o estudo desse trabalho consome em média 120 L/h de água, que são descartados a rede de esgoto pelo simples fato de estarem ligeiramente aquecidos. O equipamento construído nesse TCC é comercialmente conhecido como chiller, e foi dimensionado para receber toda a água decorrente do resfriamento do destilador, para reduzir sua temperatura até os padrões iniciais e então devolvê-la ao processo. Na etapa de projeto foi determinado da carga térmica imposta ao sistema de refrigeração, construção de evaporador e escolha de equipamentos periféricos. A construção desse chiller buscou reutilizar a maior quantidade de materiais e equipamentos possíveis como forma de auxiliar na sustentabilidade do projeto. Na fase da instalação, foi avaliado se a execução do projeto atendeu as demandas estabelecidas. Na sequência foi determinado o consumo elétrico do aparelho e verificado o desempenho do destilador com essa nova fonte de refrigeração. Por fim, foi realizado análises para determinar a redução do consumo de água nesse destilador, bem como, os aspectos de sustentabilidade ambiental além da economia que pode trazer às contas da Universidade.

Palavras-chave: Água; Chiller; Destilador; Economia; Reutilização; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The objective of this work was to design and build equipment capable of allowing wastewater resulting from the cooling process of laboratory distillers to be reused. It was found that a distiller like the one studied in this work consumes an average of 120 liters of water per hour, which are discarded into the sewage system just because they are slightly heated. The equipment built in this thesis is commercially known as a chiller and was designed to receive all the water resulting from the distiller's cooling, to reduce its temperature to initial standards and then return it to the process. The project involved determining the thermal load imposed on the refrigeration system, building an evaporator, and choosing peripheral equipment. The construction of this chiller aimed to reuse as many materials and equipment as possible as a way of helping the sustainability of the project. In the installation phase, it was assessed whether the execution of the project met the established demands. Then, the electrical consumption of the device was determined and the performance of the distiller with this new refrigeration source was verified. Finally, analyzes were carried out to determine the reduction in water consumption in this distiller, as well as the aspects of environmental sustainability in addition to the savings that can bring to the University's accounts.

Key-words: Water; Chiller; Distiller; Savings; Reuse; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Representação esquemática de um destilador.	21
Figura 02 – Protótipo proposto	23
Figura 03 – Fluxograma para Torre de Resfriamento	24
Figura 04 – Esquema real do reservatório no laboratório	25
Figura 05 – Chiller AquaForce® 30XSB.....	27
Figura 06 – Fluxograma dos componentes do Chiller	28
Figura 07 – Componentes básicos de um sistema de refrigeração e condições típicas de operação.....	29
Figura 08 – Fluxograma do sistema de refrigeração	30
Figura 09 – Fluxograma da modelagem do projeto.....	33
Figura 10 – Diagrama dos componentes	34
Figura 11 – Volume de Controle do destilador analisado	36
Figura 12 – Procedimentos de construção do chassi do equipamento	47
Figura 13 – Montagem das tubulações	49
Figura 14 – Vista lateral do chiller, detalhe para a proteção da bomba hidráulica	49
Figura 15 – Fabricação do evaporador	50
Figura 16 – Vista superior do reservatório	51
Figura 17 – Painel de controle do Chiller	52
Figura 18 – Esquema de ligação do controlador de temperatura.....	53
Figura 19 – Painel elétrico de comando do chiller.....	53
Figura 20 – Relação Temperatura Saturação x Pressão – Refrigerante R-22	55
Figura 21 – Conexão das mangueiras ao destilador	64
Figura 22 – Mudança no trajeto do retorno da água	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Parâmetros de Temperatura da água de refrigeração no Chiller	71
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Relação de Materiais e Custos - Continua	56
Tabela 02 – Relação de Valores de mão de obra	57
Tabela 03 – Resultados do dimensionamento do sistema de refrigeração	58
Tabela 04 – Resultados referentes ao evaporador	60
Tabela 05 – Resultados do dimensionamento do sistema hidráulico	61
Tabela 06 - Operação do Chiller com o Destilador desligado	69
Tabela 07 – Operação do Chiller em <i>Standy-by</i> com o Destilador ligado	69
Tabela 08 – Operação conjunta Chiller e Destilador	70
Tabela 09 – Análise do Destilador sem o Chiller operar	72
Tabela 10 – Análise do Destilador com o Chiller operando.....	73
Tabela 11 – Compilados dos Resultados	74

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

A	- Ampère
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
°C	- Celsius
CA	- Corrente Elétrica Alternada
COPEL	- Companhia Paranaense de Energia
cv	- Cavalo Vapor
g	- Grama
Gr	- Número de Grashof
h	- Horas
HP	- Horsepower
HV	- Hospital Veterinário
ISO	- Organização Internacional de Normalização
IP	- Índice de Proteção
J	- Joule
k	- Quilo
K	- Kelvin
m	- Metro
min	- Minutos
Nu	- Número de Nusselt
ONU	- Organizações das Nações Unidas
PVC	- Plástico, policloreto de vinila
Ra	- Número de Rayleigh
Re	- Número de Reynolds
Pr	- Número de Prandtl
s	- Segundos
SANEPAR	- Companhia de Saneamento do Paraná
TIG	- Tungsten Inert Gas
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
V	- Volt, tensão elétrica
V.C.	- Volume de Controle
W	- Watt

LISTA DE SÍMBOLOS

α	- Alfa
@	- Arroba
β	- Beta
©	- Copyright
Δ	- Delta
γ	- Gama
°	- Grau
®	- Marca registrada
μ	- Mi
π	- Pi
%	- Porcentagem
Σ	- Somatório de números
ρ	- Rho

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 JUSTIFICATIVA	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 DESTILADOR DE ÁGUA	20
2.2 ANÁLISE NA UFPR SETOR PALOTINA.....	21
2.3 PESQUISAS DE PROJETOS	22
2.4 METODOLOGIA UTILIZADA NESSE TRABALHO	26
2.4.1 Chiller	27
2.4.2 Modelagem.....	29
2.4.2.1 Sistema de refrigeração.....	29
2.4.2.2 Sistema de bombeamento de água gelada	31
2.4.2.3 Sistema de controle e automação	31
2.4.2.4 Modelo seguido	32
3 MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	33
3.1 ESQUEMA PRÉVIO DE MODELAGEM.....	34
3.2 MODELAGEM DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO.....	35
3.2.1 Determinação da Potência de Resfriamento	35
3.2.2 Determinação da Temperatura de Operação	37
3.2.3 Determinação da Condensadora.....	37
3.2.4 Determinação da Evaporadora.....	38
3.2.4.1 Número de Grashof	39
3.2.4.2 Número de Rayleigh.....	40
3.2.4.3 Número de Prandtl.....	40
3.2.4.4 Número de Nusselt	41
3.2.4.5 Coeficiente Convectivo Natural Médio e Área Superficial.....	41
3.3 MODELAGEM DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO	42
3.3.1.1 Dimensionamento da bomba d'água	43
3.4 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	45

3.5 DETERMINAÇÃO DE EQUIPAMENTOS.....	45
3.6 MONTAGEM E FABRICAÇÃO.....	46
3.6.1 Estrutural.....	46
3.6.2 Instalação dos componentes do chiller.....	47
3.6.2.1 Condensador.....	47
3.6.2.2 Sistema hidráulico.....	48
3.6.2.3 Evaporador.....	49
3.6.2.4 Sistema de operação automática.....	51
3.7 TESTES INICIAIS DE FUNCIONAMENTO DOS COMPONENTES.....	54
3.8 INSTALAÇÃO NO LOCAL DEFINITIVO.....	55
3.9 RELAÇÃO DE MATERIAIS E CUSTOS.....	55
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	58
4.1 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO.....	58
4.1.1 Potência de refrigeração.....	59
4.1.2 Temperaturas de operação.....	59
4.1.3 Evaporador.....	60
4.1.4 Sistema de Bombeamento.....	61
4.2 CHILLER EM TESTES PRELIMINARES.....	62
4.2.1 Problemas verificados nos testes iniciais.....	65
4.3 MODIFICAÇÕES APÓS AS VERIFICAÇÕES INICIAIS.....	67
4.4 ANÁLISE FINANCEIRA.....	72
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
REFERÊNCIAS.....	78
ANEXO 1 – PARÂMETROS DO CONTROLADOR DE TEMPERATURA.....	80
ANEXO 2 – ROTINA DE CÁLCULOS EES.....	81
ANEXO 3 – MANUAL DE OPERAÇÃO DO CHILLER.....	84

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios quando os elementos hidrogênio e oxigênio se uniram e passaram a formar a substância mais crucial a vida nesse planeta, a água, todas as civilizações que por aqui passaram utilizaram-se desse recurso para o seu desenvolvimento. Atualmente a sua utilização apresenta todos os fins possíveis e imagináveis, certamente, alguns mais nobres que outros. (BACCI et al., 2008). Seja para suprir necessidades básicas dos seres humanos, hidratação, alimentação até mesmo a geração de energia, a vida sempre esteve atrelada a água.

A Agência Nacional de Água e Saneamento Básico, no ano de 2019, conduziu estudo técnico demonstrando que a irrigação é o principal consumidor de água, atingindo a marca de quase metade de tudo que é utilizado. Em seguida, o consumo humano nas cidades representa um quarto do total. Atividades industriais, geração de energia em termoeletricas e consumo animal representam a outra parcela do total.

Pesquisas da Organização das Nações Unidas apontam que o consumo médio mundial de água por pessoa é de aproximadamente 110 litros por dia, mas, de acordo com o Instituto Trata Brasil, os brasileiros utilizam bem mais que a média global, aqui a quantidade é de 166,3 litros por habitante dia. Vale ressaltar que a maior parcela desse volume é utilizada para as demandas corporais básicas, em especial descargas sanitárias e banhos.

As atividades agropecuárias, como a irrigação e utilização animal, lideram o consumo desse recurso, representando 60%, em seguida, o abastecimento urbano, atividades industriais e termoeletricas completam a lista dos maiores utilizadores de água (ANA, 2017). Indústrias de alimentos, por sua vez, utilizam grandes equipamentos como caldeiras para aquecer a água até atingir temperaturas elevadas para utilização no processamento de alimentos. Além das mais diversas formas de utilizações dos processos fabris.

Dentre as atividades consumidoras desse recurso, a sua utilização como fluido térmico é de significativa relevância. No setor automobilístico é parte integrante do líquido de arrefecimento dos motores de combustão interna, responsável por absorver o calor gerado da queima do combustível no interior do motor, e em seguida conduzir para o radiador onde será liberado para o meio exterior (TORSANI, 2018).

Dentre os alvos estratégicos da Engenharia de Energia, o desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas para reduzir custos de operação e perdas de energias,

poupar insumos e recursos naturais, bem como, avaliar o funcionamento de equipamentos e propor mudanças para maximizar suas eficiências, são parte integrante do profissional. Nesse sentido, toda intervenção bem-sucedida que promova melhorias no processo, devem ser implementadas e replicadas com dedicação, pois demonstram a responsabilidade econômica e ambiental do engenheiro.

1.1 PROBLEMA

Além do cenário ambiental, a redução do consumo de água traz benefícios econômicos, uma vez que, os custos com a compra desses volumes das companhias de saneamento e depois com o tratamento do esgoto, não serão mais contabilizados.

As atividades laboratoriais são capazes de fornecer experiências práticas e aprendizado aos alunos, além de serem oportunidades de desenvolver novas habilidades que complementam os estudos de sala. As universidades públicas federais têm por vocação desenvolver atividades de pesquisa e inovação, destarte, possuir uma infraestrutura de equipamentos e recursos para a realização de pesquisas acadêmicas contribui para o avanço e disseminação do conhecimento.

Dentre todas as mais variadas instrumentações e aparelhagens presente em um laboratório, tem-se um insumo como indispensável para qualquer centro de pesquisa, a água destilada. Com utilização majoritária como solvente ou reagente de reações químicas, além de fazer parte no processo de lavagem de vidrarias e aparelhos. Assim, a produção de água destilada é de grande valia para suprir as necessidades dos ambientes de pesquisa. A produção de água destilada ocorre em aparelhos chamados de destiladores de água.

Destiladores de água são dispositivos presentes em quase todos os laboratórios de análises químicas. Segundo a SpLabor, o destilador é um equipamento utilizado para purificar a água, uma vez que, a destilação envolve o processo de fervura da água, transformando-a em vapor, em seguida, esse vapor é condensado e se transforma novamente em água líquida. Componentes minerais e contaminantes presentes no líquido original são separados na mudança de fase da água. Dessa maneira, é obtido água com excelente grau de pureza para a utilização em ambientes laboratoriais.

Na Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina há oito destiladores instalados em blocos de ensino e laboratórios o que gera um consumo aproximado de 80 metros cúbicos por mês. Isso impacta em algo em torno de R\$ 1.800,00 nas finanças da Universidade, pois, inclui também o tratamento de esgoto de acordo com os valores cobrados pela Sanepar

Foi avaliado a instalação e operação de um destilador de água no laboratório de Análises Clínicas do Hospital Veterinário da Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina. Durante a inspeção foi verificado que o destilador consome em média 120 litros de água potável no sistema de resfriamento. Essas águas provêm do sistema de abastecimento da companhia estadual, que após passar pelo trocador de calor do destilador é descartada ao sistema de tratamento de esgoto, sem qualquer outro aproveitamento. Em dias de operação normal, chega-se a consumir quase 700 litros de água potável para produção de apenas 20 litros de água destilada. Essa grande discrepância entre o produto obtido e o volume consumido gera preocupações a respeito do desperdício desse valioso recurso hídrico.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Reduzir o consumo de água potável na produção de água destilada, de forma a propiciar a sustentabilidade ambiental, que é algo imperativo para a UFPR, bem como, a todas repartições públicas.

Reutilizar equipamentos de refrigeração e climatização que estão sem utilização, bem como itens reciclados para a construção e desenvolvimento do projeto do chiller.

1.2.2 Objetivos específicos

Realizar e executar o projeto de um chiller que possa atender as demandas de água de refrigeração de um destilador de água. Realizar os cálculos de engenharia para a determinação de incógnitas como: cargas térmicas, dimensionamento de tubulações, coeficientes de transferência de calor, dimensionamento de serpentina,

escolha adequada de bomba d'água e, por fim, a viabilidade econômico-financeira do projeto.

1.3 JUSTIFICATIVA

A diminuição do consumo de água em fins não nobres é sem sombra de dúvidas um dos fatores que contribui para o desenvolvimento sustentável da atual sociedade. Aliado a questão ambiental o aspecto financeiro também toma corpo, as reduções no consumo diário de aproximadamente 700 litros trarão economia as contas públicas da universidade com a companhia de saneamento de água.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão bibliográfica deste trabalho foi realizada com base em pesquisas e consultas a trabalhos análogos como forma de compreender as metodologias já explorados na área. O objetivo principal foi analisar as formas de reutilizar a água de refrigeração do destilador, bem como, as maneiras propostas por esses autores. Essa água, utilizada no resfriamento do sistema de condensação do vapor, apresenta potencial para reutilização, reduzindo assim o impacto ambiental e otimizando os recursos hídricos.

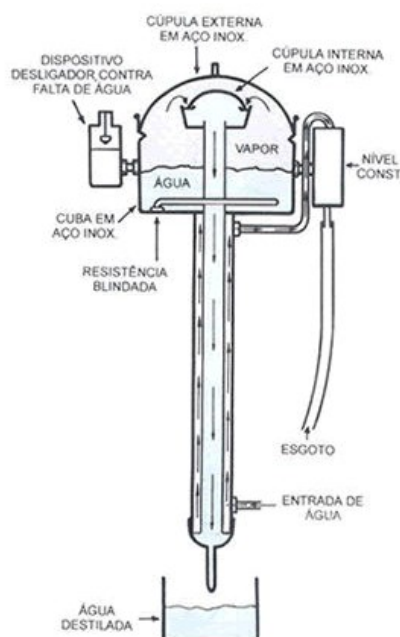
Nesse sentido, o levantamento bibliográfico foi essencial para comparar as propostas deste trabalho, ao que já foi construído por outros pesquisadores e profissionais da área. Foi optado por fazer a fundamentação técnica e teórica das hipóteses adotadas no dimensionamento do sistema de refrigeração, sistema hidráulico e automação no capítulo de Modelagem e Desenvolvimento.

2.1 DESTILADOR DE ÁGUA

O mecanismo de funcionamento de um destilador do tipo Pilsen, como mostrado na Figura 01 é muito simples. Esse equipamento possui uma coluna de resfriamento que é formado por dois tubos concêntricos, o tubo interno é percorrido por vapor, ao passo que, o tubo externo é preenchido com água do sistema de abastecimento urbano. A água deve ser fornecida na parte de baixo do equipamento, na medida que ela enche o tubo externo começa a alimentar a cuba de vaporização. Nesse recipiente há uma resistência elétrica, essa dissipa energia até que a água atinja seu ponto de ebulição. A partir do momento que ela começa a se vaporizar, esse vapor é conduzido até o tubo interno da coluna do destilador, ali ocorre a condensação do vapor.

A água destilada nada mais é que o vapor condensado após a ebulição. No recipiente onde está a resistência elétrica ficam depositados sais minerais e demais componentes insolúveis presentes na água, tornando-a dessa forma mais pura e apta a ser utilizada em práticas laboratoriais.

Figura 01 – Representação esquemática de um destilador.



Fonte: DELTA Equipamentos para Laboratórios (2021).

Desenvolver técnicas ou aprimorar o sistema de funcionamento de destiladores de água não é algo novo. Observar diariamente dezenas de litros de água potável sendo descartada por apenas estar aquecida, após passar pelo trocador de calor do destilador, e mantendo as mesmas características de potabilidade inicial instigou vários acadêmicos de centros de ensino a proporem soluções para um destino mais digno a esse líquido tão valioso.

Como forma de facilitar o entendimento desse capítulo, a revisão bibliográfica a partir daqui foi dividida em três itens, sendo eles: Análise na própria UFPR; Pesquisas de projetos similares; Premissas desse trabalho.

2.2 ANÁLISE NA UFPR SETOR PALOTINA

Inicialmente foi verificado se dentro da UFPR Setor Palotina já existiam medidas para mitigar esse desperdício. Em dois laboratórios, foi visto que os técnicos que operam esse equipamento algumas vezes coletam essa água em baldes para posteriormente destinar a irrigação de plantas, ou para o pessoal da higienização lavar calçadas e afins.

Em outros ambientes verificados, a água é simplesmente descartada a rede de coleta de esgoto sem qualquer forma de reaproveitamento.

Mesmo que seja aproveitada de alguma forma esporádica pelos profissionais da UFPR, esse volume ainda é contabilizado nas faturas da Companhia de Abastecimento, o que acarreta em despesas orçamentárias à instituição. Dessa maneira, iniciou-se pesquisas em artigos científicos e periódicos sobre mecanismos de reaproveitamento da água de resfriamento do destilador.

2.3 PESQUISAS DE PROJETOS

Em um estudo de recuperação da água dos laboratórios da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), (MENEZES e FILHO, 2022), propõem três caminhos para reutilizar a água do destilador, são eles:

Reintegração da água ao sistema de abastecimento do próprio prédio;
Adaptação do processo de destilação para possibilitar a reutilização da água no próprio destilador;
Armazenamento da água para posterior utilização no próprio laboratório.

Para o primeiro caso, foi proposto por esses autores, que seja construído uma cisterna para armazenamento da água descartada nos destiladores, e em seguida, ela seria encaminhada ao reservatório principal do prédio. Todavia, essa opção conta com várias modificações no sistema hidráulico existente nos laboratórios analisados, bem como, com obra civil e que gerariam custos elevados e vários transtornos a rotina de trabalho desses centros de pesquisas, dessa maneira, a ideia foi descontinuada.

A segunda opção, trata de reciclar no próprio destilador a água descartada, por meio de um sistema de resfriamento que não traga custos elevados de energia elétrica. Carolina et al. (2022) citam o trabalho de Matos, S. C. C. et al. (2015) que propôs a montagem de um sistema de recirculação para o destilador, no qual o resfriamento da água ocorria em um tubo de cobre de quatro metros de comprimento que estava inserido em um banho de água gelada, esse resfriamento era feito mediante a adição direta de gelo.

O protótipo confeccionado por Matos et al. (2015) está apresentado na Figura 02. As numerações 1, 2, 3 e 4, são, respectivamente, o depósito de água destilada, o destilador, a caixa de isopor com o sistema de resfriamento e o reservatório de água com a bomba que impulsiona a água até o destilador.

Vale ressaltar que o próprio autor, relatou que não realizou quaisquer cálculos de termodinâmica ou transferência de calor para a determinação do tamanho exato do tubo de resfriamento, bem como, da quantidade de gelo necessária para o resfriamento da água, o que não lhe garantiu boa confiabilidade de funcionamento.

Figura 02 – Protótipo proposto

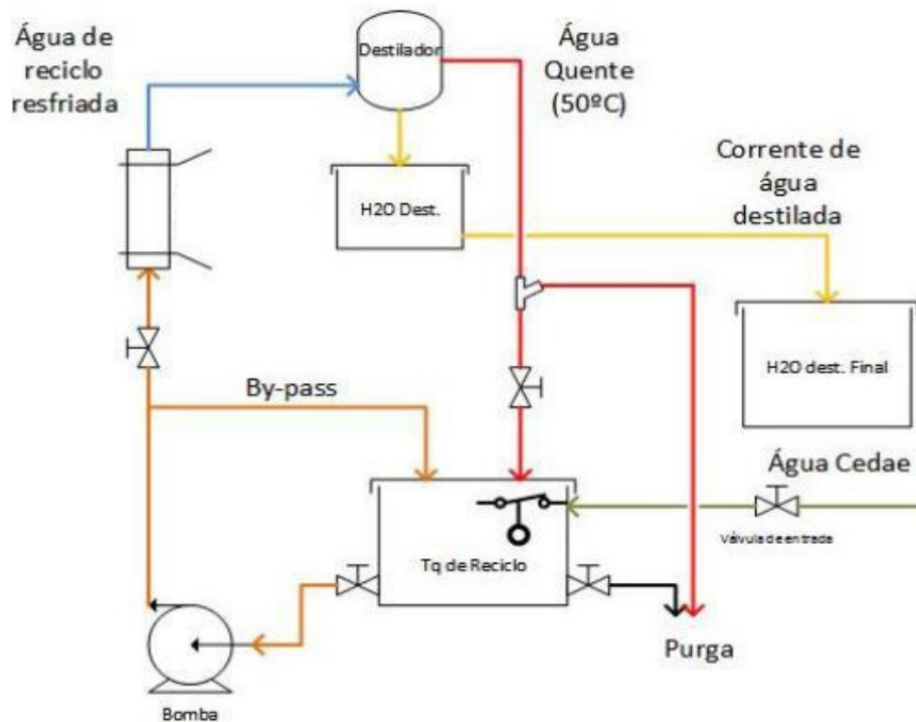


Fonte: Matos, S. C. C. et al. (2015)

Outra proposta apresentada por Carolina et al. (2022) foi de resfriar a água quente que sai do destilador por meio da utilização de uma torre de resfriamento. Esse sistema constituía em uma serpentina de cobre superdimensionada e dois pequenos ventiladores, semelhantes aos de computadores. Nessa serpentina haveria um gotejamento de água que propiciaria um aumento da troca térmica, ou seja,

aumentaria o coeficiente convectivo externo. No entanto essa ideia foi cessada e nem chegou a ser implementada, devido a ineficiência do sistema proposto. O modelo esquemático da torre de resfriamento está representado na Figura 03.

Figura 03 – Fluxograma para Torre de Resfriamento



Fonte: Carolina et al. (2022)

Em nova tentativa de resfriar a água sem custos energéticos, Carolina et al. propuseram a construção de um reservatório intermediário de argila. A fundamentação dos autores, remonta a técnicas indígenas de armazenamento de água em temperaturas mais amenas para o consumo. Ela relata na sua explicação o processo de evaporação que ocorre nos vasos de barro, que devido aos poros presentes na estrutura da parede do recipiente, a água migra para o lado externo, ali em contato com o ar atmosférico ela evapora. No processo de evaporação, as gotículas de água absorvem calor da parede do vaso, o que a resfria, e consequentemente também o líquido armazenado dentro, assim diminui a sua temperatura.

Por fim, os autores discutem sobre formas de armazenamento de água para utilização posterior no laboratório. Esta é, segundo eles, a maneira mais simples de

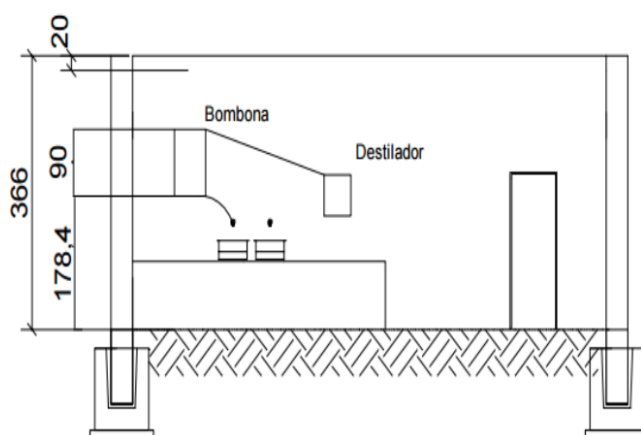
realizar o reaproveitamento, pois não apresenta empecilhos com layouts, equipamentos para controle de temperatura ou movimentação de fluido. No entanto, é reiterado por eles que há restrições no volume a ser armazenado, devido ao tamanho dos laboratórios geralmente ser pequeno.

Aguiar, M. B. et al (2018), projetaram a instalação de um reservatório para a coleta da água de descarte de um destilador do Laboratório de Química da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais Unidade Barreiro. Após o armazenamento no recipiente proposto essa água seria destinada para a lavagem de vidrarias utilizadas no próprio laboratório.

O autor após medições concluiu que para a produção de um litro de água destilada eram desperdiçados dezessete litros de água. Como a rotina de utilização desse equipamento era baixa, ele dimensionou o reservatório para a produção máxima de água destilada de um dia. O destilador avaliado por ele tem capacidade de produzir 10 L de água destilada, dessa maneira seriam despendidos 170 L de água para resfriamento, com uma pequena margem de segurança para o reservatório foi adotado um recipiente de 200 L para um dia de operação.

A proposta de Aguiar, M. B. et al (2018), foi a instalação desse reservatório acima da pia de lavagem de vidrarias, para a fácil visualização do nível de água armazenada e evitar custos com bombeamento. A iniciativa dos autores está representada na Figura 04.

Figura 04 – Esquema real do reservatório no laboratório



Fonte: Aguiar, M. B. et al. (2018).

No ano de 2014, a empresa Zanin Soluções Técnicas, na qual o autor desse trabalho faz parte do quadro societário, realizou a instalação de um sistema de tubulações com o objetivo de coletar águas residuais do laboratório de análises químicas de uma empresa parceira. Nesse caso, foi realizada a construção de uma rede de coleta, e armazenamento para posterior reutilização. Nesse laboratório todos os equipamentos que utilizavam água proveniente do abastecimento urbano para resfriar seus componentes ou análises, foram interligados a rede coletora e direcionados a um reservatório intermediário já existente no local. Pelo fato desse armazenamento inicial ser subterrâneo, o direcionamento da água para ele ocorreu de forma natural por ação da gravidade. A partir desse ponto, a água foi bombeada para a caixa de água do laboratório para ser posteriormente ser utilizada.

Cabe ressaltar que essa rede construída não coletou águas de pias, ralos ou esgoto do banheiro, ou ainda para casos em que poderia ocorrer contaminações físico-químicas da água. Esse cuidado foi tomado, uma vez que, ela foi destinada até o reservatório principal da edificação. Outro fato importante é que essa água não é utilizada em nenhuma hipótese para o consumo humano, apenas para fins laboratoriais, de limpeza e sanitários. A motivação desse serviço foi decorrente de vários problemas que aconteciam nas proximidades da fossa séptica em que era descartada essa água. Em especial, encharcamento do terreno, e inundações em caixas da infraestrutura elétrica que estavam enterradas perto.

2.4 METODOLOGIA UTILIZADA NESSE TRABALHO

Após avaliar as condições de operação do destilador, os posicionamentos de máquinas e layouts dos laboratórios da UFPR, bem como, da análise dos autores citados no item anterior, fica claro que não é possível realizar um reaproveitamento concreto da água de refrigeração do destilador. Sem que haja custos energéticos para esse fim, assim deu-se início na formulação de hipóteses para a resolução do problema.

Para propor uma solução ao desperdício de água que vai além de um simples sistema de armazenamento para uma posterior utilização em lavagem de vidrarias e afins, deve ser construído um equipamento que consiga resfriar o líquido de arrefecimento até parâmetros próximos aos da entrada.

Assim sendo, será projetado, e construído ao menor custo possível um aparelho de refrigeração que atenda as demandas térmicas do destilador e possa realizar um ciclo fechado com a água de arrefecimento, esse equipamento já existe, e comercialmente é chamado de chiller. Com o aparelho construído e em operação serão realizados os estudos de viabilidade econômica com base nos volumes de água que deixarão de ser desperdiçados.

2.4.1 Chiller

Chillers são máquinas de refrigeração utilizadas para resfriar grande quantidade de líquidos em curtos períodos de tempo. São indicados para as mais diversas aplicações em sistemas de água gelada, podendo ser utilizado em hotéis, edifícios comerciais, indústrias, hospitais, etc. (CARRIER, 2023). Na Figura 05, está representado um modelo comercial da marca Carrier.

Figura 05 – Chiller AquaForce® 30XSB



Fonte: Carrier do Brasil (2024).

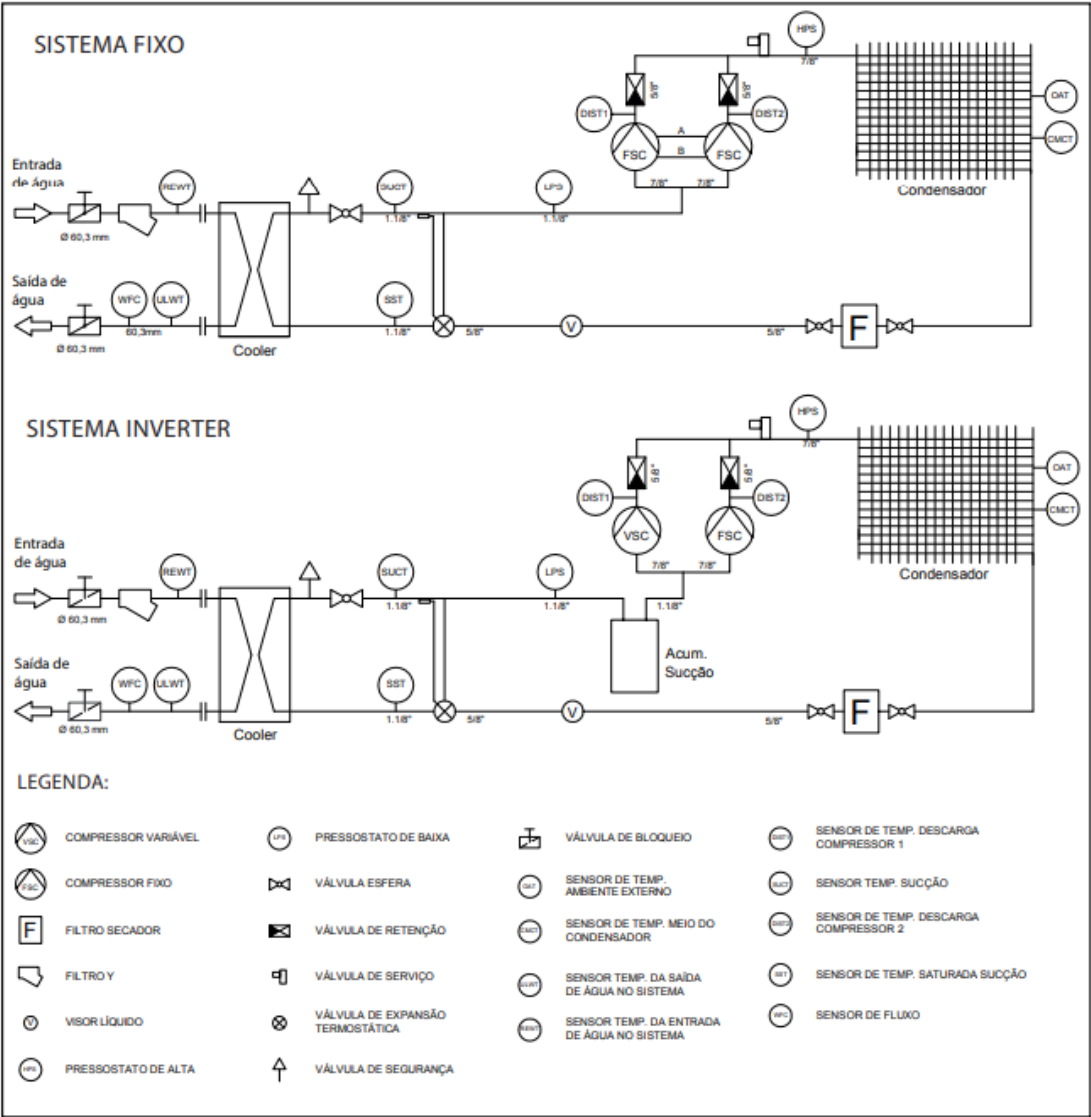
Um fluxograma básico de funcionamento desse equipamento está representado na Figura 06. Ele, assim como qualquer outro sistema de refrigeração possui os mesmos componentes básicos, sendo eles: unidade compressora, trocador de calor externo (condensador), dispositivo de expansão e trocador de calor interno (evaporador). Já no sistema hidráulico, os principais componentes são os conjuntos

de sensores de temperatura, a bomba hidráulica, sistema de *by-pass* e o reservatório de resfriamento.

Figura 06 – Fluxograma dos componentes do Chiller



3.3 Fluxograma dos Componentes



Fonte: Carrier do Brasil (2024).

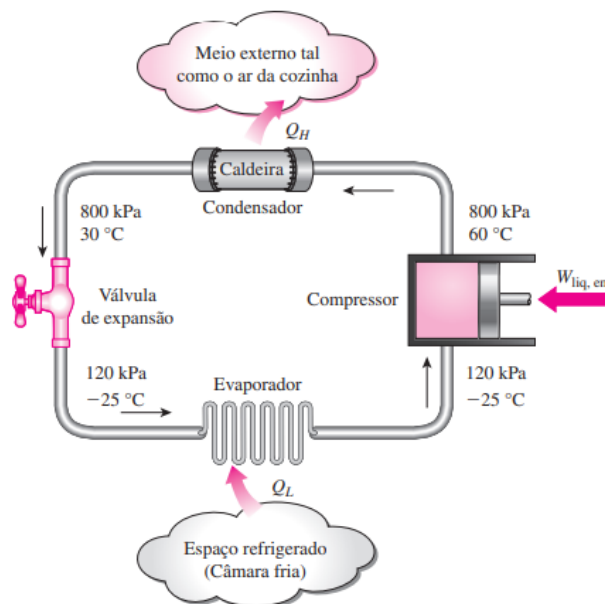
2.4.2 Modelagem

Para uma correta modelagem do equipamento a ser construído, ela será dividida em três partes, sistema de refrigeração, sistema de bombeamento de água gelada e sistema de controle e automação.

2.4.2.1 Sistema de refrigeração

Um sistema de refrigeração que opera através da compressão mecânica de um gás refrigerante, ou seja, um ciclo de refrigeração através da compressão de vapor está ilustrado na Figura 07. Em síntese um sistema de refrigeração é dividido em alta e baixa pressão.

Figura 07 – Componentes básicos de um sistema de refrigeração e condições típicas de operação



Fonte: Çengel (2013)

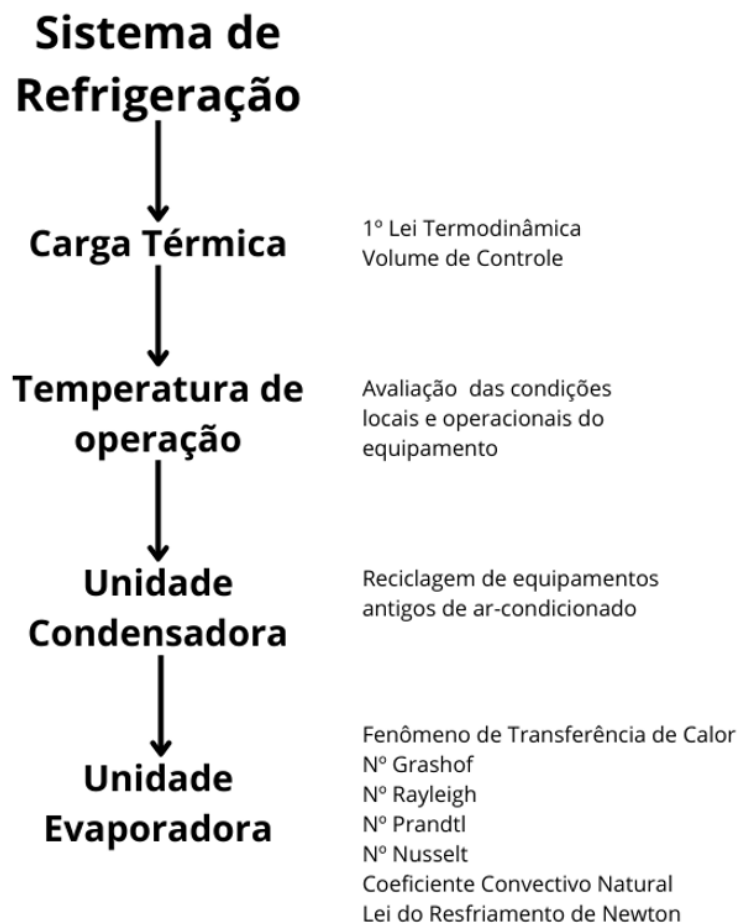
O lado de alta é formado pelo compressor, trocador de calor externo e ventilador externo. O compressor comprime o refrigerante na forma de vapor a elevadas pressões, o qual ao passar por um trocador de calor externo (condensador) podendo ter ou não o auxílio de ventilação forçada libera energia na forma de calor ao ambiente externo, e passa ao estado de líquido pressurizado.

Na sequência esse líquido sob pressão passa pelo dispositivo de expansão, que pode ser desde um tubo capilar (tubo de diâmetro muito fino), ou uma válvula de abertura eletrônica. Nessa etapa ocorre a queda abrupta de pressão do líquido e

consequentemente a queda de temperatura. O refrigerante, agora no estado líquido e com baixa temperatura passa pelo trocador de calor interno (evaporador), nessa fase, ele absorve o calor do ambiente a ser resfriado e passa ao estado de vapor, uma vez que, aumenta a sua temperatura ao retirar o calor do meio. Logo após, ele retorna ao compressor e o ciclo reinicia.

O evaporador pode ter o auxílio de ventilação forçada para maximizar as trocas de calor. Cabe ressaltar que o projeto do evaporador deve ser preciso, pois caso ele não tenha capacidade de absorver a quantidade de calor correta para evaporar todo o refrigerante, pode haver o retorno do fluido refrigerante na fase líquida ao compressor, o que gera danos ao mecanismo interno de compressão. Por fim, válvula de expansão e evaporador compõem o lado de baixa pressão do sistema de refrigeração. A sequência de passos adotados para o dimensionamento do sistema de refrigeração do chiller está exposta na Figura 08.

Figura 08 – Fluxograma do sistema de refrigeração



As bibliografias base consultadas para a modelagem de todo o sistema de refrigeração necessário para vencer a carga térmica imposta pelo destilador foram os livros de Termodinâmica e de Transferência de Calor, ambos de autoria de Yunus A. Çengel et al. As explicações teóricas a respeito das hipóteses adotadas no dimensionamento, bem como, os equacionamentos estão no capítulo de MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.

2.4.2.2 Sistema de bombeamento de água gelada

A vazão de água requerida para o funcionamento do sistema de resfriamento foi avaliada e medida com o auxílio do técnico responsável pelo laboratório analisado. Mediante isso, procedeu-se com a determinação das perdas de carga nas tubulações e mangueiras que conectariam o chiller ao destilador, levando em consideração diversos fatores construtivos, como o diâmetro das tubulações, comprimento e rugosidade, além de eventuais acessórios e curvas.

Com essas informações, foram realizados os cálculos necessários para determinar a potência elétrica da bomba hidráulica requerida para o projeto. Os cálculos balizaram-se em análises de perdas de carga distribuída ao longo das tubulações e a perdas de carga localizada em válvulas e acessórios. Além disso, foram consideradas as variações de pressão necessárias para superar a altura manométrica total do sistema. Os passos adotados e o dimensionamento estão descritos na Capítulo de MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.

2.4.2.3 Sistema de controle e automação

O sistema de controle de temperatura e acionamento da circulação de água, foi esquematizado previamente com base no conhecimento prático adquirido ao longo da experiência profissional desse autor. Foram utilizados dois dispositivos de acionamento indireto, contatores, e diretos como as chaves duas posições liga-desliga, comercialmente conhecida como tic-tac. Além disso, foi integrado ao sistema um controlador de temperatura comercial, amplamente utilizado em câmaras frigoríficas e expositores de bebidas. Esse controlador terá a função de gerir a temperatura da água, bem como, garantir os intervalos de operação do sistema. A

combinação desses dispositivos simples, permitirá a criação de um sistema de controle robusto e confiável para o gerenciamento do equipamento.

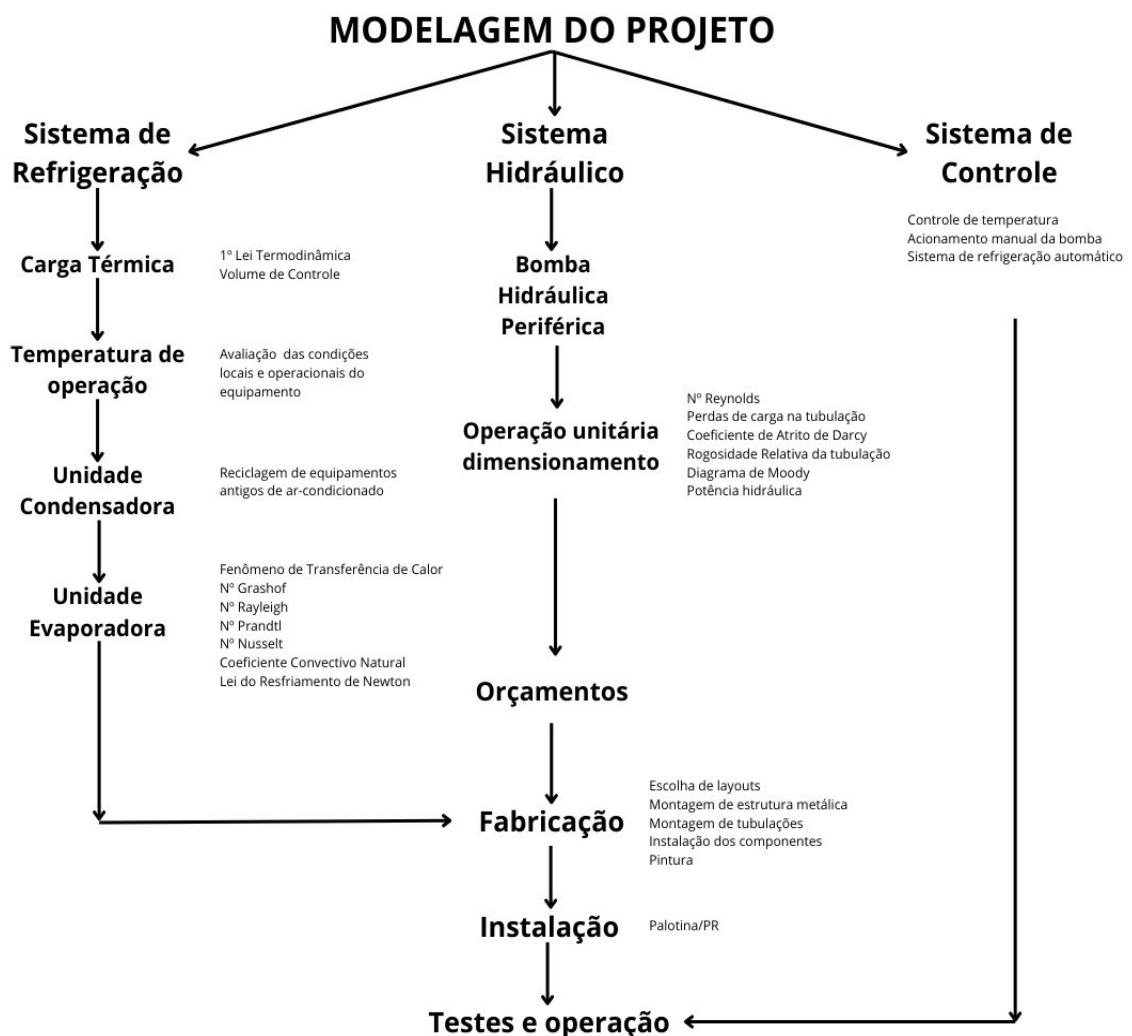
2.4.2.4 Modelo seguido

Com base nas análises feitas dos trabalhos citados anteriormente foi escolhido o protótipo confeccionado por Matos et al. (2015), que consistia no resfriamento da água de refrigeração do destilador com adição de gelo a um trocador de calor, para orientar minimamente o desenvolvimento desse projeto. No entanto, sua fundamentação teórica e mecanismos de operação são muito simplórios frente a complexidade do problema objeto desse trabalho. Portanto, seguiremos a construção do chiller baseado nas bibliografias literárias referenciadas, no conhecimento tácito desse autor e sobretudo, com base em análises e testes a serem executados no decorrer do processo.

3 MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Como forma de melhorar a organização da metodologia de dimensionamento e construção do sistema de resfriamento de água, esse capítulo foi dividido em tópicos, sendo eles: modelagens dos sistemas de resfriamento; bombeamento; controle do chiller; montagem e fabricação; instalação e testes de funcionamento e custos financeiros. Abaixo, na Figura 09 pode ser visualizado um fluxograma dos tópicos que serão abordados.

Figura 09 – Fluxograma da modelagem do projeto



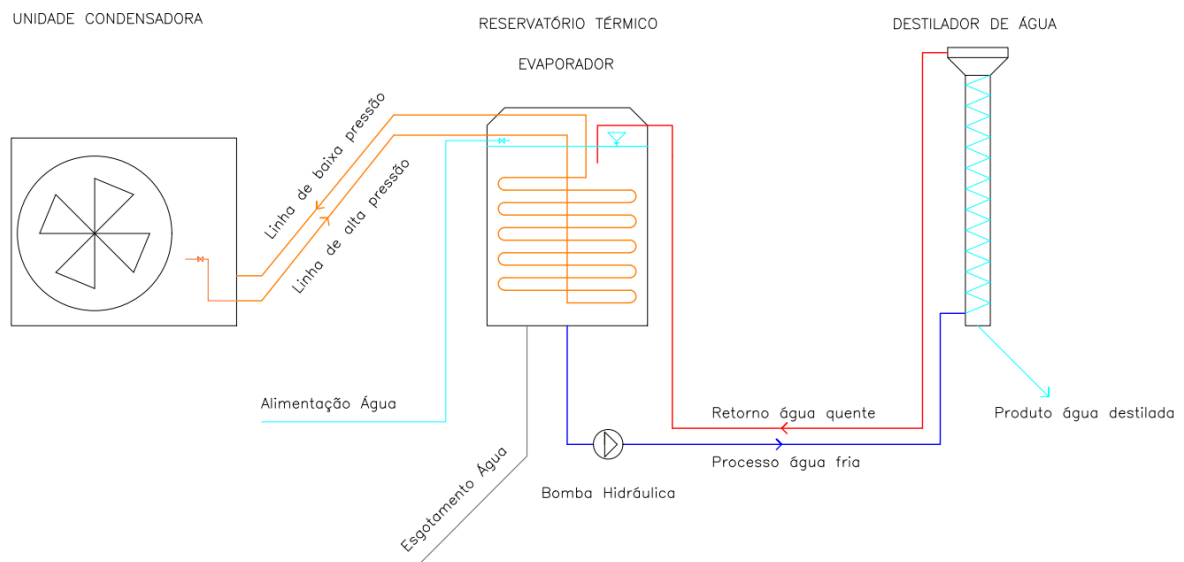
Fonte: Autor (2024)

3.1 ESQUEMA PRÉVIO DE MODELAGEM

O modelo esquemático de funcionamento e interligação dos equipamentos que serão modelados nesse trabalho, pode ser verificado logo a seguir na Figura 10. Nela, estão representados todos os principais componentes que serão parte integrante dos cálculos de engenharia para a determinação das capacidades e potências necessárias dos itens integrantes.

Figura 10 – Diagrama dos componentes

PROJETO DOS COMPONENTES



Fonte: Autor (2024)

Em ordem, da direita para a esquerda estão: unidade condensadora do sistema de refrigeração; Linhas de alta e baixa pressão; Reservatório térmico com evaporador embutido; Linhas de transporte de água gelada e quente. Por fim, o destilador.

A água fria ao entrar no destilador começa a absorver o calor do vapor que passa pela rede de canais helicoidais. Dessa maneira, quando ela atinge o ápice do aparelho, já com temperatura mais elevada, é então conduzida até o reservatório térmico. Nesse reservatório, a água quente é então resfriada por meio de um sistema de refrigeração (objeto desse trabalho), assim ela volta até as condições iniciais, com

capacidade de condensar novamente o vapor. Dessa forma, tem-se um ciclo fechado para a água de resfriamento, no qual não ocorrem perdas ou desperdícios de água.

No cenário apresentado acima, os principais itens de dimensionamento, que demandarão tempo e conhecimento específico, são eles: a potência de refrigeração; e tipo e tamanho do evaporador, haja visto que, no reservatório térmico o fenômeno de transferência de calor que rege o processo é a convecção. Esse mecanismo é de extrema complexidade e possui várias formas de modelagem, assim se torna necessário avaliar cuidadosamente todos os pontos envolvidos no Volume de Controle, bem como, garantir a precisão dos cálculos. Nos itens subsequentes serão discriminados todos os equacionamentos, bem como, as hipóteses adotadas nesse trabalho.

3.2 MODELAGEM DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO

3.2.1 Determinação da Potência de Resfriamento

Primeiramente, foi realizado o dimensionamento da carga térmica que o destilador despeja na água de refrigeração, essa é a potência que deve ser vencida pelo equipamento que será construído. A determinação da carga térmica envolvida no processo de condensação do vapor d'água para a formação da água destilada envolveu os princípios básicos da termodinâmica.

Para a determinação do calor absorvido pelo líquido de resfriamento foi traçado o volume de controle (V.C.) para análise, e em seguida, realizado o balanço de energia para processos com escoamento em regime permanente (ÇENGEL, 2013), em que, a quantidade de água que entra no destilador sairá como produto (água destilada) ou na forma de líquido aquecido. Para essa determinação foi utilizada a Equação 01.

$$\dot{Q}_{ent} + \dot{W}_{ent} + \sum_{ent} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_{sai} + \dot{W}_{sai} + \sum_{sai} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (01)$$

Em que:

$\dot{Q}$ = Taxa de calor gerada ou consumida no V.C. (kW).

$\dot{W}$ = Trabalho realizado ou produzido no V.C. (kJ).

$\dot{m}$ = Fluxo de massa analisada que cruza o V.C. (kg/s).

h = Entalpia (kJ/kg).

V = Velocidade do escoamento/fluído (m/s).

g = Aceleração da gravidade (m/s²).

z = Cota de altura avaliada (m).

Os subscritos *ent* e *sai* denotam os estados de entrada e saída, respectivamente do V.C. traçado sobre o destilador, conforme pode-se verificar na Figura 11.

Figura 11 – Volume de Controle do destilador analisado



Fonte: Autor (2024)

A seta número 1 indica a corrente de água que abastece todo o equipamento. Já a seta 2 trata-se da água de resfriamento que absorveu calor e será encaminhada ao reservatório térmico do chiller para ser resfriada e retornar ao destilador. Por fim, a

seta 3 mostra o produto sendo direcionado a uma barrica de armazenamento. Assim o balanço de massa é concluído.

Por conseguinte, foram medidas, em duplicata, as temperaturas do fluído nas situações avaliadas anteriormente, para que, em seguida possa ser consultado, nas bibliografias referenciadas ao final desse trabalho, os respectivos valores de entalpia e demais propriedades termofísicas necessárias a determinação dos resultados.

Assim, considerando o escoamento incompressível, no qual, não acontece a realização de trabalho, adotou-se a Primeira Lei da Termodinâmica (Equação 01) para modelar o sistema. Os termos de produção de trabalho, energia cinética do líquido e energia potencial gravitacional foram desconsiderados da equação pois não apresentam valores significativos aos resultados, uma vez que, no cenário analisado o fenômeno físico mais relevante é o gradiente de temperatura do líquido de arrefecimento.

3.2.2 Determinação da Temperatura de Operação

O destilador de água analisado opera em ampla faixa de temperatura para o líquido de arrefecimento, uma vez que, ele foi projetado para trabalhar com água de fornecimento público em temperatura ambiente.

O local de instalação desse equipamento está localizado a oeste do Estado do Paraná, na cidade de Palotina, região com elevada amplitude térmica e baixa altitude. As condições climáticas e territoriais descritas acima, em consonância com as temperaturas médias registradas nos últimos anos, optou-se pela temperatura de 20°C para o resfriamento.

3.2.3 Determinação da Condensadora

Não foram realizados cálculos de dimensionamento para determinar ou construir uma unidade condensadora para o sistema de refrigeração do chiller. Isso ocorreu porque os cálculos iniciais da carga de resfriamento resultaram em valores significativamente altos, tornando-se inviáveis para o projeto.

Diante disso, foi avaliada e aceita a possibilidade de aproveitar um equipamento de ar-condicionado que estava sem uso. Considerando que o meio de transferência de calor nesse caso é o ar atmosférico, uma unidade condensadora de

ar-condicionado pode muito bem desempenhar esse serviço de maneira eficaz, eliminando a necessidade de construir uma unidade condensadora do zero, que demandaria mais recursos financeiros e tempo, além de não ser o objetivo principal desse trabalho.

3.2.4 Determinação da Evaporadora

O projeto do evaporador foi o ponto crucial no dimensionamento do sistema de refrigeração, uma vez que, ele precisava ser ajustado e preciso para garantir que todo o fluido refrigerante pudesse passar pelo processo de evaporação de forma completa, pois, caso ocorresse de permanecer alguma parcela do fluido em fase líquida, este ao retornar ao compressor poderia causar danos ao mecanismo interno, haja visto que, o líquido é um fluido incompressível, no ramo da refrigeração, esse fenômeno é conhecido como golpe de líquido. Além disso, o evaporador deverá ter a capacidade de retirar todo o calor da água nas mesmas proporções que a potência do condensador, assegurando assim o equilíbrio térmico e a eficiência do sistema.

Como esse evaporador ficará imerso em água, foram adotadas algumas hipóteses para o seu dimensionamento. O processo de transferência de calor no reservatório térmico ocorre do líquido em temperaturas mais quentes ao trocador de calor em temperaturas mais frias, conforme as leis da termodinâmica. Em seguida, deve ser determinado os fenômenos envolvidos para a transferência de calor no recipiente de resfriamento de água.

Foi avaliado que o fluxo necessário de água para o resfriamento do destilador é tão pouco em comparação ao reservatório proposto de água gelada, que foi considerado que o processo de resfriamento da água do reservatório térmico ocorre por meio do fenômeno da convecção natural.

Convecção natural é um mecanismo físico de transferência de calor no qual, os movimentos dos fluidos ocorrem de maneira natural, sem o auxílio de forçadores como bombas ou ventiladores. Quem propicia essa movimentação é a diferença de densidade entre as parcelas infinitesimais do líquido, causada por diferenças de temperatura. Outro fato, é que o fluido circula com velocidades inferiores a 1 m/s e espontaneamente ocorre a transferência de calor por convecção natural. Aliado a isso, foi realizado a verificação numérica, em que se a desigualdade exposta na Equação 02 for muito maior que 1, os efeitos da convecção forçada podem ser desprezados.

$$\frac{Gr_L}{Re^2} \gg 1 \quad (02)$$

Em que:

Gr_L = Número de Grashof.

Re^2 = Número de Reynolds.

A evaporadora do sistema será dimensionada para utilizar tubos de cobre de diâmetro de $\frac{3}{8}$ de polegadas. Como o objetivo é absorver o calor da água que já passou pelo destilador, não é necessário empregar uma serpentina com aletas ou qualquer outro artifício que aumente a área de troca de calor. Isso se deve ao fato, que o mecanismo de transferência de calor da convecção é muito mais atuante em líquidos do que em gases. Destarte, o trocador de calor do reservatório térmico será modelado com base no Capítulo de Convecção Natural das bibliografias referenciadas.

Na determinação do processo de transferência de calor através da convecção natural, tendo as temperaturas críticas determinadas, o primeiro procedimento é a determinação dos seguintes parâmetros: número de Grashof, número de Rayleigh, número de Prandtl, e por fim, o número de Nusselt. Após as determinações desses números adimensionais, é possível calcular o coeficiente convectivo natural médio do escoamento do reservatório térmico. Finalmente, com base na Lei do Resfriamento de Newton determina-se a área superficial necessária para que ocorra o resfriamento do líquido.

3.2.4.1 Número de Grashof

Representa a relação entre as forças de empuxo para as forças viscosas. O número Grashof está para a convecção natural, assim como Reynolds está para a convecção forçada, ele está representado na Equação 03, dessa maneira, as correlações matemáticas ou empíricas existentes para a determinação do número de Nusselt e conseqüentemente a transferência de calor, são funções de Grashof e Prandtl.

$$Gr_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2} \quad (03)$$

Em que:

g = Aceleração da gravidade (m/s²).

β = Coeficiente de expansão volumétrica, calculado pelo inverso da temperatura absoluta do fluido (K).

T_s = Temperatura da superfície do tubo (°C).

T_∞ = Temperatura média do fluido (°C).

L = Comprimento característico da superfície analisada (m).

ν = Viscosidade cinemática, razão entre viscosidade dinâmica e densidade (Pa/s)

3.2.4.2 Número de Rayleigh

Da mesma maneira que ocorre na convecção forçada a convecção natural também pode apresentar escoamentos que ocorrem fora do regime laminar, isto é, que há presença de instabilidades fluidodinâmicas, caracterizadas como turbulências. A sua verificação se dá através do número de Rayleigh que é o produto dos números de Grashof e Prandtl, conforme elencado abaixo na Equação 04.

$$Ra = Gr_L Pr \quad (04)$$

Quando o número Rayleigh assume valores maiores que 10^9 o regime turbulento sobressai na Transferência de Calor, o que deve ser avaliado para escolha da correlação apropriada de Nusselt. (INCROPERA et. al, 2014)

3.2.4.3 Número de Prandtl

O número de Prandtl (Pr) é um parâmetro adimensional que relaciona as espessuras relativas da camada limite hidrodinâmica e térmica. Dessa maneira, quanto menor for o valor de Prandtl para um fluido mais fácil o calor se difunde nele. Gases possuem Pr próximos a 1, que indica que a quantidade de movimento e calor que se dissipam sobre esse fluido ocorrem na mesma taxa. (ÇENGEL, 2012).

Por se tratar de uma propriedade física de grande importância e utilização, as bibliografias referenciadas nesse trabalho foram consultadas para coleta de valores necessários a resolução dos cálculos. Essas fontes trazem valores tabelados para cada Prandtl em diferentes temperaturas de análise.

3.2.4.4 Número de Nusselt

Por se tratar de um processo termodinâmico extremamente complicado e difícil de modelar, foi adotado a correlação empírica de convecção natural para cilindros horizontais da bibliografia de Transferência de Calor e Massa referenciada ao final desse trabalho, que está exposta na Equação 05 é a correlação de Churchill e Chu, para a determinação do número de Nusselt médio.

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 * Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (05)$$

3.2.4.5 Coeficiente Convectivo Natural Médio e Área Superficial

A partir do número de Nusselt médio, determinado na Equação 05, é possível calcular o coeficiente convectivo natural médio do escoamento dentro do reservatório térmico do chiller. A Equação 06, modela essa determinação.

$$Nu = \frac{h * L_c}{k} \quad (06)$$

Em que:

h = Coeficiente convectivo natural médio (kJ/kg.K).

L_c = Comprimento característico (m).

k = Condutividade térmica (W/m.K).

Dessa forma, foi determinado um coeficiente convectivo natural externo de troca de calor, em seguida, pela Lei do Resfriamento de Newton, determinado qual a

área superficial necessária para a transferência de calor proposta. A Lei do Resfriamento de Newton está disposta na Equação 07.

$$\dot{Q}_{conv} = h A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (\text{kW}) \quad (07)$$

Em que:

h = Coeficiente convectivo natural médio (kJ/kg.K).

T_s = Temperatura da superfície do tubo (°C).

T_{∞} = Temperatura média do fluido (°C).

Tendo o valor da área molhada do tubo, bastou calcular o seu tamanho linear pela equação do comprimento da circunferência, como pode ser observada na equação 08.

$$A_s = \pi \cdot D \cdot L \quad (\text{m}^2) \quad (08)$$

Em que:

D = Diâmetro do tubo (m²).

L = Comprimento (m)

Como forma de mitigar os efeitos de possíveis incrustações que possam surgir nas paredes externas do tubo. E também, por se tratar de um dimensionamento térmico, em que há muitas correlações, aproximações e incertezas envolvidas, é prática comum na engenharia a utilização de um fator de segurança. No dimensionamento de tubulações esse fator é de 50 %, dessa maneira, o resultado foi multiplicado por 1,5.

3.3 MODELAGEM DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO

A partir da definição de um layout para o sistema de bombeamento, o qual se trata de uma operação unitária, e a determinação da perda de carga da rede e vazão mínima necessária para resfriamento do destilador foi possível realizar a determinação da bomba d'água necessária a movimentação do fluido. Foram

realizados os cálculos de perdas de cargas localizada e contínuas nas tubulações seguindo as orientações do Manual de Hidráulica (NETO, 1973).

3.3.1.1 Dimensionamento da bomba d'água

Para a determinação se o escoamento do líquido de resfriamento do destilador assume as características de laminar ou turbulento foi calculado o Número de Reynolds, por meio da Equação 9. O termo de velocidade média ($V_{méd}$) foi definido a partir de medições da vazão desse líquido realizadas no destilador.

$$Re = \frac{\rho V_{méd} D}{\mu} \quad (09)$$

Em que:

Re = Reynolds.

ρ = Massa específica (kg/m³).

$V_{méd}$ = Velocidade média do escoamento (m/s).

D = Diâmetro do tubo (m²).

μ = Viscosidade dinâmica (Pa.s).

De acordo com a faixa de valor obtida pela Equação 08 é possível determinar o tipo de escoamento que ocorre no interior dos tubos do destilador. Para valores inferiores a 2.300 o escoamento é caracterizado como laminar, entre 2.300 e 4.000 considerado em faixa de transição, e acima de 4.000 tem-se um escoamento turbulento. (ÇENGEL, 2012).

Em seguida, deve ser determinado a perda de carga nas tubulações que fazem parte do sistema hidráulico, através da Equação de Darcy-Weisbach, Equação 10.

$$h_f = f * \frac{L}{D_H} * \frac{V^2}{2g} \quad (m) \quad (10)$$

Em que:

f = Coeficiente de atrito de Darcy

L = Comprimento da tubulação analisada (m).

D_H = Diâmetro hidráulico (m).

V = Velocidade de escoamento do fluido (m/s).

g = Aceleração da gravidade (m/s²).

O coeficiente de atrito f é função de Reynolds e da rugosidade relativa da parede interna dos tubos analisados. Ele pode ser calculado através de fórmulas iterativas como a Equação de Colebrook ou de Haaland, ou por meio de análises gráficas. Nesse trabalho o coeficiente de atrito foi determinado pela avaliação gráfica do Diagrama de Moody.

Em seguida, foi determinada as perdas de cargas localizadas em curvas e acessórios presentes na linha de bombeamento de água. Essas singularidades foram determinadas a partir da equação 11.

$$h_s = K_s * \frac{V^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (11)$$

Em que:

K_s = Coeficiente de perda de carga singular.

O coeficiente de perdas de carga singulares (K_s) apresenta valores tabelados para cada tipo de conexão, curva ou acessório utilizado. Ele foi consultado nas bibliografias referenciadas ao final desse trabalho. A perda de carga que acontece no destilador foi considerada como distribuída em uma mangueira de $\frac{1}{2}$ polegada.

A altura manométrica total (H_{mt}) foi determinada através da medição das cotas entre o topo do destilador e base onde será instalado o chiller. A ela também foram somadas as parcelas de perdas de carga localizada e distribuída.

Por fim, para a determinação da potência elétrica da bomba, foi utilizada a Equação 12. Depois foi realizado o acréscimo de potência conforme orienta o Manual de Hidráulica de Azevedo Netto.

$$P = \frac{Q * \gamma * H_{mt}}{\eta} \quad (\text{W}) \quad (12)$$

Em que:

Q = Vazão de bombeamento (m³/s).

γ = Massa específica do líquido bombeado (kg/m³).

η = Eficiência global do conjunto motor elétrico e bomba.

As tubulações que serão instaladas no chiller, da bomba até o reservatório, bem como, do sistema de *by-pass*, até o ponto de fornecimento de água gelada, foram utilizadas nas bitolas recomendadas pela fabricante bomba escolhida.

3.4 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Nesse trabalho, a determinação do consumo de energia elétrica dos componentes constituintes do chiller foi feita de forma indireta, uma vez que, não se teve a possibilidade de utilização de um wattímetro. De acordo com a Primeira Lei de Ohm, a potência elétrica dissipada por um equipamento elétrico é dada pela multiplicação da tensão elétrica fornecida ao equipamento pela corrente elétrica do circuito em questão. Na sequência, é possível determinar de forma indireta, o consumo elétrico, realizando a multiplicação da potência elétrica pelo tempo de operação, em horas, cujo resultado se dá em Watt hora. (MAMEDE, 1987). A equação 13 exposta a seguir ilustra essa determinação.

$$E = \frac{V \cdot i \cdot t}{1000} \quad (\text{kWh}) \quad (13)$$

Em que:

V : Tensão elétrica (V);

i : Corrente elétrica (A);

t : Tempo de operação (h).

3.5 DETERMINAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Como forma de realizar um projeto economicamente eficiente, após a análise dos resultados encontrados no dimensionamento e nos cálculos de carga térmica, foi optado pela utilização de uma condensadora de ar condicionado usada, que foi gentilmente cedida pela Zanin Soluções Técnicas para a construção desse projeto. Para o sistema de refrigeração, a unidade condensadora selecionada fazia parte de

um aparelho de ar-condicionado Split residencial convencional da marca LG. Essa unidade com capacidade de climatização de 9.000 BTU/h, atende as demandas térmicas do projeto.

Para o reservatório térmico, foi utilizado um tambor plástico de 50 litros, que geralmente é utilizado para armazenamento de comida para animais. O sistema hidráulico foi adquirido com recursos próprios, sendo: uma bomba periférica de $\frac{1}{2}$ cv. da marca Vonder, tubulações de interligação entre a bomba e o reservatório foram seguidas as especificações do fabricante da bomba, sendo então, utilizado tubos de PVC soldável de 32 e 25 mm marca Krona, ademais, todas as conexões que se fazem necessárias para o correto funcionamento do sistema, como joelhos 90°, luvas, registros e uniões e adaptadores com rosca.

3.6 MONTAGEM E FABRICAÇÃO

3.6.1 Estrutural

Os componentes do chiller foram posicionados no chão previamente para a definição do melhor layout de funcionamento, respeitando os espaçamentos mínimos necessários para a montagem e operação. Os tubos de aço foram cortados e montados conforme a necessidade de tamanho dos elementos que seriam instalados sobre a estrutura metálica.

A estrutura mecânica para suportar o reservatório de água gelada, bem como, os demais componentes do sistema, foi construída em tubo de aço carbono de seção quadrada de 20 mm x 20 mm e espessura de 1,2 mm. Em virtude de as paredes dos tubos serem finas, as peças foram todas soldadas por meio de solda TIG. Esse processo de soldadura permite controlar a temperatura do banho de fusão e alinhado a prática do soldador garante bom acabamento (FERREIRA, 2022) assim, essa foi a melhor maneira encontrada para realizar a junção dos tubos e chapas, isso pode ser visualizado na Figura 12.

Figura 12 – Procedimentos de construção do chassi do equipamento



Fonte: Autor (2024)

Essa estrutura foi superdimensionada a partir de conhecimento tácito, o que lhe garantiu a robustez necessária. Dessa maneira, não foi realizado nenhum dimensionamento de carga antecipadamente, pois cada ponto foi avaliado e testado individualmente durante o processo de montagem. Quando necessário, os reforços foram posicionados nos pontos críticos para garantir a segurança, estabilidade e rigidez da estrutura. Essa abordagem permitiu uma adaptação flexível às demandas específicas de cada componente, resultando em uma estrutura sólida e confiável para suportar o funcionamento eficiente do chiller.

Após a montagem do chassi do chiller e conferência das medidas e posições dos componentes, iniciou-se o processo de pintura. Para a escolha do melhor sistema de pintura devem ser observados o ambiente e sua agressividade, segundo a norma ISO 12.994, além de serem avaliados outros fatores que possam afetar a vida útil do aço. (LIBERA, 2018). Assim sendo, o cenário de instalação do equipamento trata-se de um ambiente urbano com atmosfera não agressiva, algo característico de cidades de pequeno porte, como Palotina. Mediante essas análises, ele foi pintado com tinta esmalte sintético de cor preta que visa a prevenção de oxidações decorrentes de intempéries climáticas.

3.6.2 Instalação dos componentes do chiller

3.6.2.1 Condensador

A unidade condensadora foi assentada sobre quatro discos de borracha com a finalidade de diminuir vibrações decorrentes do funcionamento do aparelho. A fixação foi feita com quatro parafusos galvanizados de $\frac{1}{4}$ de polegada x 2 polegadas.

3.6.2.2 Sistema hidráulico

O reservatório de água foi posicionado no seu local definitivo e feitas as marcações para as furações necessárias para os circuitos de água. A bomba foi instalada no local pré-definido, fixada com quatro parafusos galvanizados de $\frac{1}{4}$ de polegada x 2 polegadas. Em seguida, foi elaborado o layout das tubulações e medições dos tubos necessários. Após posicionar a bomba, a condensadora e o reservatório, junto com um esquema prévio dos trajetos das tubulações, deu-se início à construção do sistema de tubulação.

Todo o sistema foi montado utilizando canos de PVC marrom de água fria. O tubo de alimentação foi feito com cano de 25 mm, enquanto os demais trajetos foram realizados com tubo de 32 mm, conforme recomendação do fabricante da bomba hidráulica. Na Figura 13 está ilustrado a montagem do sistema de tubulações do equipamento. Todas as conexões foram lixadas para eliminação de resíduos oleosos ou sujeiras, dessa maneira, evita-se contaminações no adesivo utilizado para a soldagem dos tubos aos acessórios.

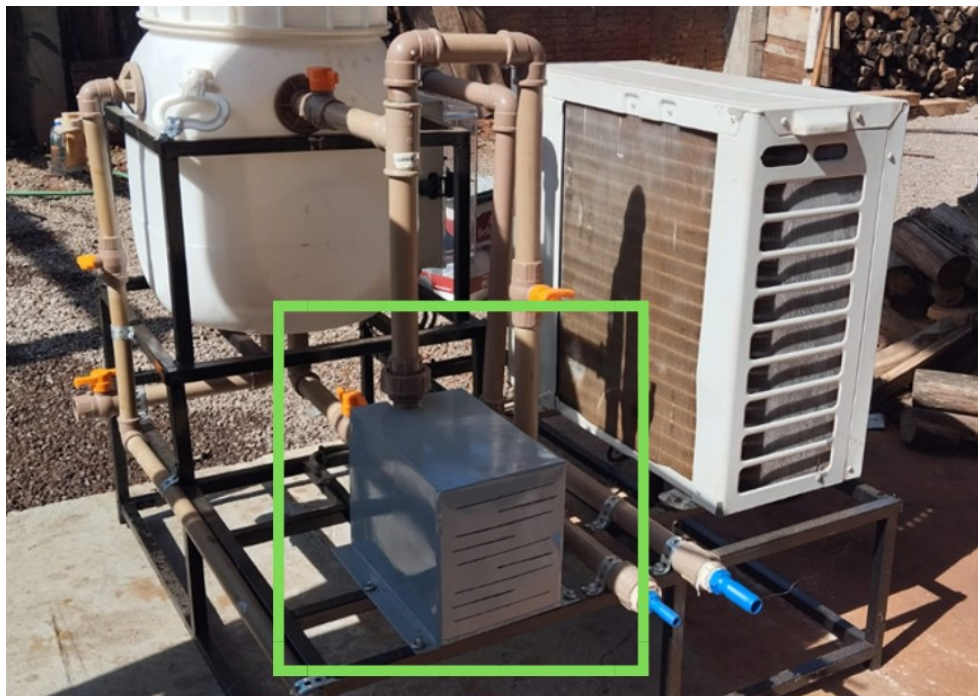
Foi avaliado que seria necessário a construção de uma cobertura com a finalidade de proteger a bomba hidráulica da ação da chuva. Haja visto, que seu Índice de Proteção é IP44, o que lhe confere proteção contra objetos sólidos de diâmetro maiores que 1 mm, e proteção contra projeções de água. Assim, foi instalado sobre a parte superior da bomba uma proteção em chapa de aço galvanizado, para impedir que a água proveniente da chuva atinja diretamente o motor e possa causar algum dano. Na parte traseira da proteção, foram feitos alguns rasgos que visam permitir a passagem de ar, e auxiliar no resfriamento do motor, como pode ser visto na Figura 14.

Figura 13 – Montagem das tubulações



Fonte: Autor (2024)

Figura 14 – Vista lateral do chiller, detalhe para a proteção da bomba hidráulica



Fonte: Autor (2024)

3.6.2.3 Evaporador

A serpentina do evaporador foi instalada no interior do tanque de armazenamento, com o acesso das tubulações pela lateral superior. Nesse ponto, foram efetuadas duas soldas nas tubulações para a conexão com as linhas frigoríficas provenientes da condensadora, conforme pode ser observado na Figura 15. A Interligação condensador ao reservatório térmico foi feita por meio de tubos de cobre que compõem a tubulação frigorífica do chiller, sendo do diâmetro de $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{8}$ de polegadas, respectivamente para a linha de líquido e gás. Valores como o comprimento total do tubo de cobre, bem como da capacidade térmica serão expostos no capítulo 4.1 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO.

Figura 15 – Fabricação do evaporador



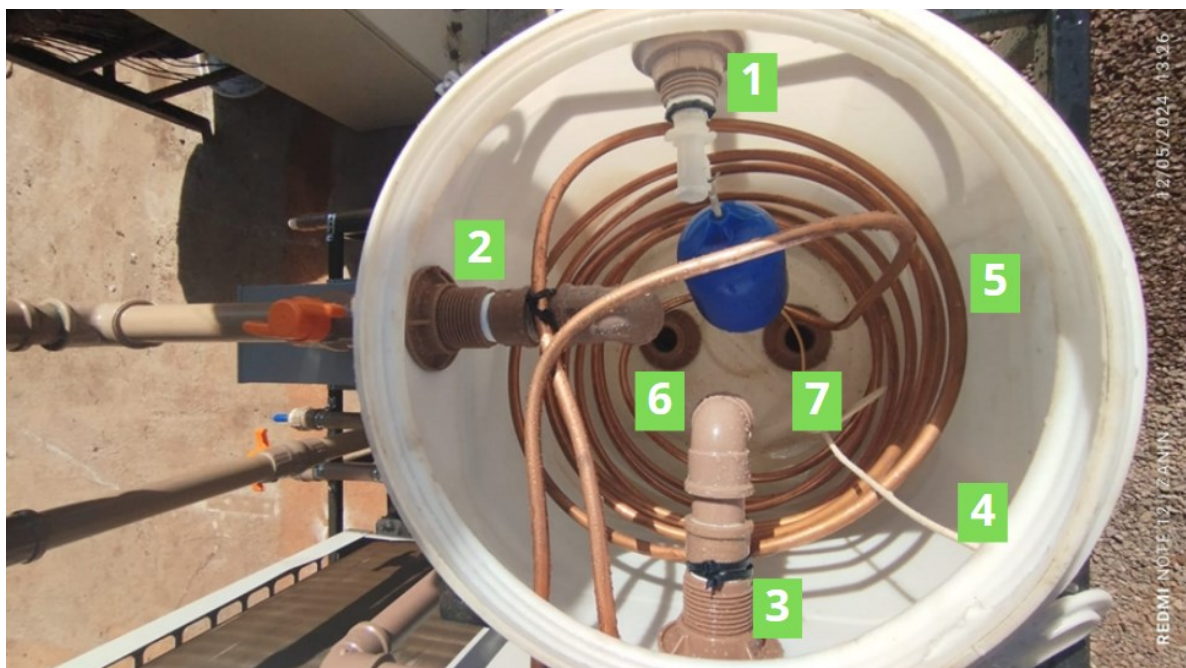
Fonte: Autor (2024)

Na Figura 16 é possível observar os três conjuntos instalados no reservatório térmico. Os algarismos de 1 a 7 expostos representam as seguintes partes constituintes do chiller:

- 1 – Entrada de água, com boia de regulação de nível;
- 2 – Retorno do *by-pass*;
- 3 – Retorno do processo;
- 4 – Sensor de temperatura;

- 5 – Evaporador;
- 6 – Saída de água para bomba hidráulica;
- 7 – Saída de água para esgoto.

Figura 16 – Vista superior do reservatório



Fonte: Autor (2024)

3.6.2.4 Sistema de operação automática

O controle e automação desse chiller foi baseado em controladores de temperaturas de câmaras frigoríficas. Com base em conhecimento prático e técnico desse autor, adquirido no decorrer de anos de serviços em manutenção desses sistemas de refrigeração, foi desenvolvido um sistema de controle simples e robusto que garanta a operação do equipamento a baixo custo e com confiabilidade. Dessa maneira, foi escolhido o Controlador de Temperatura Full Gauge MT- 512E 2HP sem degelo, para comandar o sistema. O acionamento da unidade de bombeamento e da condensadora foi feito por meio de partida direta em contatora.

No painel elétrico do chiller há duas chaves liga-desliga, como pode ser observado na Figura 17, uma aciona a bomba hidráulica e a circulação de água pelo sistema de tubulações. Já a outra habilita o funcionamento do sistema de refrigeração que será gerido pelo controlador de temperatura. Os parâmetros configurados podem ser observados no ANEXO 1 – Parâmetros do controlador de temperatura.

Figura 17 – Painel de controle do Chiller



Fonte: Autor (2024)

A montagem do painel de controle foi feita conforme o esquema elétrico do controlador de temperatura, conforme ilustrado na Figura 18. Da mesma maneira, a Figura 19 representa a instalação dele, bem como, de todos os demais componentes no equipamento.

Figura 18 – Esquema de ligação do controlador de temperatura

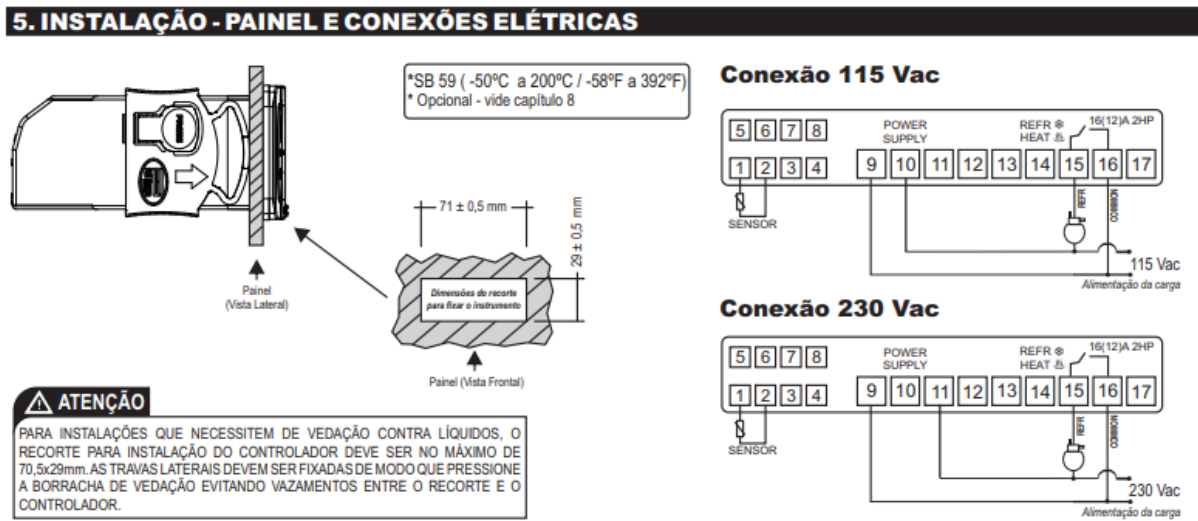
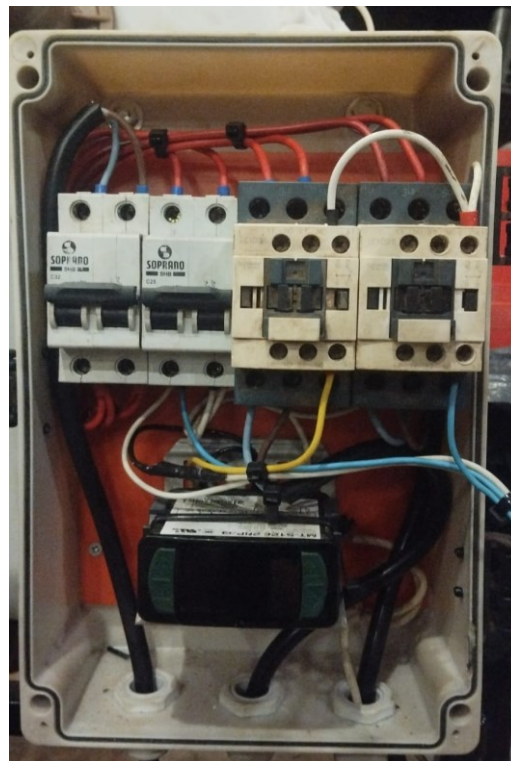
Fonte: *Full Gauge Controls* (2013)

Figura 19 – Painelelétrico de comando do chiller



Fonte: Autor (2024)

Em ordem da esquerda para a direita estão: disjuntor geral do equipamento, disjuntor de comando, contatora de acionamento da condensadora, contatora de acionamento da bomba d'água.

Por fim, foi instalado os cabos elétricos para alimentação da bomba hidráulica, e da condensadora. Ambos foram fixados com abraçadeiras de plástico, do tipo Fita Hellermann. O painel elétrico foi fixado com três parafusos galvanizados de $\frac{1}{4}$ de polegada x 2 polegadas em um local de fácil operação. Na sequência, realizado a conexão dos cabos ao painel de comando e iniciado novos testes de funcionamento.

3.7 TESTES INICIAIS DE FUNCIONAMENTO DOS COMPONENTES

Após a montagem de toda a estrutura do equipamento, foram realizados testes de funcionamento no sistema hidráulico e de refrigeração por meio de acionamento manual, sem o uso do painel de controle. Essa abordagem foi feita para identificação mais fácil de possíveis problemas no chiller.

Os testes incluíram a verificação de vazamentos nas conexões do sistema de bombeamento de água e o funcionamento dos registros e do sistema de *by-pass*. Após confirmar que o circuito do *by-pass* estava aberto os testes no sistema de refrigeração foram iniciados.

A unidade condensadora foi conectada à evaporadora e logo após realizado o procedimento de vácuo do sistema frigorífico para a eliminar a umidade e gases incondensáveis presente no interior da rede. Esses são procedimentos padrão para a instalação desse equipamento e seguem exigências do fabricante. Após a conclusão do vácuo, o refrigerante foi adicionado ao sistema de acordo com as especificações do fabricante para operação normal, utilizando 660 gramas de fluido R-22.

Após o reservatório de água estar em seu nível máximo, deu-se o início da operação do sistema de refrigeração, com a medição de alguns parâmetros para o correto ajuste de funcionamento do equipamento. A temperatura inicial da água era de 33°C quando o chiller foi ligado.

A pressão de sucção medida na condensadora foi de 50 PSI manométrico, o que remonta em uma temperatura de saturação próxima a -3°C, de acordo com a tabela de Temperatura de Saturação x Pressão – Refrigerante R-22, conforme pode ser visualizado na Figura 20 em destaque amarelo. Para evitar o congelamento da água na evaporadora, foram adicionados 85 gramas de refrigerante, elevando a pressão de sucção para 62 PSI e a temperatura para 2°C, conforme destacado em verde na Figura 20. Dessa forma, totalizou-se 745 gramas de R-22 no sistema. A

corrente elétrica da condensadora foi medida após um tempo em funcionamento e apresentou valores dentro dos padrões nominais, em 4,0 A.

Figura 20 – Relação Temperatura Saturação x Pressão – Refrigerante R-22

ANEXO I

Relação Temperatura Saturação x Pressão - Refrigerante R-22

Temperatura (°C)	Pressão (kPa) Manométrica R-22	Pressão (psi) Manométrica R-22	Temperatura (°C)	Pressão (kPa) Manométrica R-22	Pressão (psi) Manométrica R-22
-10	253,04	36.7	40	1434,12	208
-9	265,45	38.5	41	1468,59	213
-8	278,55	40.4	42	1509,96	219
-7	292,34	42.4	43	1544,43	224
-6	306,13	44.4	44	1585,80	230
-5	319,92	46.4	45	1627,17	236
-4	334,40	48.5	46	1668,54	242
-3	349,57	50.7	47	1709,91	248
-2	364,74	52.9	48	1751,27	254
-1	380,60	55.2	49	1799,54	261
0	396,45	57.5	50	1840,91	267
1	413,00	59.9	51	1889,17	274
2	429,55	62.3	52	1930,54	280
3	446,79	64.8	53	1978,80	287
4	464,71	67.4	54	2027,06	294
5	482,64	70.0	55	2075,33	301

Fonte: Carrier (2012)

Com aproximadamente 25 minutos de operação, o chiller resfriou aproximadamente 45 litros de água da temperatura inicial de 33 °C a 10,9 °C. Esse valor pode ser verificado com base na Equação 1, que reflete em termos de calor, na retirada de 1,72 kW da água, que realizando a conversão equivale a 5.868 BTU/h.

3.8 INSTALAÇÃO NO LOCAL DEFINITIVO

A instalação do chiller ocorreu na segunda metade do mês de maio, o laboratório contemplado foi o de Análises Clínicas pertencente ao Hospital Veterinário da UFPR Setor Palotina.

3.9 RELAÇÃO DE MATERIAIS E CUSTOS

Os materiais e equipamentos utilizados para a construção desse projeto, com exceção da unidade condensadora, foram todos adquiridos com recursos próprios do

autor desse trabalho, sem qualquer contrapartida da Instituição. Na Tabela 01, estão discriminados todos os itens e seus respectivos custos.

Tabela 01 – Relação de Materiais e Custos - Continua

	Descrição	Quantidade	Valor unitário	Valor total
1	Unidade Condensadora LG 9.000 BTU convencional	1	R\$ 450,00	R\$ 450,00
2	Bomba periférica monofásica Vonder 1/2 cv	1	R\$ 210,00	R\$ 210,00
3	Controlador de temperatura Fullgauge MT512	1	R\$ 220,00	R\$ 220,00
4	Disjuntor 2x32A Soprano	1	R\$ 32,00	R\$ 32,00
5	Disjuntor 2x25A Soprano	1	R\$ 30,00	R\$ 30,00
6	Contatora Schneider 25 A	2	R\$ 180,00	R\$ 360,00
7	Chave liga-desliga	4	R\$ 25,00	R\$ 100,00
8	Botão parada de emergência	1	R\$ 24,00	R\$ 24,00
9	Prensa cabo 1/2"	3	R\$ 2,00	R\$ 6,00
10	Quadro de sobrepor acrílico 200x300x150	1	R\$ 95,00	R\$ 95,00
11	Adaptador 32 mm x 1 polegada	4	R\$ 2,75	R\$ 11,00
12	Joelho 90° 32 mm	9	R\$ 3,50	R\$ 31,50
13	Tee 32 mm	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
14	Registro 32 mm	4	R\$ 12,00	R\$ 48,00
15	União 32mm	2	R\$ 18,00	R\$ 36,00
16	Flange caixa d'água 32mm	4	R\$ 18,00	R\$ 72,00
17	Luva 32 mm x 1"	2	R\$ 9,00	R\$ 18,00
18	Cano 32 mm	6	R\$ 8,00	R\$ 48,00
19	Joelho 25 mm	2	R\$ 1,50	R\$ 3,00
20	Registro 25 mm	1	R\$ 9,00	R\$ 9,00
21	Luva 25 mm x 1/2"	1	R\$ 6,00	R\$ 6,00
22	Flange caixa d'água 25 mm	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
23	Boia de nível	1	R\$ 45,00	R\$ 45,00
24	Cano 25 mm	3	R\$ 6,00	R\$ 18,00
25	Cola para tubulações de PVC	1	R\$ 18,00	R\$ 18,00
26	Lixa grão 80	2	R\$ 3,00	R\$ 6,00
27	Fita veda rosca 25 metros	1	R\$ 7,50	R\$ 7,50
28	Tubo quadrado de aço 20x20x6000	3	R\$ 50,00	R\$ 150,00
29	Vareta de solda TIG ferro cobreado	10	R\$ 1,80	R\$ 18,00
30	Tinta esmalte sintético preto	1	R\$ 85,00	R\$ 85,00
31	Cinta de aço perfurada	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
32	Parafuso auto-brocante 4.8 x 3/4"	50	R\$ 0,24	R\$ 12,00
33	Cabo PP 3x1,5 mm	10	R\$ 5,80	R\$ 58,00
34	Parafuso sextavado 1/4" x 2 "	4	R\$ 0,80	R\$ 3,20
35	Arruela 1/4"	8	R\$ 0,16	R\$ 1,28
36	Porca 1/4"	4	R\$ 0,18	R\$ 0,72
37	Abraçadeira Nylon 4,2 mm x 280 mm	45	R\$ 0,21	R\$ 9,45
38	Barrica 50 litros	1	R\$ 65,00	R\$ 65,00
39	Mangueira cristal 1/2"	18	R\$ 4,50	R\$ 81,00
40	Mangueira cristal 3/4"	10	R\$ 6,00	R\$ 60,00
41	Conexões para mangueiras e abraçadeira	1	R\$ 42,50	R\$ 42,50
42	Plug macho 10A	2	R\$ 7,85	R\$ 15,70
43	Plug fêmea 10A	1	R\$ 8,80	R\$ 8,80

44	Cabo PP 2 x 2,5 mm	10	R\$ 5,40	R\$ 54,00
45	Placas de identificação	1	R\$ 150,00	R\$ 150,00
			Total Geral	R\$ 2.738,65

Fonte: Autor (2024)

Conforme exposto na Tabela 01, os custos de materiais e equipamentos para montagem do chiller foram de R\$ 2.738,65; a esse valor deve-se somar os custos de mão de obra para a fabricação da estrutura e montagem de todos os componentes conforme descrito no decorrer desse projeto.

Na Tabela 02, estão dispostos os itens de mão de obra, todos eles foram baseados conforme as horas trabalhadas para a execução desse projeto. Os valores homem/hora foram definidos através de consulta de preço de mercado, o valor do serviço tem o custo de R\$ 1.340,00.

Tabela 02 – Relação de Valores de mão de obra

	Descrição	Quantidade	Valor unitário	Valor
1	Mão de obra metalúrgica e pintura	5	R\$ 90,00	R\$ 450,00
2	Mão de obra montagem de tubulações	4	R\$ 90,00	R\$ 360,00
3	Mão de obra montagem e instalação painel de comando	2	R\$ 130,00	R\$ 260,00
4	Mão de obra instalação no laboratório	3	R\$ 90,00	R\$ 270,00
			Total Geral	R\$1.340,00

Fonte: Autor (2024)

Assim, os custos totais de construção do chiller foram de R\$ 4.078,65. Esse valor será avaliado no capítulo de Análise Financeira para estimativa de *payback* do investimento que foi feito.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

A metodologia de cálculos exposta no item 3.2 MODELAGEM DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO e 3.3 MODELAGEM DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO, foi toda realizada no Software de resolução de cálculos de engenharia, *Engineering Equation Solver EES*, cujos diagramas de resolução estão disponíveis no ANEXO 2 – Rotina de cálculos ees. A Tabela 03 traz sintetizado todos os principais resultados que foram necessários para a modelagem do sistema de refrigeração do chiller.

Tabela 03 – Resultados do dimensionamento do sistema de refrigeração

Item	Valor	Unidade
Vazão mássica água de resfriamento	119,50	kg/h
Vazão mássica água destilada	4,96	kg/h
Temperatura Entrada T1	30,50	°C
Temperatura Saída T2	50,50	°C
Entalpia T1	127,90	kJ/kg
Entalpia T2	211,50	kJ/kg
	2,60	kW
Q - Taxa de calor absorvida	8.870,00	BTU/h
	2.235,00	kcal/h
Gr/Re ²	0,35	Adimensional
Nº Grashof	59.932,87	Adimensional
Nº Rayleigh	258.910,00	Adimensional
Nº Prandtl	4,32	Adimensional
Nº Nusselt	11,50	Adimensional
Coeficiente Convectivo Natural	703,50	kJ/kg.K
Temperatura de superfície do tubo	6,00	°C
Temperatura de filme do fluido	30,00	°C
Área superficial	0,15	m ²
Diâmetro do tubo	9,52	mm
Comprimento do tubo 3/8"	5,14	m
Comprimento do tubo 3/8" pós correção	7,71	m

Fonte: Autor (2024)

Cabe citar que T1 refere-se a temperatura de entrada da corrente de água no V.C. (temperatura fria) e T2 refere-se a temperatura de saída do V.C. (temperatura quente).

4.1.1 Potência de refrigeração

A determinação da potência de refrigeração necessária para vencer a carga térmica, imposta no processo de condensação do destilador, foi determinada pela utilização da Equação 01, que aplica a Primeira Lei da Termodinâmica, a qual resultou em 2,599 kW. Para fins de análise e seleção de equipamentos, esse valor foi convertido para as unidades comerciais de refrigeração: kcal/h, padrão de sistemas de refrigeração comercial, e BTU/h, unidade britânica usual de aparelhos de ar-condicionado. Dessa forma, resultou em 2.235 kcal/h ou 8.870 BTU/h.

Então, notou-se que essa capacidade de refrigeração é compatível com equipamentos de climatização residencial. Mediante isso, foi optado por utilizar uma condensadora integrante de um equipamento de ar-condicionado. Cujas potência é de 9.000 BTU/h, uma vez que, esta opção atende a necessidade de carga, mas principalmente simplifica a montagem dos componentes. Visto que, não foi necessário realizar cálculos de dimensionamento de compressor, trocador de calor da condensadora e dispositivos de expansão.

Utilizar uma unidade condensadora pronta e disponível resultou em economia significativa de tempo e recursos financeiros. O que, evitou a necessidade de personalização ou ajuste de elementos do equipamento, o que certamente aumentaria os custos e prolongaria os prazos de implementação do projeto.

4.1.2 Temperaturas de operação

As medições das temperaturas da água de resfriamento foram feitas em duplicata com termômetro convencional eletrônico de propriedade do laboratório em questão. Nos cálculos e nas coletas das propriedades termodinâmicas foi utilizada a média das medições, sendo:

T1 – Temperatura de entrada, 30,5°C.

T2 – Temperatura de saída, 50,5°C.

Para fins de cálculo e padronização, a T_f (temperatura de filme) da água no reservatório foi definida em 30°C, para não possuir ter um delta tão grande, o que

mudaria os valores finais do dimensionamento. Por fim, foi definido com base nas regulagens de pressão de trabalho da condensadora a temperatura de evaporação do gás refrigerante em 2°C, no entanto, foi considerado que a parede do tubo da evaporadora estaria em 6°C, devido a perdas de frio no decorrer do trajeto, todavia, esse cálculo não foi apresentado, pois os valores seriam irrisórios frente ao dimensionamento como um todo do sistema.

4.1.3 Evaporador

Conforme todo o escopo e metodologia apontada no item 3.2.4 - Determinação da Evaporadora, os principais resultados dessa modelagem, estão expostos abaixo na Tabela 04, que é um recorte da Tabela 03 – Resultados do dimensionamento do sistema de refrigeração.

Tabela 04 – Resultados referentes ao evaporador

Item	Valor	Unidade
Q - Taxa de calor absorvida	2,60	kW
	8.870,00	BTU/h
	2.235,00	kcal/h
Gr/Re ²	0,35	Adimensional
Nº Grashof	59.932,87	Adimensional
Nº Rayleigh	258.910,00	Adimensional
Nº Prandtl	4,32	Adimensional
Nº Nusselt	11,50	Adimensional
Coeficiente Convectivo Natural	703,50	kJ/kg.K
Área superficial	0,15	m ²
Diâmetro do tubo	9,52	mm
Comprimento do tubo 3/8"	5,14	m
Comprimento do tubo 3/8" pós correção	7,71	m

Fonte: Autor (2024)

A verificação do fenômeno atuante no mecanismo de transferência de calor, conforme foi citado no item 3.2.4, em especial na equação 02 foi comprovada nos cálculos de modelagem do sistema de resfriamento. A desigualdade Gr/Re² apresentou valores menores que 1, conforme, a bibliografia exige para a caracterização da convecção natural como fenômeno principal de transferência de calor. Os parâmetros adimensionais determinados por meio da utilização do software

de resolução apresentaram valores que confirmam que a convecção natural é o mecanismo predominante nesse cenário delineado no chiller.

Assim, com a utilização da correlação citada no capítulo anterior foi possível quantificar o N° de Nusselt, e como esperado, o valor foi baixo; 11,50. Logo em seguida, foi mensurado o coeficiente de convecção natural, cujo valor foi de 703,50 kJ/kg.K. Novamente, fica claro que os valores seguem os padrões pré-estabelecidos para a convecção natural. Haja visto que, a literatura referenciada, traz valores abaixo de 800 kJ/kg.K como o esperado para a convecção natural.

Por último, foi possível quantificar a área superficial necessária para que o evaporador possa desempenhar suas funções. Ao valor encontrado, foi aplicado o fator de segurança estabelecido, assim totalizou-se 7,71 metros de comprimento do tubo de cobre de diâmetro nominal de $\frac{3}{8}$ de polegadas.

4.1.4 Sistema de Bombeamento

Da mesma maneira que o item anterior, o escopo de cálculos para determinação da potência elétrica da bomba hidráulica, foi balizado no capítulo 3.3 MODELAGEM DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO. Será ela quem realizará o bombeamento da água resfriada do reservatório térmico ao destilador e o seu consequente retorno ao reservatório. Em que, os principais resultados do dimensionamento encontram-se na Tabela 05.

Tabela 05 – Resultados do dimensionamento do sistema hidráulico

Item	Valor	Unidade
Densidade água	995,50	kg/m³
Reynolds	849,70	Adimensional
Coeficiente de Atrito de Darcy	0,03	Adimensional
Rugosidade relativa da tubulação PVC	0,0018	e/D
Altura manométrica	3,00	m
Perdas de cargas totais	0,65	m
Potência do motor elétrico	0,15	HP
Potência do motor elétrico após correção	0,24	HP

Fonte: Autor (2024)

As propriedades termofísicas, como viscosidade dinâmica e densidade, da água foram todas consultadas com base nas bibliotecas do próprio software. O valor do N° de Reynolds calculado, apresentou valores menores que 2.300, o que, de acordo com as bibliografias, caracteriza o escoamento interno em tubos, como do tipo laminar. A rugosidade relativa apresentou valores condizentes com o esperado, haja visto que, tubulações de PVC apresentam excelente acabamento interno, sem grandes imperfeições nas paredes interiores. Dessa forma, foi determinado o valor do coeficiente de atrito de Darcy, pela utilização do Diagrama de Moody, que pode ser consultado em qualquer bibliografia de Mecânica dos Fluidos.

Na sequência, as alturas manométricas e perdas de carga, localizada e distribuída, totalizaram 3,65 m. Então, utilizando a Equação 12, para a determinação da potência elétrica da bomba, foi encontrado o valor de 0,12 kW. De acordo com o Manual de Hidráulica de Azevedo Netto, para dimensionamentos em que o valor seja menor que 0,50 cv, deve-se realizar a correção deste, multiplicando o fator de segurança de 50%. Assim, realizado esse ajuste, o novo valor obtido foi de 0,24 cv. No entanto, ao consultar os catálogos de fabricantes, foi verificado que a potência comercial mais próxima ao calculado era de 0,50 cv, sendo essa, então a adquirida para o projeto.

4.2 CHILLER EM TESTES PRELIMINARES

Após a instalação do chiller no local definitivo, bem como, toda a interligação de mangueiras e cabos elétricos necessários ao correto funcionamento do equipamento, foram iniciados os testes finais. O primeiro passo, foi a verificação dos fluxos de água e regulação do *by-pass*. Em seguida, a verificação do sistema de refrigeração e as condições de operação dele. Por fim, foi realizado ajustes no controlador de temperatura para determinação final o *setpoint*.

Foram feitas todas as interligações necessárias entre o destilador e o chiller por meio de mangueiras do tipo cristal, que apresenta as mesmas características de rugosidade que tubos de PVC. Sendo utilizado os diâmetros de $\frac{1}{2}$ polegada para a alimentação do chiller e do destilador, e de $\frac{3}{4}$ de polegada para o retorno do destilador ao chiller. Inicialmente, estava previsto que esse último trajeto também seria feito com mangueira de $\frac{1}{2}$ polegada, porém nos testes iniciais verificou-se a necessidade de

aumentar a secção transversal, haja visto que, o retorno ocorre apenas por ação da gravidade, o que não estava propiciando vazão adequada para o funcionamento do destilador. As mangueiras de transporte de água fria e quente podem ser visualizadas na Figura 21, em que, estão identificados os seguintes pontos:

- 1 – Entrada de água gelada, vinda do chiller;
- 2 – Saída de água quente, que vai para o chiller;
- 3 – Alimentação de água para o chiller e destilador;
- 4 – Água destilada produzida.

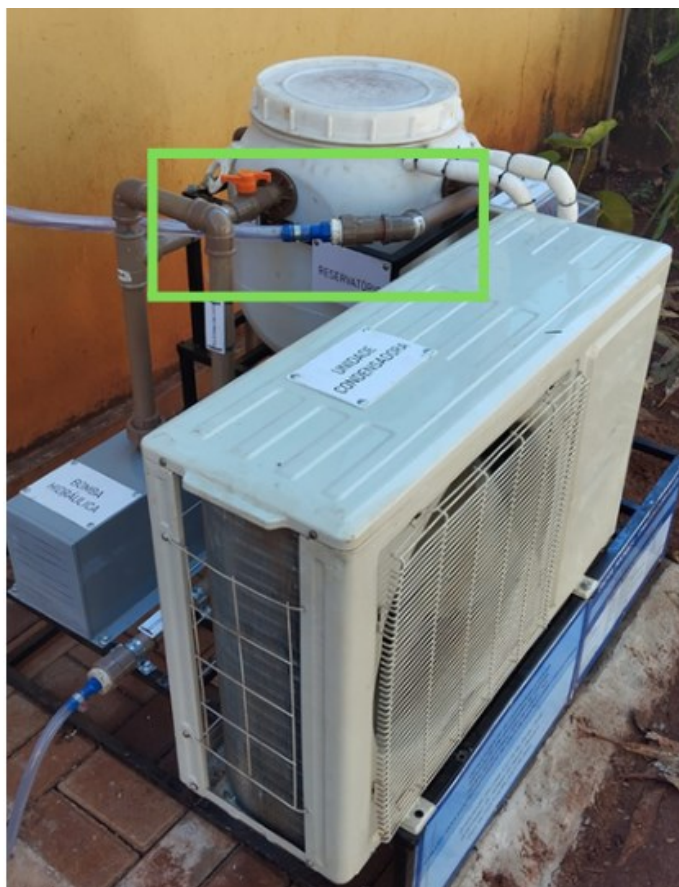
Figura 21 – Conexão das mangueiras ao destilador



Fonte: Autor (2024)

No chiller foi feita uma modificação no trajeto da tubulação de retorno, uma vez que, a corrente de água quente vai para o reservatório térmico com ação apenas da força da gravidade. Assim, foi retirado a tubulação da parte de baixo e feito a entrada no mesmo nível do reservatório, o que propiciou um melhor funcionamento do retorno, abaixo na Figura 22, pode ser visto a adaptação realizada.

Figura 22 – Mudança no trajeto do retorno da água



Fonte: Autor (2024)

4.2.1 Problemas verificados nos testes iniciais

Realizado o *startup* e acompanhado o funcionamento do equipamento por três dias, tudo sob a supervisão do Técnico do Laboratório, o qual realizou pequenos ajustes na regulação do registro do *by-pass*, que acarretou em significativas melhoras na refrigeração do destilador. Foi verificado que durante as duas primeiras horas de funcionamento do chiller, a produção de água destilada foi perfeita, e não sofreu nenhuma alteração se comparado com o funcionamento sem o chiller. No entanto, com um tempo maior que duas horas de operação, o sensor de temperatura do destilador atuava e desligava o destilador por razões de superaquecimento.

Esse problema ocorria com o chiller e o destilador funcionando em conjunto, porém após aproximadamente 10 minutos o sistema de proteção térmica do destilador, saía do modo de proteção e automaticamente atracava o equipamento na medida em que, a temperatura voltava aos padrões de funcionamento. Após isso, o

sistema funcionava conforme o esperado por quase uma hora e meia, onde novamente apresentou a falha de temperatura.

Durante a ocorrência dessas paradas foram verificadas as temperaturas da água de refrigeração no reservatório térmico, como maneira de entender o motivo desse problema e saná-lo. No procedimento de partida do aparelho, foi constatado que a temperatura da água de resfriamento era próxima a temperatura ambiente, 20 °C, na medida em que o destilador funcionava, a água fria circulava para o resfriar e voltava quente, ao passar do tempo, notou-se que o chiller não estava mais conseguindo baixar a temperatura para níveis inferiores a esse, apenas conseguia manter na faixa de 23 a 24°C. No decorrer do funcionamento, próximo das duas horas de operação, a temperatura atingia 30°C, e acontecia a falha na sequência.

Essa análise leva a acreditar que a carga térmica imposta ao chiller está ligeiramente maior que a capacidade de refrigeração do equipamento, o que, evidentemente resulta no aquecimento da água no reservatório. Novas verificações foram realizadas com as condições de operação normais para formular hipóteses que viessem a solucionar esse problema. Foi realizado a medição da vazão da água de retorno, bem como, das temperaturas de saída e regresso. Ambas, apresentaram valores muito próximos ao utilizado no dimensionamento. Os cálculos, então, foram revistos e realizados novamente, estes apresentaram valores semelhantes ao que foi determinado na modelagem. Todavia, foi notado que na carga térmica do aparelho não foi utilizado nenhum fator de segurança, que viesse reduzir a possibilidade que problemas como esse aconteçam.

Outro fato verificado é que o equipamento utilizado já era usado, o que certamente leva a crer que já possuía algum desgaste ou depreciação que faça com que ele não consiga entregar toda sua potência de refrigeração. Isso pode ser visto nos testes iniciais, dispostos no capítulo 3.7 TESTES INICIAIS DE FUNCIONAMENTO DOS COMPONENTES em que foi verificado que a potência de refrigeração atingida foi de 5.868 BTU/h, que equivale a apenas 65% de sua capacidade nominal.

Dessa maneira, foi optado por modificar as rotinas de operação do destilador para adaptá-lo ao chiller, como uma solução provisória para que não ocorresse problemas com desabastecimento de água destilada no Hospital Veterinário. Antes de utilizar o destilador, dever-se-ia ligar o chiller e deixar funcionando por 15 minutos. Dessa maneira, o reservatório térmico atinge a temperatura de 15 °C, conforme o

setpoint ajustado. Assim, pode-se iniciar a utilização do destilador, no entanto ele deve ser desligado com aproximadamente 120 minutos de operação, novamente, para uma pausa por 15 minutos, para que o chiller consiga resfriar novamente a água do reservatório até próximo ao *setpoint*.

Para sanar esse problema, e propiciar condições de segurança de operação, sem a necessidade de ciclar o funcionamento do destilador, deverá ser substituída a unidade condensadora do chiller por uma de maior potência. Aplicando um fator de segurança de 50 % no dimensionamento da carga térmica, seria necessária uma unidade de 13.500 BTU/h, como essa potência comercial não existe, foi selecionada a que vem na sequência, assim deve-se instalar uma unidade de 18.000 BTU/h no equipamento.

Deverá ser prevista a troca de toda a água de refrigeração que circula no chiller e no destilador, com o objetivo de descartar os sólidos e sais minerais que tiveram suas concentrações aumentadas em razão do procedimento de destilação. Na medida em que a destilação ocorre, as concentrações de sais minerais aumentam na água o que modifica as propriedades termoquímicas do líquido, acarretando em maior temperatura de ebulição. Foi determinado, com base em testes práticos, que o intervalo entre trocas de água é de 3 horas de operação do equipamento. Caso essa troca não aconteça, o excesso de sais atrapalha o processo de vaporização na cuba do destilador, causando o transbordamento dessa cuba e a consequente contaminação de toda a água destilada produzida.

4.3 MODIFICAÇÕES APÓS AS VERIFICAÇÕES INICIAIS

Para resolver o problema da ineficiência da refrigeração da água de resfriamento do destilador, foi substituída a unidade condensadora por outra de 18.000 BTU/h, dessa vez cedida pela UFPR. Este equipamento, anteriormente fazia parte de um sistema de climatização que foi desativado, seguindo assim o viés de reciclagem de aparelhos deste projeto. Além disso, foi necessário realizar uma manutenção preventiva geral no equipamento antes de proceder com a substituição no chiller, para que pudesse ser garantido o seu funcionamento adequado.

A unidade foi instalada da mesma maneira que os procedimentos de instalação mencionados anteriormente no item 3.6.2 - Instalação dos componentes do chiller. Após a instalação, a unidade foi colocada em funcionamento para a realização

de ajustes e verificações de regulação de carga de fluido refrigerante, para na sequência, testar o seu poder de resfriamento, assegurando que a eficiência desejada fosse alcançada.

Cabe ressaltar que o evaporador foi mantido da mesma maneira que estava anteriormente. Como forma de analisar se havia possibilidade de acontecer problemas ao sistema de refrigeração como o retorno de fluido na fase líquida ao compressor, que acarreta em quebras do mecanismo interno, foi realizado medições de pressão e temperatura na região da válvula de serviço. Pelo fato desse equipamento também operar com R-22 pode ser verificado na Figura 20 que a pressão de 62 PSI, como foi regulado, acarreta em temperaturas de saturação de 2°C, e foi verificado que a temperatura de retorno na tubulação estava próxima a 7°C, assim é possível garantir que o refrigerante está retornando na fase gasosa.

Ocorreram alguns problemas iniciais de funcionamento, devido à instalação elétrica do laboratório ser antiga e mau dimensionada com vários aparelhos conectados no mesmo circuito. Assim, após aproximadamente 5 minutos de operação, o disjuntor desse circuito elétrico atuava e desabilitava toda a tensão da rede. Para resolver essa questão, foi modificado o caminho da tomada do chiller para que ele pudesse ser ligado provisoriamente no ponto elétrico do ar-condicionado da sala, permitindo a realização das verificações necessárias.

Com essa modificação provisória, foi possível realizar os testes e ajustes essenciais no chiller, garantindo a regulação correta da carga de fluido refrigerante e a verificação do seu poder de resfriamento. Essa solução permitiu que o equipamento operasse de maneira eficiente, até que uma solução definitiva para a instalação elétrica do laboratório seja implementada.

O sistema de bombeamento não apresentou nenhum problema após a mudança da condensadora, o que possibilitou iniciar os testes de funcionamento do chiller, após as alterações necessárias.

Uma nova programação foi realizada no controlador de temperatura, a fim de otimizar o funcionamento do chiller e do destilador. Acatando sugestão do Técnico Pedro e do orientador desse trabalho, o *setpoint* se manteve em 15°C, porém com histerese foi modificada a 5°C. Dessa maneira, o chiller irá operar até que se alcance a marca de 15°C e permanecerá desligado até aquecer a 20°C.

Assim sendo, iniciou-se as análises. Primeiramente, objetivava determinar o tempo em que, o chiller conseguiria atingir a temperatura programada, sem a

interferência da carga térmica do destilador. Então com o reservatório cheio, em temperatura de 20°C, foi iniciado a verificação do resfriamento. Paralelamente a isso, foi medido a corrente elétrica decorrente do funcionamento, essa medição foi feita com um alicate amperímetro Fluke 302+, dados esses que serão parte integrante na determinação do consumo de energia elétrica do equipamento. Abaixo na Tabela 06, pode ser visualizado que em menos de cinco minutos de operação foi possível atingir a marca de 15°C. A título de comparação o sistema antes da substituição demorava próximo de vinte e cinco minutos para atingir essa temperatura.

Tabela 06 - Operação do Chiller com o Destilador desligado

Tempo (h)	Temperatura (°C)	Corrente elétrica (A)
00:00:00	20	8,5
00:01:00	19	8,7
00:01:50	18	8,8
00:02:42	17	8,8
00:03:37	16	8,7
00:04:37	15	8,8

Fonte: Autor (2024)

A análise dos resultados dessa verificação demonstra que nos cinco minutos iniciais de funcionamento, o equipamento conseguiu resfriar todo o volume de água do reservatório até 15°C. Ao passo que, a corrente elétrica média foi de 8,71 A. com isso é possível determinar o consumo de energia, uma vez que, a tensão elétrica é de 220 V CA. Dessa maneira, o consumo elétrico desse intervalo foi de 0,048 kWh.

Na sequência, foi realizado a análise com o destilador ligado. Tendo por objetivo determinar o tempo no qual seria possível manter o a refrigeração do chiller em *standy-by*, ou seja, apenas o sistema de bombeamento hidráulico operante. Na Tabela 07 estão representados os dados.

Tabela 07 – Operação do Chiller em *Standy-by* com o Destilador ligado

Tempo (h)	Temperatura (°C)	Corrente elétrica (A)
00:00:00	15	1,3
00:01:48	16	1,3
00:02:40	17	1,3
00:03:50	18	1,3
00:04:48	19	1,3
00:05:34	20	1,3

Fonte: Autor (2024)

Com base nos dados apresentados, é possível manter o sistema de refrigeração do Chiller em *standy-by* por até cinco minutos. Visto que, com o destilador funcionando a plena carga, esse foi o tempo no qual a temperatura retornou a marca inicial. Esse tempo, será utilizado na programação do controlador como um dos parâmetros de funcionamento (F09 – Tempo mínimo da saída desligada).

Por fim, foi realizada a análise real de operação do aparelho. Em que, a temperatura do reservatório parte de 20°C, e o destilador já está operando de maneira estabilizada e contínua. Estes dados estão disponíveis na Tabela 08, e serão padronizados para as determinações de consumo de energia elétrica e água na determinação do *payback* do projeto.

Tabela 08 – Operação conjunta Chiller e Destilador

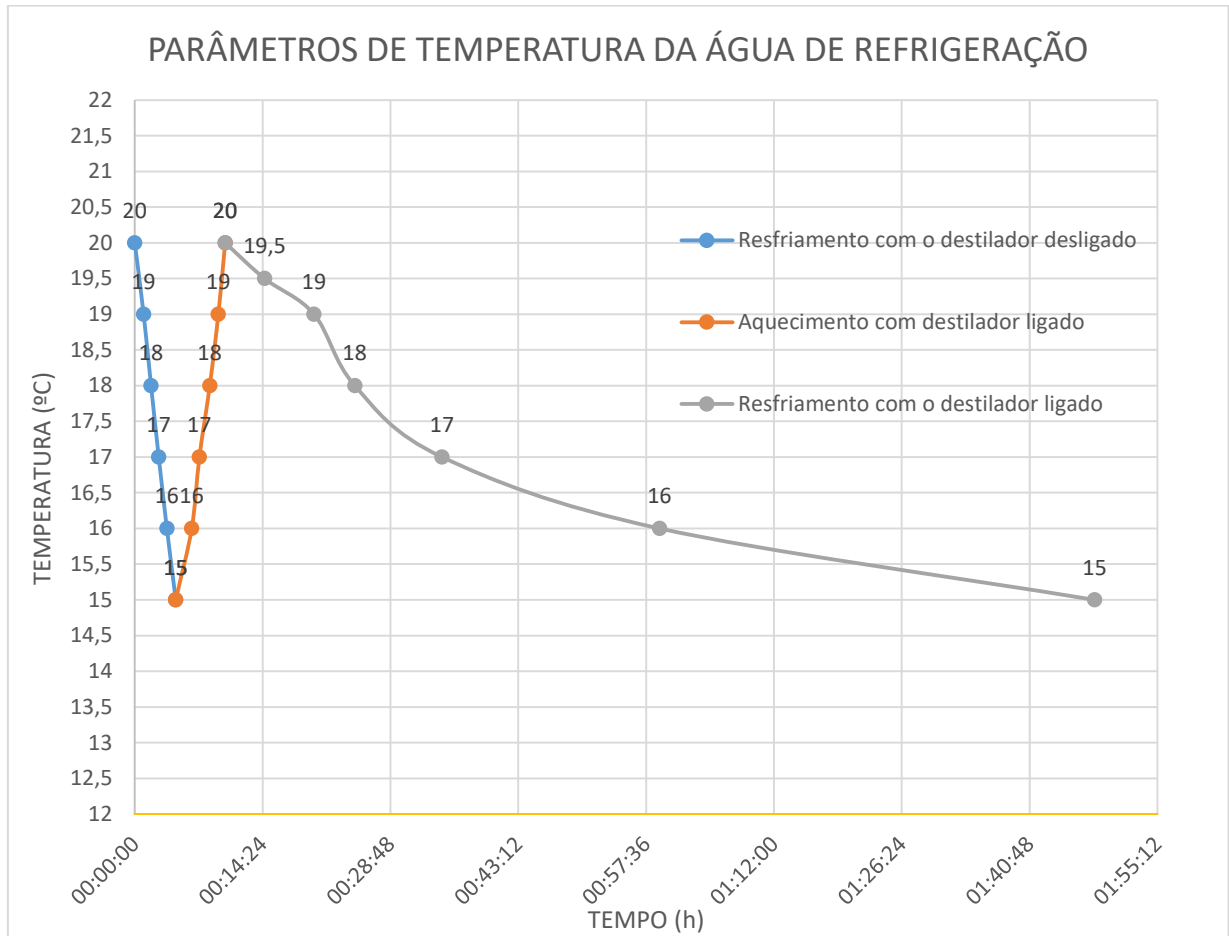
Tempo (h)	Temperatura (°C)	Corrente elétrica (A)
00:00:00	20	8,4
00:04:27	19,5	8,5
00:10:02	19	8,8
00:14:37	18	9
00:24:27	17	9,1
00:48:57	16	9,2
01:38:07	15	9,1

Fonte: Autor (2024)

Da mesma maneira que nas medições anteriores, também foi registrado o valor da corrente elétrica consumida durante o funcionamento do equipamento. É notável que com o destilador em operação, o tempo necessário para atingir o *setpoint* foi muito maior que quando o destilador estava desligado.

Com o propósito de demonstrar de maneira mais clara o tempo de operação e as temperaturas atingidas foi construído o Gráfico 1. As cores azul, laranja e cinza, referem respectivamente as três análises realizadas, são elas: Chiller operando integralmente com o destilador desligado; Chiller operando apenas o sistema de bombeamento e com o destilador ligado; Chiller e destilador operando todas as funções em regime permanente.

Gráfico 1 – Parâmetros de Temperatura da água de refrigeração no Chiller



Fonte: Autor (2024)

Durante os primeiros cinco minutos, com o destilador desligado, a queda de temperatura ocorreu linearmente, quase a 1°C por minuto, uma vez que, não havia nenhum ponto gerador de calor que afetasse no sistema de refrigeração. A mesma apuração é válida para a análise subsequente, em que, no intervalo de tempo semelhante, a temperatura da água de resfriamento foi aquecida até a marca inicial. De modo equivalente, o ganho de calor para essa situação ocorreu em 1°C por minuto.

Já para a análise nas condições reais de operação, com o destilador em regime permanente, o sistema necessitou de um intervalo de tempo bem maior para atingir o *setpoint*. Foram necessários aproximadamente 100 minutos para que a temperatura retornasse a 15°C. É perceptível que nos primeiros vinte minutos a queda da temperatura foi mais acentuada que no restante do tempo. A medida em que, o delta de temperatura entre a superfície do tubo do evaporador diminui em relação a temperatura da água armazenada, acarreta na diminuição da taxa de transferência de

calor, aliado ao importante fato de que de forma continua o destilador despacha água quente para o resfriamento.

4.4 ANÁLISE FINANCEIRA

Ressalta-se que todos os estudos elencados a partir daqui, são estimativas de consumo, conforme a rotina estabelecida e explicada na sequência. São desconhecidos quaisquer outros valores para outras faixas de operação diferentes do que foi referenciado.

De acordo com consulta realizada na Agência Reguladora do Paraná (AGEPAR, 2024), o valor cobrado pela SANEPAR para o metro cúbico de água e esgoto é de R\$ 21,26, esse valor é válido para estabelecimentos comerciais e para o Poder Público, a UFPR se enquadra nesse último cenário. Da mesma forma, foi consultado o valor do kWh de Energia Elétrica no portal da Copel, esse apresentou valor de R\$ 0,89, como fornecimento simples sem demanda contratada.

O primeiro estudo, demonstrado na Tabela 09, buscou demonstrar os custos operacionais do destilador, em água e energia elétrica para rotinas pré-estabelecidas. Foi determinado a rotina diária de seis horas de operação em 22 dias por mês, o que totaliza 132 horas mensais de operação. Conforme já citado nos capítulos iniciais, a produção de água destilada é de cinco litros por hora de operação, ao passo que, o desperdício na refrigeração é de 120 litros.

Tabela 09 – Análise do Destilador sem o Chiller operar

Tempo de Operação (h)	Volume Água Resfriamento (L)	Volume Água Destilada (L)	Valor do m³	Valor gasto água	Energia elétrica kWh	Valor do kWh	Valor gasto com energia elétrica	Custo total de operação
1	120	5	R\$ 21,26	R\$ 2,66	3,50	R\$ 0,89	R\$ 3,12	R\$ 5,77
2	240	10		R\$ 5,32	7,00		R\$ 6,23	R\$ 11,55
3	360	15		R\$ 7,97	10,50		R\$ 9,35	R\$ 17,32
4	480	20		R\$ 10,63	14,00		R\$ 12,46	R\$ 23,09
5	600	25		R\$ 13,29	17,50		R\$ 15,58	R\$ 28,86
6	720	30		R\$ 15,95	21,00		R\$ 18,69	R\$ 34,64
132	15840	660		R\$ 350,79	462,00		R\$ 411,18	R\$ 761,97

Fonte: Autor (2024)

Portanto, ao fim de um mês de operação têm-se produzido nesse aparelho 660 litros de água destilada. Com desperdício de assustadores 15.840 litros de água.

Além dos volumes de água, foi determinado o consumo elétrico da resistência do destilador, essa dissipa a potência de 3.500 W com operação constante. Ao final do mesmo intervalo de tempo, o consumo foi de 462,00 kWh. Realizando a multiplicação pelos valores monetários específicos a cada item, resulta em um custo mensal de R\$ 761,97 em água e luz.

As mesmas situações citadas anteriormente foram avaliadas após a instalação e operação do Chiller. Cabe ressaltar que foi verificado e explicado no capítulo anterior, que será necessário realizar um esgotamento completo da água do reservatório a cada três horas, por motivos de aumento da concentração de sólidos e sais minerais, decorrentes da destilação. Pelo fato do reservatório possuir capacidade para 45 litros, afim de facilitar a modelagem da análise financeira, foi considerado um consumo de 15 litros por hora de operação.

A determinação do consumo de energia elétrica do Chiller foi feita através da medição da corrente elétrica e da tensão fornecida ao equipamento, pelo fato de não ter acesso a um equipamento mais específico a esse fim (wattímetro). Assim, foram desconsiderados os intervalos em que o aparelho permanece em repouso quando atinge o *setpoint*. Foi calculado seu consumo de energia elétrica, como se ele ficasse as 132 horas mensais funcionando a plena carga. Assim os resultados para o consumo de energia elétrica, sem sombra de dúvidas, estão inflacionados. Essa estimativa, apresentou um valor de R\$ 643,79 em eletricidade, o que representa o consumo de 723,36 kWh.

Tabela 10 – Análise do Destilador com o Chiller operando

Tempo de Operação (h)	Volume Trocas de Água (L)	Volume Água Destilada (L)	Valor do m³	Valor gasto água	Energia Elétrica kWh	Valor do kWh	Valor gasto com energia elétrica	Custo total de operação
1	15	5	R\$ 21,26	R\$ 0,43	5,48	R\$ 0,89	R\$ 4,88	R\$ 5,30
2	30	10		R\$ 0,85	10,96		R\$ 9,75	R\$ 10,60
3	45	15		R\$ 1,28	16,44		R\$ 14,63	R\$ 15,91
4	60	20		R\$ 1,70	21,92		R\$ 19,51	R\$ 21,21
5	75	25		R\$ 2,13	27,40		R\$ 24,39	R\$ 26,51
6	90	30		R\$ 2,55	32,88		R\$ 29,26	R\$ 31,81
132	1980	660		R\$ 56,13	723,36		R\$ 643,79	R\$ 699,92

Fonte: Autor (2024)

Dessa forma, ao fim de um mês de operação, espera-se que a produção de água destilada sejam os mesmos 660 litros. No entanto, o volume de água descartado

foi estimado em 88% a menos que no cenário anterior. Esse fantástico resultado prevê uma economia de 13.860 litros de água potável em apenas um mês de operação do Chiller. Essa economia de água pode abastecer uma residência na qual habitam 3 pessoas. A Tabela 11, elenca esses satisfatórios resultados.

Tabela 11 – Compilados dos Resultados

Tempo de Operação (h)	Custo total de operação sem o chiller		Custo total de operação com o chiller		Economia R\$	Economia R\$	Economia Litros Água	Economia Litros Água
1	R\$	5,77	R\$	5,30	R\$	0,47	8%	105
2	R\$	11,55	R\$	10,60	R\$	0,94	8%	210
3	R\$	17,32	R\$	15,91	R\$	1,41	8%	315
4	R\$	23,09	R\$	21,21	R\$	1,88	8%	420
5	R\$	28,86	R\$	26,51	R\$	2,35	8%	525
6	R\$	34,64	R\$	31,81	R\$	2,82	8%	630
132	R\$	761,97	R\$	699,92	R\$	62,05	8%	13860

Fonte: Autor (2024)

No tocante a economia financeira, mesmo com o inflacionamento do consumo de energia elétrica, ainda foi prevista uma economia de R\$ 62,05 mensais, o que representa 08% dos custos operacionais.

Ao analisar a economia mensal de pouco mais de sessenta reais, pode-se imaginar que esse projeto não é viável, muito menos vantajoso, pois o *payback* simples foi de 5 anos e meio. No entanto a análise financeira não deve ser o único ponto analisado nessa situação. Pois nos mesmos 5 anos e meio, esse sistema deixará de utilizar mais de 940 mil litros de água potável.

A economia de água prevista para um mês de operação do chiller, objeto deste trabalho, foi de quase 14 mil litros. Este resultado é extremamente significativo para a sociedade atual, onde a conservação dos recursos hídricos é uma preocupação crescente. A redução no consumo de água para fins não nobres como o resultado aqui desse TCC não apenas contribui para a preservação ambiental, mas também está alinhado com as diretrizes e objetivos da Graduação em Engenharia de Energia, a qual visa promover otimização em processos industriais com o foco em redução de gastos em combustíveis e recursos naturais. Além disso, essa economia de água reforça o compromisso institucional com a sustentabilidade, servindo como exemplo para outras iniciativas dentro e fora do campus.

Para se ter uma ideia do impacto desse resultado, será considerado uma residência com três pessoas adultas. O consumo médio de água por pessoa no Brasil pode ser aproximado a 150 litros por dia. Portanto, uma residência desse porte consumiria cerca de 13.500 litros em um mês. Assim, a economia de quase 14 mil litros obtida com o chiller equivale ao consumo mensal de uma casa com três adultos, demonstrando a relevância prática dessa iniciativa. Ademais, o projeto se destacou por reaproveitar equipamentos que estavam sem serventia, conferindo-lhe um forte aspecto sustentável. Este reaproveitamento não só evita o descarte inadequado de materiais, mas também promove a reutilização eficiente de recursos, reduzindo a necessidade de novas aquisições e, conseqüentemente, o impacto ambiental associado à produção de novos equipamentos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto de construção do chiller com o objetivo de reutilizar a água de refrigeração de um destilador laboratorial revelou-se uma iniciativa extremamente eficaz e sustentável. Antes da implementação, cerca de 120 litros de água eram descartados por hora de operação pelo simples fato de estarem levemente aquecidos. Com o chiller projetado, esse volume de água agora é recebido, resfriado até os padrões de entrada e bombeado novamente ao destilador, permitindo o reinício contínuo do ciclo de refrigeração.

O equipamento foi instalado nas dependências do Laboratório de Análises Clínicas do Hospital Veterinário da Universidade Federal do Paraná em Palotina e demonstrou ser altamente eficiente, podendo reduzir em até 88% a demanda de água potável para o processo de destilação. Este resultado não apenas representa uma significativa economia de recursos hídricos, mas também destaca a viabilidade técnica e operacional do sistema, confirmando a capacidade do chiller de suprir as necessidades do destilador de forma sustentável.

O projeto também se destacou pelo seu forte viés de sustentabilidade. A economia de quase 14.000 litros de água mensais é um resultado significativo, especialmente considerando que foram utilizados equipamentos de refrigeração sem utilização que, de outra forma, seriam descartados. Esse reaproveitamento de materiais subutilizados não só evitou o descarte inadequado, mas também promoveu a reutilização eficiente de recursos, alinhando-se perfeitamente com as diretrizes sustentáveis da universidade.

Além da economia de água, o projeto conseguiu reduzir os custos operacionais do destilador. A análise de custo-benefício revelou que o consumo de energia elétrica do chiller não ultrapassou os custos anteriormente gastos com a água, demonstrou então que a implementação do sistema é economicamente vantajosa. Este fator reforça a relevância do projeto não apenas do ponto de vista ambiental, mas também financeiro, com a economia de recursos públicos.

Dada a eficácia e os benefícios demonstrados nesse trabalho, ele deve servir como um exemplo a ser replicado para cada destilador de água existente na Universidade. No atual cenário de secas no norte do país e enchentes no sul, onde pessoas enfrentam dificuldades extremas e necessitam de doações de água para sobrevivência, é inadmissível que uma repartição pública mantenha práticas nada

ecológicas, como esse modelo de resfriamento. A implementação de sistemas similares pode contribuir significativamente para a conservação de recursos hídricos, promovendo uma cultura de sustentabilidade e responsabilidade ambiental em toda a instituição.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como forma de facilitar a utilização do equipamento e otimizar a operação, poderia ser estudado a possibilidade de instalação de uma válvula de abertura automática para realizar o descarte de água, a medida em que ela satura. Esse sistema deve se comunicar com o destilador, pois será essencial que ele esteja desligado nesse momento, uma vez que, a não passagem de água para o resfriamento pode levar ao sobreaquecimento da resistência e consequente queima. Poderia ser avaliado a possibilidade de instalação de outra válvula na tubulação de alimentação, para que durante o esgotamento do reservatório não entre água até que ele esteja completamente vazio. A água a ser descartada poderia ser utilizada para irrigação das flores que estão plantadas nas proximidades de onde esse chiller foi instalado.

Realizar testes para verificar se pode ser alterado o *setpoint* do sistema para valores mais próximos a 18°C, por exemplo. Pois a medida em que a temperatura da água de resfriamento fica mais fria, ela demora mais tempo para atingir o valor programado de 15°C, exposto no Gráfico 1. Seria interessante avaliar também a histerese do controlador, para manter uma faixa na qual não há ciclos de ligar e desligar muito próximos, isso pode comprometer a vida útil do compressor.

Avaliar o consumo de energia elétrica do sistema, por meio da utilização de equipamento específico para esse fim, e então propor mudanças na faixa de temperatura de operação, com o intuito de diminuir o tempo da unidade condensadora ligada. Escolher outro sistema de refrigeração com Índice de Desempenho de Refrigeração Sazonal maior, poderá trazer mais economias no consumo de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- BACCI, Denise de la Corte; PATACA, Ermelinda Moutinho. **Educação para a água**. Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP 2008.
- TORSANI, Laisa Maria. **Estudo da influência das variações do fluido de arrefecimento em motores de combustão a diesel**. 2018. 42 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em Engenharia Química - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018
- Consumo de água cotidiano**. Sabesp - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Disponível em: <<https://site.sabesp.com.br/site/interna/default.aspx?secaold=595>> Acesso em: 04 de abr. de 2024.
- Entenda o funcionamento de um destilador de água: Um guia completo**. Disponível em: <<https://www.splabor.com.br/blog/destilador-2/destilador-de-agua-processos-de-destilacao/>> Acesso em: 22 de mar. de 2024.
- Agência Nacional de Águas (Brasil). **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil** / Agência Nacional de Águas. - Brasília: ANA, 2019.
- Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 4ª Edição. Porto Alegre/RS. Editora AMGH. 2012.
- Yunus A. Çengel, Michael A. Boles. **Termodinâmica**. 7ª Edição. Porto Alegre/RS. Editora AMGH. 2013.
- Yunus A. Çengel, John M. Cimbala. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. Porto Alegre/RS. Editora AMGH. 2007
- Frank P. Incropera et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6ª Edição. Rio de Janeiro/RJ. Editora LTC. 2008.
- Azevedo Neto, José Martiniano de, e Guillermo Acosta Alvarez. **Manual de Hidráulica**. 6ª Edição. São Paulo/SP 1973.
- Pipe Masters Academy. **Soldadura TIG: conheça as suas vantagens e o nosso curso**. Disponível em: <<https://pipemasters.pt/blog/industria/soldadura-tig-vantagens-e-curso/>> Acesso em: 17 de abr. de 2024.
- Ramsés Della Libera. **Como pintar estruturas metálicas e protegê-las da corrosão precoce?** Disponível em: < <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/como-pintar-estruturas-metalicas-e-protege-las-da-corrosao-precoce/17253>> Acesso em: 12 de abr. de 2024.
- Carolina Cinelli Bezerra de Menezes, Rogério do Bonfim Souza Carneiro Filho. **Estudo de recuperação da água dos laboratórios para o reabastecimento da EQ/UFRJ**. Projeto Final de Curso – Bacharelado em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ. 2022

Ricardo A. F. de Matos, Paulo R. R. Meira, Samuel C. C. de Matos. **Adaptação de uma unidade de destilação de água para reaproveitamento de fluido refrigerante interno com materiais de baixo custo.** v.6 n.2 p. 663-672 Revista Científica Cognitionis. 2023.

Carrier do Brasil. **Chiller Modular Scroll 30EX/EV Condensação a Ar.** Catálogo Comercial. Brochure Carrier_30EX_EV - A - 08/23 © 2023 Carrier.

Mamede Filho, João. **Instalações Elétricas Industriais.** 2º Edição. Rio de Janeiro/RJ. Editora LTC. 1987.

ANEXO 1 – PARÂMETROS DO CONTROLADOR DE TEMPERATURA

TCC - Marcelo Leonardo Victor Zanin			
Parâmetros do Controlador de Temperatura			
Full Gauge MT-512E 2HP			
Função	Descrição	Ajuste	Unidade
F01	Código de Acesso - senha	123	
F02	Temperatura Desejada <i>Setpoint</i>	15,0	°C
F03	Deslocamento de indicação	0,0	°C
F04	<i>Setpoint</i> Mínimo	2,0	°C
F05	<i>Setpoint</i> Máximo	25,0	°C
F06	Histerese	5,0	°C
F07	Modo de Operação	0 - refriger	
F08	Tempo Mínimo saída ligada	180,0	seg
F09	Tempo Mínimo saída desligada	180,0	seg
F10	Tempo de refrigeração	30,0	min
F11	Tempo de degelo	no	min
F12	Estado inicial ao energizar	0 - refriger	
F13	Indicação de temperatura travada no degelo	no	
F14	Retardo de energização <i>delay</i>	no	
F15	Tempo adicional ao final do primeiro ciclo	no	
F16	Situação do compressor com o sensor inoperante	0,0	
F17	Tempo do compressor ligado em caso de erro	3,0	min
F18	Tempo do compressor desligado em caso de erro	10,0	min
F19	Intensidade do filtro digital	no	
F20	Tempo para bloqueio das funções	no	
F21	Desligamento das funções de controle	no	

ANEXO 2 – ROTINA DE CÁLCULOS EES

File: modelagem do chiller.EES

09/06/2024 21:27:47 Page 1

EES Ver. 9.457: #1514: For use only by Mohamed Shaker, Ginza, Cairo, Egypt

```

1: "!"
2: Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia de Energia - UFPR
3: Graduando: Marcelo Leonardo Victor Zanin
4: Orientador: Dr. Wilson de Aguiar Beninca
5:
6: "!Modelagem do sistema de refrigeração"
7:
8: " 1) Carga térmica decorrente do refrigeramento do destilador "
9:
10:  $q = m_2 \cdot h_2 - m_1 \cdot h_1$  {kW} {Equação 01}
11:
12:  $T_1 = 30,5$  [°C] {Entrada no destilador vindo da torneira}
13:  $T_2 = 50,5$  [°C] {Saída do destilador para o ralo}
14:  $T_3 = 40$  [°C] {Saída da água destilada, produto final}
15:  $P_1 = 101,3$  [kPa] {Pressão atuante (Atmosférica)}
16:  $P_2 = P_1$ 
17:  $h_1 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_1; P=P_1)$  {Entalpia no estado 1}
18:  $h_2 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_2; P=P_2)$  {Entalpia no estado 2}
19:
20: " 2) balanço de massa "
21:
22:  $m_1 = m_2 + m_3$  {Água da torneira = Água destilada + Água que vai para o ralo}
23:
24:  $m_2 = \text{agua\_descarte} / 3600$  {Água que vai para o ralo}
25:  $m_3 = \text{agua\_destilada} / 3600$  {Água destilada produto}
26:
27:  $\text{agua\_descarte} = 120 \cdot \rho_{\text{agua\_descarte}} / 1000$  {120 litros por hora, vazão medida in loco}
28:  $\rho_{\text{agua\_descarte}} = \text{Density}(\text{Water}; T=T_1; P=P_1)$ 
29:
30:  $\text{agua\_destilada} = 5 \cdot \rho_{\text{agua\_destilada}} / 1000$  {5 litros por hora, vazão medida in loco}
31:  $\rho_{\text{agua\_destilada}} = \text{Density}(\text{Water}; T=T_3; P=P_1)$ 
32:
33:
34:  $Q_{\text{btu}} = \text{Convert}('kW'; 'Btu/hr') \cdot q$  {carga térmica em BTU/h}
35:
36:  $Q_{\text{kcal}} = \text{Convert}('kW'; 'kcal/hr') \cdot q$  {carga térmica em Kcal/h}
37:
38: " 3) Cálculo do coeficiente convectivo natural "
39: "Correlação para cilindro em posição horizontal"
40: "Compilado das Equações 02 a 06"
41:
42:  $\text{Call FC\_horizontal\_cylinder}(\text{Fluid}; T_s; T_{\text{infinity}}; P; D : h; \text{Nusselt}; Ra)$ 
43:
44: "Entrada de dados"
45:  $\text{Fluid} = 'water'$  {Imerso em água}
46:  $T_s = 6$  {Temperatura da Superfície do tubo}
47:  $T_{\text{infinity}} = 30$  {Temperatura média da água}
48:  $P = 101,5$  {Pressão atuante no sistema (Atmosférica)}
49:  $D = 3/8 \cdot 25,4 \text{E-}3$  {Diâmetro do Cilindro = 3/8 de polegadas}
50:
51: "4) Determinação da área superficial, através da Equação 07 e 08"
52:
53:  $q \cdot 1000 = a_{\text{superficial}} \cdot h \cdot (T_{\text{infinity}} - T_s)$  {Equação 07}
54:  $a_{\text{superficial}} = \pi \cdot D \cdot L$  {Equação 08}
55:
56:  $\text{fator\_seguranca} = 1,5$  {Fator de segurança}
57:  $L_{\text{corrigido}} = L \cdot \text{fator\_seguranca}$ 

```

```

58:
59:
60: "!Modelagem do sistema de bombeamento"
61:
62: " 5) Reynolds do escoamento"
63:
64:  $Re = (\rho_{\text{agua\_descarte}} * V_{\text{med}} * D) / \mu$  {Equação 09}
65:
66:  $V_{\text{med}} = \text{Vazão} / \text{area\_seção}$  {Velocidade média}
67:  $\text{Vazão} = m1 / \rho_{\text{agua\_descarte}}$  {Vazão}
68:  $\text{area\_seção} = (\pi * D_{\text{hid25}}^2) / 4$  {Área seção transversal do tubo 3/8}
69:  $\mu = \text{Viscosity}(\text{Water}; T=T1; P=P1)$  {Viscosidade dinâmica}
70:
71:  $D_{\text{hid25}} = 25E-3$ 
72:
73: " 6) Rugosidade relativa"
74:
75:  $\text{Rugosidade} = e / D_{\text{hid32}}$ 
76:  $e = 6E-5$ 
77:  $D_{\text{hid32}} = 32E-3$ 
78:
79: {análise do Diagrama de Moody f=0,032}
80:
81: " 7) Perdas de carga distribuídas"
82:
83: "tubulação 32 mm"
84:
85:  $h_{f1} = f * (L_{\text{tub1}} / D_{\text{hid25}}) * (V_{\text{med}}^2 / 2 * g)$  {Equação 10}
86:
87:  $g = 9,81$  {Aceleração da gravidade}
88:  $f = 0,032$  {Coeficiente de atrito}
89:  $L_{\text{tub1}} = 5$  {Comprimento do tubo}
90:
91: "mangueiras cristal"
92:
93:  $h_{f2} = f * (L_{\text{tub2}} / D_{\text{hid25}}) * (V_{\text{med}}^2 / 2 * g)$ 
94:  $L_{\text{tub2}} = 10$ 
95:
96: " 8) Perdas de carga localizadas"
97:
98: "joelhos"
99:
100:  $h_{s\_joelhos} = K_{s\_joelhos} * (V_{\text{med}}^2 / 2 * g) * \text{qtd\_joelhos}$  {Equação 11}
101:  $K_{s\_joelhos} = 1,3$ 
102:  $\text{qtd\_joelhos} = 4$ 
103:
104: "tee"
105:  $h_{s\_tee} = K_{s\_tee} * (V_{\text{med}}^2 / 2 * g) * \text{qtd\_tee}$ 
106:  $K_{s\_tee} = 0,4$ 
107:  $\text{qtd\_tee} = 1$ 
108:
109: "união"
110:  $h_{s\_união} = K_{s\_união} * (V_{\text{med}}^2 / 2 * g) * \text{qtd\_união}$ 
111:  $K_{s\_união} = 0,04$ 
112:  $\text{qtd\_união} = 2$ 
113:

```

File: modelagem do chiller.EES

09/06/2024 21:27:47 Page 3

EES Ver. 9.457: #1514: For use only by Mohamed Shaker, Ginza, Cairo, Egypt

```

114: "registros de esfera"
115: h_s_registro = K_s_registro * (V_med^2/2 * g) * qtd_registro
116: K_s_registro = 0,9
117: qtd_registro = 2
118:
119: "somatório"
120: h_s_total = h_s Joelhos + h_s_tee + h_s_união + h_s_registro
121:
122: "9) Perdas de carga compiladas"
123:
124: Perdas_carga_totais = h_f1 + h_f2 + h_s_total {Perdas de carga total no sistema hidráulico}
125:
126: "10) Potência da bomba " {Equação 12}
127:
128: P_bomba = (Vazão * gama * (Perdas_carga_totais + H_manometrico)) / eta_bomba
129: H_manometrico = 3
130: gama = rho_agua_descarte
131: eta_bomba = 0,8
132:
133: P_bomba_corrigido = 1,5 * P_bomba

```

SOLUTION

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

agua_descarte = 119,5 [kg/h]	agua_destilada = 4,961 [kg/h]	area_seção = 0,0004909 [m²]
asuperficial = 0,1539 [m²]	D = 0,009525 [m]	Dhid25 = 0,025 [m]
Dhid32 = 0,032 [m]	e = 0,00006	η_bomba = 0,8
f = 0,032	fator_segurança = 1,5	Fluid\$ = 'water'
g = 9,81 [m/s²]	gama = 995,5	h = 703,5 [kJ/kgK]
h1 = 127,9 [kJ/kg]	h2 = 211,5 [kJ/kg]	hr1 = 0,157
hr2 = 0,3141	H_manometrico = 3 [m]	hs_Joelhos = 0,1276 [m]
hs_registro = 0,04416 [m]	hs_tee = 0,009814 [m]	hs_total = 0,1835 [m]
hs_união = 0,001963 [m]	Ks_Joelhos = 1,3	Ks_registro = 0,9
Ks_tee = 0,4	Ks_união = 0,04	L = 5,145 [m]
L_corrigido = 7,717 [m]	L_tub1 = 5	L_tub2 = 10 [m]
m1 = 0,03456 [kg/s]	m2 = 0,03318 [kg/s]	m3 = 0,001378 [kg/s]
μ = 0,0007893	Nusselt = 11,5	P = 101,5 [kPa]
P1 = 101,3 [kPa]	P2 = 101,3 [kPa]	Perdas_carga_totais = 0,6546 [m]
P_bomba = 0,1579 [HP]	P_bomba_corrigido = 0,2368 [HP]	q = 2,599 [kW]
qtd_Joelhos = 4	qtd_registro = 2	qtd_tee = 1
qtd_união = 2	Qbtu = 8870 [Btu/hr]	Qkcal = 2235 [kcal/hr]
Ra = 258910	Re = 849,7 [kg-m/s]	ρ_agua_descarte = 995,5 [kg/m³]
ρ_agua_destilada = 992,2 [kg/m³]	Rugosidade = 0,001875 [1/m]	T1 = 30,5 [°C]
T2 = 50,5 [°C]	T3 = 40 [°C]	T∞ = 30 [°C]
Ts = 6 [°C]	Vazão = 0,00003472 [m³/s]	Vmed = 0,07073 [m/s]

30 potential unit problems were detected.

EES suggested units (shown in purple) for Rugosidade .

ANEXO 3 – MANUAL DE OPERAÇÃO DO CHILLER

CHILLER PARA O RESFRIAMENTO DE ÁGUA DE DESTILADOR LABORATÓRIO DE ANÁLISES CLÍNICAS DO HOSPITAL VETERINÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ – SETOR PALOTINA

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E EXATAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA
GRADUANDO: MARCELO LEONARDO VICTOR ZANIN
PALOTINA, JUNHO DE 2024**

1 PREFÁCIO

Esse manual é destinado aos técnicos e alunos que irão operar em conjunto o destilador de água e o chiller com o intuito de auxiliar nos procedimentos de partida e funcionamento dos equipamentos. Cabe ressaltar que o chiller em questão é de fabricação própria e artesanal, e faz parte integrante do Trabalho de Conclusão de Curso desse autor. Esse equipamento foi doado a Universidade após a conclusão do TCC e sua manutenção, conservação e operação é inteiramente a cargo dos responsáveis da Universidade.

Se após a leitura você ainda precisar de informações adicionais, leia o TCC desse autor, nele estará toda a fundamentação técnica e teórica do projeto, premissas de cálculos e aspectos de construção, caso ainda tenha dúvidas entre em contato pelo e-mail: zaninmarcelozanin@gmail.com.

2 INSTRUÇÕES DE SEGURANÇA

O equipamento foi dimensionado para operar em conjunto com o destilador do Laboratório de Análises Clínicas do Hospital Veterinário da UFPR de Palotina, dessa forma, é desconhecido a sua capacidade de operação para outro destilador.

Quando estiver trabalhando no equipamento siga sempre as normas para o trabalho com eletricidade (NR-10) e as boas práticas do serviço de engenharia de climatização e refrigeração.

Risco de explosão:

JAMAIS acione o compressor com as válvulas de serviço fechadas.

JAMAIS comprima ar utilizando o compressor da unidade.

JAMAIS utiliza chama viva para localização de vazamentos.

3 LOCAL DE INSTALAÇÃO

Mantenha sempre o local onde foi instalado o Chiller limpo e de fácil acesso. Certifique-se que não há obstáculos que impeçam o acesso para manutenções futuras, ou que atrapalhe no correto fluxo de ar da unidade condensadora. Tenha certeza que pessoas não treinadas não tenham acesso até o chiller para não comprometer seu funcionamento.

4 OPERAÇÃO

Nunca desconecte o plug da tomada com o equipamento em operação.

Não danifique o cabo de alimentação.

Opere o equipamento somente através das chaves de acionamento, que estão instaladas no interior da sala do laboratório. O sistema de acionamento, tanto para a refrigeração, como para circulação de água é composto por duas chaves liga/desliga que estão dispostas em série, dessa forma, é necessário que ambas estejam ligadas (chave 1 no chiller, chave 2 no quadro interno na sala).

Não bloqueie a entrada e saída de ar da unidade externa.

Se perceber qualquer anomalia como aquecimento anormal, fumaça, etc. Desligue o aparelho nas chaves e na sequência retire o plug da tomada. Comunique a manutenção da Universidade sobre o fato.

Não faça reparos no equipamento sem ter conhecimento técnico

Ligue o chiller com no MÍNIMO 5 MINUTOS antes do destilador para garantir temperatura ideal de refrigeração.

Os dois registros do *BY-PASS* após realizado a regulagem de funcionamento não devem ser mexidos, pois irão afetar diretamente na vazão de água gelada e consequentemente na produção de água destilada.

A cada 3 TRÊS horas de operação do destilador é imprescindível realizar a troca de toda a água de refrigeração do chiller através do registro de esgotamento. A não realização desse procedimento pode acarretar no aumento excessivo da concentração de sais e sólidos na água e ocasionar problemas no destilador, como formação de bolhas e derramamentos.

O controlador de temperatura é um Full Gauge MT-512E 2HP, cujo manual de operação pode ser facilmente encontrado na internet. Para ajustar a

temperatura do *setpoint* pressione a tecla SET por aproximadamente 10 segundos até que apareça o valor programado. Na sequência, utiliza as teclas ▲ cima ▼ baixo para regular a temperatura desejada. A programação inicial foi de 15 graus com histerese de 5 graus. Os demais parâmetros do controlador podem ser consultados no Anexo 2 do TCC do autor desse projeto.

5 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Mantenha sempre a unidade condensadora do aparelho limpa, aconselhável que se lave com detergente neutro e água pressurizada a cada 3 meses.

Mantenha o local de instalação do chiller limpo e de fácil acesso.

Verifique sempre se não há vazamentos ou mangueiras rachadas, caso haja, providencie a substituição.

Verifique mensalmente o estado de conservação da estrutura metálica do chiller, se houver focos de oxidação, providencie retoques na pintura.

A bomba hidráulica, em função do seu baixo valor agregado, não necessita de verificações constantes, apenas deve-se tomar cuidado para nunca ligar ela sem que conferir que há água no reservatório.