

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação – CTE  
Departamento de Engenharia de  
Controle, Automação e Computação – CAC



Gabriela Alice Kriek

Eficiência energética em bombas de água gelada de um sistema  
de climatização com *chillers*

Blumenau

2020

Gabriela Alice Krieck

# Eficiência energética em bombas de água gelada de um sistema de climatização com *chillers*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

## Comissão Examinadora



Documento assinado digitalmente  
Tiago Davi Curi Busarello  
Data: 08/09/2020 09:58:14-0300  
CPF: 319.950.098-65

---

Prof. Dr. Tiago Davi Curi Busarello  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Orientador



Documento assinado digitalmente  
Adão Boava  
Data: 08/09/2020 10:03:08-0300  
CPF: 645.640.969-15

---

Prof. Dr. Adão Boava  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
Leonardo Mejia Rincon  
Data: 08/09/2020 14:13:53-0300  
CPF: 011.678.849-65

---

Prof. Dr. Leonardo Mejia Rincon  
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 6 de setembro de 2020

**Gabriela Alice Krieck**

**Eficiência energética em bombas de água gelada de um sistema de climatização com *chillers***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação.  
Orientador: Prof. Dr. Tiago Davi Curi Busarello

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação – CTE  
Departamento de Engenharia de  
Controle, Automação e Computação – CAC

Blumenau  
2020

# Agradecimentos

Este documento não representa apenas mais uma das etapas que temos que concluir antes da tão aguardada formatura. Para mim, ele é também símbolo da conclusão do que talvez tenha se tornado a etapa mais desafiadora da minha vida até então. O período da graduação representou, sobretudo, um ciclo de muito amadurecimento na minha vida. O momento de conclusão desta etapa é também um momento propício para agradecer todos aqueles que, de alguma forma, foram parte desta importante transição e de tantas outras etapas da minha vida que fizeram de mim a pessoa que sou hoje. Deste modo, agradeço:

Aos meus pais, Sueli e Walter, por sempre me encorajarem a seguir meus sonhos, ainda que eles signifiquem mudanças difíceis. Muito obrigada por me ajudarem a chegar até aqui e por me incentivarem, todos os dias, a me tornar uma pessoa melhor.

À minha irmã, Letícia, pelas palavras sensatas nos momentos difíceis. Muito obrigada por ser, desde sempre, muito mais do que uma irmã pra mim e por sempre estar presente.

A todos meus professores na universidade e antes dela, toda a gratidão e admiração. Neste momento em especial, agradeço ao meu orientador Tiago Busarello, por estar tão presente neste momento da minha vida, pela paciência, pelos conselhos e pelas boas conversas que tivemos. Muito obrigada pelo grande exemplo que vocês foram e por ajudarem tanto no meu desenvolvimento.

Aos meus colegas na ABB, especialmente à equipe de engenharia e gerenciamento de produtos, por todo tempo que dispenderam comigo e por toda a paciência que tiveram para me orientar e dar conselhos, ainda que para isso tivessem que deixar outras atividades de lado. Graças a influência de cada um de vocês sou hoje uma pessoa melhor. Tenho absoluta certeza que, independente do rumo que a minha vida tomar, levarei muito do que aprendi com essa equipe comigo.

À todos os amigos que tive o prazer de conhecer nos mais diversos momentos da minha vida. Aos amigos que fiz durante a faculdade, muito obrigada por tornarem essa jornada menos penosa e muito mais divertida. Aos amigos de vida que o escotismo me trouxe, muito obrigada pelas lembranças engraçadas e inesquecíveis e por terem ajudado a minha mente a se manter saudável durante os momentos difíceis da faculdade e muito antes dela. Aos amigos que conheci em outros momentos da minha vida e que estão sempre por perto, muito obrigada por me ajudarem tanto e por estarem sempre junto de mim, ainda que virtualmente. Levo cada um de vocês no meu coração e torço genuinamente pelo sucesso vocês, independentemente do que isso signifique para vocês.

Olhando para trás percebo que essa foi definitivamente uma experiência incrível e que sem a presença de cada um de vocês ela seria bem diferente. Me sinto muito grata por ter tido a oportunidade de conhecer todos vocês.

*"The three great essentials to achieve anything worthwhile are, first, hard work; second, stick-to-itiveness; third, common sense."*  
(Thomas A. Edison)

# Resumo

Os sistemas centrais de climatização são projetados para assegurar que a capacidade máxima de resfriamento é suficiente para a condição mais extrema possível, como por exemplo os dias mais quentes do verão. Essas condições, no entanto, ocorrem em poucos momentos, o que significa que na maior parte do tempo esses sistemas operam com cargas parciais. Este trabalho teve como objetivo principal estudar e avaliar os potenciais ganhos em desempenho energético em um sistema de bombas de água gelada do sistema de refrigeração da ABB em Sorocaba que podem ser obtidos com diferentes configurações de equipamentos. Neste sentido, três possíveis cenários de operação são propostos e comparados: 1) Sistema com duas bombas ligadas diretamente na rede elétrica, semelhante ao que é utilizado atualmente; 2) sistema com duas bombas operando com inversores de frequência que permitem que o sistema opere com carga parcial; e 3) sistema com três bombas e inversores de frequência. Os desempenhos para cada um dos cenários foram comparados através de simulações e se observou que, em condições ideais, o sistema nos Cenários 2 e 3 apresentaram, respectivamente, economia em energia elétrica de cerca de 26,9% e 67,5% e payback de 10,5 e 6,3 meses em relação ao Cenário 1.

**Palavras-Chave:** 1. Sistemas HVAC 2. Edifícios sustentáveis 3. Eficiência energética

# Abstract

When designing a heating, ventilation and air conditioning (HVAC) system, it is necessary to ensure that maximum cooling capacity is enough for the most extreme possible condition, for example, the hottest days of the summer. However, these conditions only happen for a few hours or days during a year, which means that most of the time these systems are operating in partial-load conditions. This project aims to study and to evaluate the potential energetic gains reached using a more efficient set of equipment to be applied in a chilled water system of a HVAC system located at ABB plant in Sorocaba. Therefore, three possible sets of equipment have been proposed and compared: 1) Two pumps started directly on line, similarly to actual setup; 2) two pumps operating with VFDs (variable frequency drives), which allows the system to operate in part-load conditions; and 3) three pumps operating with VFDs. The performances for each of the scenarios were compared through simulations and it was observed that, under ideal conditions, the system in Scenarios 2 and 3 presented, respectively, savings in electricity of about 26,9% and 67,5% and 10,5 and 6,3 months payback when compared to Scenario 1.

**Keywords:** 1. HVAC systems 2. Green Buildings 3. Energy Efficiency

# Lista de figuras

Figura 1 – Prédio 1 da ABB Sorocaba. . . . .	14
Figura 2 – Visão geral do sistema HVAC do prédio 1 da ABB Sorocaba. . . . .	15
Figura 3 – Evolução da oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil [1]. . . . .	19
Figura 4 – Participação de fontes renováveis na matriz de energia elétrica brasileira. . . . .	20
Figura 5 – Evolução da participação setorial no consumo de eletricidade no Brasil em 2018 e 2029 [1] [2]. . . . .	21
Figura 6 – Evolução do consumo de energia elétrica por equipamento residencial no Brasil em 2019 e em 2029 [1]. . . . .	22
Figura 7 – Consumo de energia em um edifício comercial comum [3]. . . . .	23
Figura 8 – Percentual de residências equipadas com ar condicionado em países selecionados em 2018 [4]. . . . .	24
Figura 9 – Componentes do ciclo de refrigeração de um chiller refrigerado a ar [5]. . . . .	26
Figura 10 – <i>Chiller</i> de condensação a ar [5]. . . . .	27
Figura 11 – Princípio básico de funcionamento dos <i>chillers</i> [6]. . . . .	27
Figura 12 – Componentes do ciclo de refrigeração de um chiller refrigerado a ar [5]. . . . .	29
Figura 13 – Torre de resfriamento de água. <sup>1</sup> . . . . .	30
Figura 14 – Unidade de tratamento de ar. <sup>2</sup> . . . . .	31
Figura 15 – Sistema de bombeamento. <sup>3</sup> . . . . .	34
Figura 16 – Diagrama motor de indução trifásico em corte [7]. . . . .	35
Figura 17 – Curva típica de rendimento de um motor de indução. [8] . . . . .	36
Figura 18 – Relações características de bombas centrífugas [9] [10]. . . . .	38
Figura 19 – Curva $\eta_b \times Q$ de bombas da linha KSB WKL <sup>4</sup> . . . . .	39
Figura 20 – Controle de vazão por estrangulamento de válvula. [8] . . . . .	40
Figura 21 – Controle de vazão por <i>by-pass</i> na saída da bomba. [8] . . . . .	40
Figura 22 – Controle por variação de velocidade do motor com aplicação de inversor de frequência [8]. . . . .	41
Figura 23 – Variação do consumo de energia por vários métodos de controle de vazão [8]. . . . .	42
Figura 24 – Faixas de operação recomendadas para bombas e inversores de frequência [9]. . . . .	42
Figura 25 – Esquemático do sistema de bombeamento de água gelada. . . . .	43
Figura 26 – Vazão total estimada em função da temperatura externa. . . . .	47
Figura 27 – Potência média diária do sistema de bombeamento para o Cenário 1. . . . .	49
Figura 28 – Temperatura média anual no município de Sorocaba/SP no ano de 2019. . . . .	50



Figura 29 – Comparação entre a vazão total média do sistema de bombeamento nos cenários 1 e 2. . . . .	51
Figura 30 – Potência média diária do sistema de bombeamento para o Cenário 2. . .	52
Figura 31 – Potência média diária do sistema de bombeamento para o Cenário 3. . .	53
Figura 32 – Potência média diária do sistema de bombeamento para os cenários estudados. . . . .	54

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros das bombas e de temperatura . . . . .	48
Tabela 2 – Energia dispendida em um dia típico de trabalho por configuração . . .	54
Tabela 3 – Parâmetros utilizados para analisar os resultados . . . . .	56
Tabela 4 – Valor gasto pelo sistema com energia elétrica em um dia típico por configuração . . . . .	56
Tabela 5 – Gastos estimados com energia elétrica por configuração em médio e longo prazo . . . . .	56
Tabela 6 – Estimativa de custos para adquirir os equipamentos por configuração .	57
Tabela 7 – <i>Payback</i> do sistema nos Cenários 2 e 3 em relação ao Cenário 1 . . . .	57

# Lista de Siglas e Abreviaturas

AHU	<i>Air Handling Unit</i>
AHRI	<i>Air-conditioning, Heating &amp; Refrigeration Institute</i>
AIE	<i>Agência Internacional de Energia</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
CAG	<i>Central de Água Gelada</i>
EIA	<i>U.S. Energy Information Administration</i>
FMI	<i>Fundo Monetário Internacional</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEMA	<i>Instituto de Energia e Meio Ambiente</i>
ONU	<i>Organização das Nações Unidas</i>
PIB	<i>Produto Interno Bruto</i>
PwC	<i>PricewaterhouseCoopers</i>
UFSC	<i>Universidade Federal de Santa Catarina</i>
UTA	<i>Unidade de Tratamento de Ar</i>

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	14
1.1	Objetivos . . . . .	16
1.1.1	Objetivo Geral . . . . .	16
1.1.2	Objetivos específicos . . . . .	16
1.2	Estrutura do documento . . . . .	17
2	PANORAMA ENERGÉTICO ATUAL . . . . .	18
2.1	Consumo de energia elétrica no Brasil . . . . .	19
2.2	Consumo de energia elétrica em edifícios . . . . .	20
2.3	Consumo de energia elétrica nos sistemas de refrigeração . . . . .	22
3	FUNDAMENTOS DE SISTEMAS HVAC . . . . .	25
3.1	<i>Chillers</i> . . . . .	26
3.1.1	Princípio de funcionamento . . . . .	27
3.1.2	Classificação . . . . .	28
3.2	Torres de refrigeração . . . . .	30
3.3	Unidades de tratamento de ar . . . . .	31
3.4	Eficiência energética em sistemas de climatização . . . . .	31
4	SISTEMAS DE BOMBEAMENTO . . . . .	34
4.1	Motores de Indução Trifásicos . . . . .	35
4.2	Bombas centrífugas . . . . .	37
4.3	Métodos de controle de vazão . . . . .	39
4.3.1	Estrangulamento por válvula . . . . .	39
4.3.2	<i>By-pass</i> . . . . .	40
4.3.3	Controle por variação de velocidade do motor . . . . .	41
4.3.4	Comparação entre os métodos de controle de vazão . . . . .	41
5	METODOLOGIA . . . . .	43
6	RESULTADOS . . . . .	48
6.1	Cenário 1: Duas bombas ligadas diretamente na rede elétrica . . . . .	48
6.2	Cenário 2: Duas bombas acionadas por inversores de frequência . . . . .	49
6.3	Cenário 3: Três bombas acionadas por inversores de frequência . . . . .	52
6.4	Comparação entre os resultados dos Cenários 1, 2 e 3 . . . . .	53
7	ANÁLISES . . . . .	55

8	CONCLUSÕES . . . . .	59
8.1	Trabalhos futuros . . . . .	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .	62
A	FOLHA DE DADOS DAS BOMBAS . . . . .	66

# 1 Introdução

No ano de 2011, a ABB Brasil adquiriu uma área de cerca de  $100.000m^2$ , localizada no município de Sorocaba. No terreno estava alocado também um prédio (Figura 1), onde até então eram montados equipamentos de informática. No local, a ABB instalou uma unidade fabril onde são fabricados produtos de baixa tensão, motores elétricos, acionamentos e automação e que empregava, no ano de 2019, cerca de quinhentos funcionários.



Figura 1 – Prédio 1 da ABB Sorocaba.

Com a compra, a empresa adquiriu também outras estruturas que já faziam parte do edifício, tais quais as instalações elétricas e o sistema de ar condicionado do prédio 1, que foi originalmente projetado para, além de controlar a temperatura dos ambientes, também fazer o ajuste da umidade relativa do ar. Devido ao elevado custo de manutenção, a ABB acabou descontinuando parte da estrutura, mantendo apenas o sistema de ar condicionado para fazer o controle da temperatura dos ambientes, eliminando assim o ajuste de umidade e o sistema de automação que eram utilizados anteriormente.

Atualmente, um dos grandes problemas das instalações físicas dessa unidade está no sistema de refrigeração do prédio 1, que está obsoleto e é incapaz de regular de maneira satisfatória a temperatura de todos os ambientes. De uma maneira geral, o sistema é

composto por dois *chillers* de condensação a ar, que são responsáveis pela refrigeração do ar, três bombas de água gelada que fazem com que a distribuição do ar gelado nos ambientes do edifício. Na Figura 2 é possível observar um esquema da estrutura atual do sistema.

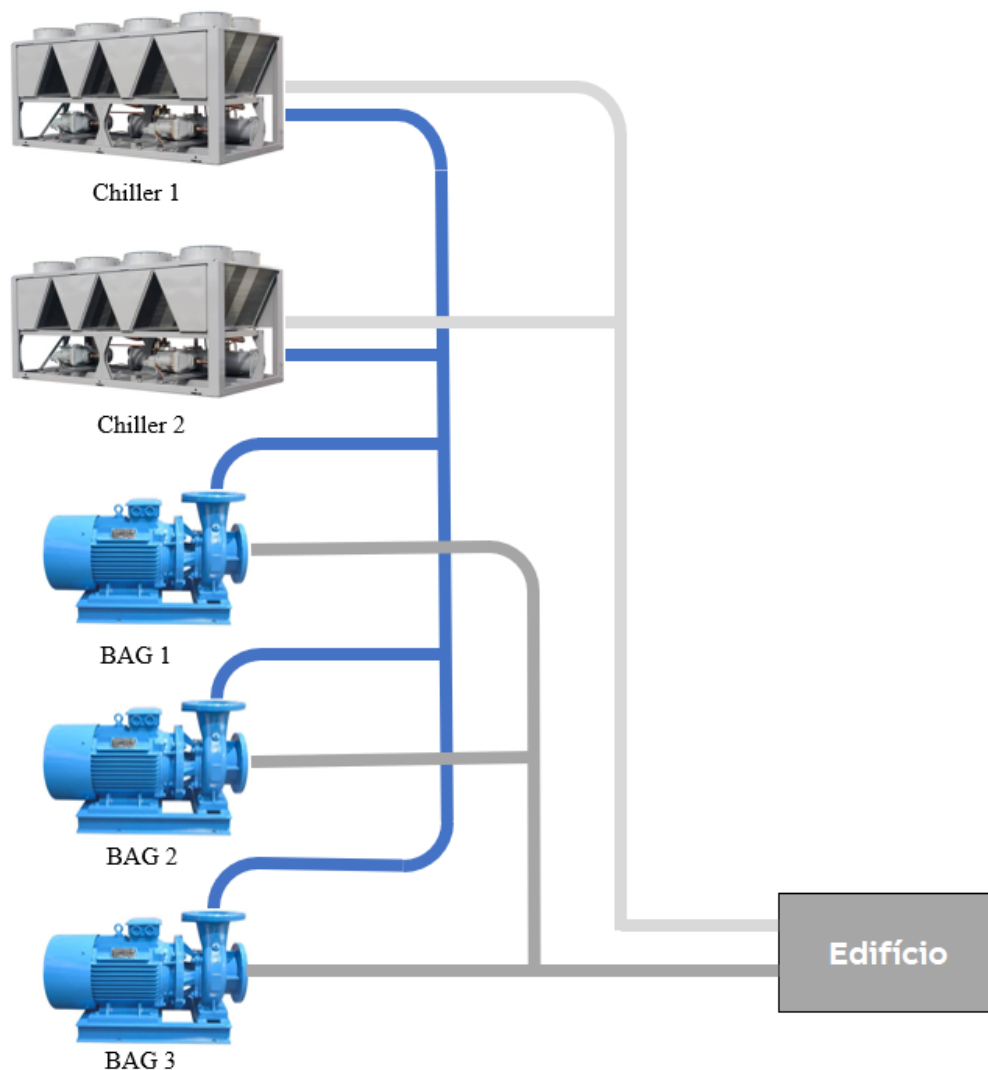


Figura 2 – Visão geral do sistema HVAC do prédio 1 da ABB Sorocaba.

Em busca de uma solução para a situação, a empresa procurou uma assessoria especializada em sistemas de refrigeração para fazer um levantamento de custos para consertar a estrutura atual. Através desse estudo foi possível constatar, por exemplo, que apenas uma das três bombas de água gelada do sistema opera sem restrições. A segunda bomba apresenta forte ruído e vibração quando em operação, o que pode indicar que está chegando ao fim de sua vida útil e a terceira está inoperante.

Diante desse cenário, a necessidade de substituição das bombas se tornou evidente e até mesmo emergente. A simples substituição das bombas já acarretará em um ganho no ponto de vista energético do sistema, já que os novos equipamentos atendem as normas mais atuais de eficiência energética e os antigos estão com funcionamento comprometido.

É possível otimizar ainda mais a operação do sistema de refrigeração fazendo também a troca dos motores que compõem a estrutura, adicionando inversores de frequência para fazer o controle de velocidade das bombas da máquina e reativando o sistema de automação que antes existia nesse sistema.

Nesse sentido, o projeto que será apresentado neste documento propõe uma solução para o sistema de bombeamento de água gelada do sistema de climatização do prédio 1 da ABB em Sorocaba. Além de causar prejuízos financeiros, a instabilidade do sistema tem impactado diretamente o bem-estar das pessoas que trabalham nesse local. O estudo conduzido por este documento visa investigar como o sistema de refrigeração da ABB em Sorocaba pode ser otimizado do ponto de vista da eficiência energética através da substituição e rearranjo dos equipamentos que compõem o sistema de bombeamento de água gelada. O propósito do projeto consiste em não apenas propor uma solução para os problemas dessa estrutura, mas também tornar o sistema mais eficiente, confiável e seguro.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo a respeito da viabilidade do ponto de vista da eficiência energética da readequação da central de água gelada do sistema de refrigeração do prédio 1 da unidade da ABB em Sorocaba.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Estudar impactos do ponto de vista energético dos sistemas de refrigeração em edifícios comerciais e residenciais.
- Investigar como os sistemas de refrigeração a *chillers* podem operar visando diminuir o consumo de energia desses sistemas.
- Apresentar como bombas de água gelada acionadas por inversores de frequência podem contribuir para diminuir o consumo de energia em um sistema de refrigeração com *chillers*.
- Apontar possíveis soluções para o sistema de bombeamento de água gelada do sistema de refrigeração da ABB em Sorocaba e determinar a mais eficiente do ponto de vista da eficiência energética.



## 1.2 Estrutura do documento

Este trabalho foi organizado em oito capítulos nos quais são apresentados um panorama geral e os objetivos geral e específicos do projeto que será desenvolvido neste documento. No Capítulo 2 serão apresentadas algumas informações relevantes referente ao panorama energético atual para os sistemas de climatização de uma maneira mais abrangente com o intuito de evidenciar a relevância deste projeto sobre uma ótica macro. Já no Capítulo 3, verificaremos como os sistemas centrais de refrigeração funcionam, quais são os principais equipamentos que compõem esses sistemas, como eles funcionam e também como esses sistemas podem operar visando a otimização do ponto de vista da eficiência energética. No Capítulo 4 direcionaremos nosso estudo aos princípios de funcionamento dos sistemas de bombeamento, que serão essenciais para o desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 5 fará a proposição de possíveis soluções para o problema abordado neste trabalho e descreverá a metodologia que será empregada para determinar a mais eficiente do ponto de vista da eficiência energética. Os Capítulos 6 e 7 apresentarão, respectivamente, os resultados que foram obtidos com o trabalho e algumas análises. O Capítulo 8, por fim, será destinado às conclusões que foram obtidas através do desenvolvimento do trabalho.

## 2 Panorama energético atual

A energia está em toda parte. Atualmente a maioria dos edifícios residenciais urbanos são abastecidos com energia elétrica e água limpa. Máquinas processam, todos os dias, alimentos que chegam às nossas mesas. Além disso, somos capazes de nos transportar como nunca antes. Podemos chegar facilmente ao trabalho, à universidade, ao supermercado ou à outras cidades em questão de minutos. Podemos voar de um continente a outro em questão de horas. Tudo isso é possível graças a energia.

Os avanços tecnológicos, aliados com o fácil acesso à energia, ajudaram a alavancar a renda, a alfabetização e a expectativa de vida das pessoas ao redor do mundo. Esse progresso, no entanto, ainda não chegou em todos os lugares. De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), no ano de 2017, 840 milhões de pessoas do redor do mundo ainda viviam sem acesso à energia elétrica. O órgão estima que em 2030 cerca de 650 milhões de pessoas ainda possam viver sem acesso à energia elétrica [11]. No Brasil, um estudo publicado pelo Instituto Energia e Meio Ambiente (IEMA) estimou que mais de 990 mil brasileiros que vivem na região da Amazônia Legal ainda não possuíam, em 2019, acesso à energia elétrica [12].

A Organização das Nações Unidas (ONU) estima que a população mundial deve aumentar em cerca de 1 bilhão entre os anos de 2017 e 2030, atingindo 8,6 bilhões de pessoas em 2030 e 9,7 bilhões em 2050 [13]. O aumento populacional desafia a sociedade não só a satisfazer as necessidades básicas, mas também a melhorar os padrões de vida em todo o mundo. De acordo com um estudo realizado pela Bloomberg Energy Finance em 2019, se estima que esse desafio exija um aumento de cerca de 62% na demanda de energia elétrica mundial entre os anos de 2020 e 2050. O estudo aponta, ainda, que os veículos elétricos devem ser os maiores responsáveis pelo aumento na demanda energética mundial neste período, adicionando o equivalente a 3.950 TWh à demanda por energia elétrica globalmente neste período [14].

Neste capítulo serão apresentados algumas informações relevantes referente ao panorama de energético atual em sistemas de refrigeração. O objetivo principal consiste em enriquecer o conteúdo deste documento através de dados, evidenciando também a relevância deste projeto sob uma ótica macro. O estudo será conduzido partindo de um panorama mais geral para um panorama mais específico, de forma que na Seção 2.1 serão apresentadas informações a respeito do consumo de energia elétrica no Brasil atualmente. Na Seção 2.2 serão analisadas alguns dados que se referem ao consumo de energia elétrica em edifícios. Na Seção 2.3, por fim, trataremos de dados específicos relativos a sistemas de refrigeração.

## 2.1 Consumo de energia elétrica no Brasil

Apesar de ser classificado como um país em desenvolvimento, o Brasil é uma das maiores economias do mundo e possuía o nono maior Produto Interno Bruto (PIB) em 2018 de acordo com o Banco Mundial. No início de 2020, o Fundo Monetário Internacional (FMI) estimou que o PIB brasileiro pudesse avançar 2,2% no ano de 2020 [15]. Com a recessão causada pelo coronavírus, no entanto, o FMI estimou, em junho de 2020, um encolhimento do PIB do país na ordem de 9,1% em 2020 [16]. Os dados publicados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em setembro de 2020 apontam uma queda de 9,7% do PIB brasileiro no segundo trimestre de 2020 quando comparado ao primeiro [17]. Para 2021, no entanto, as projeções do FMI para o PIB do Brasil são mais otimistas, com um avanço de 3,6% em relação a 2020 [16]. O relatório *The World in 2050*, publicado em 2017 pela PwC, estimou que o Brasil possa se tornar a quinta maior economia do mundo em 2050 [18]. Com o avanço da economia do país é natural esperar que a demanda energética também cresça.

O Plano Decenal de Expansão de Energia, publicado em 2019 pelo Ministério de Minas e Energia, prevê um aumento de 3,6% ao ano na demanda energética do país entre 2020 e 2029, o que representaria um aumento de 2.900 megawatts por ano. O relatório também destaca o protagonismo da oferta interna de energias renováveis neste período e prospecta um crescimento médio anual estimado em 2,9% na demanda de energia elétrica, onde se destacam um crescimento médio de 7% a.a. na oferta de energias renováveis minoritárias, como as energias eólica, solar, biodiesel e lixívia [1]. A Figura 3 apresenta gráficos comparativos relativos a evolução da oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2019 e em 2029.

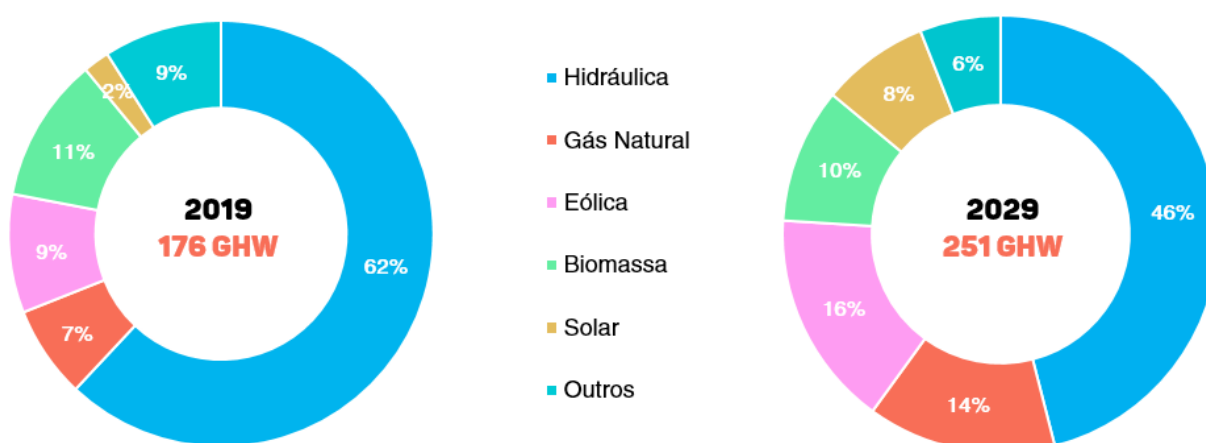


Figura 3 – Evolução da oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil [1].

Atualmente Brasil possui uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica, que corresponde a 67% da oferta interna. Os dados dos gráficos da Figura 3 apontam para a expectativa de uma maior diversificação da matriz

elétrica brasileira ao longo do tempo, com a diminuição na participação das hidrelétricas sendo compensada pelo crescimento da capacidade das fontes eólica e solar. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia, o crescimento da participação de gás natural pode ser interpretado como uma forma de compensar a queda na participação de outras fontes fósseis [1].

Na Figura 4a é apresentado um gráfico contendo um panorama geral da participação de fontes renováveis na matriz de energia elétrica brasileira em comparação com o restante do mundo atualmente. Já na Figura 4b é possível observar o cenário projetado pelo Ministério de Minas e Energia para o decênio 2019-2029.

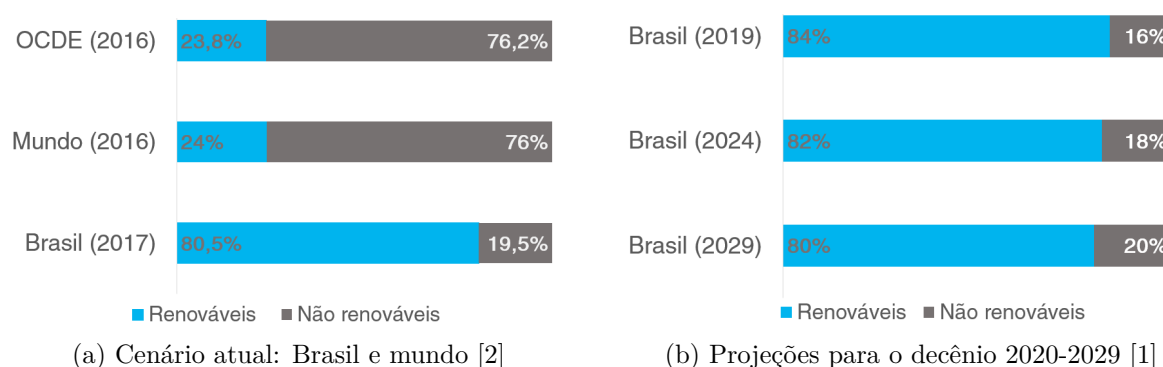


Figura 4 – Participação de fontes renováveis na matriz de energia elétrica brasileira.

De acordo com as informações do Balanço Energético Nacional do ano de 2019, as fontes renováveis representaram 83,3% da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2018, resultante da soma da produção nacional mais as importações, que são essencialmente renováveis [2]. Os dados apresentados no gráfico da Figura 4a indicam que o país caminha na contramão do mundo que, no ano de 2016, ainda possuía apenas 24% de fontes renováveis em suas matrizes energéticas. As projeções, no entanto, indicam uma estimativa de decréscimo da participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira em 4% entre os anos de 2019-2029.

## 2.2 Consumo de energia elétrica em edifícios

Passamos uma boa parte das nossas vidas dentro de edifícios, de forma que esses ambientes podem influenciar diretamente a nossa saúde, bem-estar e produtividade. Uma pesquisa feita nos Estados Unidos indicou que uma grande parte das pessoas não está inteiramente satisfeita com os ambientes que ocupam [19], ainda que estejam em edifícios modernos e altamente tecnológicos [20].

A Construção Civil tem sido duramente criticada nas últimas décadas por ser um dos setores de atividade humana que mais causam impactos ambientais globalmente. Cerca de 30% das emissões de gases de efeito estufa [21], além de cerca de 40% a 50% da poluição

da água no meio ambiente [22] são de responsabilidade do setor. Além disso, a Construção Civil ainda é responsável por 40% do total de resíduos sólidos que são descartados por países desenvolvidos [23].

O conceito de edifícios sustentáveis, também chamados de *green buildings*, tem ganhado especial relevância quando o assunto é minimizar os impactos causados pela Construção Civil e também aumentar a eficiência energética dos edifícios ao longo de suas vidas úteis [24]. O surgimento de novas tecnologias, como a utilização de sensores e atuadores em larga escala, as técnicas de controle avançado e a inteligência artificial têm trazido inovações também para os edifícios. Em geral, os edifícios verdes integram diferentes estratégias em todos os estágios do seu ciclo de vida incluindo localização, projeto, construção, operação, manutenção e até mesmo demolição e tem como objetivo diminuir os impactos ambientais causados pela destinação indevida de resíduos como água, energia e outros recursos naturais [25]. Os prédios têm se tornado, gradualmente, mais inteligentes, automatizados e multifuncionais e, por esse motivo, aspectos como a segurança, saúde, conforto e acessibilidade têm se tornado cada vez mais relevantes [26]. Além disso, o tema tem ganhado relevância diante das estatísticas e projeções para o setor quando o assunto é o consumo de energia elétrica.

Em 2019, a Agência Internacional de Energia (IEA) prospectou um salto no percentual de energia elétrica utilizada por edifícios ao redor do mundo de 33% em 2017 para 55% em 2050 [27]. No Brasil, os dados do Balanço Energético Nacional de 2018 indicam que os edifícios residenciais, comerciais e públicos já consumiam juntos cerca de 51% de toda a energia elétrica primária do Brasil em 2018 [2]. As perspectivas para 2029 levantadas pelo Plano Decenal de Expansão de Energia apontam um cenário estável no médio prazo [1], como pode ser observado nos dados apresentados na Figura 5.

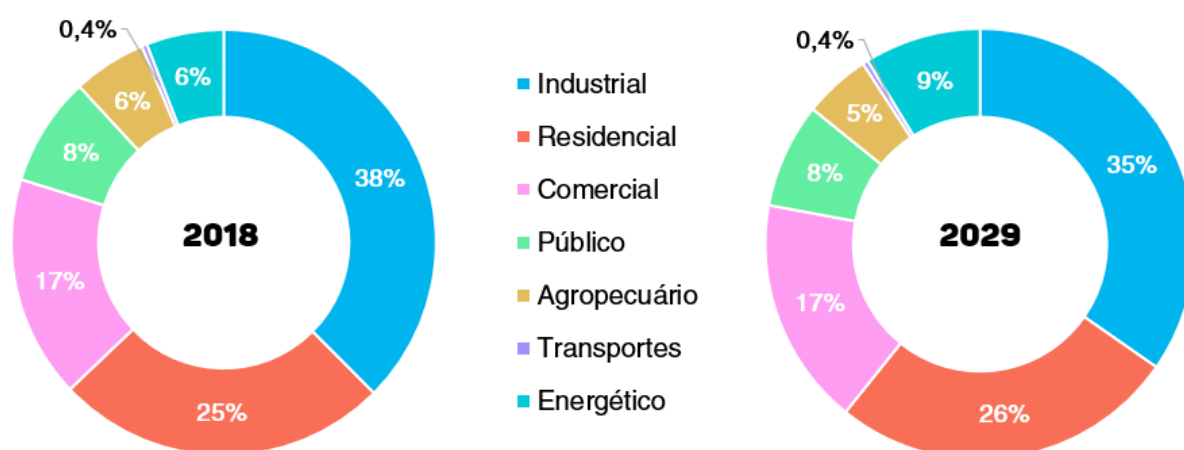


Figura 5 – Evolução da participação setorial no consumo de eletricidade no Brasil em 2018 e 2029 [1] [2].

As principais fontes de energia nos edifícios residenciais no Brasil são a eletricidade e o gás liquefeito de petróleo (GLP). Já nos setores comerciais e públicos o uso predominante

é da energia elétrica [2]. Nos próximos dez anos, espera-se que essas fontes de energia continuem sendo protagonistas no setor das edificações, com destaque para a eletricidade. Em 2029, estima-se que o consumo final de energia elétrica corresponda a cerca de 70% da matriz energética dos edifícios [1]. Os dados da Figura 6 sugerem que o consumo de energia elétrica associado aos principais eletrodomésticos deverá crescer nos próximos anos.

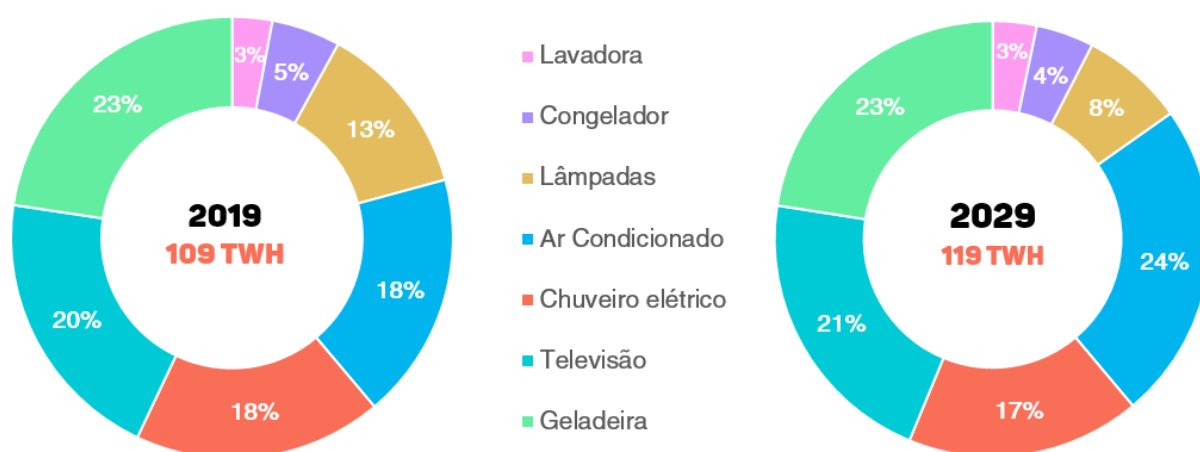


Figura 6 – Evolução do consumo de energia elétrica por equipamento residencial no Brasil em 2019 e em 2029 [1].

Os dados da Figura 6 apontam para um crescimento no consumo de energia elétrica nas residências na ordem de 3,9% ao ano entre 2018 e 2029. As projeções indicam, ainda, que o principal equipamento responsável pelo aumento na demanda de energia elétrica nas residências devem ser os condicionadores de ar, com um crescimento de 3,6% ao ano ao longo do período analisado. A demanda por eletricidade para iluminação, no entanto, deve diminuir como resultado da maior penetração da tecnologia LED (*light-emitting diode*), que apresenta menor consumo específico e maior vida útil quando comparada com as lâmpadas fluorescentes [1].

## 2.3 Consumo de energia elétrica nos sistemas de refrigeração

Os sistemas aquecimento, ventilação e refrigeração, também conhecidos como sistemas HVAC, do inglês *Heating, Ventilation and Air Conditioning*, estão cada vez mais presentes em edifícios de médio e grande porte. Além de controlarem a temperatura dos ambientes internos através do aquecimento ou da refrigeração, esses sistemas também podem ser responsáveis pelo controle de umidade e qualidade do ar nesses locais.

Um estudo publicado em 2012 apontou que os sistemas HVAC consomem, em média, 40% de toda a energia consumida edifícios comerciais, como pode ser observado nos da-

dos apresentados pela Figura 7a [3]. De uma maneira geral, os sistemas de refrigeração possuem um número considerável de motores elétricos. Os motores elétricos são os equipamentos que mais consomem energia elétrica a nível mundial, sendo responsáveis por 46% do total de energia consumida [28] e são utilizados em uma ampla gama de aplicações industriais, comerciais e residenciais [29]. Nos sistemas HVAC, os motores elétricos são utilizado em ventiladores, compressores e bombas [30]. Os ventiladores, responsáveis pela ventilação do ar, consomem cerca de 34% de toda a energia elétrica em um sistema HVAC típico, como pode ser observado nos dados da Figura 7b. Já as bombas, responsáveis pela circulação da água gelada que faz a refrigeração dos ambientes são responsáveis por cerca de 16% de toda a energia elétrica consumida nesses sistemas [3].

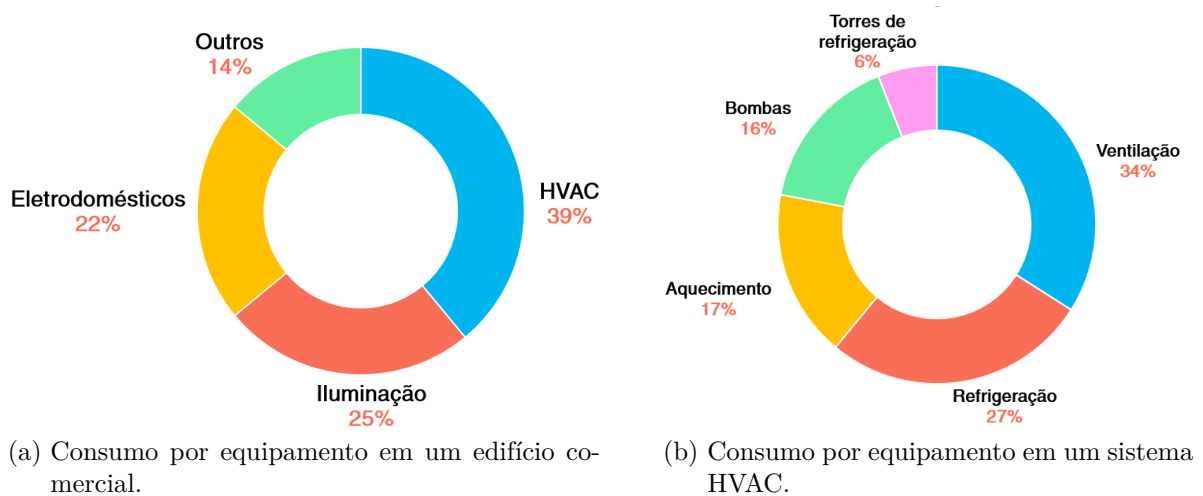


Figura 7 – Consumo de energia em um edifício comercial comum [3].

As preocupações com uma operação eficiente dos sistemas de refrigeração são cada vez mais recorrentes e visam não só evitar desperdícios do ponto de vista da eficiência energética do sistema como um todo, mas torná-los mais confiáveis, melhorando também o conforto e bem-estar das pessoas que ocupam esses espaços. O assunto tem ganhado especial atenção frente a grande demanda mundial de energia elétrica por esses equipamentos e também às projeções para os próximos anos.

O relatório *The Future of Cooling*, publicado pela Agência Internacional de Energia (AIE) em 2018, aponta que equipamentos de condicionadores de ar e ventiladores elétricos consumiam, juntos, cerca de 10% de toda energia utilizada no mundo em 2018. De acordo com o documento, esses equipamentos ainda estão concentrados em poucos países, de forma que grande parte das famílias ainda não adquiriu seu primeiro condicionador de ar, como pode ser observado nos dados apresentados na Figura 8 [4].

O aumento populacional, especialmente nas regiões tropicais, tem tornado o uso desses equipamentos cada vez mais comuns, de forma que a AIE estime que, nos próximos trinta anos, eles se tornem um dos maiores consumidores da demanda de eletricidade mundial. Até 2050, se espera de cerca de  $\frac{2}{3}$  das casas ao redor do mundo possuam ao menos um

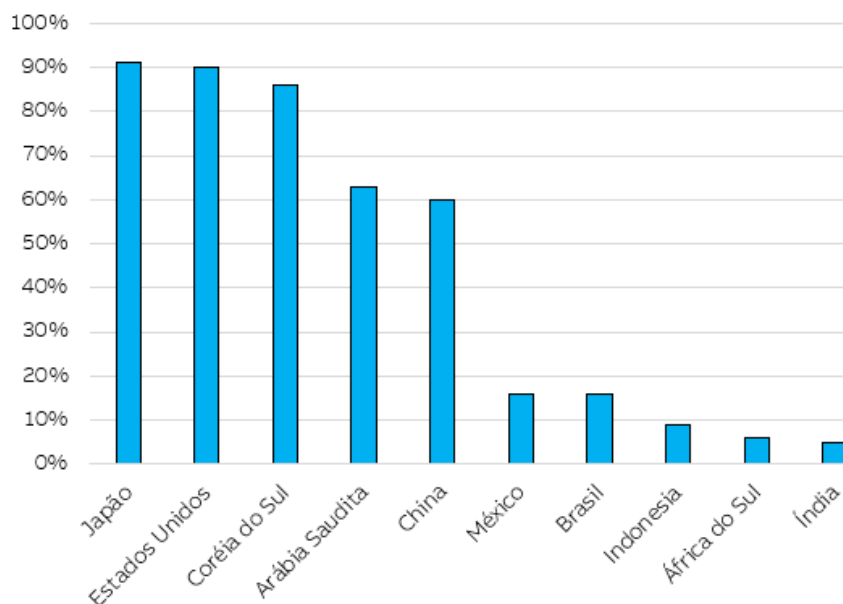


Figura 8 – Percentual de residências equipadas com ar condicionado em países selecionados em 2018 [4].

equipamento ar-condicionado [4]. Para o Brasil, como discutido na Seção 2.1, se espera um crescimento de cerca de 3,6% ao ano no consumo de energia elétrica por equipamentos acondicionadores de ar entre os anos de 2018 e 2029. O Plano Decenal de Expansão de Energia atribui essas estimativas às projeções de aumento do poder aquisitivo das famílias brasileiras neste período, o que facilitará o acesso da população a equipamentos acondicionadores de ar neste período [1].

O diretor executivo da Agência Internacional de Energia (AIE), Fatih Birol, declarou em 2018 que a crescente demanda por acondicionadores de ar é um dos maiores e mais importantes assuntos em discussão no cenário energético atualmente. Para ele, a adoção em larga escala, por parte das legislações nacionais, de padrões de eficiência energética mais rígidos para fabricantes desses equipamentos é uma das maneiras mais rápidas e práticas de evitar a necessidade de instalação de novas usinas para a geração de energia elétrica e, como consequência, reduzir também os impactos ambientais e custos desnecessários [4].

A AIE estima que sem legislação adequada para a eficiência energética, a demanda por energia elétrica em acondicionadores de ar deve mais que triplicar até 2050, de forma que esses equipamentos consumam o equivalente em energia elétrica que a China e a Índia juntas atualmente. A adoção de políticas de eficiência energética em larga escala podem reverter essas projeções, sendo capazes de dobrar a eficiência média de equipamentos de ar-condicionado e reduzir a demanda energética por sistemas de refrigeração em até 45% em 2050. Essas medidas poderiam evitar gastos com investimentos na geração de energia elétrica e manutenções na ordem de 3 trilhões USD entre 2018 e 2050 [4].



### 3 Fundamentos de Sistemas HVAC

É cada vez mais comum que edifícios comerciais e industriais de médio e grande porte possuam sistemas centrais de refrigeração, também chamados de sistemas HVAC. Esses sistemas são responsáveis por prover ar refrigerado aos ambientes internos desses edifícios, proporcionando também mais conforto e segurança às pessoas que trabalham nesses locais. Diversos estudos já apontaram que as condições dos nossos ambientes de trabalho podem influenciar diretamente a nossa saúde, comportamento e produtividade. A qualidade e temperatura do ar são dois fatores determinantes para o nosso conforto. O ar deve estar limpo, inodoro e fatores como a temperatura, circulação e umidade do ar devem estar dentro de certos padrões.

Nos Estados Unidos, uma norma publicada pela Associação Americana de Engenheiros de sistemas HVAC estabeleceu que a temperatura interna dos ambientes deve estar entre  $20^{\circ}\text{C}$  e  $24^{\circ}\text{C}$  no inverno e  $22^{\circ}\text{C}$  e  $26^{\circ}\text{C}$  no verão para que seja considerado confortável para a maioria das pessoas das pessoas. Além disso, a norma ainda estabelece que a umidade relativa do ar deve ser de aproximadamente 50% e a velocidade do ar não deve ser superior que  $0,15\text{m/s}$  [31].

Um sistema HVAC central é composto por um grupo de equipamentos que trabalham juntos para mover o calor para dentro ou fora dos edifícios, dependendo se é necessário aquecer ou resfriar os ambientes internos. No caso de um sistema de refrigeração por água gelada, como o apresentado na Figura 9, há uma casa de máquinas chamada Central de Água Gelada (CAG), onde uma ou mais máquinas frigoríficas, chamadas também de *chillers*, nomenclatura em inglês, no ramo da refrigeração fazem a refrigeração da água. As bombas fazem com que a água gelada flua através de uma tubulação específica para as unidades de tratamento de ar (UTA); nesses equipamentos, a água gelada troca calor com o ar do ambiente refrigerado e retorna mais quente para os *chillers*, onde o ciclo recomeça [32].

Juntamente com os *chillers* trabalham as torres de refrigeração, que são responsáveis por resfriar a água utilizada para a condensação do fluido refrigerante que circula dentro das máquinas frigoríficas. Para executar a circulação da água entre os *chillers* e as torres, se utiliza um conjunto de bombas chamadas de bombas de água condensada [32].

Como pode ser observado no esquema da Figura 9, os sistemas de refrigeração a *chillers* são compostos basicamente por:

1. Torre de refrigeração: Dispositivo de remoção de calor usado para fazer a transferência do calor do processo para a atmosfera.
2. *Chiller*: Máquina térmica que possui a finalidade de fazer a refrigeração do ar, produtos ou equipamentos de acordo com a aplicação em que são utilizados.

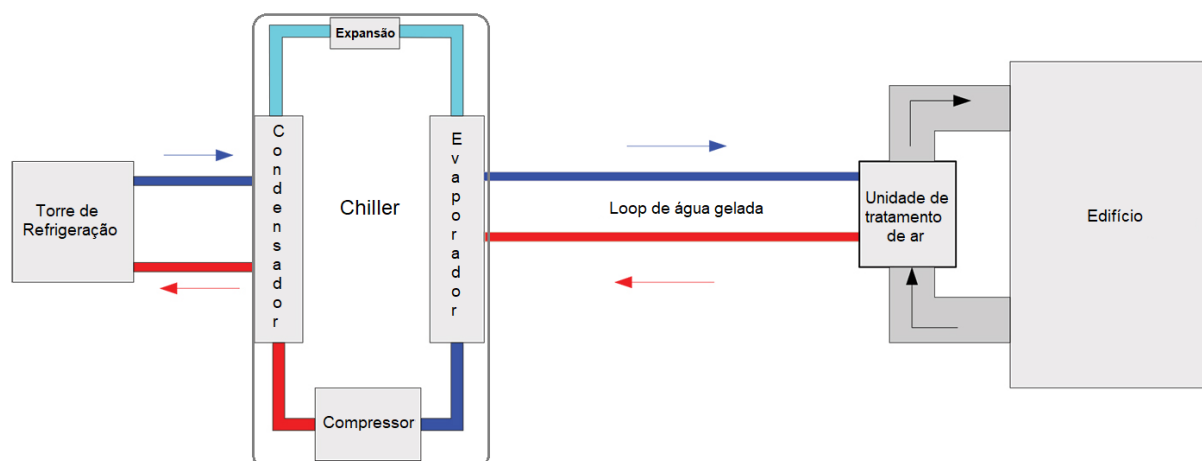


Figura 9 – Componentes do ciclo de refrigeração de um chiller refrigerado a ar [5].

3. Unidades de tratamento de ar (UTAs): Dispositivo utilizados para condicionamento e circulação do ar pelos ambientes.
4. Bombas: Equipamento que adiciona energia aos líquidos, tomando energia mecânica de um eixo, de uma haste ou de um outro fluido. Nos sistemas de refrigeração são responsáveis por fazer com que a água flua através do sistema como um todo.

Na Seção 3.1 exploraremos, com mais detalhes, os princípios de funcionamento dos *chillers*, sua classificação e também os principais indicadores de performance energética desses equipamentos. Os princípios de funcionamento das torres de refrigeração e das unidades de tratamento de ar serão apresentados, respectivamente, nas Seções 3.2 e 3.3. Neste trabalho desenvolveremos um estudo de eficiência energética no sistema de bombeamento de água gelada e, por esse motivo, os princípios que norteiam a operação das bombas serão apresentados e discutidos de maneira mais aprofundada na Seção 4.

### 3.1 *Chillers*

Os *chillers* são máquinas térmicas que possuem como finalidade resfriar a água. A água gelada produzida por esses equipamentos é utilizada com o objetivo de resfriar o ar, produtos ou outros equipamentos. Junto aos outros equipamentos que compõem os sistemas HVAC, o *chiller* proporciona a climatização dos ambientes e permite também o controle não só da temperatura, como também da umidade relativa, da filtragem, da renovação e da movimentação do ar [33]. Na Figura 10 é possível observar um *chiller* de condensação a ar.

Nesta seção serão abordados alguns dos princípios fundamentais dos *chillers*. O objetivo é prover o leitor com algumas informações essenciais a respeito do funcionamento desses equipamentos, de suas principais características e também de alguns aspectos que se referem à sua performance. Assim, na Subseção 3.1.1 discutiremos os princípios físicos

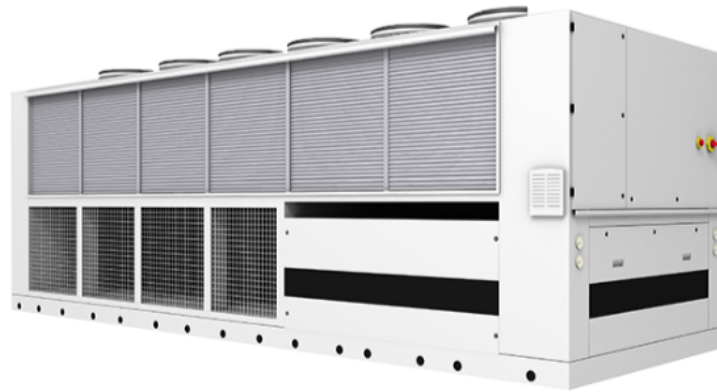


Figura 10 – *Chiller* de condensação a ar [5].

de funcionamento dessas máquinas. Já na Subseção 3.1.2 trataremos da classificação dos principais tipos de *chillers* que estão disponíveis no mercado.

### 3.1.1 Princípio de funcionamento

De forma geral, os *chillers* são compostos por quatro componentes básicos: Um compressor, um condensador, um dispositivo de expansão e um evaporador [33] e seu funcionamento se baseia no ciclo de Carnot. A Figura 11a apresenta o esquema de funcionamento de um *chiller* centrífugo de condensação a água, ao passo que na Figura 11b pode-se observar o diagrama pressão-entalpia (P-H). Note que em ambas as figuras, estão evidenciados alguns pontos de interesse (1, 2, 3 e A).

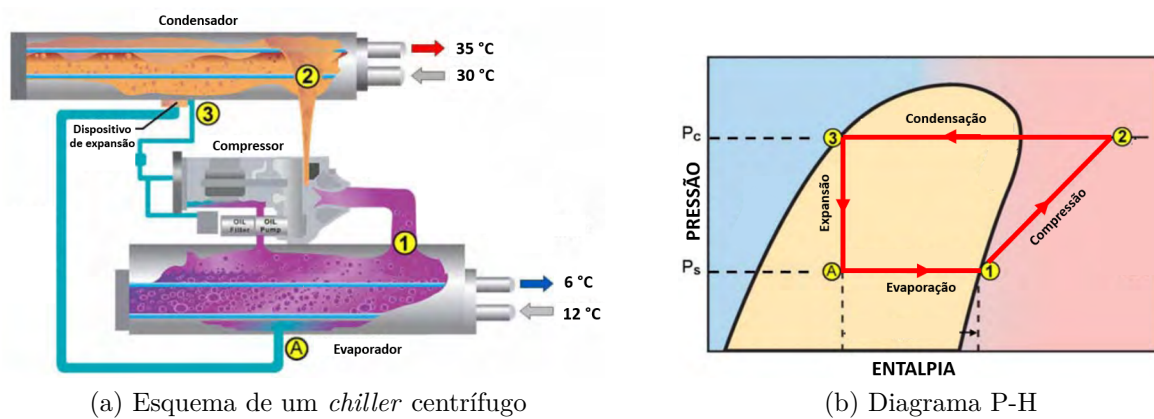


Figura 11 – Princípio básico de funcionamento dos *chillers* [6].

Um gás de baixa temperatura e pressão entra no compressor (1). O compressor é alimentado por uma força mecânica externa, tipicamente um motor elétrico, e aumenta a pressão do gás, aumentando também sua temperatura. O gás se torna, então, um vapor superaquecido de alta pressão e temperatura (2) e passa por um trocador de calor (condensador), transferindo calor para um meio externo, tipicamente o ar ou a água, que reduz a temperatura do gás, o transformando em líquido (3). O líquido quente sai do

condensador e passa por um dispositivo de expansão, que reduz sua pressão. O gás, com pouca pressão e temperatura, passa então pelo evaporador (A), absorvendo calor da água e retornando para o ponto inicial do ciclo [6] [34].

As principais diferenças que podem ser encontradas nos ciclos de resfriamento reais em relação aos teóricos são: as perdas de carga no condensador e no evaporador, o superaquecimento do vapor na aspiração do compressor, o sub-resfriamento do líquido que deixa o condensador e a compressão não isoentrópica demonstrando ineficiência devido a perdas [35].

### 3.1.2 Classificação

Os sistemas de refrigeração com *chillers* podem ser divididos em dois grupos básicos: os *chillers* de absorção e os *chillers* de compressão a vapor. Os *chillers* que possuem sistemas de compressão a vapor são os mais comuns e, de forma geral, utilizam um compressor mecânico acionado por um motor elétrico para aumentar a pressão em determinada fase do ciclo termodinâmico do sistema [34]. Já os *chillers* de absorção produzem água gelada a partir de uma fonte de calor, em um processo termoquímico de absorção [36]. Neste estudo nos ateremos em detalhes ao princípio de funcionamento dos *chillers* de compressão a vapor, que foi descrito na Seção 3.1.1, já que o sistema que estamos estudando é composto por dois resfriadores deste tipo.

Para selecionar o melhor tipo de *chiller* para uma aplicação é muito importante considerar a eficiência e os custos ao longo da vida útil desse tipo de sistema. De uma maneira geral, a troca de calor em *chillers* pode ser feita através de dois meios distintos: o ar ou a água. Os *chillers* refrigerados a água bombeiam a água por um condensador selado e a dispersam através de uma torre de refrigeração. Já os *chillers* refrigerados a ar utilizam ventiladores para ejetar o ar através do condensador [3].

Por não requirirem torres de condensação, os *chillers* refrigerados a ar normalmente apresentam custos menores de manutenção e instalação que os *chillers* refrigerados a água [5]. As bombas de condensação de água e os diversos tratamentos químicos que são requeridos pelo condensador nos sistemas refrigerados a água acabam aumentando significativamente o custo de manutenção desse tipo de sistema. Por outro lado, os *chillers* de condensação a água são mais eficientes e, conseqüentemente, possuem custos operacionais menores [33].

De uma maneira geral, os *chillers* refrigerados a ar são escolhidos quando não é viável utilizar uma torre de resfriamento, pouca água está disponível ou a água disponível é corrosiva. Aplicações mais comuns desse tipo de *chiller* incluem universidades, hospitais e escritórios [5]. Como o sistema que estamos estudando é composto por dois *chillers* de condensação a ar, daremos enfoque maior ao funcionamento desses equipamentos. Na Figura 12 é possível observar um esquema contendo os principais componentes de um

*chiller* de condensação a ar.

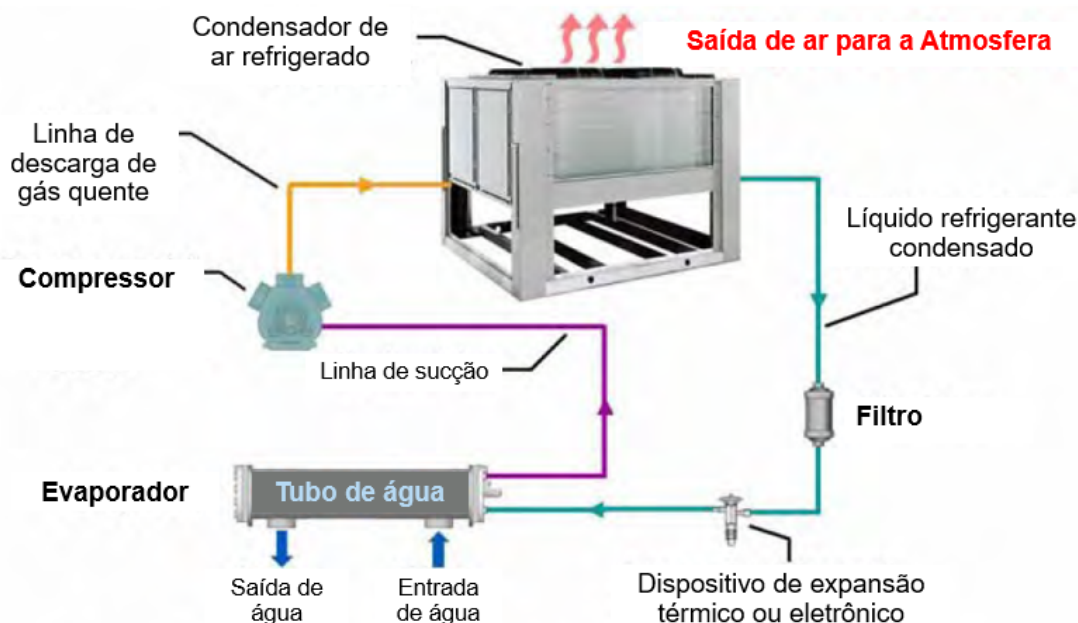


Figura 12 – Componentes do ciclo de refrigeração de um chiller refrigerado a ar [5].

No ciclo de refrigeração de um *chiller* de condensação a ar, a água que entra no evaporador é resfriada por um líquido refrigerante e bombeada para o prédio. O processo no evaporador é completado quando a água, já quente, retorna para o sistema. Ainda no evaporador, uma parte do calor da água quente é absorvida e aquecida até que, finalmente, sai do evaporador em forma de vapor. Esse fluido entra então em uma linha de sucção até chegar no compressor. No compressor, o líquido é comprimido, aumentando sua pressão e temperatura. Quando vapor sai do compressor, já com alta temperatura e pressão, passa por uma linha de descarga e entra no condensador. No condensador, o gás é condensado até se transformar em líquido nos tubos e o excesso de calor é eliminado para a atmosfera utilizando ventiladores. Quando o fluido sai do condensador, entra então por um dispositivo de expansão. Conforme o fluido passa pelo dispositivo de expansão, sua pressão e temperatura são diminuídas até que o vapor comece a se transformar em líquido. Após sair do dispositivo de expansão, o volta para o evaporador e o ciclo começa a se repetir [5].

Os *chillers* podem ser classificados de acordo com o tipo de compressor que utilizam. Nos sistemas de refrigeração, os compressores são dispositivos responsáveis por comprimir o fluido refrigerante, diminuindo seu volume e aumentando sua pressão e temperatura proporcionando, assim, o fluxo do fluido refrigerante através dos equipamentos do sistema. Os *chillers* podem possuir compressores dos tipos rotativo, parafuso, alternativo, *scroll* ou centrífugos [34]. Os *chillers* centrífugos são, tipicamente, mais eficientes e melhores no quesito performance [36]. Mais informações a respeito de compressores podem ser encontradas na literatura específica desses equipamentos [37].

## 3.2 Torres de refrigeração

As torres de refrigeração, também chamadas de torres de resfriamento, são equipamentos usados para dissipar calor de um determinado processo. De uma maneira geral, são aplicadas em processos nos quais grandes quantidades de calor devem ser removidas para que os parâmetros se mantenham dentro do esperado. Algumas aplicações comuns são unidades de geração de energia elétrica, processos industriais, plantas de ar condicionado e refrigeração de água [38]. A Figura 13 apresenta uma torre de refrigeração de água típica.

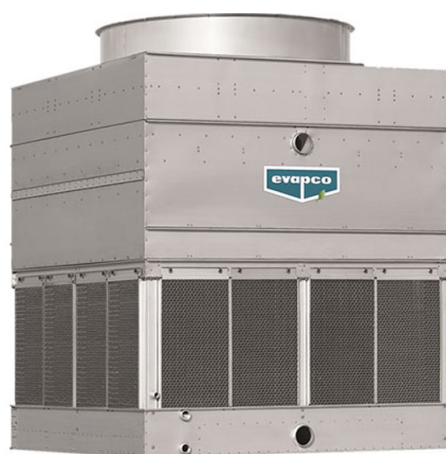


Figura 13 – Torre de resfriamento de água.<sup>1</sup>

Com as crescentes preocupações ambientais, as torres de refrigeração de água passaram a ser adaptadas para que colaborassem com o uso consciente de água. Assim, esses equipamentos estão sendo, cada vez mais, adaptados para que sejam capazes de integrar um circuito fechado para que sejam mais viáveis do ponto de vista ambiental e automatizados para aumentar também a viabilidade econômica [39].

Segundo a *Global Industry Analysts, Inc*, o mercado de torres de refrigeração movimentou cerca de 2 bilhões de dólares no ano de 2018 e deve crescer cerca de 4% até 2025. O estudo aponta que o principal fator que contribuirá para a movimentação deste mercado entre os anos de 2019 e 2025 são as expectativas de aumento no uso de sistemas HVAC nos estabelecimentos comerciais e também o aumento de investimentos nas indústrias de processos para esse período. Além disso, as políticas governamentais em prol de tecnologias menos poluentes também devem favorecer a penetração desses produtos nos mercados [40].

<sup>1</sup> Fonte: <https://www.evapco.com.br/pt-br>.

### 3.3 Unidades de tratamento de ar

As unidades de tratamento de ar (UTA) ou, em inglês, *fan-coils*, são os equipamentos primários dos sistemas HVAC de água gelada. São assim chamados por serem compostos basicamente por um ventilador (*fan*) e uma serpentina (*coil*), como pode ser observado na Figura 14. É através desses equipamentos que, ao se misturarem com o ar exterior na quantidade correta, chega-se a temperatura e umidade ideal para o ar que será distribuído pelo edifício [32].



Figura 14 – Unidade de tratamento de ar.<sup>2</sup>

Esses equipamentos são compostos por uma caixa misturadora que combina o ar de retorno e o exterior, um ventilador que é movimentado por um motor elétrico, uma serpentina de onde vem a água que foi refrigerada pelo *chiller*, um elemento filtrante e um *dumper* para controlar a vazão. Em geral, as UTAs são fabricadas em módulos para que componentes possam ser adicionados ou retirados de acordo com as necessidades da aplicação [32].

### 3.4 Eficiência energética em sistemas de climatização

Quando o assunto é eficiência energética nos sistemas de climatização, é muito comum encontrar informações a respeito de como aprimorar a eficiência nos *chillers*. É

<sup>2</sup> Fonte: <https://www.medicalexpo.com/pt/>.

importante ressaltar, no entanto, que os sistemas de refrigeração a *chillers* são compostos também por bombas, torres de resfriamento, unidades de tratamento de ar (UTAs) e até mesmo sistemas de automação e que, para atingir melhores resultados em termos de eficiência energética, é muito importante levar em consideração o conjunto de todos esses equipamentos e não apenas um componente de forma individual [41].

Um sistema de climatização pode ser considerado eficiente quando atende todas as necessidades do projeto com a menor quantidade de perdas que for possível [36]. Assim, no momento em que esses sistemas são dimensionados, é importante que se leve em consideração não somente a carga total do sistema, mas também as condições de carga parcial, nas quais o sistema vai operar na maior parte do tempo. Para dimensionar esses sistemas da forma mais correta possível, deve-se levar em consideração o tamanho do sistema, o tipo de edifício, a variação de carga e também as condições de operação do sistema [3] [41].

Já nos sistemas que já estão em operação, diversas técnicas podem ser adotadas para aumentar a eficiência energética do sistema como um todo. Uma das estratégias mais comuns consiste em reajustar a temperatura de saída de água gelada nos *chillers*. De uma maneira geral, a temperatura de saída da água gelada nos *chillers* é fixa e configurada para operar em torno de  $6^{\circ}\text{C}$ . O reajuste da temperatura da água gelada permite que a temperatura seja aumentada para otimizar o sistema quando estiver operando com carga parcial. Com isso, é possível reduzir a quantidade de trabalho realizado pelo compressor dos *chillers*. É importante notar que, para atender a nova carga de resfriamento, é provável que as bombas de água gelada do sistema aumentem a velocidade a fim de atender a carga de resfriamento. Nesse caso, o ponto ideal deve ser calculado para garantir que o aumento de potência de bombeamento não compense a economia do *chiller* [42].

Os *chillers* são, em geral, os maiores consumidores de energia elétrica nos sistemas centrais de climatização e possuem, em média, um tempo de vida operacional que varia entre 15 e 25 anos. Critérios como as condições, criticidade e confiabilidade desempenham um papel importante na decisão de substituir esses resfriadores. A substituição de um *chiller* existente por um equipamento mais novo com melhor eficiência energética é capaz de reduzir o consumo de energia da planta em cerca de 30% a 40% [42].

Outra técnica muito usada para aprimorar a eficiência energética dos sistemas HVAC, consiste na utilização de inversores de frequência para a variação de velocidade dos motores que são acoplados aos ventiladores da torre de resfriamento e às bombas de água gelada e de condensação. Embora esses equipamentos não façam parte do *chiller*, eles são parte do sistema e a maneira com a qual eles funcionam afeta diretamente o desempenho do *chiller*. De uma maneira geral, esses equipamentos são superdimensionados em 5% a 20% e a adição de inversores de frequência permite que operem de maneira otimizada [34] [43]. No Capítulo 4 estudaremos, com mais detalhes, como os sistemas de bombeamento operam e algumas técnicas para aumentar a eficiência energética desses sistemas.



Além das estratégias descritas anteriormente, também é possível instalar um sistema de automação com o intuito de aumentar a eficiência energética do sistema. Os sistemas de automação podem assegurar que a rotina de trabalho seja mais eficiente em função da curva de cada item do sistema. A depender da proposta do sistema, é possível implementar, através da automação, rotinas que identificam tendências de utilização de cada parte do sistema e determinam, por exemplo, qual é o melhor momento de ligar e desligar os equipamentos do sistema. Estudos apontam que a implementação de sistemas de automação podem reduzir em média 20 a 30% do consumo de energia total das plantas de refrigeração [43].

## 4 Sistemas de Bombeamento

Uma bomba é um equipamento capaz de transferir energia de uma fonte para um fluido, assim esse fluido pode realizar trabalho. As bombas mais comumente utilizadas em sistemas de climatização são as bombas centrífugas. Esses equipamentos podem operar a uma velocidade constante e produzir vazões que vão de zero a um valor máximo, dependendo do projeto da bomba.

Os sistemas de bombeamento são compostos por um conjunto de bombas e são responsáveis por fazer com que um fluido seja deslocado de um ponto a outro do sistema. Em geral, esses sistemas são compostos por três elementos: motores elétricos, bombas hidráulicas e a tubulação, conforme esquematizado na Figura 15. As bombas hidráulicas fornecem energia a um fluido para que ele exerça trabalho e escoe pelo sistema através da tubulação. Isso ocorre através da transferência de energia de uma fonte mecânica, geralmente um motor elétrico, para a bomba, que a converte em energia cinética.

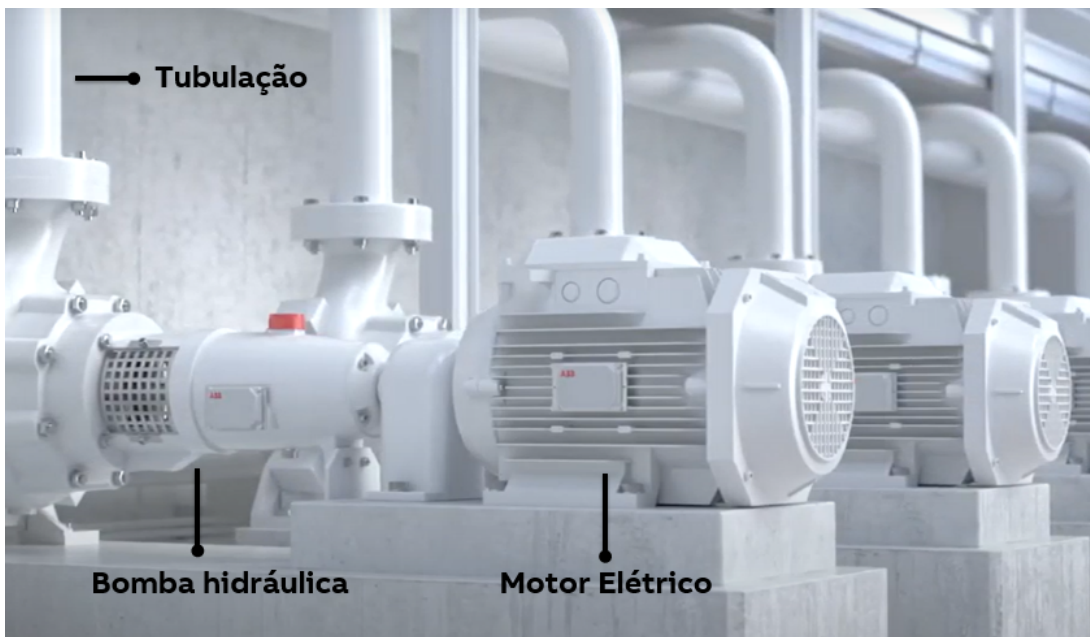


Figura 15 – Sistema de bombeamento.<sup>1</sup>

Os sistemas de bombeamento são utilizados em aplicações como saneamento, irrigação, sistemas de climatização, tratamento de água, indústrias químicas, petroquímicas, açucareiras, destilarias, entre outras. Nos sistemas HVAC, as bombas são utilizadas para fazer com que a água seja transportada dos *chillers* para as torres de refrigeração, onde é feita a troca de calor, e também dos *chillers* pela tubulação do edifício para climatizar os ambientes.

---

<sup>1</sup> Adaptado de: ABB.

Nesta seção estudaremos como esses sistemas funcionam e como podem ter seu desempenho otimizado. O conjunto composto pelo motor elétrico e pela bomba hidráulica é chamado também de conjunto motobomba e seu funcionamento será explorado com mais detalhes nas Subseções 4.1 e 4.2. Já na Subseção 4.3 abordaremos como o desempenho desses sistemas pode ser otimizado do ponto de vista da eficiência energética.

## 4.1 Motores de Indução Trifásicos

Os motores de indução trifásicos são máquinas elétricas que convertem energia elétrica em mecânica. As principais partes de um motor de indução são o estator e o rotor. Através de uma tensão alternada aplicada aos enrolamentos do estator, uma tensão será induzida nos enrolamentos do rotor. Na Figura 16 é possível observar o diagrama de um motor de indução trifásico em corte.

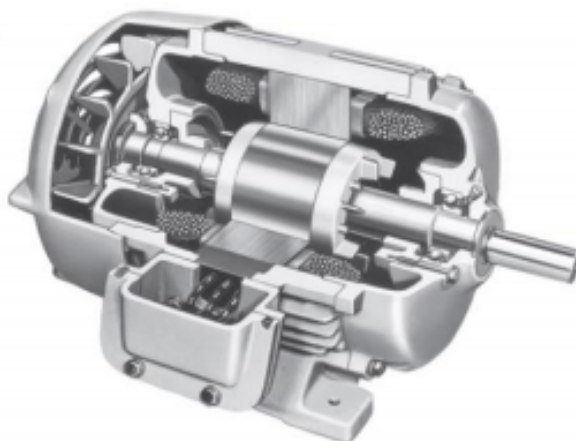


Figura 16 – Diagrama motor de indução trifásico em corte [7].

Os motores de indução trifásicos com rotor gaiola de esquila, também chamados de motores assíncronos, são os mais utilizados nas aplicações industriais e são aplicados em setores como a mineração, papel e celulose, saneamento, óleo e gás, cimento, entre outros. Esses equipamentos representam mais de 85% de todos os motores instalados em indústrias e, por esse motivo, seu controle se tornou objeto de muitas pesquisas. Esses equipamentos são empregados em praticamente todas as aplicações industriais por serem mais econômicos do que outros tipos de motores [8].

Os motores síncronos são assim denominados porque sua velocidade está sincronizada com a frequência da rede de alimentação [44]. Quanto maior for a frequência, maior também será a rotação e vice-versa, conforme demonstrado pela equação (4.1), onde  $n_R$  corresponde à velocidade de rotação do eixo do motor, em rpm;  $f$  à frequência de acionamento do motor, em Hz;  $p$  ao número de polos do motor; e  $s$  ao escorregamento do

motor [7].

$$n_R = \frac{120 \cdot f}{p} \cdot (1 - s) \quad (4.1)$$

O rendimento de motores elétricos ( $\eta_m$ ) se refere à quantidade percentual de energia elétrica consumida ( $P_e$ ) foi efetivamente convertida em energia mecânica ( $P_m$ ) no eixo do rotor. O rendimento do motor é pode ser descrito pela Equação (4.2).

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_e} \quad (4.2)$$

As perdas em motores elétricos podem ser divididas em quatro categorias: As perdas elétricas (ou perdas no cobre), as perdas no núcleo, as perdas mecânicas e as perdas suplementares [7]. Mais informações a respeito do funcionamento dos motores elétricos pode ser encontrada na literatura específica desses equipamentos.

A Figura 17 apresenta um exemplo de curva de rendimento típica de um motor elétrico. É possível observar, na imagem, que, quando o motor está operando com uma carga inferior aos valores nominais, o seu rendimento também será baixo. Isso ocorre devido às perdas fixas e à potência dispendida que acabam sendo maiores que a potência mecânica fornecida ao eixo. Com a elevação da carga, o rendimento tende a se aproximar dos valores nominais.

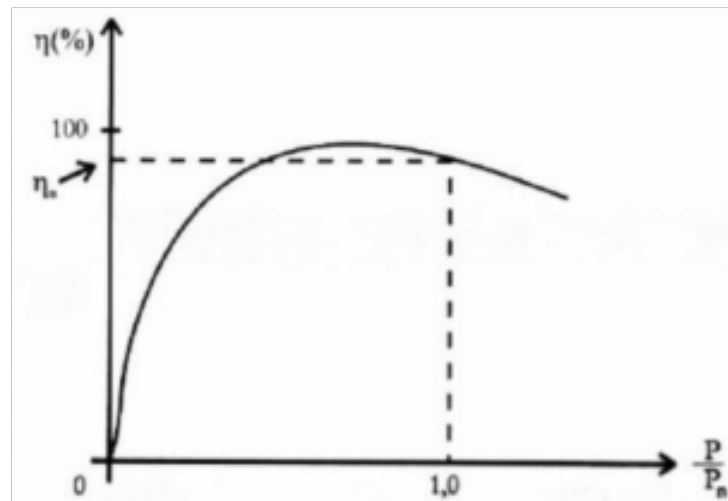


Figura 17 – Curva típica de rendimento de um motor de indução. [8]

No Brasil, os motores elétricos são responsáveis pelo consumo de 70% da energia elétrica utilizada na indústria [2]. Em 2013, a Norma NBR 17094-1, que especifica valores mínimos de rendimentos para motores elétricos comercializados no país, foi revisada e definiu valores mínimos de rendimento para duas classes de equipamentos: IR2 e IR3. Em agosto de 2019, uma nova lei entrou em vigor, determinando a comercialização de motores com nível mínimo de rendimento IR3. Com essa revisão, o Brasil passa ser um dos pioneiros da adoção de um nível mínimo de rendimento para motores trifásicos, junto

aos Estados Unidos e Canadá. Essas exigências, apesar de positivas, não abrangem a base já instalada no país.

## 4.2 Bombas centrífugas

A bomba é um equipamento acoplada a um motor elétrico e tem a função de extrair a energia mecânica do eixo do motor e ceder, em forma de energia hidráulica, à água. Neste processo, no entanto, existem algumas perdas e é muito importante estar atento às características de rendimento da bomba para assegurar a melhor performance possível do sistema. O rendimento da bomba ( $\eta_b$ ) é expresso pela relação entre a potência hidráulica ( $P_h$ ), dada em watts, e a potência mecânica  $P_m$ , também em watts, como expresso pela Equação (4.3).

$$\eta_b = \frac{P_h}{P_m} \quad (4.3)$$

A potência hidráulica ( $P_h$ ) pode ser determinada através da Equação (4.4), onde  $\gamma$  é o peso específico da água, dado em  $N/m^3$ ,  $Q$  é a vazão, em  $m^3$  e  $H$  a altura manométrica, em mca.

$$P_h = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{270} \quad (4.4)$$

As leis da semelhança são amplamente utilizadas para determinar o efeito da variação da rotação para a vazão, altura e potência de bombas e estabelecem as relações expressas pelas Equações (4.5), (4.6) e (4.7).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.5)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (4.6)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (4.7)$$

onde  $N_1$  e  $N_2$  correspondem à velocidade de rotação da bomba,  $Q_1$  e  $Q_2$  à vazão relativa a rotação da bomba,  $H_1$  e  $H_2$  à altura manométrica total relativa a rotação da bomba e  $P_1$  e  $P_2$  à potência consumida relativa a rotação da bomba.

A Figura 18 apresenta um estudo das leis de semelhança em um sistema cuja bomba varia suas características através da variação da sua velocidade de rotação. Nessa figura, é possível observar a intersecção das curvas características da bomba com as curvas características do sistema para as rotações  $N_1$ ,  $N_2$  e  $N_3$ , resultando nos pontos  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$  [9] [10].

O estudo aponta que o rendimento da bomba ( $\eta_b$ ) tende a decrescer com o a diminuição da rotação, mas em uma faixa de  $\pm 20\%$  da rotação inicial praticamente não são observadas alterações significativas no rendimento das bombas. As relações quadráticas e cúbicas da altura manométrica e da potência consumida pelo sistema implicam que em pequenas mudanças na velocidade do eixo da bomba geram significativas mudanças nesses parâmetros [9] [10].

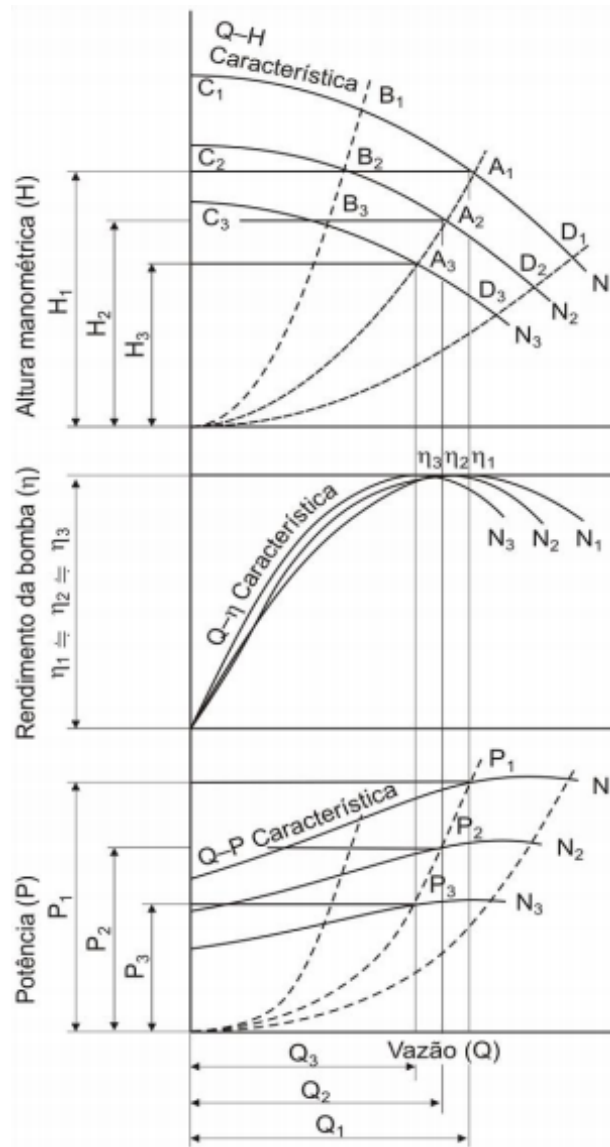


Figura 18 – Relações características de bombas centrífugas [9] [10].

A Figura 19 apresenta a curva do rendimento da bomba ( $\eta_b$ ) em função da vazão  $Q$  extraída do manual de uma bomba centrífuga de alta pressão. Através das curvas do rendimento da bomba em função da vazão, é possível determinar de maneira intuitiva o ponto ótimo de operação desses equipamentos, obtendo assim melhores performances para as bombas e o sistema.

<sup>2</sup> Fonte: Manual de bombas da linha KSB WKL.

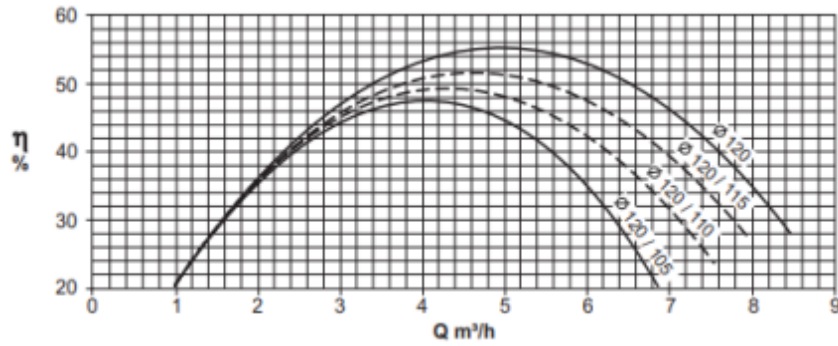


Figura 19 – Curva  $\eta_b \times Q$  de bombas da linha KSB WKL <sup>2</sup>

O rendimento do conjunto moto-bomba pode ser determinado através do produto entre os rendimentos do motor elétrico ( $\eta_m$ ) e da bomba ( $\eta_b$ ), expresso pela Equação (4.8), onde  $P_m$  é a potência do motor, dada em watts,  $P_h$  a potência hidráulica, expressa em watts e  $P_e$  a potência de entrada de ambos, também em watts.

$$\eta_m \cdot \eta_b = \frac{P_h}{P_e} \quad (4.8)$$

### 4.3 Métodos de controle de vazão

Em aplicações nas quais existe alguma variação na vazão demandada ao sistema de bombeamento, como é o caso dos sistemas HVAC, é comum que seja utilizado algum tipo de controle de vazão entregue pelas bombas. Nesta seção estudaremos alguns métodos comumente utilizados para controlar a vazão sem sistemas de bombeamento de água e sua relação com a eficiência energética do sistema.

A variação da demanda do sistema, ao longo do dia, provoca a variação da vazão de fluido que é bombeado através do sistema, o que faz com que a energia gasta seja maior em momentos nos quais uma maior vazão é demandada e menor quando não é necessário utilizar todo o potencial do sistema. Com a bomba operando em velocidade fixa, o motor trabalhará com potência consideravelmente superior à requerida, ocasionando gastos desnecessários com energia elétrica e pressões elevadas na rede de abastecimento que podem ocasionar vazamentos na tubulação.

#### 4.3.1 Estrangulamento por válvula

O controle de vazão por estrangulamento de válvula é um dos métodos mais utilizados, principalmente nas bombas de pequeno porte [8]. Uma válvula é inserida na tubulação, como esquematizado na Figura 20, e quando fechada, diminui o diâmetro da tubulação e a vazão do sistema. Por consequência, a operação da bomba é alterada.

Na Figura 20 é possível observar a redução da vazão de  $Q_1$  para  $Q_2$  pelo aumento da altura manométrica que foi provocada pelo estrangulamento da válvula. A vazão mínima

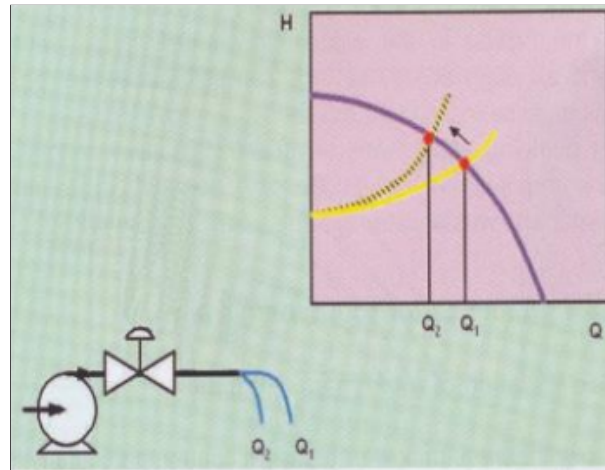


Figura 20 – Controle de vazão por estrangulamento de válvula. [8]

deve ser limitada a valores que não ultrapassem o limite de 25% a 30% da vazão do ponto de operação com rendimento ótimo em rotação máxima. Reduções excessivas na vazão podem provocar recirculação de água nas bombas e provocarem vibrações, cargas excessivas e aquecimento do conjunto, diminuindo sua vida útil [8].

### 4.3.2 *By-pass*

O controle *by-pass* é feito através da variação da abertura da válvula instalada em um tubo *by-pass* da bomba. Ao aumentar a abertura da válvula, a vazão da tubulação de recalque da bomba é diminuída. A Figura 21 apresenta a redução da vazão quando a válvula *by-pass* é aberta e a bomba passa a bombear uma vazão  $Q_3$  correspondente a vazão de retorno pelo *by-pass* somada à vazão de recalque. Nessas condições, a vazão de recalque é imediatamente diminuída para um valor  $Q_2$  fora da curva da bomba e fechando gradualmente a válvula, a vazão sofre um pequeno acréscimo para  $Q_1$  em um ponto da curva da bomba [8].

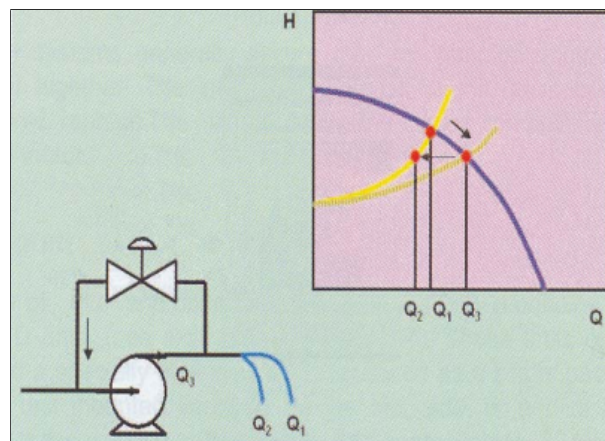


Figura 21 – Controle de vazão por *by-pass* na saída da bomba. [8]



### 4.3.3 Controle por variação de velocidade do motor

As bombas que operam com velocidade de rotação variável com o emprego de inversores de frequência proporcionam maior eficiência a processos que requerem algum tipo de controle de vazão. O inversor de frequência é um equipamento eletrônico que proporciona a variação da rotação do motor elétrico e, conseqüentemente, da rotação do rotor da bomba, o que altera também a vazão e pressão fornecidas pelo conjunto motobomba. A utilização de inversores de frequência acarreta na redução da potência dos motores e pode possibilitar também uma economia de energia de 30% a 50% [10].

No controle com inversor de frequência, a diminuição na rotação faz com que a vazão de recalque ( $Q_1$ ) diminua para um valor  $Q_2$  pelo simples deslocamento da curva da bomba sobre a curva do sistema, como pode ser observado na Figura 22

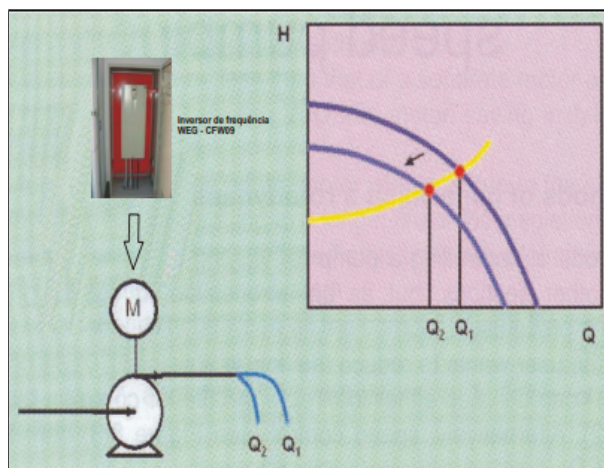


Figura 22 – Controle por variação de velocidade do motor com aplicação de inversor de frequência [8].

Dentre as principais vantagens do uso de inversores de frequência nos sistemas de bombeamento estão: a economia de energia elétrica, a redução nas vibrações devido à partida e parada suaves do motor, o aumento da confiabilidade do sistema, o aumento da vida útil da bomba, dos mancais e das vedações, a possibilidade de controle da corrente do motor elétrico, aumento do fator de potência, eliminação da necessidade de utilizar válvulas para partir e parar o bombeamento, melhor controle do processo, minimização da necessidade de paradas do sistema e a possibilidade de automatizar o sistema [10].

Já as desvantagens da utilização de inversores de frequência são o custo relativamente alto, as interferências na rede elétrica da alimentação, a geração de distorções harmônicas da tensão e a necessidade de manutenção especializada em eletrônica [10].

### 4.3.4 Comparação entre os métodos de controle de vazão

A Figura 23 apresenta a variação do consumo de energia elétrica pelos diversos métodos de controle de vazão.

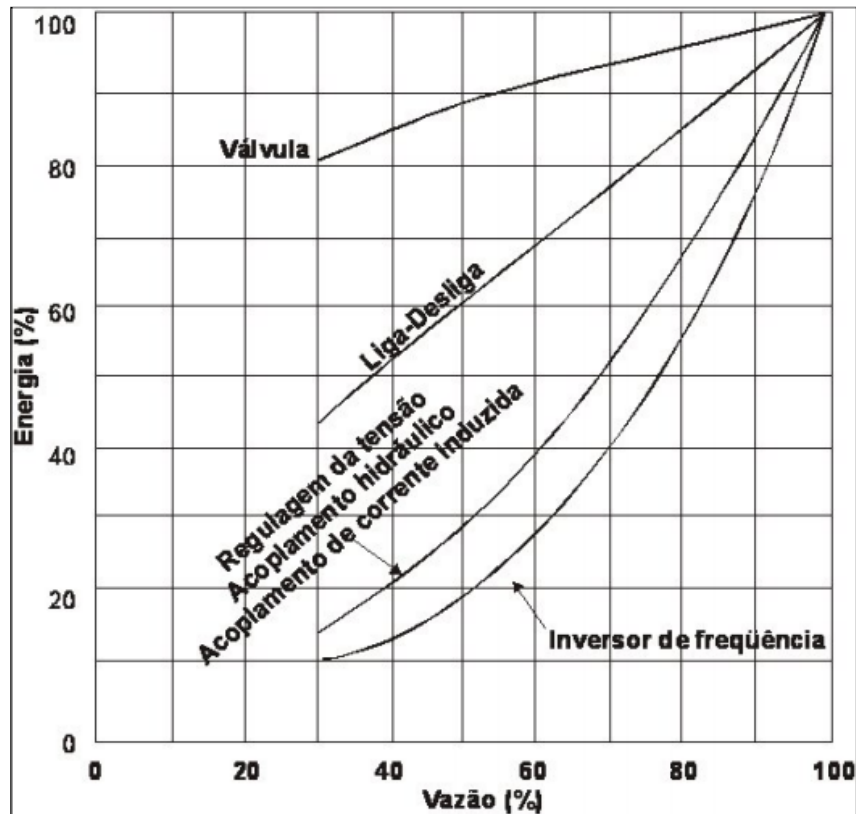


Figura 23 – Variação do consumo de energia por vários métodos de controle de vazão [8].

O gráfico da Figura 23 indica que, dentre os diferentes métodos de controle de vazão utilizados em sistemas de bombeamento, o controle por variação de velocidade do motor utilizando inversores de frequência pode ser considerado, em geral, mais eficiente do ponto de vista da energia dispendida.

Como critérios de projeto em sistemas de bombeamento, TSUTIYA (2006) recomenda que as bombas centrífugas operem em faixas de operação entre 70% e 120% do rendimento ótimo das bombas e inversores de frequência operando com frequências entre 30 a 60Hz, como esquematizado na Figura 24 [8] [9].

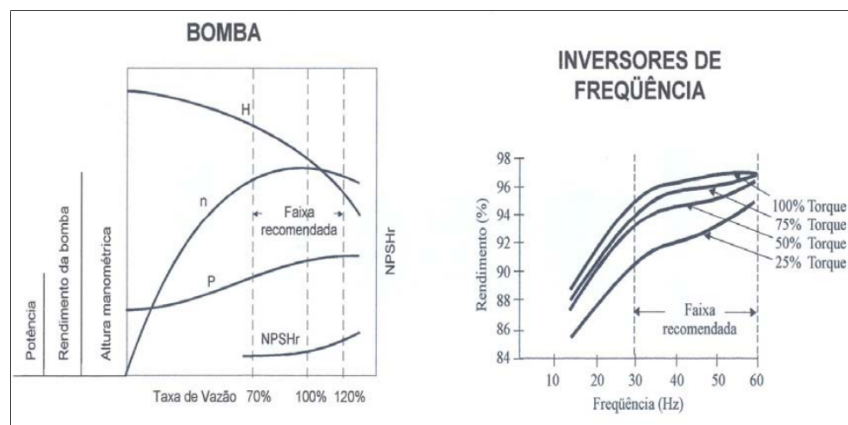


Figura 24 – Faixas de operação recomendadas para bombas e inversores de frequência [9].

## 5 Metodologia

Estudos de eficiência energética em sistemas centrais de refrigeração podem se tornar complexos quando esses sistemas são observados como um todo. Além dos *chillers* e das unidades de tratamento de ar (UTAs), responsáveis pela refrigeração e distribuição do ar para os ambientes internos, esses sistemas são também compostos por unidades de tratamento de ar (AHU), bombas, dutos e, em plantas com *chillers* de condensação a água, torres de refrigeração. Por esse motivo não é incomum encontrar na literatura trabalhos em eficiência energética que se concentrem na otimização de uma das partes que compõem esses sistemas.

A pesquisa que será apresentada neste documento se concentrará na eficiência energética do conjunto de bombas de água gelada de um sistema de refrigeração composto por dois *chillers* de condensação a ar. Como esses *chillers* fazem a troca de ar quente diretamente com a atmosfera, esse sistema não possui uma torre de refrigeração de água. O sistema possui, ainda, três bombas de igual capacidade que fazem o bombeamento da água gelada para dentro do edifício e que serão alvo do nosso estudo, conforme esquematizado na Figura 25.

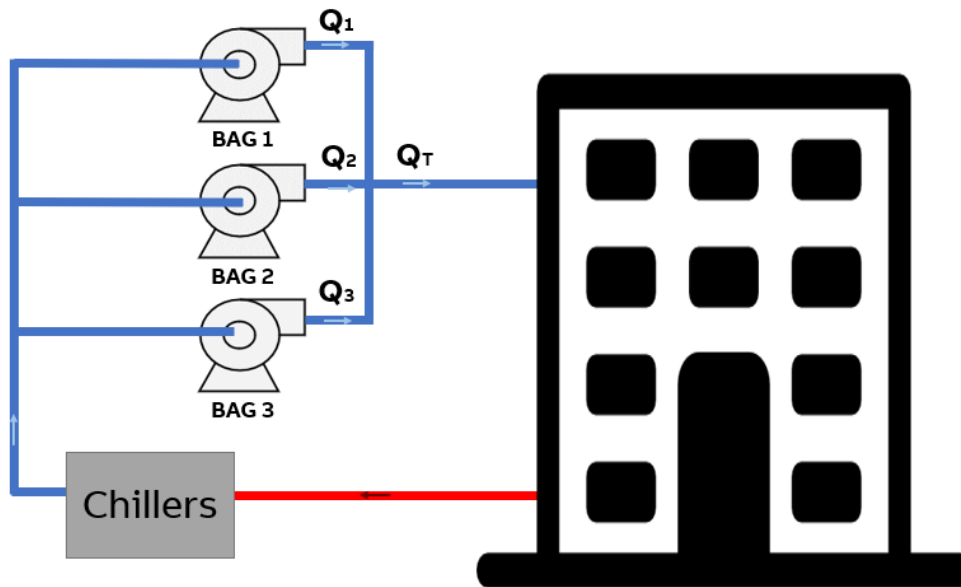


Figura 25 – Esquemático do sistema de bombeamento de água gelada.

As bombas de água gelada são responsáveis por fazer com que a água refrigerada pelos *chillers* flua através de dutos pelo edifício e refrigere os ambientes internos do prédio. Após percorrer o edifício por inteiro, a água retorna mais quente aos *chillers*. Os *chillers*, por sua vez, fazem a refrigeração da água quente e tomam decisões, com base na temperatura da água que retorna dos prédios, a respeito de quanto esforço deverá ser empreendido para refrigerar a água que deverá retornar gelada ao edifício. Mais detalhes a respeito do

funcionamento de cada um dos equipamentos que compõem os sistemas de refrigeração podem ser encontrados no Capítulo 3.

Em estudos de eficiência energética em sistemas de refrigeração, é muito comum que se leve em consideração a carga térmica do edifício. A carga térmica é a quantidade de calor que deve ser retirada ou fornecida a um sistema, por unidade de tempo, objetivando a manutenção de determinadas condições térmicas [45] e, desse modo, influencia diretamente na quantidade de calor que deverá ser aplicada no edifício pelo sistema de refrigeração. Em geral, a quantidade de pessoas que estão dentro do edifício todos os dias, bem como a quantidade de equipamentos que estão ligados e critérios de projeto do edifício, como iluminação e renovação do ar, influenciam diretamente na carga térmica dos ambientes.

Como premissa deste trabalho se considerará que a carga térmica do edifício se manteve constante no decorrer do ano de 2019, período no qual os dados foram coletados, de maneira que o fator que mais influenciará na quantidade de calor que o sistema de refrigeração deve fornecer ao edifício é a temperatura ambiente externa. Essa é uma afirmação razoável, tendo em vista que não houve movimentações expressivas na quantidade de pessoas, equipamentos ou reformas estruturais no edifício no período observado.

O conjunto de bombas de água gelada do sistema de refrigeração em estudo foi dimensionado originalmente para operar utilizando três bombas. Atualmente, no entanto, o funcionamento é restrito a duas bombas, das quais uma apresenta forte ruído e vibração, o que indica necessidade emergente de substituição. Para este estudo consideraremos que todos os equipamentos operam em um cenário ideal, ou seja, que estão em plenas condições de funcionamento. Serão estudados os efeitos de três cenários possíveis levando em consideração as características do sistema e também o melhor ajuste seguindo critérios de eficiência energética, conforme descrito abaixo:

- Cenário 1: Conjunto composto por duas bombas ligadas diretamente na rede elétrica, em uma configuração semelhante ao que é utilizado atualmente.
- Cenário 2: Sistema com duas bombas acionadas por inversores de frequência. O objetivo consiste em estudar as vantagens e desvantagens que o controle e variação de velocidade proporcionadas pelos inversores de frequências podem trazer para o sistema em termos de eficiência energética quando comparado ao conjunto proposto pelo Cenário 1.
- Cenário 3: Conjunto de três bombas acionadas por inversores de frequência. A intenção é verificar de que maneira a adição de uma bomba ao conjunto pode colaborar para a eficiência energética do sistema em relação à configuração que foi proposta no Cenário 2.

De acordo com o setor de manutenção da empresa, atualmente o sistema opera cerca de 12h/dia, apenas nos dias úteis, e é ligado por volta das 6h e desligado as 18h. Além disso,

o setor ainda afirma que o sistema opera com apenas uma bomba até as proximidades das 11h, quando a segunda bomba é ligada para atender a demanda térmica do edifício. Com base nessas informações, nos dados fornecidos pelo fabricante das bombas, nas leis da afinidade para bombas e em princípios físicos será possível estimar o quanto se gasta em energia elétrica pelo sistema de bombeamento atualmente (Cenário 1).

Para aumentar a eficiência energética do sistema, propõe-se utilização de inversores de frequência para o acionamento das bombas nos Cenários 2 e 3. Como discutido no Capítulo 4, além de suavizar a curva de partida do conjunto motobomba, os inversores de frequência também possibilitam a variação de velocidade desses equipamentos, reduzindo assim o consumo de energia elétrica e aumentando a vida útil do sistema como um todo. O grande paradigma do uso de inversores de frequência nas aplicações consiste nos custos associados à compra desses componentes que muitas vezes são percebidos pelo usuário como um valor adicional e até mesmo desnecessário. No longo prazo, no entanto, é comum que esses custos sejam suprimidos pela economia de energia elétrica que o sistema acaba proporcionando.

Essa dualidade de opiniões pode também ser observada durante a execução do projeto descrito por esse documento, no qual parte da equipe acredita que o uso de inversores de frequência pode contribuir com a eficiência energética do sistema no longo prazo, ao passo que a outra parcela pondera que a adição desses componentes gerará custos adicionais ao projeto. O estudo que será realizado neste documento busca verificar de que maneira a adição de inversores de frequência pode contribuir para a eficiência energética desse sistema em específico e também analisar se é mais vantajoso, no longo prazo, adquirir esses equipamentos ou não através da comparação entre os resultados obtidos para os Cenários 1 e 2.

O uso de inversores de frequência nos Cenários 2 e 3 possibilita também a automação de processos relacionados ao acionamento e ao uso das bombas e pode evitar, por exemplo, que o operador tenha que ligar esses equipamentos manualmente. Também é possível, através do uso desses equipamentos, a criação de rotinas customizadas para o acionamento das bombas de forma que, por exemplo, a Bomba  $BAG_2$  seja acionada quando a Bomba  $BAG_1$  estiver sobrecarregada e a Bomba  $BAG_3$  seja acionada no momento em que as Bombas  $BAG_1$  e  $BAG_2$  atingirem determinada vazão.

Neste trabalho, se considerou um ajuste no qual a vazão das bombas é igual em todos os momentos, de forma que a vazão em cada uma das bombas ( $Q$ ) e a vazão total do sistema para os cenários 2 e 3, expressas respectivamente por  $Q_{T_2}$  e  $Q_{T_3}$ , são expressas por:

$$Q = Q_{BAG1} = Q_{BAG2} = Q_{BAG3} \quad (5.1)$$

$$Q_{T_2} = Q_{BAG1} + Q_{BAG2} = 2 \cdot Q \quad (5.2)$$

$$Q_{T_3} = Q_{BAG1} + Q_{BAG2} + Q_{BAG3} = 3 \cdot Q \quad (5.3)$$

Para estimar a quantidade de energia elétrica gasta pelo sistema de bombeamento nos Cenários 2 e 3, será proposto um contexto no qual a vazão total do sistema de bombeamento ( $Q_T$ ) varia de acordo com a temperatura externa média ( $\theta_{EM}$ ) registrada no município de Sorocaba/SP durante o ano de 2019. Com essas informações e com os princípios definidos pelas leis da afinidade para bombas será possível determinar a quantidade de energia elétrica que teria sido gasta pelo sistema de bombeamento nos Cenários 2 e 3 no decorrer do ano de 2019 e fazer uma análise comparativa com os dados obtidos para o Cenário 1.

Os dados da temperatura externa média serão obtidos através de uma base de dados contendo a temperatura hora a hora no aeroporto do município. Já a vazão total será estimada com base nas observações do sistema relatadas pela equipe de manutenção da empresa e também nas informações fornecidas pelo fabricante das bombas. Com a curva característica das bombas será possível determinar as vazões mínimas ( $Q_{min}$ ) e máximas ( $Q_{max}$ ) para cada uma das bombas. A vazão total mínima do sistema nos cenários 2 e 3 não poderá ser inferior à vazão mínima do sistema com três bombas e a vazão total máxima não poderá ser superior a vazão do sistema com duas bombas. Desta forma, as vazões totais mínima ( $Q_{T_{min}}$ ) e máxima ( $Q_{T_{max}}$ ) para os cenários 2 e 3 poderão ser expressas pelas Equações (5.4) e (5.5) respectivamente.

$$Q_{T_{min}} = 3 \cdot Q_{min} \quad (5.4)$$

$$Q_{T_{max}} = 2 \cdot Q_{max} \quad (5.5)$$

Para simular a operação do sistema nos Cenários 2 e 3, a vazão total do sistema de bombeamento ( $Q_T$ ) será, então, expressa em função da temperatura externa ( $\theta_E$ ) por meio de uma função linear aproximada dada pela Equação (5.6).

$$Q_T(\theta_E) = \begin{cases} Q_{T_{min}}, & \text{se } Q_T(\theta_E) \leq \theta_{E_1} \\ a \cdot \theta_E + b, & \text{se } Q_T(\theta_E) \in [\theta_{E_1}, \theta_{E_2}] \\ Q_{T_{max}}, & \text{se } Q_T(\theta_E) \geq \theta_{E_2} \end{cases} \quad (5.6)$$

Para definir os coeficientes  $a$  e  $b$  da equação linear no sistema de equações (5.6), os valores da temperatura externa  $\theta_{E_1}$  e  $\theta_{E_2}$  serão ajustados de forma a obter uma curva para a vazão total mais próxima possível do cenário atual, que podem ser observados nas simulações do sistema para o Cenário 1. A Figura 26 apresenta um esboço da curva característica da função  $Q_T(\theta_E)$ .

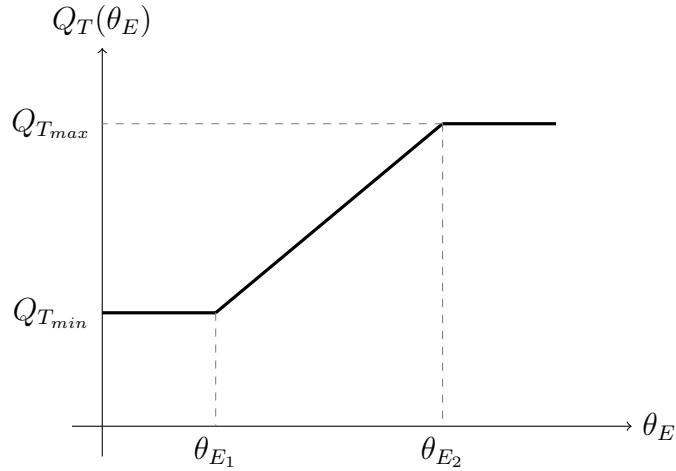


Figura 26 – Vazão total estimada em função da temperatura externa.

Com a função  $Q_T(\theta_E)$  definida e com os dados da temperatura externa média no município de Sorocaba/SP poderemos, então, encontrar a curva da vazão total do sistema em função da temperatura externa média  $Q_T(\theta_{EM})$ . A partir desta curva, dos princípios definidos pelas leis de afinidade para bombas e das Equações (5.2) e (5.3) é possível determinar a potência média do sistema para os cenários 2 e 3 em um dia de operação típico, como expresso nas Equações (5.7) e (5.8), onde  $P_N$  e  $Q_N$  correspondem, respectivamente, à potência e vazão nominais do sistema.

$$P_{M_2}(\theta_{EM}) = 2 \cdot P_N \cdot \left( \frac{Q_{T_2}}{Q_{N2}} \right)^3 = 2 \cdot P_N \cdot \left( \frac{Q_T(\theta_{EM})}{2 \cdot Q_N} \right)^3 \quad (5.7)$$

$$P_{M_3}(\theta_{EM}) = 3 \cdot P_N \cdot \left( \frac{Q_{T_3}}{Q_N} \right)^3 = 3 \cdot P_N \cdot \left( \frac{Q_T(\theta_{EM})}{3 \cdot Q_N} \right)^3 \quad (5.8)$$

Através dos sinais das potências médias para os Cenários 2 e 3 será possível encontrar a quantidade de energia dispendida pelo sistema em um dia típico de trabalho nesses dois casos. Por consequência, também poderemos descobrir o valor gasto em energia elétrica ao longo de um ano de trabalho, estimando também o retorno sobre o capital investido (*payback*) do sistema para cada um dos cenários que foram propostos e, por fim, fazendo uma avaliação a respeito do cenário mais promissor no longo prazo.

## 6 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados que foram obtidos através das simulações do sistema para os Cenários 1, 2 e 3 de acordo com a metodologia que foi descrita no Capítulo 5. Os valores de potência nominal e das vazões mínima, máxima e nominal das bombas, bem como de temperatura que foram considerados na compilação dos resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros das bombas e de temperatura

Variável	Descrição	Valor
$P_N$	Potência nominal das bombas	23,18 W
$Q_N$	Vazão nominal das bombas	103,2 m <sup>3</sup> /h
$Q_{min}$	Vazão mínima das bombas	35 m <sup>3</sup> /h
$Q_{max}$	Vazão máxima das bombas	103 m <sup>3</sup> /h
$\theta_{E_1}$	Limite inferior para a temperatura externa	22 °C
$\theta_{E_2}$	Limite superior para a temperatura externa	27 °C

Os parâmetros da bomba foram determinados com base na folha de dados fornecida pelo fabricante dos equipamentos e disponibilizada na Seção de Anexos desse documento. Já os valores de mínimo e máximo da temperatura externa foram determinados com base no melhor ajuste possível da curva de vazão para os Cenários 2 e 3 que será apresentada nas próximas seções.

Na Seção 6.1 serão apresentados os resultados obtidos nas simulações para o Cenário 1, onde duas bombas estão ligadas diretamente na rede. A seguir, na Seção 6.2 serão apresentados os resultados referentes ao Cenário 2, no qual duas bombas são acionadas por inversores de frequência. Já na Seção 6.3 serão apresentados os resultados que foram compilados para o Cenário 3, no qual se considerou um sistema composto por três bombas acionadas por inversores de frequência. A Seção 6.4, por fim, apresentará um estudo comparativo entre os resultados dos Cenários 1, 2 e 3 que será utilizado posteriormente, no Capítulo 7, para analisar os resultados obtidos por este trabalho.

### 6.1 Cenário 1: Duas bombas ligadas diretamente na rede elétrica

Para a obtenção dos resultados deste cenário foram consideradas informações fornecidas pela equipe de manutenção da empresa e também as informações da bomba. A partir dessas observações, foi possível obter uma expressão matemática para a potência média



diária no cenário 1 em função do horário do dia ( $P_{M_1}(t)$ ) descrita pela Equação (6.1), com a potência  $P_{M_1}$  dada em quilowatts (kW) e o tempo  $t$  em horas (h).

$$P_{M_1}(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } t \leq 6 \text{ ou } t \geq 18 \\ 23,18 & \text{se } 6 < t \leq 11 \\ 46,36 & \text{se } 11 < t < 18 \end{cases} \quad (6.1)$$

O gráfico da Figura 27 apresenta a curva da potência do sistema de bombeamento para o Cenário 1 em função do horário do dia .

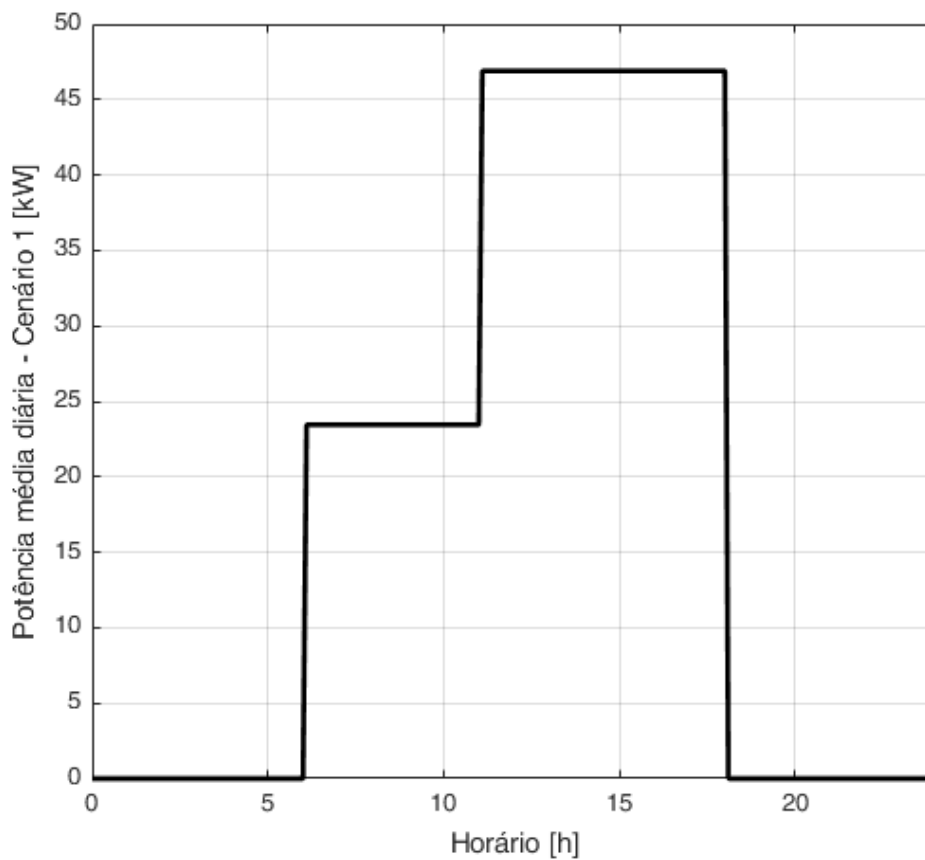


Figura 27 – Potência média diária do sistema de bombeamento para o Cenário 1.

## 6.2 Cenário 2: Duas bombas acionadas por inversores de frequência

Para estimar a quantidade de energia elétrica gasta pelo sistema de bombeamento neste cenário, foi proposto um contexto no qual a vazão total do sistema de bombeamento ( $Q_T$ ) varia de acordo com a temperatura externa média no município de Sorocaba/SP ( $\theta_{E_M}$ )

durante o ano de 2019. Os dados que se referem a temperatura média anual registradas em Sorocaba/SP no ano de 2019 podem ser observados na Figura 28.

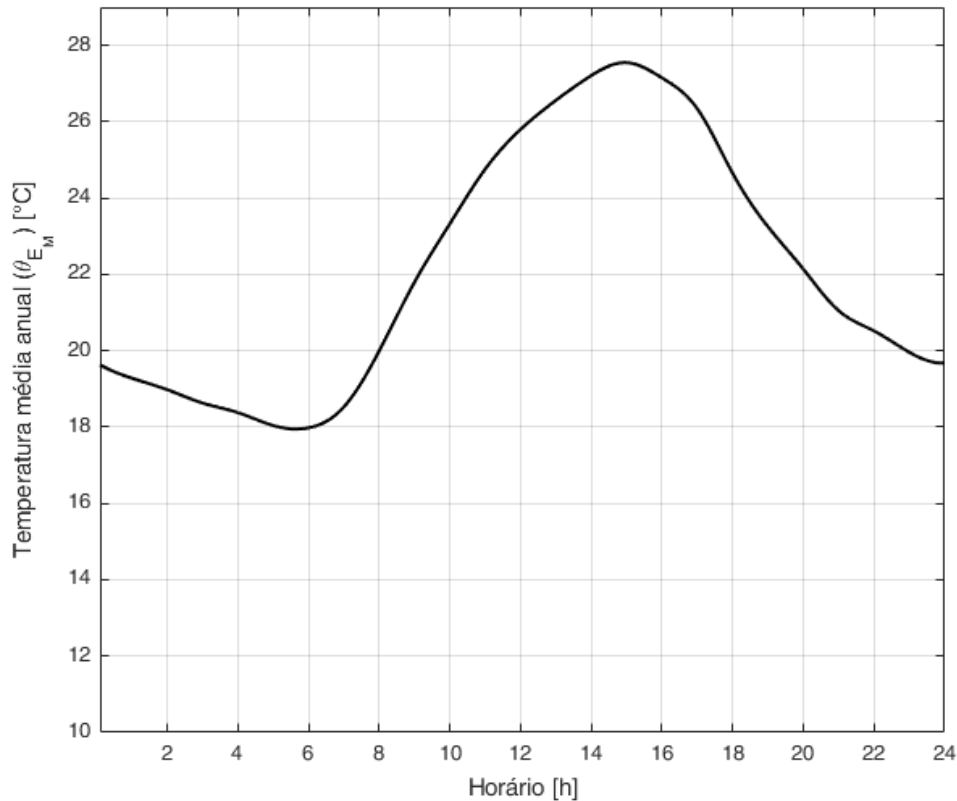


Figura 28 – Temperatura média anual no município de Sorocaba/SP no ano de 2019.

Com os valores para as vazões mínima ( $Q_{min}$ ) e máxima ( $Q_{max}$ ) das bombas apresentados na Tabela 1 e das expressões para as vazões totais mínima ( $Q_{Tmin}$ ) e máxima ( $Q_{Tmax}$ ) definidas, respectivamente, pelas Equações (5.4) e (5.5) é possível definir os valores das vazões totais mínima e máxima possíveis para o sistema, conforme as Equações (6.2) e (6.3).

$$Q_{Tmin} = 105m^3/h \quad (6.2)$$

$$Q_{Tmax} = 206m^3/h \quad (6.3)$$

A vazão total ( $Q_T$ ) do sistema foi definida através da Equação (5.6) como uma função linear limitada, no eixo x, pelos valores das temperaturas  $\theta_{E_1}$  e  $\theta_{E_2}$  e, no eixo y, pelos valores das vazões totais mínima ( $Q_{Tmin}$ ) e máxima ( $Q_{Tmax}$ ). Com os valores de  $\theta_{E_1}$  e  $\theta_{E_2}$  que foram definidos na Tabela 1 e com  $Q_{Tmin}$  e  $Q_{Tmax}$  expressos respectivamente

pelas equações (6.2) e (6.3) é possível determinar os coeficientes  $a$  e  $b$  da Equação (5.6) e reescrevê-la na forma da Equação (6.4).

$$Q_T(\theta_E) = \begin{cases} 105, & \text{se } \theta_E \leq 22 \\ 20,2 \cdot \theta_E - 339,4, & \text{se } Q_T(\theta_E) \in [18, 27] \\ 206, & \text{se } \theta_E \geq 27 \end{cases} \quad (6.4)$$

Ao aplicar a curva da temperatura média no município de Sorocaba/SP ( $\theta_{EM}$ ), ilustrada na Figura 28, na função  $Q_T(\theta_E)$  descrita pela Equação (6.4), obtemos uma curva para a vazão total do sistema em função da temperatura externa do município de Sorocaba ( $Q_T(\theta_{EM})$ ), que pode ser visualizada, em preto, na Figura 29.

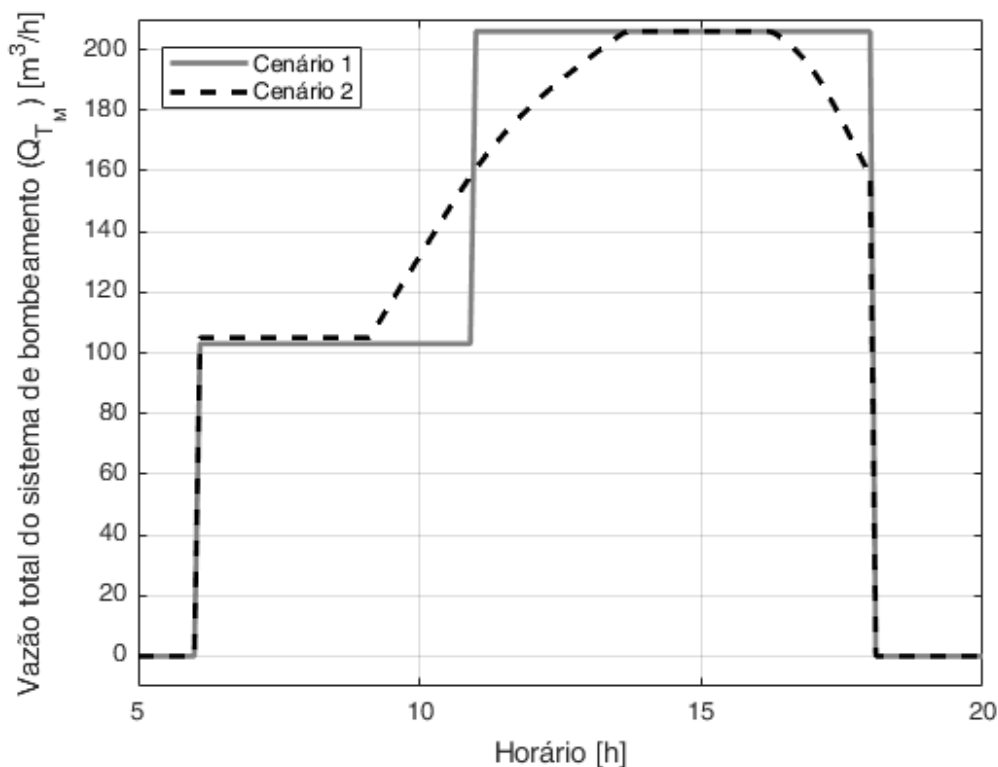


Figura 29 – Comparação entre a vazão total média do sistema de bombeamento nos cenários 1 e 2.

Pode-se observar, na Figura 29, duas curvas que representam a vazão total do sistema. A curva que foi desenhada com um traço contínuo cinza representa a vazão total do sistema no decorrer de um dia típico para o Cenário 1, ao passo que a curva tracejada em preto representa a curva da vazão total proposta para o Cenário 2 ajustada através de simulações para representar da melhor maneira possível a vazão total do sistema utilizando um conjunto de bombas acionadas por inversores de frequência.

A Figura 30 apresenta a potência média diária do sistema de bombeamento para o Cenário 2 e foi obtida aplicando a curva apresentada na Figura 29 e os dados fornecidos

pela Tabela 1 na Equação (5.7).

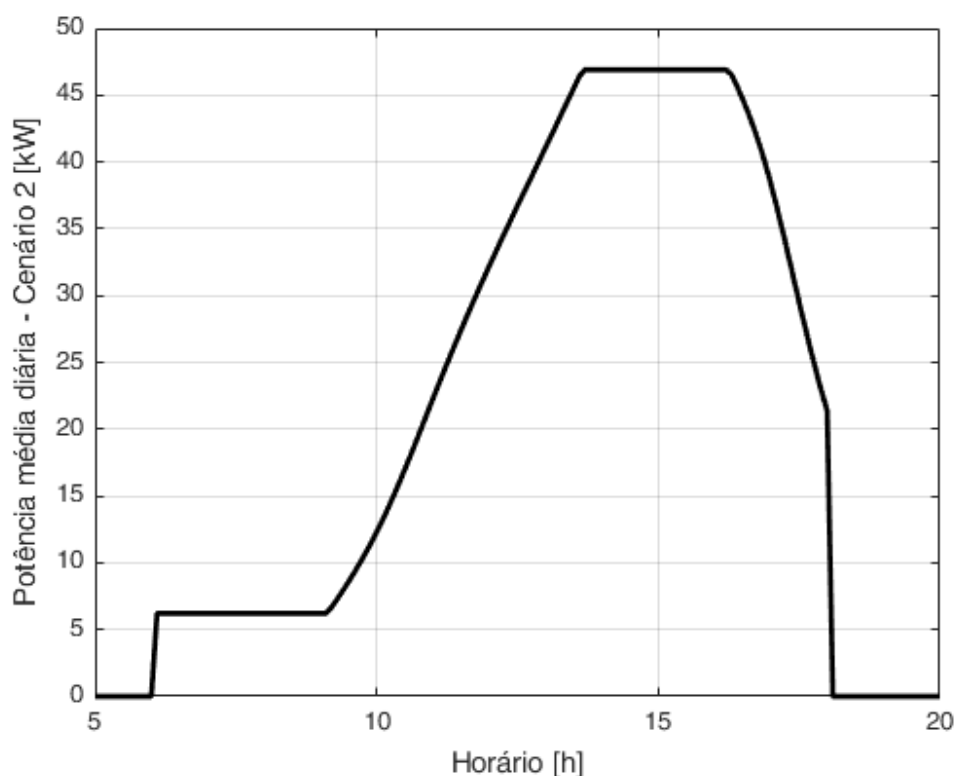


Figura 30 – Potência média diária do sistema de bombeamento para o Cenário 2.

### 6.3 Cenário 3: Três bombas acionadas por inversores de frequência

O Cenário 3 foi proposto com o intuito de investigar quais seriam os efeitos da adição de mais uma bomba no sistema e, por esse motivo, é natural que as premissas utilizadas para compilar os resultados nesta configuração sejam semelhantes àquelas que foram propostas nos cenários anteriores. Desta forma, as considerações que foram utilizadas para determinar a curva da potência média diária do sistema de bombeamento no Cenário 3 são as mesmas que as do Cenário 2, já descritas na Seção 6.2.

Para determinar a curva de potência média diária para o Cenário 3, a curva da vazão total do sistema de bombeamento apresentada na Figura 29 foi aplicada à Equação (5.8). No gráfico apresentado na Figura 31 é possível observar a curva da potência média diária para esta configuração.

Através de uma comparação entre os resultados da potência média diária do Cenário 3 (Figura 31) em relação ao Cenário 2 (Figura 30) é possível observar que a energia dispendida pelo sistema apresenta pico de aproximadamente 20,9kW no Cenário 3, enquanto que no Cenário 2 é de aproximadamente 46,9kW. Como a carga que é aplicada neste sistema é

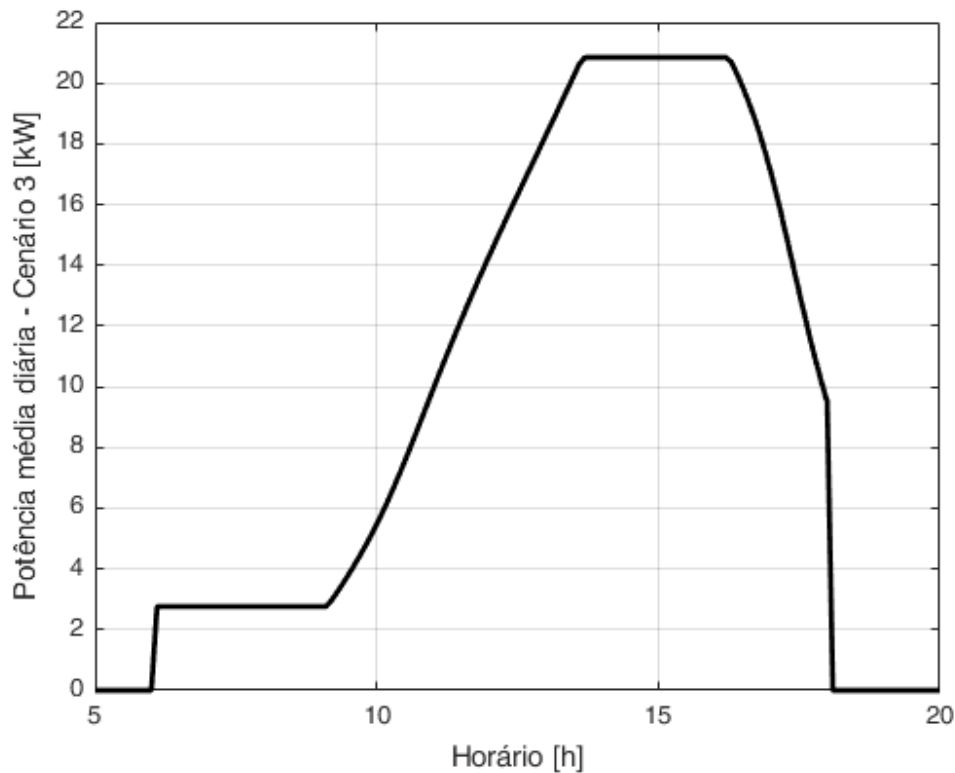


Figura 31 – Potência média diária do sistema de bombeamento para o Cenário 3.

um fluido – a água – seu comportamento não é linear. As leis da afinidade para bombas, expressas pelas Equações (4.5), (4.6) e (4.7) determinam que a vazão desses equipamentos varia em razão cúbica em relação a potência, o que explica esse fenômeno. Assim, pequenas variações de vazão do sistema podem implicar em mudanças significativas na potência da bomba.

Essa diferença é ainda mais evidente neste estudo pois a vazão total é dividida por duas bombas no Cenário 2 e por três bombas no Cenário 3, como expresso, respectivamente, pelas Equações (5.7) e (5.8). A razão entre as potências do Cenário 3 em relação ao Cenário 2 pode também ser expressa na forma da Equação (6.5), na qual é possível observar que a potência dispendida por três bombas para entregar a mesma vazão que duas bombas entregariam é 44% menor.

$$\frac{P_{M_3}}{P_{M_2}} = 0,44 \quad (6.5)$$

## 6.4 Comparação entre os resultados dos Cenários 1, 2 e 3

Nas Seções 6.1, 6.2 e 6.3 foram apresentados os resultados obtidos através das simulações para as potências médias diárias para o sistema de bombeamento nos Cenários 1,

2 e 3 respectivamente. Nesta seção os dados obtidos e apresentados nas seções anteriores serão apresentados de maneira conjunta para que possam ser analisados da maneira mais correta e coerente possível no Capítulo 7.

O gráfico da Figura 32 apresenta as curvas para as potências médias diárias obtidas nos cenários 1, 2 e 3 ao decorrer de um dia típico de trabalho. A curva em preto representa o resultado obtido no Cenário 1, no qual se considerou um sistema composto por duas bombas ligadas diretamente na rede. Já o sinal em tom cinza claro demonstra a curva da potência média diária para o Cenário 2, no qual foi simulado um sistema composto por duas bombas acionadas por inversores de frequência. A curva em tom cinza escuro, por fim, representa o sistema com três bombas acionadas por inversores de frequência.

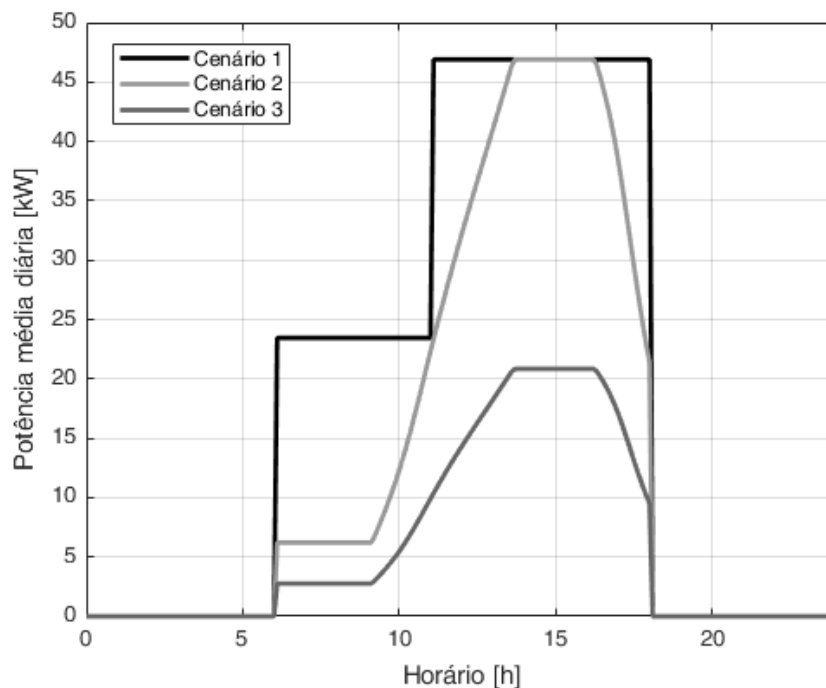


Figura 32 – Potência média diária do sistema de bombeamento para os cenários estudados.

Através da integração dos sinais das potências médias apresentados na Figura 32 é possível mensurar a energia, em kWh, dispendida pelo conjunto de bombas em um dia típico de trabalho, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Energia dispendida em um dia típico de trabalho por configuração

Configuração	Energia [kWh]
Cenário 1	440,42
Cenário 2	321,82
Cenário 3	143,03

## 7 Análises

Neste capítulo faremos algumas análises dos resultados apresentados no Capítulo 6 com a finalidade de averiguar, com mais clareza, qual das configurações é mais interessante para o melhor desempenho possível do sistema nos horizontes de médio e longo prazo. Para isso, estimaremos a quantidade de energia que seria economizada nos Cenários 2 e 3 em relação ao Cenário 1 ao longo do tempo e também uma expectativa de retorno sobre o investimento (*payback*) nos cenários estudados. Para conduzir este estudo, serão considerados uma estimativa de custos com a compra dos equipamentos para cada um dos cenários e também os resultados apresentados no Capítulo 6.

De uma maneira geral, as despesas desse tipo de sistema ao longo de seu ciclo de vida podem ser divididas em duas categorias: As despesas em Capex e as despesas com Opex. O termo Capex tem origem do inglês *capital expenditure* e se refere às despesas ou investimentos em bens de capital de um projeto ou mesmo uma empresa. Já Opex se originou do termo *operational expenditure*, que significa, basicamente, despesas operacionais. As despesas do tipo Capex são aquelas utilizadas na compra, no reparo, na atualização ou na melhoria de um ativo. Trata-se de uma despesa única, não recorrente, e que afeta um ativo em questão no longo prazo. Já as despesas operacionais incluem as despesas para operar o ativo em questão e são, no caso de negócios, custos como o salário dos funcionários, com o giro estoque, manutenção da estrutura e até mesmo materiais de escritório. Nos sistemas de bombeamento tal qual o que estamos estudando, as despesas do tipo Capex são, basicamente, os custos de compra dos equipamentos ao passo que as despesas de Opex se referem a outros custos operacionais do sistema, como gastos com a energia elétrica ou mesmo com a manutenção preventiva.

Um erro bastante comum ao projetar e analisar custos de sistemas como o que estamos estudando é levar em consideração apenas as despesas de Capex do projeto, ou seja, os custos para adquirir os materiais ou equipamentos e negligenciar as outras despesas operacionais, como os gastos com energia elétrica e manutenção ao longo do ciclo de vida do sistema. Por esse motivo, a diferenciação entre esses dois tipos de despesas é tão importante e deveria, via de regra, ser considerada como premissa no projeto desse tipo de sistema.

Nesta fase do nosso estudo, consideraremos como despesas de Opex os gastos estimados com energia elétrica nos Cenários 1, 2 e 3 nos horizontes de um, cinco e dez anos. Foram negligenciados eventuais gastos com a manutenção dos equipamentos neste período. As despesas de Capex serão utilizadas para fazer uma estimativa do retorno sobre o capital investido (*payback*) deste sistema. Para este estudo foi considerado, também, que um ano possui, em média, 255 dias úteis e que o preço da energia elétrica, por kWh, cobrada pela

concessionária é de R\$0,48, como informado na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para analisar os resultados

Variável	Descrição	Valor
$d/a$	Quantidade de dias úteis em um ano	255 $d$
$V_{kWh}$	Preço da energia elétrica por kWh	0,48 $BRL$

Com as informações a respeito da quantidade de energia dispendida em um dia típico de trabalho em cada uma das configurações apresentadas na Tabela 2 do Capítulo 6 e também com os dados da Tabela 3 podemos estimar o valor gasto com energia elétrica pelo sistema de bombeamento em um dia médio de trabalho e também o quanto se economizaria nos Cenários 2 e 3 em relação ao Cenário 1, como exposto na Tabela 4.

Tabela 4 – Valor gasto pelo sistema com energia elétrica em um dia típico por configuração

Configuração	Custo diário [BRL]	Economia diária [BRL]	Percentual de economia [%]
Cenário 1	211,40	-	-
Cenário 2	154,47	56,93	26,9
Cenário 3	68,65	142,75	67,5

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 4 é possível observar que a simples adição de inversores de frequência para fazer o controle da vazão das bombas (Cenário 2) acarretou numa economia de energia elétrica de cerca de 27% em relação ao Cenário 1. Já a adição de uma terceira bomba ao conjunto (Cenário 3) possibilitou a diminuição de 68% dos gastos com energia elétrica do sistema em relação ao Cenário 1 e de 56% em relação ao Cenário 2.

A relevância desses resultados é ainda mais evidente quando analisamos as estimativas de gasto com energia elétrica desse sistema no longo prazo. Os dados da Tabela 5 evidenciam, por exemplo, que, no horizonte de 10 anos, a adição de uma terceira bomba ao sistema poderia economizar cerca de R\$218.839,00 em energia elétrica quando comparado ao Cenário 2 e mais de R\$364.000,00 em relação ao Cenário 1.

Tabela 5 – Gastos estimados com energia elétrica por configuração em médio e longo prazo

Configuração	Custo em 1 ano [BRL]	Custo em 5 anos [BRL]	Custo em 10 anos [BRL]
Cenário 1	53.907,41	269.537,04	539.074,08
Cenário 2	39.390,77	196.953,84	393.907,68
Cenário 3	17.506,87	87.534,36	175.068,72



É importante ressaltar que, neste estudo, foram considerados preços fixos de energia elétrica correntes no ano de 2020. É natural que esses valores sejam reajustados com o passar dos anos. Desta forma, os dados apresentados na Tabela 5 podem ser ainda maiores se fosse considerado também a correção no preço da energia com o passar do tempo.

Por serem compostos por diferentes equipamentos, os custos para adquirir os materiais para cada um dos cenários que estamos estudando são diferentes entre si. Para a composição dos custos para o Cenário 1, que possui duas bombas ligadas diretamente na rede, foram considerados os valores de mercado de dois motores elétricos com especificações equivalentes àquelas sugeridas pelo fabricante das bombas. Já os custos dos equipamentos nos Cenários 2 e 3 devem levar em consideração, também, os valores dos inversores de frequência que serão utilizados para acionar os motores de cada uma dessas configurações. A Tabela 6 apresenta o valor, em Reais, que deverá ser dispendido na compra dos equipamentos para cada uma dos cenários estudados.

Tabela 6 – Estimativa de custos para adquirir os equipamentos por configuração

Configuração	Custo [BRL]
Cenário 1	10.600,00
Cenário 2	18.000,00
Cenário 3	27.000,00

É importante destacar que os custos que se referem às bombas de cada uma das configurações foi desconsiderado na composição de custos apresentada da Tabela 6 já que, neste projeto, esses equipamentos foram doados. Assim, se, por algum motivo, esse estudo for replicado em outro contexto, será necessário considerar também esses equipamentos na composição de custos do projeto.

Com os dados apresentados na Tabela 4 e com uma estimativa do valor que será investido na compra dos equipamentos (Tabela 6) é possível prever quanto tempo levará para que se obtenha o *payback*, ou seja, o retorno sobre o capital investido na compra dos equipamentos com a economia de energia para os Cenários 2 e 3 em relação ao Cenário 1, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – *Payback* do sistema nos Cenários 2 e 3 em relação ao Cenário 1

Configuração	<i>Payback</i> [dias]	<i>Payback</i> [meses]
Cenário 2	316,2	10,5
Cenário 3	189,1	6,3

É importante pontuar que o estudo apresentado neste documento não levou em conta o rendimento das bombas, dos motores elétricos e dos inversores de frequência. Como visto no Capítulo 4, o rendimento desses equipamentos varia conforme a carga aplicada

ao sistema e que, como critério de projeto, se recomenda que as bombas operem em faixas entre 70% e 120% do ponto ótimo, ao passo que inversores de frequência operem em frequências entre 30 a 60Hz para que não haja perdas expressivas no rendimento do sistema [8] [9].

Assim, apesar dos resultados para o Cenário 3 serem bastante expressivos em relação aos resultados dos Cenários 1 e 2, é possível que, por estar operando com cargas baixas a maior parte do tempo, o rendimento do conjunto moto-bomba seja muito baixo, ocasionando grandes perdas elétricas. Como o sistema está superdimensionado para este cenário, se recomenda que o conjunto moto-bomba e inversor seja redimensionado para atender as necessidades do sistema de maneira mais eficiente. Neste caso, com novos equipamentos, os resultados apresentados neste estudo também serão alterados. Além disso, a substituição dos equipamentos atuais por modelos de menor porte pode acarretar na necessidade de redimensionar da tubulação e também as outras partes que constituem o sistema, o que pode se tornar inviável devido aos altos custos e a morosidade dessas operações.

Pode-se observar, a partir dessas análises, a importância de dimensionar o sistema corretamente no momento de projeto, já que uma eventual necessidade de substituição dos equipamentos posteriormente pode ser inviável técnica e economicamente. Desta forma, apesar deste estudo ter indicado que o sistema operaria de maneira mais eficiente no Cenário 3, se recomenda que o Cenário 2 seja utilizado neste caso, por não requerer o redimensionamento do sistema e garantir, através do uso de inversores de frequência, maior eficiência do processo de bombeamento. Neste caso, se recomenda, ainda, que a terceira bomba seja mantida em *stand-by* para que possa ser utilizada nos dias de maior calor, nos quais será exigido maior potência do sistema.

## 8 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade do ponto de vista da eficiência energética da readequação do sistema de bombeamento de água gelada do sistema de climatização do prédio 1 da unidade da ABB em Sorocaba. Os sistemas centrais de climatização são, em geral, projetados para assegurar que a capacidade máxima de resfriamento é suficiente para a condição mais extrema possível, como os dias mais quentes do verão. No entanto, essas condições ocorrem apenas em poucas horas ou dias durante o ano, o que significa que a maior parte do tempo o sistema opera com cargas parciais, que podem ser muito baixas em estações do ano como o inverno.

Essa condição foi observada no sistema de refrigeração da ABB, que foi originalmente dimensionado para operar com três bombas de água gelada mas que, na prática, tem funcionado satisfatoriamente bem na maior parte do tempo com apenas duas bombas. A partir do aprofundamento teórico a respeito dos sistemas de bombeamento foi possível constatar que seria possível otimizar a operação desse sistema para cargas parciais adicionando inversores de frequência para fazer o acionamento das bombas, o que proporcionaria variação da velocidade do conjunto moto-bomba e permitindo, assim, que a vazão do sistema seja controlada.

No que diz respeito à manutenção dos motores e das bombas, outras vantagens do uso dos inversores de frequência refere-se ao desgaste mecânico das peças, que operam de maneira suave através do controle da rotação, prevenindo as constantes trocas de peças mecânicas e avarias no acoplamento do eixo desses equipamentos.

Três possíveis cenários de operação do sistema foram propostos e tiveram seus desempenhos comparados: i) Sistema com duas bombas ligadas diretamente à rede elétrica, semelhante ao que é utilizado atualmente; ii) Sistema composto por duas bombas acionadas por inversores de frequência, permitindo o controle da vazão de água que circula pelo sistema; e iii) Sistema com três bombas acionadas por inversores de frequência, em uma configuração semelhante àquela que o sistema foi originalmente projetado para funcionar.

Os desempenhos para cada um dos cenários foram comparados através de simulações e se observou que, em condições ideais, o sistema nos Cenários 2 e 3 apresentariam, respectivamente, economia em energia elétrica de cerca de 26,9% e 67,5% e *payback* de 10,5 e 6,3 meses em relação ao Cenário 1. Apesar dos resultados para o Cenário 3 apresentarem valores bastante expressivos em relação aos resultados dos Cenários 1 e 2, é possível que, por operar com cargas baixas a maior parte do tempo, o rendimento do conjunto moto-bomba seja muito baixo, o que ocasionaria grandes perdas elétricas.

Pode-se observar, a partir desse trabalho, a importância de dimensionar o sistema corretamente no momento de projeto, já que uma eventual necessidade de substituição

dos equipamentos posteriormente pode ser inviável técnica e economicamente. Desta forma, apesar deste estudo ter indicado que o sistema operaria de maneira mais eficiente no Cenário 3, se recomenda que o Cenário 2 seja considerado como primeira opção para este caso, por não requerer o redimensionamento do sistema e garantir, através do uso de inversores de frequência, maior eficiência do processo de bombeamento. Neste caso, se recomenda, ainda, que se mantenha a terceira bomba em *stand-by* para que possa ser utilizada nos dias mais quentes, nos quais será exigido maior potência do sistema.

## 8.1 Trabalhos futuros

Este trabalho apresentou um estudo de eficiência energética em um conjunto de bombas de água gelada em um sistema de refrigeração com *chillers* do prédio 1 da unidade da ABB em Sorocaba. Pudemos observar, através dos resultados que, apesar da energia dispendida para o sistema com três bombas ser muito menor do que o sistema com duas bombas, quando levamos em consideração as perdas elétricas do conjunto moto-bomba em cargas parciais, esse ajuste se torna muito ineficiente do ponto de vista da eficiência energética.

Um melhor ajuste poderia ser obtido, neste caso, redimensionando o sistema para operar com três bombas de forma que o conjunto motobomba opere em uma faixa de  $\pm 20\%$  do ponto ótimo de rotação na maior parte do tempo, diminuindo as perdas elétricas nesses equipamentos. É possível que, com o redimensionamento desses equipamentos para outros de menor potência, a tubulação e outras partes do sistema também precisem ser reajustados e esse reajuste poderia se tornar inviável devido aos altos custos e à morosidade dessas operações.

Outra possibilidade para contornar esse problema seria a utilização de motores síncronos de relutância ao invés de motores de indução. Esses equipamentos, apesar de não serem tão comuns, possuem perdas elétricas consideravelmente menores que os motores de indução trifásicos devido a sua forma construtiva e sua eficiência já foi comprovada em diversos estudos em aplicações com cargas parciais [34] [46] [47] [48].

O estudo que foi apresentado neste documento foi realizado através de simulações com o intuito de apontar possíveis soluções para o sistema de bombeamento de água gelada do sistema de refrigeração. Com a conclusão desta etapa, uma decisão a respeito da composição de equipamentos será tomada e novos equipamentos serão instalados no sistema. Para validar o estudo em cada uma das etapas, a quantidade de energia gasta pelo sistema será medida antes e depois da instalação dos novos equipamentos. Apenas desta forma será possível mensurar de maneira precisa como os novos equipamentos estão se comportando em relação aos antigos e qual dos arranjos de equipamentos é mais viável do ponto de vista da eficiência energética.

Além disso, uma terceira etapa do projeto consiste na implantação de um sistema supervisorio de automação desta estrutura. Através deste sistema, será possível controlar não só o funcionamento das bombas de água gelada, como também dos *chillers* e dos *fan-coils*. Através deste sistema será possível, também, implementar rotinas de otimização da eficiência energética do sistema e fazer, por exemplo, que o sistema dispenda menos energia nos ambientes menores, nos quais trabalham menos pessoas, e mais energia nos ambientes que estão mais cheios. Desta forma será possível aumentar também o conforto e o bem-estar das pessoas que trabalham nesses ambientes. A implementação desse sistema permite, ainda, que os equipamentos sejam acionados de maneira remota, que torne mais fácil identificar os motivos falhas no sistema e também o armazenamento de dados relativos ao sistema.

# Referências Bibliográficas

- 1 Ministério de Minas e Energia. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. 2019. <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2029>>. Acesso em: 13/03/2020.
- 2 Ministério de Minas e Energia. *Balanco Energético Nacional 2019 - Ano Base 2018*. 2019. <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em: 13/03/2020.
- 3 David Chokolich and John Wilson and Lasath Lecamwasam. *Guide to Best Practice Maintenance & Operation of HVAC Systems for Energy Efficiency*. 2012. <<https://www.energy.gov.au/publications/guide-best-practice-maintenance-and-operation-hvac-systems-energy-efficiency>>.
- 4 International Energy Agency (IEA). *The Future of Cooling*. 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>>.
- 5 CARRIER. Air-cooled chillers. *Commercial HVAC Chiller Equipment*, p. 1–82, 2005.
- 6 CARRIER. Water-cooled chillers. *Commercial HVAC Chiller Equipment*, p. 1–82, 2005.
- 7 CHAPMAN, S. *Fundamentos de Máquinas Elétricas - 5ed.* [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- 8 GURGEL, B. B. F. do A. *Proposição de uma metodologia para avaliação de inversores de frequência em estações elevatórias de água*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 14 2006.
- 9 TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de Água*. [S.l.]: ABES, 2006.
- 10 GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. de. *Manual de sistemas de bombeamento - Eficiência Energética*. 1. ed. João Pessoa, 2012.
- 11 Agência Internacional da Energia (AIE). *The Energy Progress Report 2019*. 2019. <<https://trackingsdg7.esmap.org/downloads>>.
- 12 Instituto de Energia e Meio Ambiente. *Um milhão estão sem energia elétrica na Amazônia, mostra IEMA*. 2019. <<http://energiaeambiente.org.br/um-milhao-estao-sem-energia-eletrica-na-amazonia-20191125?fbclid=IwAR16Yp7GsxSYpLcvfhTJwZoH9u--I7aYw0OKfW92uSiaqauPT1550sF1U>>. Acesso em: 06/09/2020.
- 13 Organização das Nações Unidas (ONU). *World Population Prospects: The 2017 Revision*. 2017.
- 14 Bloomberg Energy Finance . *New Energy Outlook*. 2019. <<https://bnef.turtl.co/story/neo2019/>>.
- 15 Fundo Monetário Internacional. *World Economic Outlook, January 2020*. 2020.

- 16 GERBELLI, L. G. *Com impacto do coronavírus, FMI prevê queda de 9,1% para o PIB do Brasil neste ano*. 2020. <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2020/06/24/com-impacto-do-coronavirus-fmi-preve-queda-de-91percent-para-o-pib-do-brasil-neste-ano.ghtml>>. Acesso em: 06/09/2020.
- 17 IBGE. *PIB cai 9,7% no 2º trimestre de 2020*. 2020. <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/28721-pib-cai-9-7-no-2-trimestre-de-2020>>. Acesso em: 06/09/2020.
- 18 PWC. *The World in 2050*. 2017. <<https://www.pwc.com/gx/en/world-2050/assets/pwc-the-world-in-2050-full-report-feb-2017.pdf>>.
- 19 FRONTCZAK, M. et al. Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design. *Indoor air*, v. 22, p. 119–31, 09 2011.
- 20 ALTOMONTE, S.; SCHIAVON, S. Occupant satisfaction in leed and non-leed certified buildings. *Building Environment*, v. 68, p. 66–76, 2013.
- 21 INVIDIATA, A.; GHISI, E. Life-cycle energy and cost analyses of window shading used to improve the thermal performance of houses. *Journal of Cleaner Production*, v. 133, p. 1371–1383, 2016.
- 22 SHARMA, M. Development of a ‘green building sustainability model’ for green buildings in india. *Journal of Cleaner Production*, v. 190, p. 538–551, 2018.
- 23 YEHEYIS, M. et al. An overview of construction and demolition waste management in canada: a lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy*, p. 81–91, 2016.
- 24 ZHANG, L.; WU, J.; LIU, H. Turning green into gold: A review on the economics of green buildings. *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 2234–2245, 2018.
- 25 ZHANG, Y. et al. A survey of the status and challenges of green building development in various countries. In: *Sustainability*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 11, n. 5385, p. 29.
- 26 JIA, R. et al. Design automation for smart building systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 106, p. 1680 – 1699, 2018.
- 27 International Energy Agency (IEA). *The Critical Role of Buildings*. 2019. <<https://www.iea.org/reports/the-critical-role-of-buildings>>.
- 28 International Energy Agency (IEA). *Energy efficiency market report 2016*. 2016.
- 29 SAIDUR, R. A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 3, p. 877 – 898, 2010.
- 30 PLESSIS, G. E. D.; LIEBENBERG, L.; MATHEWS, E. H. The use of variable speed drives for cost-effective energy savings in south african mine cooling systems. *Applied Energy*, v. 111, p. 16 – 27, 2013.
- 31 SUGARMAN, S. C. *HVAC fundamentals*. [S.l.]: The Fairmont Press Inc, 2007. 325 p.

- 32 FERREIRA, C. R. *Proposta de melhoria no plano de manutenção do sistema de refrigeração de um edifício da rede globo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 10 2018.
- 33 KAVANAUGH, S. *HVAC Simplified*. [S.l.]: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2006.
- 34 OLIVEIRA, F. R. de. *Energy Efficiency in variable speed centrifugal chiller systems driven by synchronous reluctance motors*. Dissertação (Mestrado) — The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 2 2018.
- 35 STOECKER, W.; JONES, J. *Refrigeration and Air Conditioning*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1982. (McGraw-Hill series in mechanical engineering). ISBN 9780070616196.
- 36 MYERS, M.; HAINES, R. *HVAC Systems Design Handbook, Fifth Edition*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2009.
- 37 FORSTHOFFER, W. *3. Forsthoffer's Rotating Equipment Handbooks: Compressors*. [S.l.]: Elsevier Science, 2005. (Forsthoffer's Rotating Equipment Handbooks).
- 38 RODA, L. M. da C.; MAIOLI, M. F. *Metodologias para caracterização do desempenho de uma torre de resfriamento de água e suas aplicações*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 2010.
- 39 SAMPAIO, F. S. *Torre de resfriamento: Modelagem, simulação e testes experimentais para apoio ao ensino de engenharia mecânica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, Brazil, 2013.
- 40 GUPTA, A.; BAIS, A. S. *Cooling Tower Market Size By Product (Evaporative/Wet, Dry, Hybrid), By Technology (Open Circuit, Closed Circuit, Hybrid), By Design (Mechanical, Natural), By Build (Field Erection, Package), By Construction Material (Concrete, Steel, FRP, Wood), By Flow (Cross Flow, Counter Flow), By Application (Chemicals & Fertilizers, Oil & Gas, Power Generation, HVACR) Industry Analysis Report, Regional Outlook, Application Potential, Competitive Market Share & Forecast, 2019 - 2025*. [S.l.], 2019.
- 41 ALMEIDA, R. *Como definir uma CAG eficiente?* 2020. <<http://www.engenhariaearquitectura.com.br/2020/01/como-definir-uma-cag-eficiente/>>. Acesso em: 31/05/2020.
- 42 Redação Guia do Ar Condicionado. *Economia de energia com a substituição do chiller - Aprenda como calcular*. 2018. <<https://guiadoarcondicionado.com.br/economia-de-energia-com-a-substituicao-do-chiller/>>. Acesso em: 31/05/2020.
- 43 Redação Guia do Ar Condicionado. *O que fazer para melhorar a eficiência do chiller*. 2018. <<https://guiadoarcondicionado.com.br/o-que-fazer-para-melhorar-eficiencia-do-chiller/>>. Acesso em: 31/05/2020.
- 44 PUCCINELLI, R. C. *Manual técnico: Bombas e estações elevatórias utilizadas em abastecimento de água*. São Paulo, 1968.
- 45 MENEZES, M. S. *Refrigeração e ar condicionado*. [S.l.], 2005.



- 46 ESTIMA, J.; CARDOSO, A. J. M. Efficiency analysis of synchronous reluctance motors. international conference on engineering. In: *International Conference on Engineering-ICEUBI*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 27–29.
- 47 KIOSKERIDIS, I.; MADEMLIS, C. Energy efficiency improvement adopting synchronous motors. In: *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 76–91.
- 48 BIANCHI, N.; ALBERTI, L.; BOTTESI, O. Energy efficiency optimisation in synchronous reluctance motor drives. In: *IEE Proceedings-Electric Power Applications*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 201–209.

# A Folha de dados das bombas

Contacto  
e-mail  
Telefone

**Cliente**

Contacto  
e-mail  
Telefone

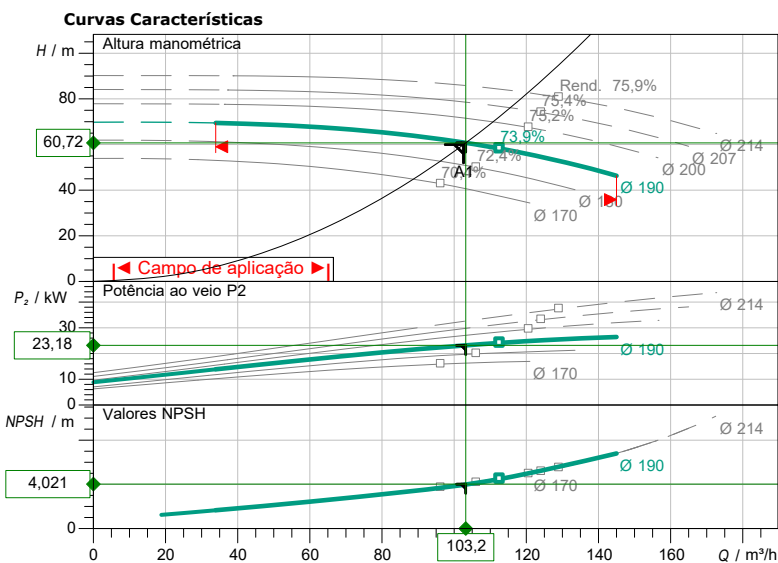
## Características técnicas

Bomba normalizada de rotor seco  
NL 65/200-30/2/6-12

Nome do projecto

Identificação do projecto  
Local de montagem  
N.º de pos. de cliente

Data 2019-04-16



### Características requeridas

Caudal 102,60 m³/h  
Altura Manométrica 60,00 m  
Media Água limpa 100 %  
Temperatura dos líquidos 20,00 °C  
Densidade 998,20 kg/m³  
Viscosidade cinética 1,00 mm²/s

### Características hidráulicas ( ponto de funcionamento)

Caudal 103,22 m³/h  
Altura Manométrica 60,72 m  
Potência ao veio P2 23,18 kW  
Rendimento hidráulico 73,53 %  
NPSH 4,02 m  
Diâmetro da turbina 190

### Dados do produto

Bomba normalizada de rotor seco  
NL 65/200-30/2/6-12  
Pressão máxima de funcionamento 1,6 MPa  
Temperatura dos líquidos -20 °C ... +120 °C  
Máx. temperatura ambiente 40 °C  
Índice de eficiência mínima (MEI)

### Dados do motor

Nível de eficiência do motor IE3  
Ligação de rede 3 ~ 380 V / 60 Hz  
Tolerância de tensão permitida  
Velocidade máx. 3560 1/min  
Potência nominal P2 30,00 kW  
Corrente nominal 56,70 A  
Factor de potência 0,86  
Rendimento 50% / 75% / 100% 92,5/93,4/93,4%  
Grau de protecção IP 55  
Classe de isolamento F  
Protecção do motor

### Dimensões da ligação

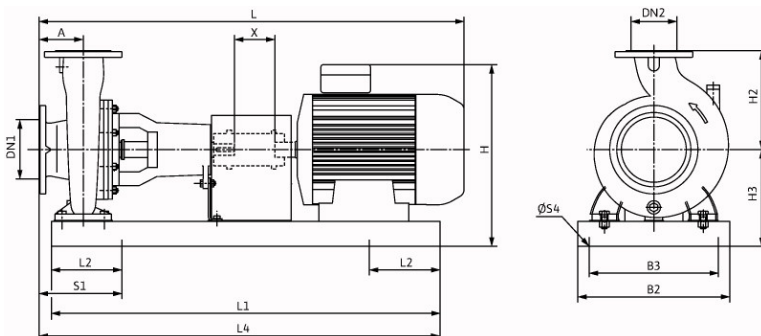
Ligação do tubo no lado da sucção DN 80, PN 16  
Ligação do tubo no lado da pressão DN 65, PN 16  
Comprimento de bomba

### Materiais

Corpo da bomba EN-GJL-250  
Impulsor EN-GJL-250  
Lanterna EN-GJL-250  
Veio da bomba X30Cr13  
Empanque mecânico AQ1EGG

### Informações de encomenda

Peso aprox. 393 kg  
Número de item



Dimensões		mm			
A	100	H2	225	L4	1310
B2	540	H3	303	ØS4	24
B3	480	L	1329	S1	235
DN1	80	L1	1310	X	140
DN2	65	L2	235		