

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

RAMO OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DE UM CHILLER DE ABSORÇÃO NUMA UNIDADE DE
COGERAÇÃO E TRIGERAÇÃO**

MESTRADO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Hugo Santos Capela

Novembro, 2015

Orientador da empresa: Engenheiro Belmiro Crispim

Orientador do ISEP: Engenheiro António Crispim



MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

RAMO OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DE UM CHILLER DE ABSORÇÃO NUMA UNIDADE DE
COGERAÇÃO E TRIGERAÇÃO**

MESTRADO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Hugo Santos Capela

Novembro, 2015

Orientador da empresa: Engenheiro Belmiro Crispim

Orientador do ISEP: Engenheiro António Crispim

Agradecimentos

O processo solitário a que qualquer investigador está destinado, reúne contributos de várias pessoas. Desde o início contei com a confiança e o apoio de inúmeras pessoas e instituições. Sem aqueles contributos, não teria sido possível.

Ao Engenheiro António Alfredo Crispim, orientador da dissertação, agradeço o apoio, pela disponibilidade, atenção dispensada, paciência, dedicação e profissionalismo... um muito obrigado. Acima de tudo, obrigado por me continuar a acompanhar nesta jornada e por estimular o meu interesse pelo conhecimento e pela vida académica.

Ao Engenheiro Belmiro Crispim, bem como a todos os profissionais da empresa Monteiro, Ribas-Indústrias, SA que permitiram o desenvolvimento deste trabalho, e o contato entre as diversas áreas em estudo.

O meu profundo agradecimento aos familiares e amigos por todo o carinho, paciência e pela ajuda constante ao longo desta dissertação.

Resumo

Portugal é um país dependente da energia do exterior, devido à elevada percentagem de consumo de energia a partir de fontes primárias, como por exemplo o gasóleo. Para colmatar este cenário, têm vindo a criar-se incentivos para o uso de energias renováveis e para intensificação de medidas de eficiência energética, como os sistemas de cogeração, de forma a tornar os processos industriais nacionais mais autónomos e mais competitivos.

O presente trabalho, centra-se na avaliação do chiller de absorção na central de trigeriação da empresa Monteiro, Ribas-Indústria, SA, com a finalidade de identificar algum problema no funcionamento do chiller. Após efetuado o estudo do chiller, verificou-se que o coeficiente de performance do chiller apresenta valores que variam entre 0,75 e 0,81, que comparado com o valor especificado, não apresenta grande diferença. No que toca à potência do chiller, esta apresentou valores entre 948 e 1045 kW. Estes valores estavam bem abaixo da potência especificada pelos fornecedores.

Assim, pretendeu-se propor medidas para melhorar a potência obtida. Para o efeito foi sugerido o aquecimento da corrente que atua como fonte de calor para o chiller, a corrente de água quente. Embora a empresa apresente a solução para o problema, um permutador de vapor para o aquecimento da corrente de água quente, este não se encontra em funcionamento contínuo, levando a uma potência mais baixa.

Palavras-chave: chiller de absorção, coeficiente de performance, potência.

Abstract

Portugal is a country dependent on foreign energy, due to the high percentage of energy consumption from primary sources, such as diesel. To overcome this scenario, incentives for the use of renewable energies and for the intensification of energy efficiency measures have been created, such as cogeneration systems, in order to make the national industries processes more autonomous and competitive.

This work focuses the evaluation of the absorption chiller in the central of cogeneration and trigeneration in the company of Monteiro, Ribas – Indústris SA, in order to identify any problems in the chiller's operation. After the study conducted, it was found that the chiller's performance coefficient had values ranging between 0,75 and 0,81, which compared to the specified value has no large difference. Regarding the chiller's power, it ranged from 948 and 1045 kW. These values were well below the power specified by the suppliers.

Thus, it was intended to propose measures to improve the chiller's power. For this purpose it has been suggested heating the current that acts as the heat source for the chiller, the hot water flow. Although the company has a solution to the problem, a steam heat exchanger for heating the hot water flow, this is not a continuous operation, leading in a lower power.

Keywords: absorption chiller, performance coefficient, power.

Índice

1. Introdução	1
1.1. A empresa	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Organização	3
2. Estado da tecnologia.....	5
2.1. Conceito de cogeração e trigeriação	5
2.1.1. Vantagens da cogeração/trigeriação.....	6
2.1.2. Limitações e barreiras da cogeração/trigeriação.....	7
2.1.3. Tecnologias de cogeração	8
2.1.3.1. Turbina de Gás (Ciclo de Brayton).....	8
2.1.3.2. Turbina de Vapor (Ciclo de Rankine).....	9
2.1.3.3. Ciclo Combinado	11
2.1.3.4. Motor alternativo de Combustão Interna.....	11
2.1.4. Tecnologias de trigeriação	13
2.1.4.1. Chillers de absorção.....	13
2.1.4.2. Chillers de adsorção.....	15
2.1.5. Parâmetros de avaliação do chiller.....	16
2.1.5.1. Coeficiente de performance do chiller.....	16
2.1.5.2. Potência do chiller	16
2.1.5.3. Balanço global ao sistema.....	17
3. Descrição da instalação em estudo.....	17
3.1. Ciclo de operação.....	19
3.1.1. Ciclo de absorção: princípio de funcionamento	19
3.1.2. Ciclo de trabalho: o ciclo duplo.....	20
3.2. Ficha de especificações.....	23
3.3. Flúidos circulantes.....	24
3.4. Diagrama P&I da instalação	26

4. Análise e discussão dos resultados obtidos	27
4.1. Levantamento de dados	27
4.2. Tratamento de dados.....	31
4.3. Discussão de resultados.....	33
5. Conclusões	37
6. Bibliografia	39

Índice de figuras

Figura 1.1 – Instalações da empresa Monteiro,Ribas	2
Figura 2.1 – Sistema de convencional.	6
Figura 2.2 – Sistema de cogeração/trigeração.	6
Figura 2.3 – Ciclo aberto de Brayton.....	8
Figura 2.4 – Ciclo fechado de Brayton.	9
Figura 2.5 – Ciclo de Rankine ideal.	10
Figura 2.6 – Motores alternativos de combustão interna.	12
Figura 2.7 – Princípio básico de uma máquina de refrigeração por absorção.	14
Figura 2.8 – Esquema de funcionamento de um chiller de adsorção.	15
Figura 3.1 – Esquema do ciclo de operação do com todos os componentes e correntes identificadas.....	21
Figura 3.2 – Diagrama P&I da instalação.	26

Índice de tabelas

Tabela 1 - Ficha de especificações do fornecedor do chiller.	23
Tabela 2 – Levantamento das temperaturas das correntes do chiller no dia 14 de Outubro.	27
Tabela 3 – Levantamento das temperaturas das correntes do chiller no dia 15 de Outubro.	28
Tabela 4 – Levantamento das temperaturas das correntes do chiller no dia 16 de Outubro.	28
Tabela 5 - Levantamento das temperaturas das correntes do chiller no dia 9 de Novembro.	29
Tabela 6 – Levantamento das temperaturas das correntes do chiller no dia 10 de Novembro.	30
Tabela 7 – Valores para os caudais das correntes circulantes no chiller.....	30
Tabela 8 – Valores médios para as temperaturas de entrada e saída nos diferentes dias.	31
Tabela 9 – Valores obtidos para o COP e a potência do chiller nos diferentes dias.....	31
Tabela 10 – Valores obtidos a energia de entrada e a energia de saída do condensador nos diferentes dias.	32
Tabela 11 – Valores obtidos para o COP do chiller nos diferentes dias e o respetivo desvio do valor especificado.	33
Tabela 12 – Valores obtidos para a potência do chiller nos diferentes dias e o respetivo desvio do valor especificado.	33
Tabela 13 – Valores obtidos para a diferença de energia nos diferentes dias.....	34

Nomenclatura

Variável	Descrição	Unidade
COP	Coeficiente de performance do chiller	Adimensional
E_u	Energia removida da corrente gelada	kW
E_a	Energia fornecida pela fonte quente	kW
$C_{p\text{água}}$	Calor específico da água	kJ/kg.K
m_{gelada}	Caudal mássico da corrente de água gelada	kg/s
m_{quente}	Caudal mássico da corrente de água quente	kg/s
$T_{\text{gel ent}}$	Temperatura de entrada da corrente água gelada	°C
$T_{\text{gel sai}}$	Temperatura de saída da corrente de água gelada	°C
$T_{\text{q ent}}$	Temperatura de entrada da corrente de água quente	°C
$T_{\text{q sai}}$	Temperatura de saída da corrente de água quente	°C
P_{chiller}	Potência do chiller	kW
P_{cond}	Potência do condensador	kW
P_{abs}	Potência da bomba de absorvente	kW
P_{refrig}	Potência da bomba de refrigerante	kW
m_{refrig}	Caudal mássico da corrente de água de refrigeração	kg/s
$T_{\text{refrig ent}}$	Temperatura de entrada da corrente água gelada	°C
$T_{\text{refrig sai}}$	Temperatura de saída da corrente de água gelada	°C

Lista de abreviaturas

Siglas

COP	Coeficiente de performance
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior

1. Introdução

No âmbito do Mestrado de Engenharia Química- Ramo de Otimização Energética na Indústria Química, foi proposto como tema a avaliação do desempenho de um chiller de absorção da empresa Monteiro, Ribas-Indústrias, SA.

O chiller de absorção faz parte de um sistema de refrigeração acoplado às unidades de cogeração e trigeração. Esta tecnologia encontra-se na empresa Monteiro Ribas-Indústrias SA. Este tipo de tecnologia tem sido cada vez mais implementado devido às suas vantagens inerentes, como o aproveitamento eficiente dos gases de escape, reduzindo assim os custos, e apresentando maior eficiência face às tecnologias convencionais.

A abordagem do tema de cogeração no processo de aprendizagem académico fora breve e de modo geral, sendo improvável o conhecimento da complexidade e aplicabilidade no seu todo. Para que seja possível a compreensão do funcionamento do chiller, é necessário a contextualização no processo de cogeração.

Os chillers de absorção permitem produzir água gelada a partir de uma fonte de calor. Esta fonte de calor será o aproveitamento de calor que seria desperdiçado.

Para se compreender melhor o funcionamento do chiller de absorção, num capítulo posterior enquadrar-se-á o sistema de refrigeração nas tecnologias de cogeração e trigeração.

1.1. A empresa

A empresa Monteiro, Ribas – Indústrias, SA pertence a um grupo empresarial que opera em diversos sectores da indústria, nomeadamente embalagens flexíveis, couro artificial, borracha e energia, encontrando-se sediada na cidade do Porto (figura 1.1).⁽¹⁾

Nos dias de hoje, a Monteiro Ribas está estruturada segundo um modelo de corporação industrial, em que a gestão operacional de cada negócio se desenvolve de forma autónoma e como empresa independente. Emprega cerca de 350 trabalhadores, possui uma área total na ordem dos 41.000m² e a atividade dos seus negócios, está fortemente direcionada para o mercado de exportação.⁽¹⁾



Figura 1.1 – Instalações da empresa Monteiro,Ribas. ⁽¹⁾

Desde cedo, o grupo evidenciou-se pela liderança do mercado no sector dos curtumes. No início dos anos 60, a empresa tinha como principal propósito servir a indústria de calçado, mas ao longo desta década iniciou-se uma política de diversificação, a qual teve como principal consequência a expansão do seu mercado. ⁽¹⁾

A empresa começou o fabrico de artigos de borracha para as indústrias de calçado, automóvel, construção civil e ferroviária, o que permitiu alcançar rapidamente o nível de maior fabricante nacional. ⁽¹⁾

A área de atividade da empresa foi ainda alargada, em 1966, à produção de couros artificiais destinados a vestuário, estofos, marroquinaria e calçado. Ainda na mesma década e na perspetiva de diversificação e crescimento da empresa, foi instalado um sector com o objetivo de produzir, para a indústria alimentar, embalagens flexíveis. No ano de 1996, é criada a unidade de componentes técnicos de borracha, resultante do sector da unidade de produção de placas de borracha. ⁽¹⁾

Além das áreas de atividade já exploradas, a Monteiro, Ribas concluiu, em Junho de 1992, a instalação de um sistema de cogeração, investimento de cerca de 3 milhões de euros, que trouxe significativas poupanças de energia para a empresa e para o País. Nessa época os excedentes produzidos eram absorvidos pela EDP, contudo na atualidade, esta entidade compra toda a energia produzida na empresa. Em 2005 a empresa encerrou uma das suas unidades, a de curtumes. ⁽¹⁾

A necessidade de expansão e crescimento de negócio, obrigou a Monteiro, Ribas a olhar para os mercados externos, sobretudo os de países europeus, atingindo atualmente valores de exportação de mais de 70% do total da sua produção. A afirmação nesses mercados faz-se essencialmente pela superior qualidade do produto apresentado, com um

preço mais acessível, quando comparada com a sua concorrência mais direta, e também na capacidade de especialização e agilidade da capacidade produtiva. ⁽¹⁾

1.2. Objetivos

Este trabalho teve como objetivo estudar o chiller de absorção da empresa Monteiro, Ribas-Indústrias SA, para identificar possíveis problemas, visto este apresentar deficiências no seu funcionamento. Para tal recorreu-se às informações recolhidas no decorrer do estágio, bem como informações fornecidas pela empresa e pelo fornecedor do chiller.

No decorrer deste trabalho, pretende-se não só identificar os possíveis problemas, como também apresentar propostas de solução para os mesmos, de modo a corrigir o funcionamento do chiller.

1.3. Organização

Esta dissertação desenvolve-se no total de 6 capítulos.

No capítulo 1, Introdução, focam-se os principais objetivos do trabalho em questão bem como a apresentação da empresa.

No capítulo 2, Estado da tecnologia, são abordados os conceitos de cogeração e trigeração, as suas vantagens e limitações, bem como as tecnologias mais utilizadas nestes processos, aprofundando o funcionamento dos tipos de chillers existentes.

No capítulo 3, Descrição da instalação, é abordado o funcionamento do chiller em questão, com os seus ciclos de operação, ficha de especificações e diagrama de controlo.

No capítulo 4, Análise e discussão dos resultados obtidos, são representados os dados recolhidos mais relevantes para a resolução do problema, é efetuado o tratamento dos referidos dados e apresentados os resultados obtidos e respetiva discussão.

No capítulo 5, Conclusões, encontram-se as principais conclusões retiradas deste estudo, com recurso ao capítulo 4.

No capítulo 6, Bibliografia, encontram-se as fontes de informação para a realização deste estudo.

2. Estado da tecnologia

Este capítulo é referente ao enquadramento do tema, onde são abordados os conceitos de cogeração e trigerção, respetivas vantagens e limitações dos mesmos, bem como as diferentes tecnologias aplicadas em ambos os processos.

2.1. Conceito de cogeração e trigerção

As indústrias necessitam de energia térmica e elétrica para os processos industriais, entre eles o aquecimento de água e ar, bem como a produção de vapor. A energia elétrica é proveniente da rede nacional, enquanto a energia térmica é obtida a partir do fuelóleo, do carvão, da biomassa e do gás natural. Esta utilização das fontes energéticas, por vezes, não é a mais eficiente. Assim, poderão recorrer à cogeração como tecnologia alternativa às grandes centrais termoelétricas. ⁽²⁾

Em meados dos anos 80, a cogeração sofreu um aumento substancial, nos Estados Unidos da América, quando o preço do gás natural sofreu uma queda, apresentando-a como uma alternativa bastante atrativa a novos sistemas de geração de energia. O sistema de cogeração é um dos principais responsáveis pelo declínio dramático da construção de plantas de energias hidráulica e nuclear. ⁽²⁾

Para uma melhor compreensão do conceito de cogeração é necessário saber que a maioria dos sistemas de energia baseiam-se na queima de óleos combustíveis para a produção de vapor, sendo a pressão desse vapor o que torna as turbinas ineficientes. As centrais termoelétricas convencionais transformam apenas 1/3 da energia do combustível em energia elétrica, sendo a restante dissipada para o exterior em forma de calor. Perante este cenário torna-se imprescindível aumentar a eficiência do processo de produção de eletricidade. ⁽²⁾

A cogeração é apresentada como alternativa para colmatar a eficiência do processo de produção de eletricidade, tendo um papel fundamental na competitividade para a redução dos consumos de energia, na economia da energia primária, bem como benefícios ambientais. Este processo consiste no aproveitamento de calor residual de processos termodinâmicos. O processo consiste em aproveitar o calor não convertido em energia mecânica, ou seja, perdas sob a forma de energia térmica do processo. ^{(2) (3)}

Pode definir-se cogeração como a produção combinada de energia elétrica e térmica a partir de um único combustível e de um único conjunto de equipamentos, destinando-se ao consumo de energia pela própria empresa ou para terceiros. Este processo reduz a utilização de equipamentos próprios para a produção de energia térmica e aquisição da energia elétrica à rede. ⁽²⁾

Já a trigeração pode ser definida como uma cogeração alargada, em que está interligado um ciclo de absorção para produção de frio a partir da energia térmica, logo será a produção combinada de energia mecânica/elétrica, calor e frio a partir de um único combustível. Na figura 2.1 e 2.2 evidencia-se a comparação entre os sistemas convencionais de energia e os processos de cogeração/trigeração. ^{(2) (3)}

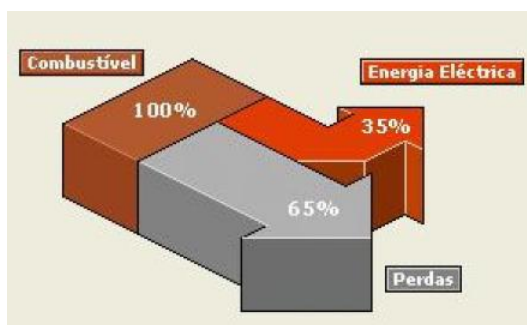


Figura 2.1 – Sistema de convencional. ⁽²⁾

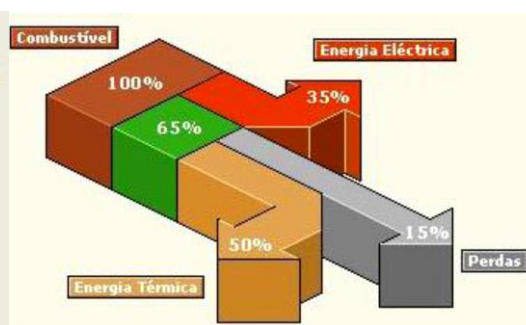


Figura 2.2 – Sistema de cogeração/trigeração. ⁽²⁾

No processo de cogeração/trigeração é possível a conversão superior a 4/5 da energia do combustível em energia efetivamente utilizável. ⁽³⁾

Os processos referidos anteriormente acarretam inúmeras vantagens, tanto a nível local permitindo uma utilização eficiente de energia traduzida na redução da fatura energética do consumidor, assim como a nível global reduzindo o consumo dos combustíveis fósseis, diminuindo o impacto ambiental associado ao uso dos mesmos. ⁽²⁾

2.1.1. Vantagens da cogeração/trigeração

Os processos de cogeração/trigeração assentam na maior eficiência energética e económica e acarretam inúmeras vantagens:

- ✓ **Economias de energia primária** – A implementação bem-sucedida da cogeração/trigeração provoca uma redução do consumo de combustível de 25% comparativamente à produção convencional.

- ✓ **Redução de emissões poluentes** – A redução da poluição atmosférica segue o mesmo princípio. Com a utilização de gás natural em vez de derivados de petróleo e carvão as emissões gases e partículas são reduzidas.
- ✓ **Benefícios económicos** – As vantagens para o utilizador final são económicas. Os custos energéticos do processo são menores que os sistemas convencionais, causando uma redução considerável dos preços.
- ✓ **Aumento da fiabilidade do aproveitamento energético** – Pequenas centrais de cogeração de energia elétrica e calor, ligadas à rede elétrica, garantem uma operação ininterrupta da instalação, no caso de falha do funcionamento da central ou do abastecimento da rede. A produção descentralizada reduz a necessidade de grandes centrais termoelétricas. Contribuem para o aumento de emprego a nível local.
- ✓ **Aumento da estabilidade do sistema elétrico** – As unidades de trigerção proporcionam um alívio significativo às redes do sistema elétrico durante o Verão. Cargas de arrefecimento são transferidas da eletricidade para um combustível fóssil através do processo de arrefecimento/refrigeração. Isto contribui para o aumento da estabilidade das redes elétricas e para a melhoria da eficiência do sistema. ^{(2) (3)}

2.1.2. Limitações e barreiras da cogeração/trigerção

Embora a cogeração apresente várias vantagens relativamente a outros sistemas de geração de energia, há alguns inconvenientes a considerar:

- ✗ A necessidade de efetuar estudos de viabilidade económica de modo a determinar até que ponto o investimento é rentável;
- ✗ Os lucros dependem dos preços de eletricidade e do combustível utilizado, e estes estão em constante mudança;
- ✗ A energia térmica apenas pode ser utilizada nas redondezas do centro produtor, visto o transporte da mesma ser bastante difícil devido às perdas nas tubagens o que limita as unidades a estações relativamente pequenas quando comparadas às centrais termoelétricas. ⁽³⁾

2.1.3. Tecnologias de cogeração

Uma central de cogeração pode estar associada a uma turbina de vapor do ciclo de Rankine ou uma turbina de gás de ciclo de Brayton ou ciclo combinado ou mesmo a motores de combustão interna (Ciclo de Otto ou ciclo Diesel).

Para a trigerção, são vulgarmente utilizados os motores de combustão interna. Nesta tecnologia, a produção a frio pode ser realizada por dois tipos de chillers, os de adsorção ou absorção.

2.1.3.1. Turbina de Gás (Ciclo de Brayton)

O ciclo de Brayton surgiu em meados de 1870, pelo George Brayton para o uso no motor de queima alternativo. As turbinas a gás usualmente atuam em ciclo aberto como representado na figura 2.3.

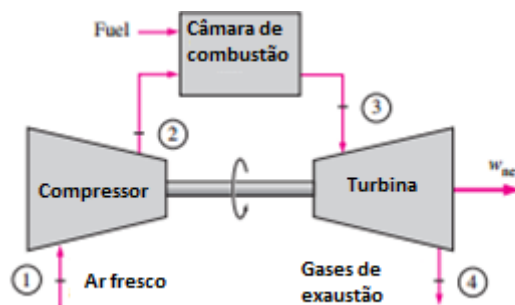


Figura 2.3 – Ciclo aberto de Brayton.

Em condições ambientais, o ar fresco é arrastado para o compressor no qual a pressão e temperatura são elevadas. De seguida, o combustível é queimado a pressão constante, na câmara de combustão. Os gases resultantes da queima, entram na turbina, onde são expandidos para a pressão atmosférica. Os gases que saem da turbina não sofrem um processo de recirculação, saindo para a atmosfera, o que se traduz num ciclo aberto.

O ciclo acima descrito pode ser modelado, resultando um sistema fechado, como é evidenciado na figura 2.4.

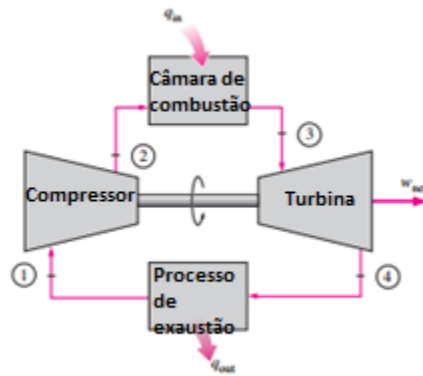


Figura 2.4 – Ciclo fechado de Brayton. ⁽⁴⁾

No ciclo de Brayton fechado, o processo de combustão é substituído por um processo de adição de calor de uma fonte externa (q_{in}), a pressão constante. O processo de exaustão é substituído por uma rejeição de calor para o exterior a pressão constante. Assim, este processo compreende quatro processos. Entre 1 e 2 ocorre uma compressão isentrópica no compressor. De 2 para 3, uma adição de calor a pressão constante. Entre 3 e 4 ocorre uma expansão isentrópica na turbina. Por último, entre 4 e 1 recuperação de calor a pressão constante. ⁽⁴⁾

Este processo acarreta inúmeras vantagens, que dizem respeito à sua manutenção simples e à baixa poluição ambiental. Além disso, não necessita de vigilância constante, fornece energia térmica a altas temperaturas oscilando entre os 500 e 600°C. Outro benefício associado a esta tecnologia, advém de não necessitar do uso de refrigeração. ⁽⁵⁾

Contudo, é limitado em relação ao número de tipo de combustíveis, necessita de dispositivos de anti poeira, anti corrosão nas paragens mais demoradas e o tempo de vida é reduzido. Outra limitação assenta na ineficácia em processos com poucas necessidades térmicas. ⁽⁵⁾

2.1.3.2. Turbina de Vapor (Ciclo de Rankine)

O ciclo de Rankine baseia-se nas quatro transformações que o fluido sofre nos vários equipamentos como pode ser visualizado na figura 2.5.

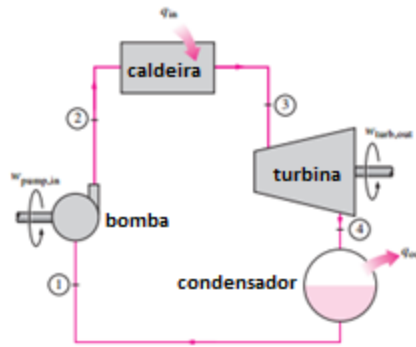


Figura 2.5 – Ciclo de Rankine ideal. ⁽⁴⁾

O princípio de funcionamento baseia-se em quatro processos. No ponto 1, o fluido apresenta-se no estado líquido saturado, sendo que entre o ponto 1 e o 2 ocorre uma compressão isentrópica numa bomba, isto é, o fluido de trabalho é bombeado de uma baixa para uma alta pressão. No ponto 2, o fluido encontra-se no estado de líquido comprimido. Do ponto 2 para 3 ocorre uma adição de calor a pressão constante, numa caldeira, saindo como vapor sobreaquecido. Entre os pontos 3 e 4 ocorre uma expansão isentrópica numa turbina realizando trabalho de eixo-que é convertido em energia elétrica através de um alternador. Em seguida o vapor (ou vapor húmido) com baixo valor energético é condensado a pressão constante a líquido saturado, fechando-se, assim, o ciclo de transformação. ⁽⁴⁾

Nos processos de cogeração, a pressão do vapor oscila entre os 40 e os 100 bar, a temperatura do vapor entre 300 e 450°C e conseqüentemente, a potência de saída entre 0,5 e 100 MW. ⁽⁵⁾

Este sistema apresenta diversas vantagens, destacando-se o elevado tempo de vida do equipamento, bem como a segurança do equipamento, assim como não necessita de uma vigilância constante. Outros benefícios do uso destes equipamentos advém de rendimento global elevado, competência de fornecer vapor a alta pressão e/ou pressão atmosférica aos processos térmicos. É de salientar que estes equipamentos adaptam-se ao uso de uma variedade de combustíveis. ⁽⁵⁾

As limitações associadas a este tipo de equipamentos dizem respeito ao arranque lento e ao baixo rendimento elétrico. ⁽⁵⁾

2.1.3.3. Ciclo Combinado

Os sistemas têm sido desenvolvidos de forma a ser cada vez mais fiáveis e eficientes. Com este desenvolvimento, surge um novo tipo de cogeração que interliga dois sistemas isolados de forma a ser unificados, designado por cogeração em ciclo combinado. De um modo geral, o ciclo que opera a temperaturas mais altas rejeita calor, sendo recuperado pelo ciclo que opera a baixas temperaturas, produzindo-se eletricidade e aumentando o rendimento elétrico. O ciclo combinado com maior interesse resulta de um turbina a gás do tipo ciclo Brayton no topo e de uma turbina a vapor tipo ciclo Rankine. Os benefícios associados a esta tecnologia provêm da grande flexibilidade na quantidade de energia térmica produzida e na redução dos custos globais da operação. Uma limitação do uso desta tecnologia é a alta temperatura do gás que sai da turbina, eliminando potenciais ganhos na eficiência térmica. Isto pode ser colmatado pelo uso de regeneração, contudo esta é limitada.⁽⁴⁾

2.1.3.4. Motor alternativo de Combustão Interna

Nos motores alternativos de combustão interna engloba-se o ciclo de Diesel e o ciclo de Otto.⁽⁴⁾

O ciclo de Otto é caracterizado por quatro tempos. Inicialmente, as válvulas de admissão e descarga, estão fechadas, e o pistão encontra-se na sua posição mais baixa (PMI). A mistura de ar e combustível é comprimida num pistão, deslocando-o para cima. Posteriormente, o pistão atinge a sua posição mais alta (PMS), iniciando-se a combustão a partir da vela de ignição, aumentando a pressão e a temperatura. Os gases libertados na combustão provocam um movimento descendente do pistão, forçando o eixo de manivelas a girar, realizando trabalho útil durante o tempo de expansão do motor. O primeiro ciclo mecânico termina quando o pistão atinge a sua posição mais baixa, e o cilindro contém a mistura de combustão. O pistão move-se para cima, mais uma vez libertando os gases de combustão, através da válvula de descarga (tempo de exaustão) e uma segunda vez volta a descer sugando o ar fresco e combustível através da válvula de admissão (tempo de admissão). O processo repete-se.⁽⁴⁾

Em relação o funcionamento do ciclo de Diesel é idêntico ao do Otto. A única distinção entre estes dois decorre no momento da combustão, sendo que no ciclo de Otto a explosão do combustível advém da faísca, e no ciclo de Diesel a combustão ocorre unicamente pela

compressão do combustível. Pode evidenciar-se na figura 2.6. os motores alternativos de combustão interna. ⁽⁵⁾

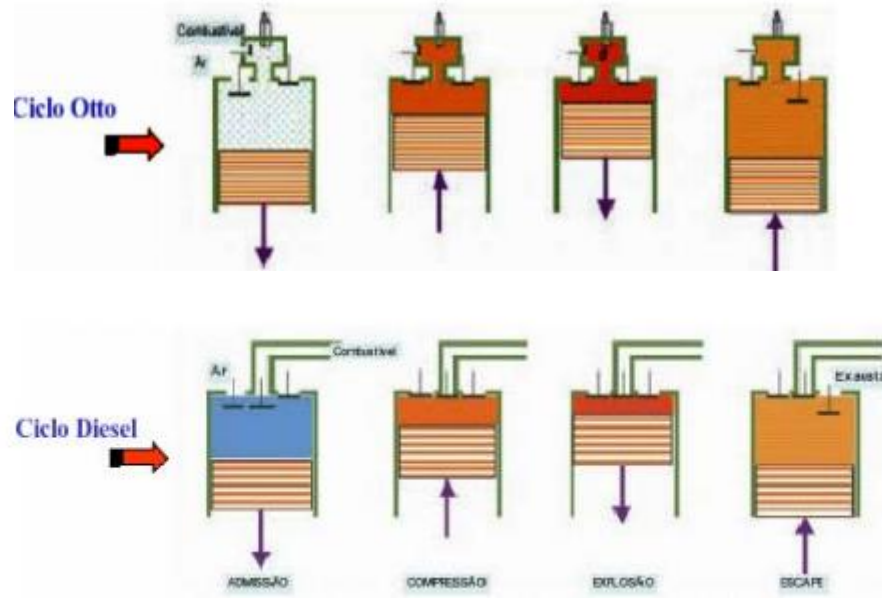


Figura 2.6 – Motores alternativos de combustão interna. ⁽⁵⁾

As vantagens associadas a este tipo de motor advêm do seu arranque rápido, consegue adaptar-se segundo necessidades térmicas e alta eficiência mecânica. Outro benefício destes motores é o facto de não necessitarem de vigilância constante. As desvantagens estão associadas ao seu rendimento térmico, custos de manutenção altos e tempo de vida reduzido. ⁽⁵⁾

2.1.4. Tecnologias de trigeriação

2.1.4.1. Chillers de absorção

Os chillers de absorção são aparelhos que produzem frio, a partir da energia térmica do processo de cogeração. ⁽⁶⁾

Os chillers de absorção incluem um sistema de condensação e um sistema de evaporação para produzir a refrigeração. Estes chillers utilizam uma fonte de calor, por combustão direta ou por combustão indireta, sendo alimentados quer por vapor, água quente ou energia térmica desperdiçada. ⁽⁶⁾

- ✓ **Chiller de absorção de queima direta** – nestes sistemas o calor necessário ao processo é obtido queimando diretamente um combustível. ⁽⁷⁾
- ✓ **Chiller de absorção de queima indireta** – nestes sistemas o calor necessário é fornecido na forma de vapor de baixa pressão, água quente ou um processo de purga quente. ⁽⁷⁾

Existem essencialmente dois tipos distintos de chillers de absorção de queima indireta:

- ✓ **Sistemas onde o absorvente é o amoníaco:** estes sistemas representam um investimento relativamente elevado, sendo normalmente aplicados apenas em instalações de grande capacidade. ⁽⁷⁾
- ✓ **Sistemas onde o absorvente é o brometo de lítio:** representa o sistema mais utilizado nos casos de integração com sistemas de micro-cogeração, devido essencialmente a uma melhor relação entre o seu custo e a sua eficiência energética. ⁽⁷⁾

Os chillers em questão são constituídos por um evaporador, um condensador, um absorvedor, um gerador e uma bomba de solução. O absorvedor através da bomba de solução, e com o auxílio do gerador comprimem o vapor do refrigerante. O vapor gerado no evaporador é absorvido por um líquido absorvente no absorvedor. O absorvente retira o refrigerante que está mais diluído, bombeia-o para o gerador onde é libertado como vapor, o qual será condensado no condensador. O absorvente regenerado ou mais concentrado é então devolvido ao absorvedor para captar de novo vapor de refrigerante. O calor fornecido ao gerador é efetuado a uma temperatura relativamente alta enquanto o calor de absorção da secção do absorvedor é dissipado, a um nível de temperatura reduzido, por circulação de

água do condensador nessa secção. Na figura 2.7. está representado o princípio básico de funcionamento de máquina de refrigeração por absorção. ⁽⁸⁾

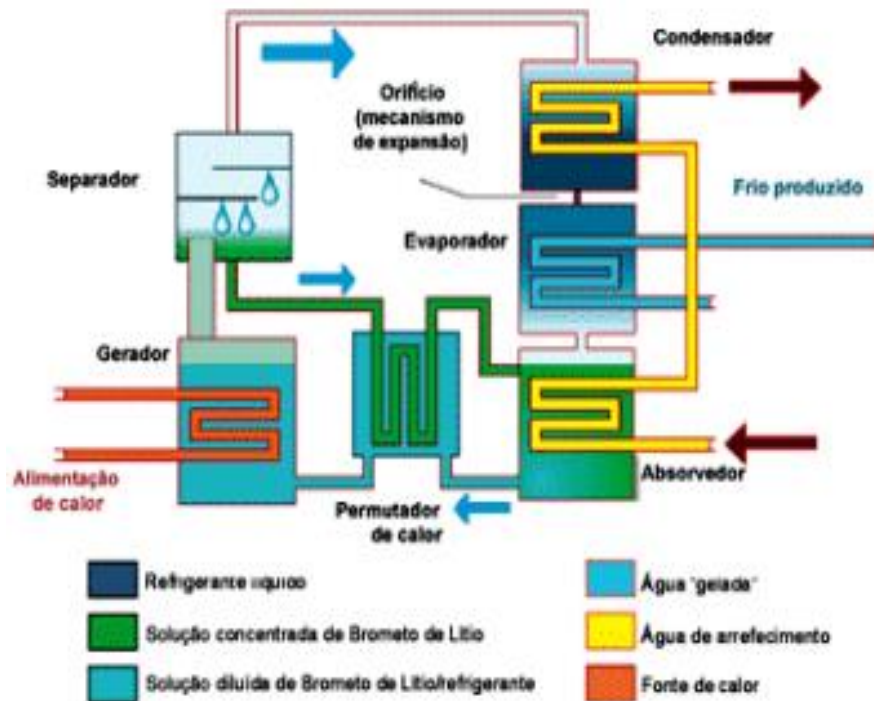


Figura 2.7 – Princípio básico de uma máquina de refrigeração por absorção. ⁽⁸⁾

Os chillers de absorção apresentam inúmeras vantagens que assentam no seu baixo consumo elétrico, uma vez que a sua principal fonte de energia ser resultante de uma fonte de calor externa. Em termos de manutenção é reduzida, devido à ausência de peças móveis, além disso tem um tempo de vida útil elevado. Como nesta tecnologia são utilizadas bombas de baixo consumo de energia, ao invés dos compressores existentes nos refrigeradores por compressão de vapor, os níveis de ruído e vibração são substancialmente reduzidos. O fluido refrigerante é a água, tendo por isso vantagens ambientais em comparação com o clorofluorcarboneto, que danifica a camada de ozono. As limitações do uso desta tecnologia advêm do consumo elevado de energia térmica, associado a eficiências baixas, no caso do brometo de lítio pode ocorrer cristalização. ⁽⁸⁾

2.1.4.2. Chillers de adsorção

Nos chillers de adsorção, tal como os anteriores, o calor gerado advém de uma fonte externa, para a produção de frio, sendo a distinção entre ambos baseada no seu princípio de funcionamento. ⁽⁸⁾

Este sistema é constituído por um adsorvente, um evaporador e um condensador. O adsorvente é regenerado, através da água quente proveniente de uma fonte externa, fomentando a vaporização do fluido refrigerante. De seguida, este passa pelo condensador onde o torna líquido. Existe uma ligação entre o condensador e o evaporador que transporta o fluido refrigerante na forma de líquido saturado, para o evaporador. De seguida, o adsorvente adsorve o vapor de água que vem do evaporador. Nesta secção, deve ocorrer um arrefecimento de forma a garantir que a adsorção é contínua. A pressão no evaporador é relativamente baixa, sendo que o fluido refrigerante no evaporador é transferido sob a forma de vapor, retirando o calor de evaporação de forma a produzir frio. Na figura 2.8. está representado o esquema de funcionamento de um chiller de adsorção ⁽⁸⁾

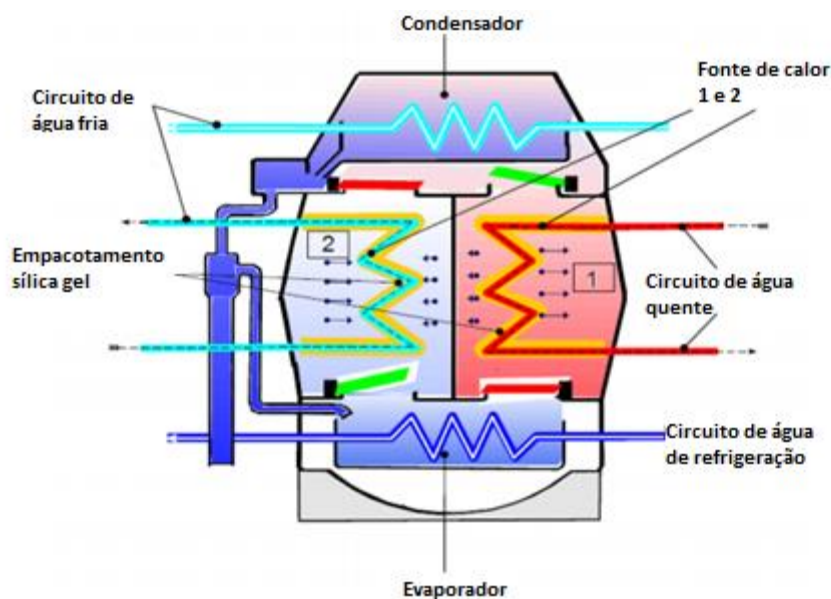


Figura 2.8 – Esquema de funcionamento de um chiller de adsorção. ⁽⁸⁾

Os chillers de adsorção podem utilizar fontes de calor com baixa temperatura, cerca de 55°C com um coeficiente entre 0,5 a 0,6. Neste sentido, podem ser aplicados em sistemas térmicos ou em sistemas de cogeração de baixa temperatura. Estes chillers não apresentam danos ambientais. Tal como os chillers de absorção, estes também não têm peças móveis, o que se traduz numa manutenção reduzida. Uma desvantagem associada a este equipamento é o seu elevado investimento inicial. ⁽⁸⁾

2.1.5. Parâmetros de avaliação do chiller

A avaliação ao desempenho do chiller será feita com recurso ao COP, à potência e ao balanço geral de energia ao condensador.

2.1.5.1. Coeficiente de performance do chiller

O coeficiente de performance é o parâmetro base para verificar a eficiência de um sistema de refrigeração. Este é a razão entre a energia útil adquirida e a energia aplicada, pode ser expresso como: ⁽⁹⁾

$$\text{COP} = \frac{E_u}{E_a} \text{ (equação 1)}$$

$$E_u = \dot{m}_{\text{gelada}} \times c_{p\text{água}} \times (T_{\text{gel ent}} - T_{\text{gel sai}}) \text{ (equação 2)}$$

$$E_a = \dot{m}_{\text{quente}} \times c_{p\text{água}} \times (T_{\text{q ent}} - T_{\text{q sai}}) \text{ (equação 3)}$$

O COP pode ser utilizado para definir a eficiência de refrigeração ou a eficiência de aquecimento, no caso das bombas de calor. Nos casos de refrigeração, o COP é definido como a razão entre calor removido e energia que entra no compressor. Nos casos de aquecimento, o COP é definido como a razão entre calor entregue e energia que entra no compressor. Nos sistemas de refrigeração por absorção, o COP é definido como a razão entre o calor removido na fonte fria e o calor fornecido pela fonte quente. Pode, também, ser utilizado para definir a eficiência nas condições padrão ou não-padrão ou como média ponderada das condições sazonais. O termo pode ou não incluir o consumo de energia de sistemas auxiliares, como ventiladores interiores ou exteriores, bombas de água gelada ou torres de refrigeração. Quanto maior o COP, mais eficiente é o sistema. ⁽⁹⁾

2.1.5.2. Potência do chiller

A potência do chiller é determinada com recurso á corrente de água gelada, ou seja, é capacidade que o chiller tem de arrefecer esta corrente. A potência á calculada através da seguinte equação: ⁽⁹⁾

$$P_{\text{chiller}} = \dot{m}_{\text{gelada}} \times c_{p\text{água}} \times (T_{\text{gel ent}} - T_{\text{gel sai}}) \text{ (equação 4)}$$

Esta equação acaba por ser idêntica à equação de calor removido, utilizada no cálculo do COP.

2.1.5.3. Balanço global ao sistema

De um modo simples e direto, a equação do balanço do global resume-se á seguinte equação:

$$P_{\text{cond}} = E_u + E_a + P_{\text{abs}} + P_{\text{refrig}} + \text{Perdas (se existem)} \text{ (equação 5)}$$

Onde o único parâmetro desconhecido, a potência do condensador, é calculado pela equação seguinte:

$$P_{\text{cond}} = \dot{m}_{\text{refrig}} \times c_{p\text{água}} \times (T_{\text{refrig sai}} - T_{\text{refrig ent}}) \text{ (equação 6)}$$

3. Descrição da instalação em estudo

Para efetuar o estudo ao chiller de absorção da Monteiro Ribas, foi necessário o conhecimento por inteiro da instalação em questão. No capítulo anterior é abordado o funcionamento geral de um chiller de absorção; neste capítulo são apresentadas todas as condições de funcionamento bem como especificações da instalação presente na empresa.

Salienta-se, novamente, que este chiller está acoplado ao sistema de cogeração existente na empresa Monteiro, Ribas-Indústrias SA, de modo a aproveitar o calor que seria desperdiçado no processo.

3.1. Ciclo de operação

3.1.1. Ciclo de absorção: princípio de funcionamento

O ponto de ebulição da água varia em função da pressão. À pressão atmosférica a água ferve a 100°C. A pressões mais baixas, a água entra em ebulição a temperaturas inferiores. À pressão de 0,6 kPa absolutos, o ponto de ebulição da água é de 3,7°C. ⁽¹⁰⁾

Considerando uma certa quantidade de água (a 12°C) que passa no interior de uma tubagem existente no interior de um evaporador. Como a temperatura de ebulição no interior do recipiente é 4°C, se pulverizar água sobre a tubagem, esta vai evaporar, arrefecendo a água que passa no interior dos tubos. No evaporador dá-se a formação de vapores de água, estes farão com que a pressão aumente, e por conseguinte, a temperatura de ebulição no interior do recipiente. Assim é necessário a remoção constante destes vapores da máquina. Este problema é resolvido através da pulverização de uma solução de brometo de lítio numa secção diferente do recipiente ao qual é atribuído o nome de absorvedor, que se encontra a seguir da secção do evaporador. ⁽¹⁰⁾

Esta solução absorve os vapores de água gerados no evaporador para manter a pressão constante a 0,6 kPa. À medida que se dá a absorção, a concentração da solução diminui, diminuindo a capacidade de absorção da solução. De modo a aumentar a concentração para os níveis iniciais, esta solução será enviada para uma secção chamada de gerador, onde esta solução é aquecida por uma fonte de calor água quente. Devido ao processo de ebulição à saída do gerador, uma solução com a mesma concentração que a inicial está disponível para ser pulverizada no absorvedor, começando um novo ciclo. No gerador também se dá a formação de vapores de água. Estes serão enviados para uma

secção chamada de condensador. Como resultado, o líquido refrigerante obtido é pulverizado no evaporador para gerar o efeito de arrefecimento. ⁽¹⁰⁾

3.1.2. Ciclo de trabalho: o ciclo duplo

Num chiller de absorção normal, a capacidade é determinada pela capacidade atingida à máxima concentração que pode ser utilizado sem criar o risco de cristalização. Assim, o absorvedor é considerada a secção mais crítica. Nos chillers de água quente, onde as temperaturas da fonte de calor são baixas, a capacidade é decida pela concentração máxima que o gerador pode atingir. Essas concentrações são geralmente baixas e longe do ponto de cristalização. Assim, nos chillers de água quente, o gerador torna-se numa secção mais crítica do que os absorvedores. ⁽¹⁰⁾

A uma dada temperatura, a concentração de brometo de lítio aumenta a baixas pressões. Assim se o gerador se mantiver a baixas pressões, consegue-se atingir uma concentração mais elevada e uma capacidade superior. Isto é conseguido através da mudança de direção da água de refrigeração Para facilitar a ebulição de brometo de lítio a baixas temperaturas, é necessário uma área de gerador enorme ou um grande caudal de água de refrigeração. Ambas são soluções dispendiosas. Daí surge o ciclo duplo. ⁽¹⁰⁾

Descrição do ciclo

O brometo de lítio circula em ambas as máquinas em paralelo, enquanto as correntes de água quente, água fria e água gelada circulam em série. O gerador de baixa pressão e baixa temperatura fornece brometo de lítio ao absorvedor de alta pressão, enquanto o gerador de alta pressão e alta temperatura fornece brometo de lítio ao absorvedor de baixa pressão. O gerador de alta temperatura pode gerar concentrações mais elevadas, que podem criar baixas pressões no absorvedor. A baixa pressão no absorvedor facilita água gelada de baixa temperatura. O gerador de baixa temperatura gera concentrações mais baixas. No entanto este brometo de lítio é utilizado no absorvedor de alta pressão, onde as temperaturas de água gelada são mais elevadas. A pressões mais elevadas a absortividade do brometo de lítio aumenta. Assim, o manuseamento eficaz das pressões e concentrações permitem aumentar a capacidade numa mesma área de transferência de calor. ⁽¹⁰⁾

Como é possível verificar na figura 3.1 o chiller é constituído por dois evaporadores, dois absorvedores, dois geradores, dois geradores e dois permutadores de calor. Existem dois de cada um destes equipamentos, a operar a baixa e alta pressão, de modo a aumentar a

eficiência de refrigeração. Existe ainda uma bomba de refrigerante, uma bomba de absorvente, uma unidade de purga e uma bomba de purga.

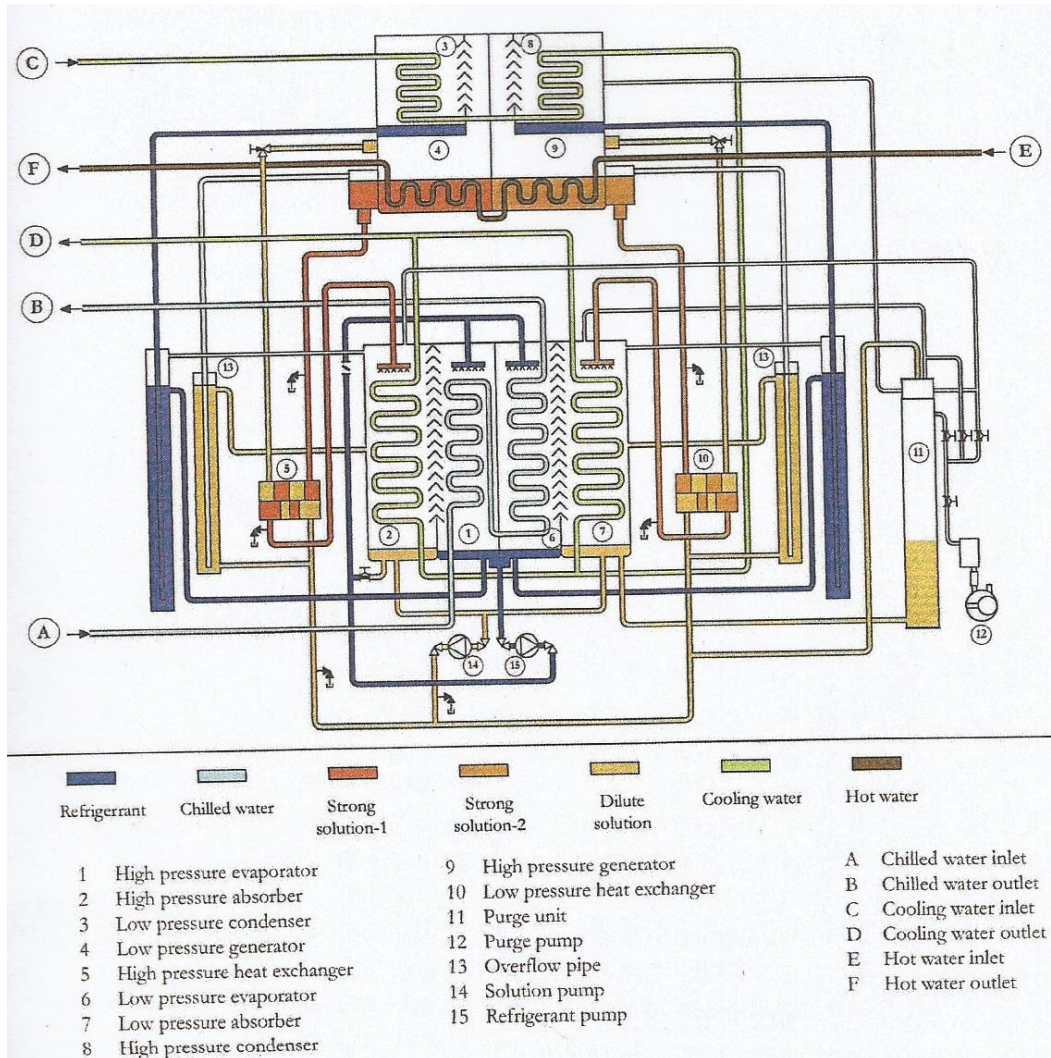


Figura 3.1 – Esquema do ciclo de operação do com todos os componentes e correntes identificadas. ⁽¹⁰⁾

Geradores: Recebem a água quente no gerador de alta temperatura. Neste, a água quente faz com que o brometo de lítio entre em ebulição, reduzindo-a para uma temperatura média. Esta água de temperatura média será o que entra no gerador de baixa temperatura. ⁽¹⁰⁾

Permutadores de calor: A solução concentrada proveniente dos geradores é enviada para os absorvedores depois da passagem por estes permutadores de calor. Nestes a solução aquece a solução diluída que vem dos absorvedores para os geradores. A temperatura da solução concentrada diminui. A utilização destes permutadores leva a um aumento na eficiência da máquina. ⁽¹⁰⁾

Absorvedores: Assim que a solução chega aos absorvedores, é pulverizada na tubagem onde passa a água gelada. A solução concentrada baixa, absorvendo os vapores gerados na secção do evaporador, de modo a manter a pressão constante, o que leva à diluição da solução de brometo de lítio. Daqui a solução é bombeada novamente para os geradores, onde será concentrada pela fonte de calor, a água quente. ⁽¹⁰⁾

A solução que vem do gerador de baixa temperatura tem menor concentração, e por isso é enviada para o absorvedor de alta pressão: no evaporador que está ao lado deste absorvedor (evaporador de alta pressão), a primeira etapa do arrefecimento da água gelada é atingido. Por outro lado, a solução concentrada vinda do absorvedor de alta temperatura tem uma concentração bem superior e maior capacidade de absorção. É, então, utilizada no absorvedor de baixa pressão. No evaporador que se encontra ao lado, o de baixa pressão, a última etapa do arrefecimento da água gelada é atingido. ⁽¹⁰⁾

A água de refrigeração circula no interior dos tubos do absorvedor, uma vez que absorção da água pelo brometo de lítio é um processo exotérmico. O calor gerado neste processo é chamado calor de diluição. Se este calor não for removido da máquina, a temperatura da solução vai aumentar, diminuindo a capacidade de absorção, o que levaria a uma diminuição da eficiência do processo. ⁽¹⁰⁾

Condensadores: Os vapores provenientes do gerador vão entrar nos condensadores, para serem condensados com recurso à água de refrigeração que circula no interior dos tubos. A água entra primeiramente no condensador de baixa temperatura. A pressão deste depende das condições de saída da água de refrigeração, a qual é mais baixa do que o condensador de alta temperatura. Assim, a pressão de condensação no condensador de baixa pressão é mais baixa, o que permite uma melhor concentração da solução de brometo de lítio no gerador de baixa temperatura. O líquido refrigerante é recolhido no fundo do condensador e é enviado para o evaporador. ⁽¹⁰⁾

Evaporadores: O refrigerante vindo dos condensadores entra nos evaporadores, que se encontram a uma pressão menor do que os condensadores; por esta razão a temperatura do refrigerante baixa para 3,7°C, que é a temperatura de ebulição correspondente à pressão no recipiente. Assim que este é recolhido no fundo do evaporador, é bombeado por uma bomba para os tabuleiros de distribuição dos evaporadores, que depois caem sobre os tubos por efeito da gravidade. Ao entrar em contacto com os tubos, evapora, retirando calor à água circulante no interior dos tubos. ⁽¹⁰⁾

Além dos componentes referidos anteriormente, apresenta ainda três circuitos distintos: circuito de água gelada., circuito de água quente e circuito de água de refrigeração. Cada um destes apresenta as seguintes funções:

- ✓ Circuito água quente – corrente de água que atua como fonte de calor do chiller.
- ✓ Circuito de água gelada – corrente de água que dará origem ao frio.
- ✓ Circuito de água de refrigeração – corrente de água que receberá calor libertado nos processos do chiller.

3.2. Ficha de especificações

Neste subcapítulo estão enumeradas as diferentes condições de funcionamento da instalação, para os diferentes circuitos, bem como as condições mínimas e máximas de funcionamento. A tabela 1 apresenta as especificações do modelo adquirido pela Monteiro, Ribas-Indústrias SA, disponibilizado pelo fornecedor à empresa. ⁽¹⁰⁾

Tabela 1 - Ficha de especificações do fornecedor do chiller. ⁽¹⁰⁾

Modelo	LT 42T New
Potência (kW)	1250
COP	0,759
Circuito de água gelada	
Caudal (m ³ /hr)	214,4
Temperatura entrada (°C)	12
Temperatura saída (°C)	7
Passagens no evaporador	1+1
Perdas de atrito (kPa)	24,5
Queda de pressão (kPa)	29,4
Diâmetro (DN)	200
Pressão máxima funcionamento (kPa (g))	785
Circuito de água refrigeração	
Calor rejeitado (kW)	2896,9
Caudal (m ³ /hr)	435
Temperatura entrada (°C)	29
Temperatura saída (°C)	34,8
Passagens no absorvedor/condensador	2,2/1+1
Perdas de atrito (kPa)	85,3
Queda de pressão (kPa)	78,4
Diâmetro (DN)	250
Pressão máxima funcionamento (kPa (g))	785

Temperatura mínima de entrada (°C)	20
Circuito de água quente	
Calor (kW)	1646,9
Caudal (m ³ /hr)	86,1
Temperatura entrada (°C)	90
Temperatura saída (°C)	73
Passagens no gerador	2+2
Perdas de atrito (kPa)	51,9
Queda de pressão (kPa)	56,8
Diâmetro (DN)	200
Pressão máxima funcionamento (kPa (g))	785
Informações das bombas	
Potência da bomba de absorvente (kW)	3,7
Potência da bomba de refrigerante (kW)	0,3

Esta tabela será utilizada como referencia para a avaliação dos resultados obtidos, visto ser a tabela do fornecedor.

3.3. Flúidos circulantes

Além dos diferentes circuitos de água, estão envolvidos outros três componentes no circuito de absorvente.

✓ Brometo de lítio – Absorvente

Obtido a partir da água do mar, LiBr e NaCl apresentam características similares, visto o Li e o Na serem alcalinos enquanto o Br e o Cl são halogenetos. Se este é deixado num ambiente de humidade elevada, torna-se pegajoso, devido à absorção da humidade do ambiente. Embora apresente as mesmas propriedades que o sal de mesa, a capacidade de absorção do LiBr é superior. Quanto mais elevada a concentração de LiBr e menor a temperatura, mais forte se torna a capacidade de absorver vapor de água. ⁽¹⁰⁾

✓ Molibdato de lítio – Inibidor de corrosão

O LiBr apresenta uma ação corrosiva no aço na presença de oxigénio. Como a máquina de absorção é um recipiente em vácuo, não existe quase oxigénio nenhum. Contudo, o inibidor é acrescentado no absorvente, ajustando a sua alcalinidade. O inibidor forma uma camada

protetora inerte na superfície interior da máquina e inibe a corrosão do metal. A formação desta camada reduz a concentração do inibidor, o que leva a que a composição do absorvente seja controlada, isto é, a quantidade de inibidor deve ser mantida. A manutenção é feita através da análise química do absorvente e a recarga de inibidor sempre que necessário. O excesso de inibidor causa a precipitação de LiBr e afeta diretamente a performance da máquina. ⁽¹⁰⁾

✓ **Água – Refrigerante**

O refrigerante utilizado é a água. Esta deve ser pura e livre de contaminantes. Água destilada ou desmineralizada é a mais indicada. ⁽¹⁰⁾

✓ **Álcool octílico – Aditivo**

Aumenta a capacidade de absorção do absorvente. Não deve ser adicionado em excesso, pois pode formar lodo nos permutadores de calor, afetando a performance da máquina. ⁽¹⁰⁾

3.4. Diagrama P&I da instalação

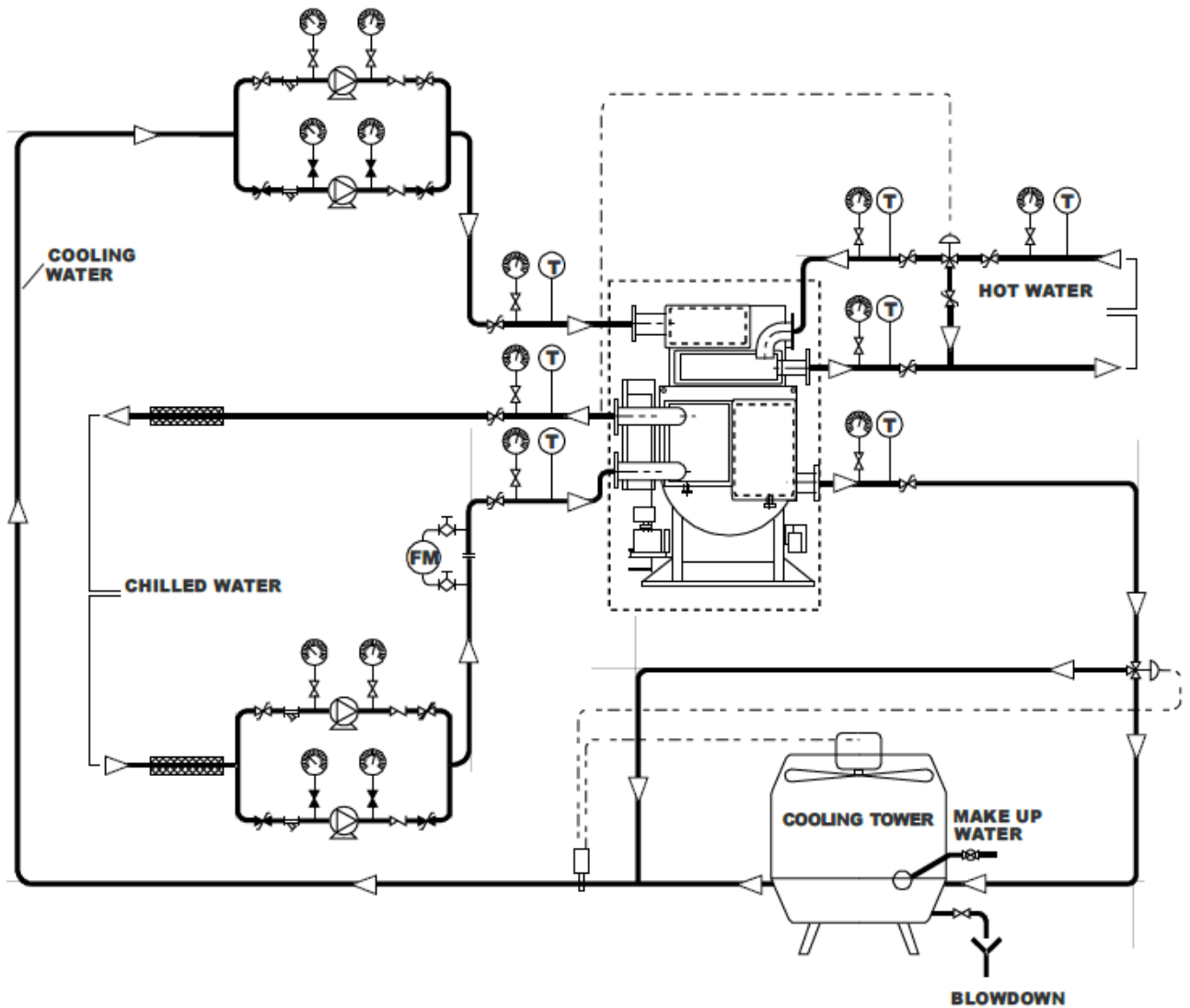
















Figura 3.2 – Diagrama P&I da instalação. ⁽¹⁰⁾

Legenda:

	Dispositivo fechado		Torneira
	Dispositivo aberto		Manómetro
	Válvula borboleta		Bomba de água
	Válvula globo		Termóstato
	Válvula de retenção		Termómetro
	Filtro "Y"		Medidor de caudal
	Válvula de controlo		
	Isolamento 50 mm		

4. Análise e discussão dos resultados obtidos

Neste capítulo são representados os dados recolhidos mais relevantes para a resolução do problema, é efetuado o tratamento dos referidos dados e apresentados os resultados obtidos e respetiva discussão.

4.1. Levantamento de dados

Nesta secção estarão apresentadas as tabelas dos dados recolhidos nos dias presentes na empresa, com os dados que eram possíveis de se efetuar a leitura.

A tabela 2 contém o levantamento das temperaturas das correntes do chiller e das temperaturas dos geradores de alta e baixa pressão, efetuado no dia 14 de Outubro.

Tabela 2 – Levantamento das temperaturas das correntes do chiller no dia 14 de Outubro.

Hora	Água gelada		Água de refrigeração		Água quente		HP Gen	LP Gen
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída		
14:00	12,5	8,8	25,8	30,0	85,0	74,9	74,5	67,9
14:20	12,5	8,7	25,8	30,0	85,1	75,1	74,5	67,9
14:40	12,6	9,0	25,8	30,0	85,1	75,1	74,5	67,9
15:00	12,4	9,0	25,8	30,0	84,9	75,1	74,5	67,8
15:20	12,6	8,9	25,8	30,0	85,0	75,0	74,6	67,8
15:40	12,6	8,9	25,8	30,0	84,9	75,0	74,6	67,8
16:00	12,7	9,0	25,8	30,1	85,1	74,9	74,6	67,8
16:20	12,5	9,1	25,9	30,1	85,0	74,9	74,6	67,9
16:40	12,6	9,1	25,8	30,1	85,3	74,9	74,5	67,9
17:00	12,5	9,0	25,8	30,1	85,2	74,9	74,5	67,8

A tabela 3 contém o levantamento das temperaturas das correntes do chiller e das temperaturas dos geradores de alta e baixa pressão, efetuado no dia 15 de Outubro.

Tabela 3 – Levantamento das temperaturas das correntes do chiller no dia 15 de Outubro.

Hora	Água gelada		Água de refrigeração		Água quente		HP Gen	LP Gen
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída		
16:20	13,4	9,5	25,8	30,5	86,2	74,8	75,2	67,6
16:40	13,5	9,2	25,7	30,6	86,4	75,5	75,7	68,4
17:00	13,6	9,6	25,9	30,6	86,5	75,2	76,2	68,0
17:10	13,6	9,7	25,8	30,6	86,1	74,7	75,1	67,4
17:20	13,7	9,8	25,8	30,5	85,7	74,5	74,9	67,3
17:30	13,7	9,8	25,8	30,6	86,0	74,5	75,0	67,3
17:40	13,6	9,7	25,9	30,5	86,1	74,7	75,1	67,4
17:50	13,5	9,6	25,9	30,5	86,6	75,1	75,5	67,6
18:00	13,2	9,3	25,9	30,5	86,7	75,2	75,7	67,6
18:10	13,1	9,2	25,9	30,6	86,4	75,0	75,6	67,8
18:20	13,0	9,1	25,9	30,6	86,1	74,8	75,2	67,7
18:30	12,9	9,0	25,9	30,5	85,9	74,8	75,1	67,5
18:40	12,8	9,0	25,9	30,5	85,8	74,7	74,9	67,6
18:50	12,8	9,0	26,0	30,6	85,5	74,5	74,7	67,4
19:00	12,8	9,0	25,9	30,5	85,4	74,5	74,5	67,5

A tabela 4 contém o levantamento das temperaturas das correntes do chiller e das temperaturas dos geradores de alta e baixa pressão, efetuado no dia 16 de Outubro.

Tabela 4 – Levantamento das temperaturas das correntes do chiller no dia 16 de Outubro.

Hora	Água gelada		Água de refrigeração		Água quente		HP Gen	LP Gen
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída		
15:00	12,7	9,0	25,9	30,2	85,3	74,9	74,6	67,8
15:10	12,9	9,0	25,9	30,3	85,1	75	74,5	67,8
15:20	12,9	9,0	25,9	30,2	85,4	75,1	74,5	67,8
15:30	12,8	9,0	25,9	30,3	85,5	75	74,6	67,8
15:40	12,8	9,1	25,8	30,3	85,4	74,9	74,6	67,9
15:50	12,8	9,1	25,8	30,3	85,3	75	74,6	67,9

16:00	12,7	9,1	25,9	30,2	85,3	75	74,6	67,9
16:10	12,9	9,0	25,9	30,2	85,3	75,2	74,6	68
16:20	13,0	9,2	25,9	30,2	85,2	75,2	74,7	67,9
16:30	13,1	9,1	25,9	30,2	85,3	75,0	74,7	67,9
16:40	13,0	9,2	26,0	30,3	85,2	75,1	74,7	67,9
16:50	13,0	9,3	26,0	30,3	85,1	75,2	74,6	67,8
17:00	13,1	9,3	25,9	30,2	85,2	75,1	74,6	67,8

A tabela 5 contém o levantamento das temperaturas das correntes do chiller e das temperaturas dos geradores de alta e baixa pressão, efetuado no dia 9 de Novembro.

Tabela 5 - Levantamento das temperaturas das correntes do chiller no dia 9 de Novembro.

Hora	Água gelada		Água de refrigeração		Água quente		HP Gen	LP Gen
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída		
10:30	12,5	8,8	26,0	30,2	85,0	74,9	74,5	67,9
10:45	12,5	8,7	26,0	30,2	85,1	75,1	74,5	67,9
11:00	12,6	9,0	26,0	30,2	85,4	74,8	74,5	67,7
11:15	12,7	9,0	26,0	30,2	84,9	74,9	74,6	67,8
11:30	12,8	9,1	26,0	30,2	85,2	75,0	74,6	67,8
11:45	12,9	9,2	26,0	30,2	85,3	75,0	74,5	67,7
12:00	13,1	9,2	25,9	30,2	85,1	74,8	74,5	67,8
12:15	13,0	9,4	25,9	30,3	85,0	74,6	74,4	67,9
12:30	13,1	9,6	25,9	30,2	85,3	74,9	74,5	67,7
12:45	13,2	9,5	25,9	30,3	85,2	74,9	74,5	67,8
13:00	13,3	9,6	25,9	30,3	85,0	75,0	74,6	67,8

A tabela 6 contém o levantamento das temperaturas das correntes do chiller e das temperaturas dos geradores de alta e baixa pressão, efetuado no dia 10 de Novembro.

Tabela 6 – Levantamento das temperaturas das correntes do chiller no dia 10 de Novembro.

Hora	Água gelada		Água de refrigeração		Água quente		HP Gen	LP Gen
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída		
16:00	12,3	8,7	25,8	30,2	85,1	75,0	74,5	67,7
16:10	12,4	8,9	26,0	30,2	85,0	74,8	74,5	67,8
16:20	12,4	8,9	25,9	30,2	85,0	74,8	74,4	67,8
16:30	12,6	9,0	25,8	30,2	85,4	74,9	74,7	67,8
16:40	12,6	9,1	25,9	30,3	85,2	75,0	74,6	67,9
16:50	12,7	9,1	25,8	30,3	85,4	75,0	74,8	67,9
17:00	12,8	9,3	25,9	30,4	85,5	75,0	74,8	67,9
17:10	12,9	9,3	25,8	30,3	85,2	74,8	74,6	67,9
17:20	13,1	9,5	25,9	30,3	84,9	74,6	74,4	67,5
17:30	13,1	9,6	25,8	30,3	85,4	74,7	74,6	67,4

Os valores dos caudais das correntes circulantes não eram possíveis de se medirem. No entanto, a empresa forneceu os valores dos mesmo, visto não serem a nunca serem alterados, são mantidos constantes A tabela 7 apresenta os valores desses mesmos caudais.

Tabela 7 – Valores para os caudais das correntes circulantes no chiller.

Corrente	Caudal (m ³ /h)
Água de refrigeração	450
Água gelada	230
Água quente	105

4.2. Tratamento de dados

Para que fosse possível tratar os dados de forma a avaliar mais facilmente os resultados, calculou-se o valor médio para as temperaturas de entrada e saída de cada corrente, como se pode verificar na tabela 8. Os valores de temperatura do HP Gen e do LP Gen não foram considerados nos cálculos, pois não influenciam o resultado dos parâmetros a avaliar, apenas servem como parâmetros de controlo do chiller de modo a verificar se este se encontra a trabalhar corretamente.

Tabela 8 – Valores médios para as temperaturas de entrada e saída nos diferentes dias.

Dia	Água gelada		Água de refrigeração		Água quente	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
14/out	12,6	9,0	25,8	30,0	85,1	75,0
15/out	13,3	9,4	25,9	30,5	86,1	74,8
16/out	12,9	9,1	25,9	30,2	85,3	75,1
09/nov	12,9	9,2	26,0	30,2	85,1	74,9
10/nov	12,7	9,1	25,9	30,3	85,2	74,9

Com os valores médios das temperaturas de entrada e saída das correntes, e com recurso aos caudais destas correntes, é possível calcular um valor médio para o COP diário, isto é, é calculado o valor médio do COP para cada dia a que foram recolhidos dados. O COP é calculado com recurso à equação 1, 2 e 3. A potência do chiller é calculada apenas utilizando as temperaturas da corrente gelada, assim como o respetivo caudal. Para o cálculo da potência recorre-se à equação 4. Na tabela 9 estão apresentados os valores médios diários para a potência e para o COP do chiller.

Tabela 9 – Valores obtidos para o COP e a potência do chiller nos diferentes dias.

Dia	COP	Potência (kW)
14/out	0,782	961,4
15/out	0,761	1045,1
16/out	0,813	1012,8
09/nov	0,790	985,7
10/nov	0,751	948,0

Por fim foi feito um balanço de energia global ao sistema. Para efetuar este cálculo foi necessário os caudais e temperaturas de entrada e saída de todas as correntes, juntamente com as potências das bombas de refrigerante e de absorvente. Os valores destas potências encontram-se disponíveis na ficha de especificações do chiller.

Os valores das potências de entrada são a soma entre a potência de frio, a potência fornecida e a potência das bombas, enquanto os valores das potências de saída são a potência do condensador apenas. Estes cálculos foram efetuados com recurso às equações 2,3, 5 e 6. A tabela 10 apresenta os valores resultantes das potências de entrada e saída do sistema.

Tabela 10 – Valores obtidos a energia de entrada e a energia de saída do condensador nos diferentes dias.

Dia	Entrada (kW)	Saída (kW)
14/out	2196,76	2194,50
15/out	2423,18	2403,50
16/out	2262,36	2246,75
09/nov	2357,57	2194,50
10/nov	2343,06	2299,00

4.3. Discussão de resultados

Na tabela 11 são apresentados os valores do COP calculados, bem como o COP da ficha de especificações do chiller, e o respectivo desvio absoluto.

Tabela 11 – Valores obtidos para o COP do chiller nos diferentes dias e o respectivo desvio do valor especificado.

Dia	COP	COP especificado	Desvio (%)
14/out	0,782	0,759	3,1
15/out	0,761		0,3
16/out	0,813		7,1
09/nov	0,790		4,1
10/nov	0,751		-1,0

Analisando a tabela é possível verificar que o COP obtido experimentalmente varia numa gama de -1,0 a 7,1% do valor especificado, e apenas num caso é inferior ao especificado. Entende-se assim que o COP obtido experimentalmente apresentava valores dentro do aceitável comparativamente àquele que seria esperado ter. Como este é um dos parâmetros de avaliação do estudo realizado, é possível concluir que o COP se encontra próximo do especificado, na generalidade para melhor.

Na tabela 12 são apresentados os valores da potência calculados, bem como a potência da ficha de especificações do chiller, e o respectivo desvio absoluto.

Tabela 12 – Valores obtidos para a potência do chiller nos diferentes dias e o respectivo desvio do valor especificado.

Dia	Potência (kW)	Potência especificada (kW)	Desvio (%)
14/out	961,4	1250	-23,1
15/out	1045,1		-16,4
16/out	1012,8		-19,0
09/nov	985,7		-21,1
10/nov	948,0		-24,2

Relativamente à análise da tabela, ao contrário do que se verifica com o COP, a potência obtida experimentalmente apresenta valores bem inferiores comparativamente ao

valor especificado. Estes variam de -16,4 a -24,2%, sendo relativamente elevados. Levando em conta que este é um dos parâmetros de avaliação do desempenho do chiller, encontra-se bem abaixo da potência que seria de esperar, embora apresente um COP aceitável.

A justificação para a baixa potência do chiller encontra-se na corrente que fornece calor ao chiller, ou seja, a corrente de água quente. Consultando a ficha de especificações, verifica-se que a diferença de temperatura da entrada e da saída da corrente de água quente é de 17°C. Os valores obtidos experimentalmente para esta diferença variam entre 10-11°C. Esta diferença de temperatura entre o valor especificado e o valor obtido tem uma enorme influência na capacidade do chiller produzir frio. Quanto menor a quantidade de calor introduzida, menor será o calor removido da corrente de água gelada.

Para que seja possível solucionar este problema, seria necessário o aquecimento prévio da corrente de água quente. Este aquecimento poderá ser feito através de um permutador de calor, recorrendo a vapor, como fonte de aquecimento para a água quente. O dimensionamento deste permutador não foi realizado, pois já se encontra instalado na empresa, não se encontrando em funcionamento aquando do levantamento de dados efetuado. Apenas se encontrou em trabalho uma vez e durante breves instantes e foi possível verificar que ambas as diferenças de temperatura da corrente de água quente e da corrente de água gelada aumentavam, o que por sua vez aumenta a potência do chiller. Não foi possível a recolha de dados durante o funcionamento do permutador, visto só ter funcionado uns breves instantes.

Na tabela 13 são apresentados a diferença entre a potência de entrada e da potência de saída.

Tabela 13 – Valores obtidos para a diferença de energia nos diferentes dias.

Dia	Diferença (kW)
14/out	2,26
15/out	19,68
16/out	15,61
09/nov	163,07
10/nov	44,06

Quanto ao balanço de energia global ao sistema, a diferença obtida entre a potência de entrada e a potência de saída é sempre positiva. Esta diferença varia de valores entre 2,3 – 163,1 kW. Embora o valor não seja constante, pelo contrário varia instavelmente, como o

valor de energia de entrada é superior ao de saída, justifica-se esta diferença como sendo as perdas de energia ao longo das tubagens no interior das várias secções do chiller.

5. Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo avaliar o desempenho do chiller de absorção, com recurso aos seguintes parâmetros: COP e potência do chiller.

Referente ao COP do chiller, este apresenta desvios entre -1,0 – 7,1%, o que são valores demasiado baixos. Foi possível concluir que o COP se encontra dentro do especificado, para melhor.

Quanto à potência do chiller, esta varia de -16,4 a -24,2%, o que são desvios bastante grandes relativamente ao esperado. A potência também se encontra bem abaixo da potência que seria de esperar.

Conclui-se que para a resolução da baixa potência seria necessário o aquecimento prévio da corrente de água quente. Este aquecimento poderá ser feito através de um permutador de calor, recorrendo a vapor como fonte de aquecimento para a água quente

A empresa já dispõe de um permutador que, na maioria das situações de levantamento de dados, não se encontrava a trabalhar. Aconselha-se a empresa a utilizar este permutador para aquecer a corrente em causa caso o aumento de potência seja absolutamente necessário.

6. Bibliografia

1. Monteiro, Ribas. [Online] <http://www.mri.pt/index.php?lingua=pt>.
2. Brandão, Sérgio da Silva. Cogeração. *Produção e Planeamento de Energia Elétrica*. [Online] Outubro de 2004.
3. Oliveira, Nuno e Costa, Pedro. Cogeração e Trigeriação. *Planeamento e Produção de eletricidade*. [Online] 2009/2010.
4. A.Cengel, Yunus e A.Boles, Michael. *Thermodynamics*. 2006. Fifth Edition.
5. Brandão, Sérgio da Silva. Cogeração. *Produção e Planeamento de Energia Elétrica*. [Online] Outubro de 2004.
6. Sá, André Fernandes Ribeiro de. *Guia de aplicações de gestão de energia e eficiência energética*. Porto: Pubindústria, Edições Técnicas, 2010.
7. CEETA. *Tecnologias de Micro-Geração e Sistemas Periféricos*. [Online]
8. Ascenção, Jorge Moreira Santos. Avaliação do potencial energético e económico de uma unidade de trigeriação numa indústria automóvel. *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*. s.l. : Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, 2011.
9. Engineering Toolbox. [Online] http://www.engineeringtoolbox.com/cop-eer-d_409.html.
10. Thermax LT-T. *Hot water fired absorption chillers, Operation Manual*.