



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica



Análise da aplicação de *free-cooling* evaporativo em *Chillers*

ANA CATARINA FAUSTINO SILVA

(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador:

Prof. Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Vitor Manuel Rodrigues Anes

Vogais:

Prof. Doutor Rogério José da Silva Correia Duarte

Prof. Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Dezembro de 2022



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica

**Análise da aplicação de *free-cooling* evaporativo em
*Chillers***

ANA CATARINA FAUSTINO SILVA
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador:

Prof. Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Vitor Manuel Rodrigues Anes

Vogais:

Prof. Doutor Rogério José da Silva Correia Duarte

Prof. Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Dezembro de 2022

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostava de prestar um especial agradecimento à professora Cláudia Casaca pela sua orientação, disponibilidade no esclarecimento das dúvidas que foram surgindo, por todo o apoio prestado e especialmente por toda a paciência durante estes dois últimos anos.

Quero deixar um agradecimento ao Eng.º Miguel Margarido, ao Eng.º Nuno Iglésias e ao Eng.º Alexandre Casquilho da Mitsubishi Electric pela ajuda prestada na escolha e no desenvolvimento do tema do trabalho e por toda a informação disponibilizada.

Agradeço à Marta Correia por toda a paciência e apoio neste processo, as nossas conversas foram fundamentais para que eu conseguisse manter a vontade de concluir esta etapa na minha vida.

Gostaria de dedicar este trabalho de final de curso aos meus pais e à minha irmã, por todo o apoio que me deram ao longo da minha vida académica e tenho a certeza de que ficarão muito orgulhosos pela conclusão desta etapa.

Não poderia avançar para o trabalho, sem fazer um agradecimento muito especial ao meu companheiro, que foi a pessoa que mais acompanhou a minha vida académica, deu-me muito apoio a todos os níveis, esteve sempre lá quando eu mais precisava e sem dúvida que é o que levo de melhor do ISEL.

Resumo

O *Chiller* pode ser utilizado numa variedade enorme de instalações industriais de forma a providenciar água arrefecida aos sistemas ou equipamentos. Este pode proporcionar a climatização de ambientes, permitindo o controle da temperatura e da humidade relativa.

No sentido da procura incessante de edifícios e instalações o menos consumidoras energeticamente possíveis, tem-se procurado técnicas e equipamentos com melhores eficiências energéticas.

O presente estudo tem como principal objetivo a análise da utilização da tecnologia de *free-Cooling* Evaporativo em *Chillers*. O processo de arrefecimento evaporativo favorece um aumento da eficiência do arrefecimento mecânico e permite que o benefício da tecnologia *free-cooling* num *Chiller* se prolongue em condições climáticas que normalmente não o permitem.

Os parâmetros do funcionamento do *Chiller* com *free-cooling* foram analisados e comparados, tendo em conta a influência da existência do kit evaporativo. Adicionalmente, estudou-se a influência das condições climáticas e das temperaturas de operação de funcionamento do *Chiller*. Para o primeiro caso foram efetuadas várias seleções do equipamento, alterando a cidade de projeto e mantendo as temperaturas de funcionamento da água e para o segundo caso fez-se as seleções para a mesma cidade, alterando as temperaturas de operação.

Este estudo permitiu demonstrar as potencialidades da utilização da tecnologia *free-cooling* evaporativo em *Chillers*, bem como a influência das condições climáticas na sua eficiência energética. Foi possível verificar que esta tecnologia pode proporcionar uma redução da potência consumida do *Chiller*, apresentando uma diferença maior para temperaturas de funcionamento da água mais elevadas.

Palavras-chave: *Chillers*, eficiência energética, *free-cooling*, arrefecimento evaporativo, temperaturas de arrefecimento da água, condições climáticas

Abstract

The Chiller can be used in a wide variety of industrial facilities to provide chilled water to systems or equipment. This can provide room air conditioning, allowing temperature and relative humidity control.

In the sense of the incessant search for buildings and installations that consume the least energy possible, techniques and equipment with better energy efficiencies have been sought.

The main objective of this study is to analyse the use of Evaporative Free-Cooling technology in *Chillers*. The evaporative cooling process favours an increase in the efficiency of mechanical cooling and allows the benefit of the free-cooling technology in a Chiller to be extended in climatic conditions that normally do not allow it.

The operating parameters of the Chiller with free-cooling were analysed and compared, taking into account the influence of the existence of the evaporative kit. Additionally, the influence of climatic conditions and operating temperatures of the Chiller was studied. For the first case, several selections were made for the equipment, changing the project city and maintaining the operating temperatures and for the second case, selections were made for the same city, changing the operating temperatures.

This study allowed to demonstrate the potential of using evaporative free-cooling technology in *Chillers*, as well as the influence of climatic conditions on their energy efficiency. It was possible to verify that this technology can provide a reduction in the power consumption of the Chiller, presenting a greater difference for higher water operating temperatures.

Keywords *Chillers*, energy efficiency, free-cooling, evaporative cooling, water cooling temperatures, weather conditions

Acrónimos e Siglas

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado

ERR – Rácio de eficiência energética

GWP - Potencial de Aquecimento Global

HR – Humidade relativa

FC – *Free-cooling*

QAI – Qualidade do ar interior

UTA – Unidade de tratamento de ar

VAC – Volume de Ar Constante

VAV - Volume de Ar Variável

VFD – Variador de frequência

VRV – Sistemas de fluxo de fluido frigorigéneo variável

Índice de conteúdos

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract	v
Acrónimos e Siglas	vii
Índice de conteúdos	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do Tema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura do Trabalho.....	2
2. Instalações Técnicas de AVAC.....	5
2.1. Classificação de sistemas AVAC	5
2.1.1. Sistemas tudo ar.....	5
2.1.2. Sistemas tudo água	8
2.1.3. Sistemas ar-água.....	11
2.1.4. Sistemas tudo fluido frigorigéneo	12
2.2. Sistemas de AVAC.....	13
2.3. Tecnologias de otimização	20
3. <i>Free-cooling</i> Evaporativo.....	23
3.1. <i>Free-cooling</i> em <i>Chillers</i>	23
3.1.1. Permutador hidráulico remoto	25
3.1.2. Módulo Hidrónico	30
3.1.3. Migração de fluido.....	32
3.2. Arrefecimento evaporativo.....	33
3.2.1. Arrefecimento evaporativo direto.....	33
3.2.2. Arrefecimento evaporativo indireto.....	35
3.2.3. Aplicação em <i>Chillers</i>	36
4. Análise do funcionamento de um <i>Chiller</i> com <i>Free-cooling</i> evaporativo	43
4.1 Descrição da instalação e principais parâmetros	43
4.2 Dimensionamento e viabilidade da aplicação para Portugal Continental	46
4.2.1 Temperatura de funcionamento da água – 7/12 °C.....	47

4.2.2	Temperatura de funcionamento da água – 20/26 °C.....	55
4.3	Utilização em diferentes zonas geográficas	58
4.3.1	Instalação na Líbia.....	59
4.2.3	Instalação numa cidade na China	62
5.	Conclusão	65
	Referências	67
	ANEXOS	71

Índice de Figuras

Figura 1 - Sistema tudo ar – adaptado de [2].....	6
Figura 2 - Sistemas tudo ar de caudal constante - adaptada de[5].....	7
Figura 3 - Sistemas tudo ar de caudal variável - adaptada de[5].....	7
Figura 4 - Instalação de um sistema a dois tubos – adaptada de [7].....	9
Figura 5 - Instalação de um sistema a quatro tubos - adaptada de [7].....	9
Figura 6 - Ventiloinvector - adaptada de[8].....	11
Figura 7 - Unidade de indução - adaptada de [10]	11
Figura 8 - Ciclo frigorífico de um equipamento de expansão direta – adaptada de [12]	13
Figura 9 - Instalação de mono-split e multi-split [14]	14
Figura 10 - Unidade Rooftop [15]	15
Figura 11 - Exemplos de Close Control [18].....	15
Figura 12 - Exemplo de diagrama de sistemas VRF – adaptada de [21].....	16
Figura 13 - Ciclo frigorífico de um sistema de expansão indireta- adaptado de [12]	17
Figura 14 - Ciclo frigorífico de um Chiller de condensação a ar – adaptado de [21]	18
Figura 15 - Ciclo frigorífico de um Chiller de condensação a ar – adaptado de [21]	18
Figura 16 - Exemplo de Layout de uma UTA com recuperação de calor[24]	19
Figura 17 - Recuperação de energia em <i>Chillers</i> - adaptada de [22]	21
Figura 18 - Regime de temperaturas exteriores de funcionamento do arrefecimento mecânico[35]	23
Figura 19 - Regime de temperaturas exteriores de funcionamento do modo arrefecimento híbrido [35].....	24
Figura 20 - Regime de temperaturas exteriores de funcionamento no modo de total Free-Cooling [35].....	24
Figura 21 - Representação do dispositivo remoto (water cooler).....	25
Figura 22 - Esquema de ligação de um dispositivo remoto a um Chiller– adaptado de [45]	25
Figura 23 – Técnica baterias hidráulicas acopladas [32].....	26
Figura 24 - Técnica de dispositivo modular [32]	26
Figura 25 -Técnica de dispositivo modular com dois módulos de tamanhos diferentes – adaptada de [32].....	27

Figura 26 – Técnica baterias hidráulicas acopladas - Funcionamento em modo Híbrido ou Mecânico[32].....	27
Figura 27 - Técnica de dispositivo modular - Funcionamento em modo Híbrido [32]..	28
Figura 28 - Técnica de dispositivo modular - Funcionamento em modo mecânico [32]28	
Figura 29 - Técnica de dispositivo modular - Funcionamento em modo total Free-Cooling[32].....	29
Figura 30 - Acumulação de sujidade na técnica baterias hidráulicas acopladas [33].....	29
Figura 31 - Limpeza das baterias do Chiller e do módulo de Free-Cooling [36].....	30
Figura 32 - Bateria de Chiller com Free-Cooling – adaptado de [33].....	30
Figura 33 - Esquema de princípio do ciclo frigorífico no modo de arrefecimento mecânico[34]	31
Figura 34 - Esquema de princípio do ciclo frigorífico do modo de arrefecimento híbrido [34]	31
Figura 35 - Esquema de princípio do ciclo frigorífico do modo de arrefecimento total free-cooling[34]	32
Figura 36 - Evolução do arrefecimento evaporativo direto – adaptada de [39]	34
Figura 37 - Evolução do arrefecimento evaporativo no diagrama psicométrico – adaptado de [45]	34
Figura 38 - Arrefecimento evaporativo indireto – adaptada de [46]	35
Figura 39 - Diagrama psicométrico do arrefecimento evaporativo indireto– adaptado de [43]	35
Figura 40 - Exemplo de combinação de arrefecimento evaporativo direto e indireto [41]	36
Figura 41 - Diagrama de Mollier com o efeito do kit evaporativo– adaptado de [42]...	37
Figura 42 - Opcional de arrefecimento evaporativo instalado num Chiller – adaptado de [31]	37
Figura 43 - Evolução da temperatura do ar ao entrar no Chiller com arrefecimento evaporativo – adaptado de [34]	38
Figura 44 - Diagrama psicrométrico da evolução da temperatura do ar com o kit evaporativo– adaptado de [34]	39
Figura 45 - Módulos do kit evaporativo[34]	40
Figura 46 - Representação do kit evaporativo externo[46]	41
Figura 47 - TRCS-FC-Z à esquerda e TRCS-EFC-Z à direita [47]	44
Figura 48 - Seleção da cidade para o estudo energético no ELCA [44].....	45

Figura 49 - Seleção do perfil de ocupação para o estudo energético no ELCA [49]	45
Figura 50 - Seleção do tipo de Chiller de projeto no ELCA [32].....	45
Figura 51 - Seleção do regime de temperaturas de água de projeto no ELCA [32]	46
Figura 52 – Definição da capacidade de arrefecimento pretendida no equipamento no ELCA [32]	46
Figura 53 - Resultados da análise energética comparativa do ELCA [32].....	46
Figura 54 -Análise da potência consumida da instalação em Lisboa	48
Figura 55 - Análise energética da instalação de Lisboa	50
Figura 56 - Análise da potência consumida da instalação no Porto	51
Figura 57 - Análise energética da instalação do Porto	52
Figura 58 - Análise da potência consumida da instalação em Faro.....	54
Figura 59 - Análise energética da instalação em Faro.....	55
Figura 60 - Análise da potência consumida da instalação em Lisboa – 20/26°C	56
Figura 61 - Análise energética da instalação de Lisboa - 20/26°C	58
Figura 62 - Análise da potência consumida da instalação na Líbia.....	59
Figura 63 - Análise energética da instalação na Líbia.....	61
Figura 64 - Análise da potência consumida da instalação na China	62
Figura 65 - Análise energética da instalação na China.....	64

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Modelos dos <i>Chillers</i>	44
Tabela 2 - Condições de temperatura de projeto	47
Tabela 3 - Perfil climático de Lisboa	47
Tabela 4 - Perfil climático do Porto	51
Tabela 6 - Perfil climático de Faro	53
Tabela 7 - Perfil climático de Lisboa	56
Tabela 8 - Perfil climático na Líbia	59
Tabela 9 - Consumo elétrico por hora das cidades Lisboa e Líbia.....	60
Tabela 10 - Perfil climático na China.....	62
Tabela 11 - Consumo elétrico por hora das cidades Lisboa e China.....	63

1. Introdução

1.1 Enquadramento do Tema

Os sistemas de climatização, mais conhecidos por aquecimento ventilação e ar condicionado (AVAC), são cada vez mais, indispensáveis para o conforto térmico da população. Estes sistemas são compostos por equipamentos, dispostos de forma estratégica, para que seja possível transportar o fluido, até ao espaço que se pretende climatizar, obtendo-se assim as condições do ar ambiente pretendidas.

A importância dos sistemas climatização é também reconhecida pelo seu consumo de energia a nível mundial, tanto a nível industrial como doméstico. O consumo de energia, é elevado, mas a existência dos sistemas de AVAC é essencial para o conforto térmico das pessoas em qualquer local fechado. Uma característica que se deve ter em conta ao dimensionar ou instalar um sistema de AVAC é que este tem de ser o mais adequado possível para que não haja desperdício de energia e isto pode resultar numa poupança energética e económica, o que contribui para um mundo mais sustentável.

Em sistemas já instalados, surge uma maior dificuldade de otimizar o seu funcionamento, ainda assim existem tecnologias que podem ser instaladas nos sistemas e de alguma forma melhorar o seu funcionamento e a sua eficiência.

As tecnologias de otimização podem ser instaladas em qualquer sistema de AVAC, desde que garantam que o retorno financeiro seja superior ao investimento da sua instalação. Em instalações existentes de *Chillers* por exemplo, o caso prático a ser abordado ao longo deste trabalho, as tecnologias podem ter uma otimização da instalação mais ou menos evasiva. No caso da mais evasiva, pode-se dar o exemplo da instalação de um permutador para fazer a recuperação de calor dos compressores, que envolve a instalação do permutador no circuito frigorífico e o respetivo controlo. No caso da menos evasiva, pode ser a simples instalação de um variador de velocidade nas bombas de circulação da água, previamente preparadas.

Com este trabalho pretende-se efetuar, um estudo pormenorizado sobre a influência da tecnologia de otimização *Free-Cooling* Evaporativo aplicada em *Chillers* de condensação a ar. Optou-se por esta aplicação porque tem a possibilidade de ser instalada em equipamentos novos ou existentes. Tanto para climas frios como para climas quentes, esta

tecnologia proporciona uma redução significativa no consumo elétrico do equipamento, principalmente em *data centers* devido às suas gamas de temperatura de funcionamento. Este ganho, acentua-se quanto mais seco for o local da instalação do *Chiller*, dado ter um maior potencial do efeito evaporativo.

Este tema foi selecionado por se tratar de um conteúdo interessante e atual, dado a recessão energética, tanto a nível nacional como a nível internacional, permitindo aplicar conhecimentos adquiridos durante o curso de Mestrado em Engenharia Mecânica e com isso demonstrar que algumas otimizações realizadas aos equipamentos permitem um menor consumo energético dos sistemas de AVAC.

1.2 Objetivos

Uma das principais motivações para a elaboração deste tema é fazer uma ligação entre o conhecimento teórico apreendido ao longo do Curso de Licenciatura e Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, num caso prático e que poderá ser uma boa otimização de consumo de energia em instalações de climatização de *data centers* em Portugal.

O objetivo principal é um estudo pormenorizado do funcionamento dos vários sistemas técnicos de ar condicionado, mais propriamente fazer um estudo do seu funcionamento e perceber as diferenças entre eles.

Como a eficiência dos sistemas AVAC é cada vez mais uma preocupação, este trabalho pretende realizar uma análise da tecnologia de otimização *free-cooling* evaporativo num modelo específico de *Chiller*. A potencialidade de utilização ou não da otimização *free-cooling* é enunciada. Adicionalmente, é analisada a influência das condições climáticas na sua instalação.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em quatro capítulos, em que no presente é realizado um enquadramento ao tema em estudo, a definição dos principais objetivos e a organização deste trabalho.

No capítulo dois é apresentado uma análise aos sistemas AVAC, mais propriamente à sua divisão e classificação elaborada de acordo com o tipo de fluido térmico usado.

No capítulo três são analisados os processos de *free-cooling* e arrefecimento evaporativo e são apresentadas várias tecnologias que têm como base estes processos e aplicações em *Chillers*.

No capítulo quatro é apresentado uma análise à influência da utilização do kit evaporativo na potência consumida e na eficiência energética de um *Chiller* com *free-cooling*. Neste também é estudado a influência das condições exteriores, tendo sido analisado o funcionamento do *Chiller* com *free-cooling* para três cidades portuguesas e 2 cidades internacionais.

Finalmente, no capítulo cinco, são apresentadas as principais conclusões da aplicação do *free-cooling* evaporativo num *Chiller*.

2. Instalações Técnicas de AVAC

As instalações técnicas de AVAC são uma das grandes especialidades da engenharia mecânica. Estas têm como propósito conjugar o conforto térmico, a qualidade do ar interior (QAI), os custos de instalação, a eficiência energética e a sua manutenção [1].

Os sistemas de climatização têm como base de funcionamento [1]:

- O controlo da temperatura ambiente, equilibrando as cargas sensíveis, retirando ou introduzindo energia térmica no local a climatizar;
- O controlo da humidade do ar ambiente, equilibrando as cargas latentes, humidificando ou desumidificando o ar;
- A filtração do ar de forma a eliminar as diversas impurezas nele existentes, tais como odores, produtos tóxicos, bactérias, etc.;
- A introdução de ar novo no espaço a climatizar, de forma a renovar o ar interior e principalmente limitar os níveis de dióxido de carbono.

2.1. Classificação de sistemas AVAC

Os sistemas de AVAC podem ser classificados com base no fluido térmico que circula nos equipamentos terminais existentes nos espaços climatizados:

- Sistemas tudo ar;
- Sistemas tudo água;
- Sistemas ar-água;
- Sistemas tudo refrigerante.

2.1.1. Sistemas tudo ar

Os sistemas tudo ar fazem a remoção da carga térmica de diferentes zonas de um edifício através da distribuição de ar tratado nos equipamentos dos sistemas individuais ou centralizados, tal como representado na figura 1.

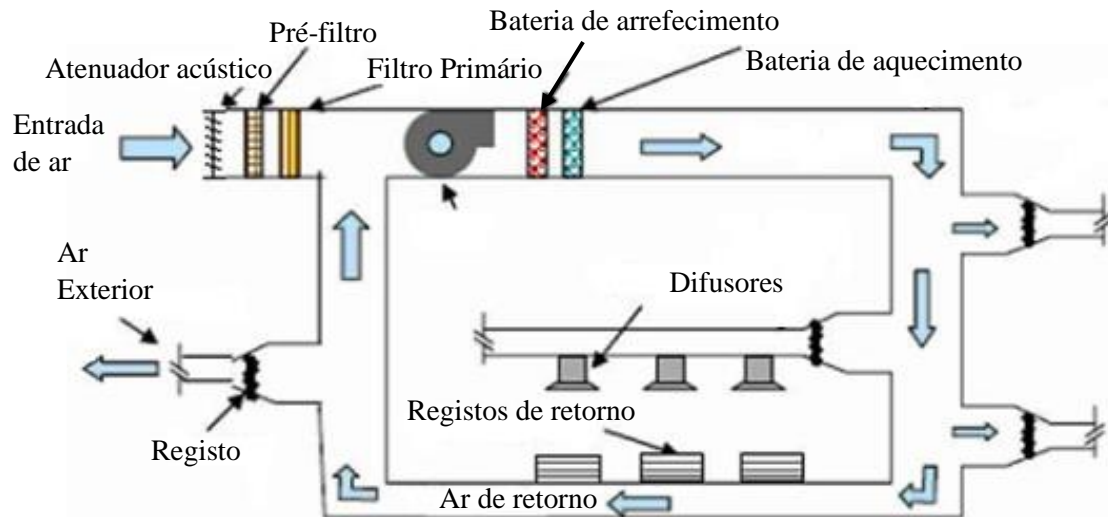


Figura 1 - Sistema tudo ar – adaptado de [2]

Nas áreas técnicas geralmente estão instaladas unidades que asseguram a produção de água arrefecida ou aquecida (*Chiller*, Bomba de Calor ou Caldeira), utilizando fluidos frigoríficos ou água, necessária nas baterias das Unidades de Tratamento de Ar (UTA). O ar depois de ser tratado nas UTA é encaminhado até aos espaços climatizados onde, ao ser insuflado no ambiente pelos elementos terminais (grelhas ou difusores), deve percorrer a zona ocupada de forma a retirar as cargas térmicas [3].

Como os sistemas por vezes têm dimensões grandes, requerem espaços propostos para a sua instalação. No caso de prédios altos torna-se difícil a sua instalação devido ao comprimento elevado das condutas, sendo que geralmente as UTA são instaladas nas coberturas [4]. Estes sistemas ainda podem ser caracterizados como:

- Volume de Ar Constante (VAC);
- Volume de Ar Variável (VAV).

O sistema VAC tem como princípio de funcionamento a insuflação de ar constante, alterando as suas condições de fornecimento de forma a garantir a remoção da carga térmica existente no espaço climatizado, tal como representado na figura 2. Estes sistemas são simples, mas têm vindo a cair em desuso devido aos elevados consumos associados a uma ventilação constante.

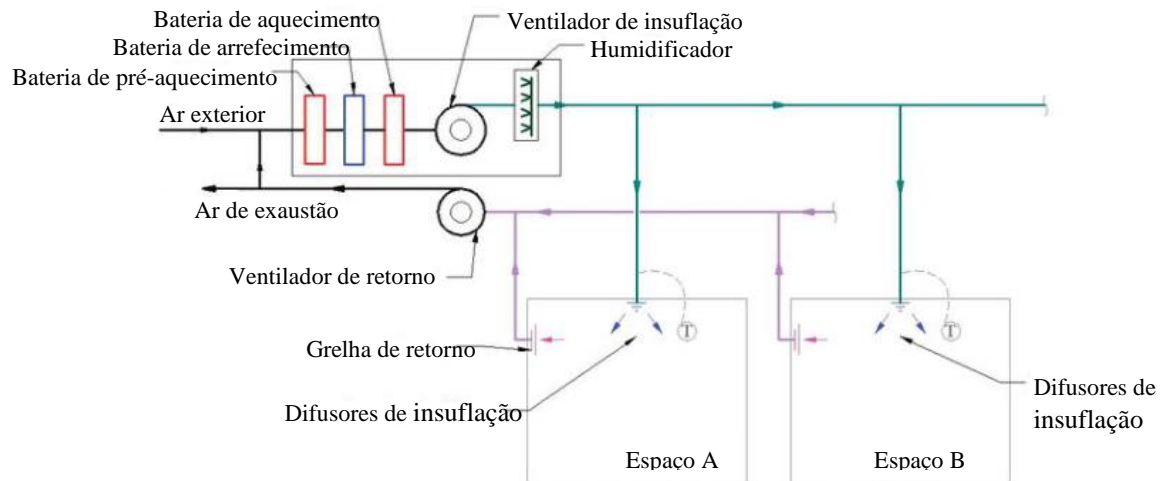


Figura 2 - Sistemas tudo ar de caudal constante - adaptada de[5]

Nos sistemas VAV, o caudal de ar é variável e a sua temperatura é constante. Através das variações de caudal é possível equilibrar os ganhos ou perdas de calor da área a climatizar, para isso são instalados registo de caudal com variador (caixas VAV, instalação exemplificada na figura 3.

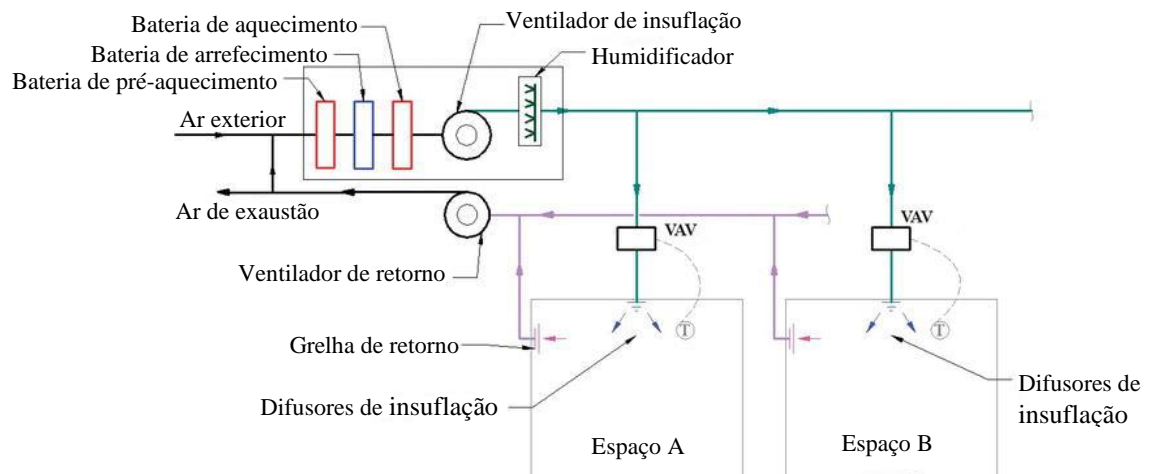


Figura 3 - Sistemas tudo ar de caudal variável - adaptada de[5]

Os sistemas tudo ar apresentam algumas vantagens [4], tais como:

- A distribuição e ventilação do ar na sala condicionada são possíveis sob condições de carga variáveis;
- Todos os sistemas a tudo ar possibilitam a conservação de energia, como por exemplo, através de rodas de recuperação de calor;

- Facilidade em alternar de regime de verão para regime de inverno;
- São unidades bastante completas e podem ser instaladas em locais propositados, de forma a reduzir os níveis de ruídos emitidos para salas ocupadas.
- Com estes sistemas é possível fazer a pressurização de escadas, ventilação de cozinhas, extração de fumos, entre outras.

No entanto, os sistemas tudo ar apresentam algumas desvantagens [4], tais como:

- A instalação destes sistemas em edifícios já existentes pode ser mais complicada, visto que é necessário um espaço elevado no teto falso para a colocação das condutas;
- Testar, ajustar ou balancear por ser uma tarefa muito difícil no caso de sistemas de volume variável VAV.

2.1.2. Sistemas tudo água

Os sistemas tudo água é uma técnica de climatização que consiste na distribuição unicamente de água pelos equipamentos terminais existentes em cada espaço climatizado. A água pode ser fria ou quente, dependendo das necessidades de arrefecimento ou aquecimento, respetivamente. Como só é fornecida água para a climatização do espaço, o ar novo deve ser fornecido por outro sistema de modo a manter a qualidade do ar interior e a respetiva ventilação. Estes sistemas podem ainda ser classificados da seguinte forma:

- Sistemas a dois tubos – as unidades somente funcionam em regime de arrefecimento ou aquecimento, nunca os dois em simultâneo;

Um sistema a dois tubos requer metade da tubagem de água exigida por um sistema a quatro tubos, o que resulta num menor custo e tempo de instalação. O sistema também é mais compacto, reduzindo os requisitos de espaço das salas técnicas. A manutenção também se torna mais simples nestes sistemas, uma vez que o número de componentes da rede hidráulica é menor.

A principal limitação de um sistema a dois tubos é a falta de flexibilidade operacional, ou seja, todos os espaços a climatizar do edifício devem operar no mesmo modo, em arrefecimento ou aquecimento, nunca os dois modos em simultâneo. O circuito de tubagem hidráulica que percorre o edifício pode ser ligado a uma caldeira e/ou a um *Chiller*, tal como representado na figura 4, dependendo das necessidades térmicas gerais[6].

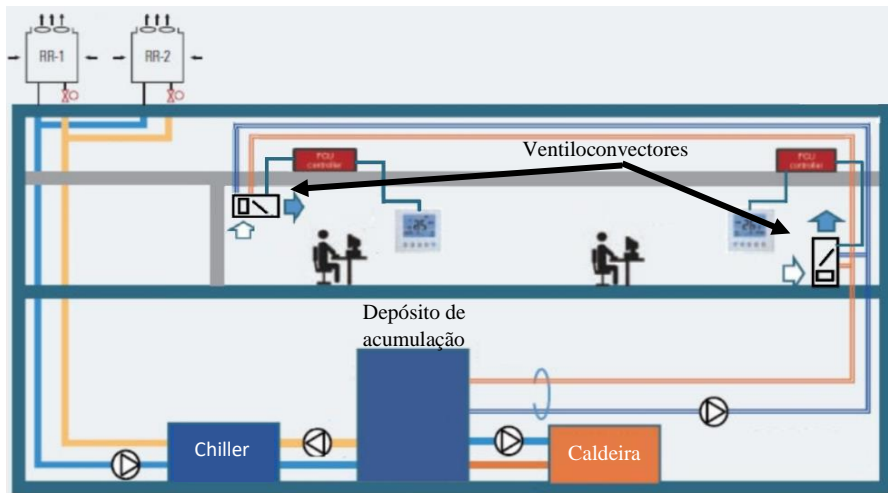


Figura 4 - Instalação de um sistema a dois tubos – adaptada de [7]

- Sistemas a quatro tubos – as unidades têm dois circuitos de abastecimento, um para a água arrefecida e outro para a água aquecida, ou seja, as unidades funcionam nos dois regimes em simultâneo, tal como representado na figura 5.

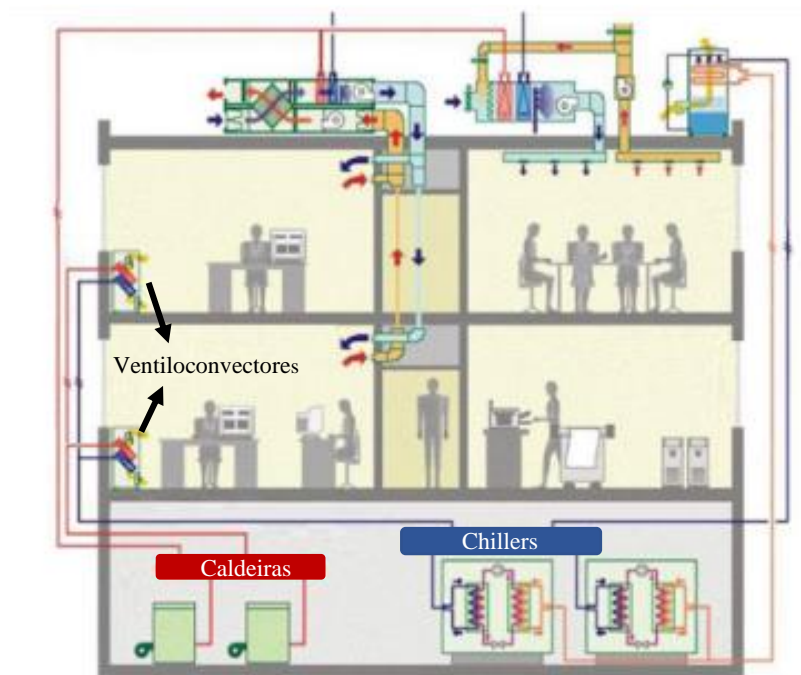


Figura 5 - Instalação de um sistema a quatro tubos - adaptada de [7]

Os sistemas tudo água apresentam a vantagem de necessitarem dum espaço reduzido para o circuito de tubagem de distribuição de água aos diferentes locais, comparativamente aos sistemas tudo ar para a mesma capacidade. Porque, a água é usada como meio de transporte de energia, que tem maior capacidade de calor específico e densidade do que o ar. Assim,

os tamanhos das tubagens são muito pequenos em comparação com as redes de condutas [4]. Os sistemas tudo água apresentam inúmeras vantagens, tais como:

- São os sistemas centrais mais baratos;
- São os mais adequados para controlo individual de climatização de espaços;
- É possível trabalharem em modo de arrefecimento e aquecimento em simultâneo, através da utilização de um sistema a quatro tubos;
- Podem ser facilmente instalados em edifícios antigos sem fazer muitas alterações nas infraestruturas existentes.
- São a melhor solução para substituir sistemas a ar em edifícios altos, pois é mais fácil transportar água através de tubos de pequeno diâmetro do que ar através de condutas de grande diâmetro em alturas mais distantes;
- São muito eficazes em aplicações onde o espaço é limitado, tais como tetos estreitos e espaços reduzidos. Uma escolha apropriada para edifícios que não foram projetados em fase de conceção com ar condicionado.

Os sistemas tudo água também apresentam algumas desvantagens [4] , tais como:

- As quantidades de unidades interiores por vezes elevadas, podem significar muito trabalho e custo de manutenção;
- Deve ser usado um sistema de ventilação à parte para fornecer o ar novo à sala climatizada, o que aumenta o custo. Além disso, o controlo da ventilação não é muito preciso;
- Se a drenagem dos condensados das unidades interiores for mal instalada, pode causar humidades nos tetos.

As unidades terminais mais usuais para anular o efeito das cargas térmicas são os ventiloconvectores, contudo existem os sistemas de indução [1,3].

Um ventiloconvector fornece arrefecimento ou aquecimento por meio de um permutador de calor a água(bateria) e um ventilador, exemplificado na figura 6. Estes são a solução ideal para climatização de habitações, visto que a circulação forçada do ar permite uma maior eficiência, e rapidez tanto na transmissão do calor para o ar como na absorção do calor do ar, permitindo maximizar a rentabilização da fonte de calor/frio, que pode ser um Chiller, uma Bomba de Calor ou uma Caldeira[8].

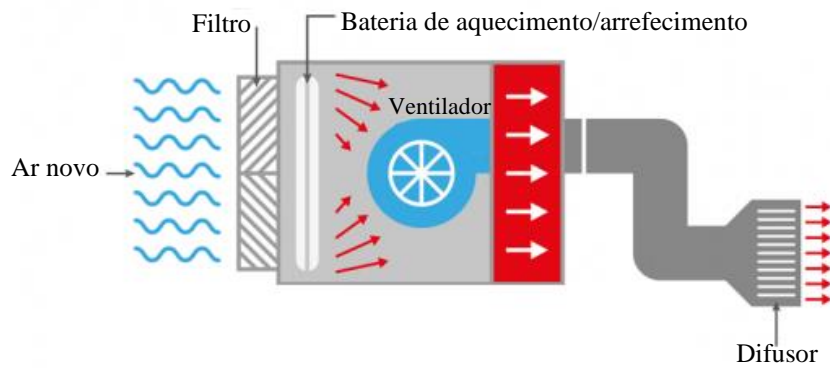


Figura 6 - Ventiloincubador - adaptada de[8]

Por outro lado, as unidades de indução são constituídas por um ou dois permutadores e uma conduta de ar primário (ar novo), exemplificado na figura 7.

É o fenómeno de indução que garante a aspiração do ar secundário (ar proveniente do espaço climatizado) através dos permutadores de calor, fornecendo assim aquecimento ou arrefecimento. É o ar secundário que controla a temperatura ambiente da sala a climatizar[9].

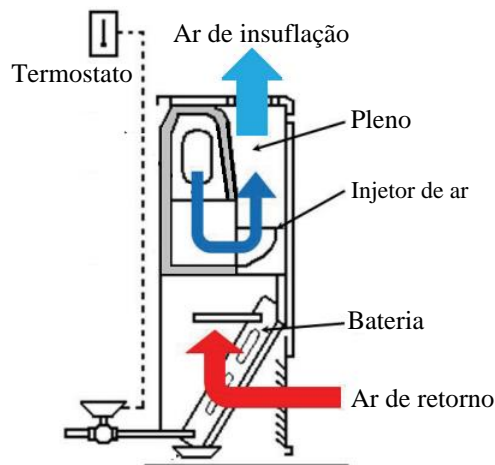


Figura 7 - Unidade de indução - adaptada de [10]

2.1.3. Sistemas ar-água

Nos sistemas ar-água, a climatização dos diferentes espaços é feita utilizando em simultâneo uma rede hidráulica e uma aeráulica. A rede hidráulica tem como função extrair e dissipar energia térmica dos espaços através de unidades interiores. A rede aeráulica por sua vez, fornece ar novo com todas as características necessárias [1,3].

Os sistemas ar-água apresentam algumas vantagens [4], tais como:

- Possibilidade de aquecimento e arrefecimento em simultâneo;

- Podem-se tornar sistemas económicos porque é possível o controlo individual do ar e da água, através de termostatos instalados nos espaços climatizados;
- A manutenção, reparação e substituição dos sistemas são mais acessíveis, tanto a nível económico como a nível de mão de obra.

Contudo, apresentam algumas desvantagens [4], tais como:

- O controlo e a operação do sistema podem gerar algumas complicações porque o ar e a água devem ser tratados de uma forma cuidada;
- Como os sistemas ar-água têm um controlo mais extensivo, pode fazer com que se tornem mais caros do que os sistemas tudo água.

2.1.4. Sistemas tudo fluido frigorígeno

Nos sistemas tudo fluido frigorígeno (expansão direta), o princípio de funcionamento é semelhante aos sistemas tudo água, só que o fluido que circula na tubagem é o fluido frigorígeno. Ao contrário dos outros sistemas, existem vários equipamentos com este princípio de funcionamento, tais como os *mono-split*, os *multi-split*, as unidades de fluxo de fluido frigorígeno variável(VRF), as *Close-Control* e as *Rooftop*. Este tipo de sistema apresenta algumas vantagens[11], tais como:

- Baixo custo do equipamento e de instalação;
- Maior simplicidade de instalação;
- Manutenção e reposição de peças mais eficientes e económicas;
- Grande versatilidade para projetos (zonamentos, variações de demanda, etc.)

No entanto, também apresentam algumas desvantagens, tais como:

- Limitação na variação da instalação do sistema, pois funcionam com coeficientes de simultaneidade;
- Dificuldade de deteção de uma fuga nas instalações, devido à complexidade das instalações;
- Quantidade de fluido frigorígeno na instalação;
- Em alguns sistemas o nível de ruído pode ser elevado;
- Instalação limitada, tanto a nível de capacidade com distância de tubagem.

2.2. Sistemas de AVAC

Os sistemas de AVAC usam os princípios da termodinâmica para transferir energia de um espaço para outro através de um fluido frigorífero. Esta transferência é realizada num ciclo de frigorífico por compressão de vapor, tal como representado na Figura 8 [4,5]. Neste ciclo ocorrem os processos de evaporação e condensação, sendo estes os responsáveis por absorver e rejeitar calor, respetivamente.

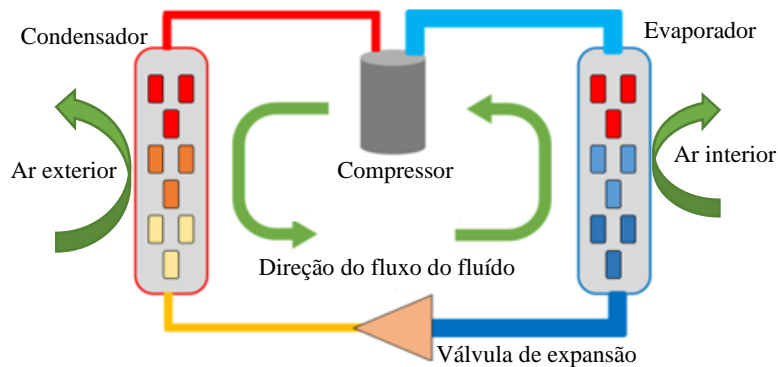


Figura 8 - Ciclo frigorífico de um equipamento de expansão direta – adaptada de [12]

O ciclo frigorífico, é composto pelos seguintes componentes principais [13]: compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador.

O compressor é o responsável por bombear o fluido frigorífero para todo o sistema, sendo este considerado o motor do ar condicionado. O fluido frigorífero é admitido no compressor em estado gasoso a baixa pressão, e ao ser comprimido, o gás aumenta a sua pressão, o que consequentemente aquece e flui na direção do condensador.

No condensador, o gás com uma elevada temperatura e alta pressão rejeita o seu calor para o ar exterior, mudando o seu estado físico para líquido a alta pressão. O líquido de alta pressão ao passar através da válvula de expansão, expande reduzindo a sua pressão e consequentemente a temperatura. O resultado desta expansão isentálpica resulta num fluido frigorífero de baixa pressão em estado de mistura bifásica.

No evaporador, o calor do ar interior é absorvido, através da evaporação do fluido frigorífero a baixa pressão. No estado gasoso, o fluido frigorífero é sugado de volta ao compressor onde se inicia um novo ciclo.

Os sistemas de AVAC também podem ser classificados da seguinte forma: expansão direta ou indireta.

Os equipamentos de expansão direta utilizam o fluido frigorígeno para efetuar a troca de calor e, sendo esta realizada diretamente com o ar ambiente e o próprio fluido que circula no sistema, como é o caso dos sistemas *Split*, *VRF*, *Rooftop* e *Close Control* [3].

Os equipamentos *Split* podem ser do tipo *mono-split* ou *multi-split*, dependendo da composição do sistema. Um sistema *mono-split* é composto por duas unidades, uma instalada no exterior do edifício, designada por unidade exterior, que se encontra ligada a uma unidade interior. As suas unidades interiores, responsáveis por permutar calor com o ar do espaço a climatizar, podem ser do tipo mural, cassette, condutas, de chão ou teto.

Um sistema do tipo *multi-split* tem uma unidade instalada no exterior e até seis no interior, o que permite climatizar várias divisões só com uma unidade exterior. As unidades interiores são do mesmo tipo que as enunciadas para os sistemas *mono-split*.

Na figura 9, é possível visualizar as diferenças de instalação dos sistemas *mono-split* e *multi-split*.

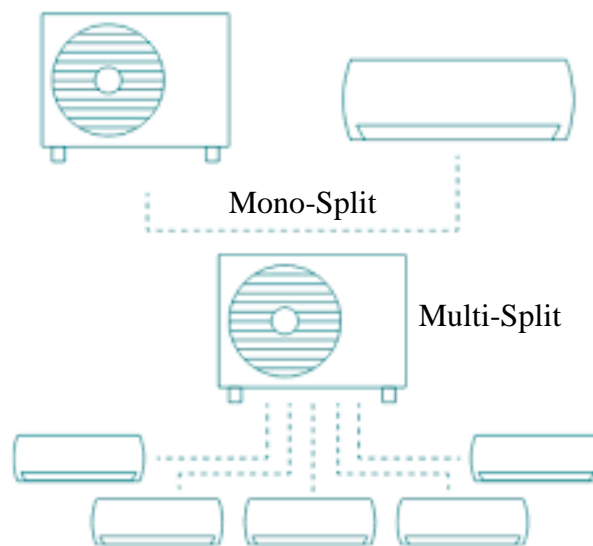


Figura 9 - Instalação de mono-split e multi-split [14]

As *Rooftop* são unidades compactas (figura 10), e são concebidas para climatizar áreas de média e grande dimensão, como por exemplo centros comerciais, retalho alimentar, serviços de logística. São unidades *'plug and play'*, o que significa que estas unidades já vêm preparadas de fábrica para que, na instalação, seja só necessário fazer a ligação das condutas.



Figura 10 - Unidade Rooftop [15]

Estão disponíveis no mercado com várias opções de configuração da estrutura, o que facilita a sua instalação. E ainda poderão incluir opcionais de forma a maximizar a sua adaptabilidade, tais como recuperação de energia, economizadores, gestão de qualidade do ar interior, bases de instalação, módulos de aquecimento auxiliar, proteção anticorrosiva nas baterias que ficam expostas ao ambiente, entre outras [6,7].

As *Close Control* são unidades autónomas de tratamento de ar e foram concebidas para fazer o controlo de cargas de calor quase exclusivamente sensíveis. Estas máquinas podem ser constituídas por duas unidades, interior e exterior ou podem ser numa versão compacta. As unidades interiores são muito semelhantes a uns armários, tal como se observa na figura 11.



Figura 11 - Exemplos de Close Control [18]

As aplicações típicas das *Close Control* são salas de servidores, estações meteorológicas, laboratórios médicos, bem como qualquer outro espaço onde uma carga sensível deve ser dissipada sem que haja alterações na humidade relativa, que geralmente deve rondar os 50% [10,11].

Os sistemas VRF têm como base uma tecnologia que permite a unidade exterior controlar a quantidade exata de fluido frigorígeno que as unidades interiores necessitam. Esta funcionalidade torna o VRF o equipamento ideal para aplicações com cargas variadas e onde o zonamento é obrigatório.

Estas unidades estão disponíveis em duas versões, unidade bomba de calor reversível, que produz arrefecimento ou aquecimento, e um sistema de recuperação de calor, para aquelas instalações onde o é necessário aquecimento e arrefecimento em simultâneo.

Para além de proporcionarem um conforto superior comparativamente a sistemas *split*, os sistemas VRF têm como vantagens a versatilidade na instalação, baixo consumo elétrico e baixo nível de ruído [10,13].

Os sistemas VRF são constituídos por uma máquina exterior, ao qual pode ser ligada até 50 unidades interiores. Na figura 12 podemos observar um exemplo de um sistema VRF com os vários tipos de unidades interiores que se pode considerar.

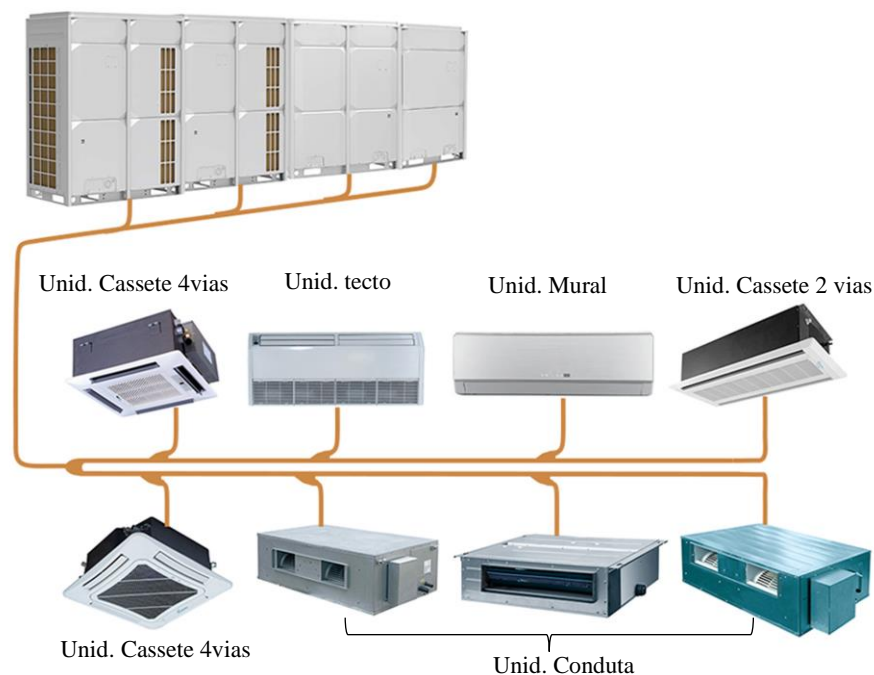


Figura 12 - Exemplo de diagrama de sistemas VRF – adaptada de [21]

Contrariamente aos sistemas de expansão direta, nos sistemas de expansão indireta, a troca de calor com o ar ambiente é realizada indiretamente. Um outro fluido térmico, como por exemplo a água, permuta calor diretamente com o ar ambiente do local a climatizar e este é que dissipa calor evaporando o fluido frigorífero do circuito frigorífico, tal como ilustrado na figura 13.

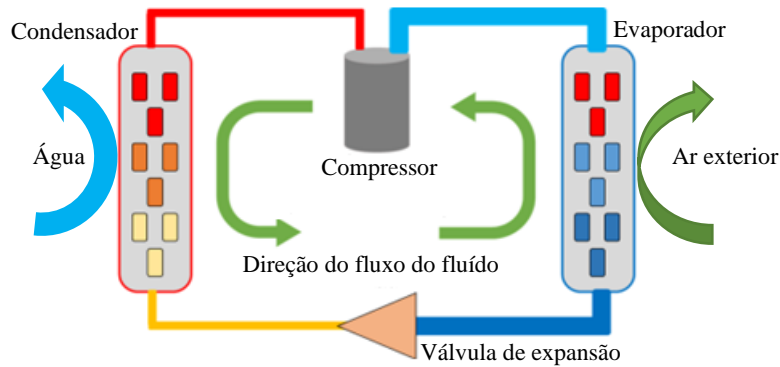


Figura 13 - Ciclo frigorífico de um sistema de expansão indireta- adaptado de [12]

Os equipamentos que utilizam este método de expansão, temos o caso dos sistemas hidrónicos e das unidades de tratamento de ar (UTA) [3].

Os sistemas hidrónicos são unidades de estrutura única e são constituídos por um circuito frigorífico de expansão indireta. A sua principal função é produzir água aquecida e/ou água arrefecida para instalações de climatização e para circuitos de aquecimento e/ou arrefecimento de instalações industriais.

Estas unidades são classificadas com base no tipo de ciclo frigorífico usado na produção de água arrefecida e quanto ao fluido utilizado no processo de condensação. Existem *Chillers* que utilizam um ciclo de refrigeração por compressão de vapor, ilustrado na figura 13, e outros que utilizam um ciclo de absorção, que se diferencia do anterior pelo facto que utiliza o calor como fonte de energia e não tem compressores[22].

Os *Chillers* existem na tipologia de condensação a ar ou a água, como se encontra ilustrado nas figuras 14 e 15, respetivamente. O funcionamento de ambos é semelhante durante a maior parte do processo até que o fluido frigorífero chegue ao condensador.

No *Chiller* de condensação a ar, o fluido frigorífero quando chega ao condensador, os ventiladores conduzem o ar externo para dentro da unidade exterior, proporcionando a absorção do calor do fluido, expelindo-o posteriormente para o ar ambiente [23].

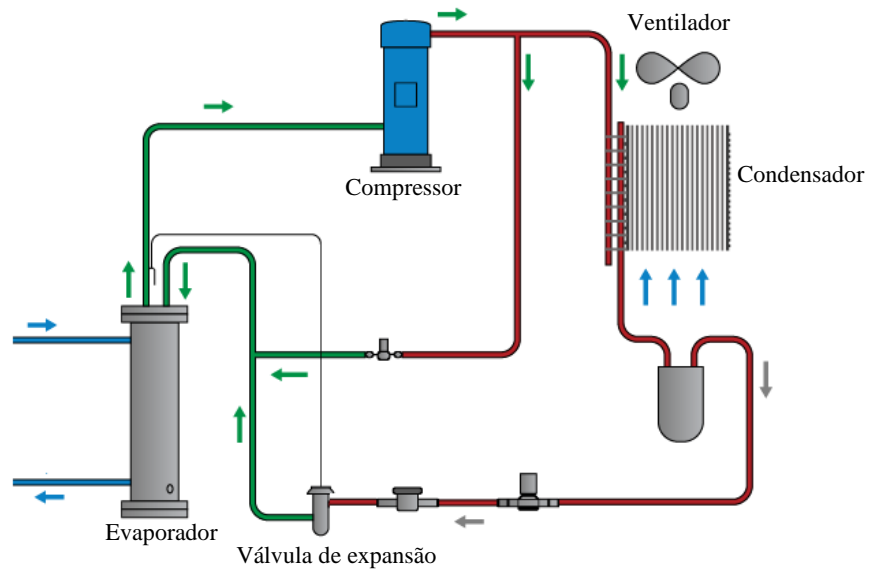


Figura 14 - Ciclo frigorífico de um Chiller de condensação a ar – adaptado de [21]

Quando a condensação dos *Chillers* é realizada a água, significa que é utilizada água como fluido para absorver o calor no condensador (percurso a vermelho na figura 15), sendo posteriormente encaminhada para uma torre de arrefecimento para liberar o calor para o exterior [23].

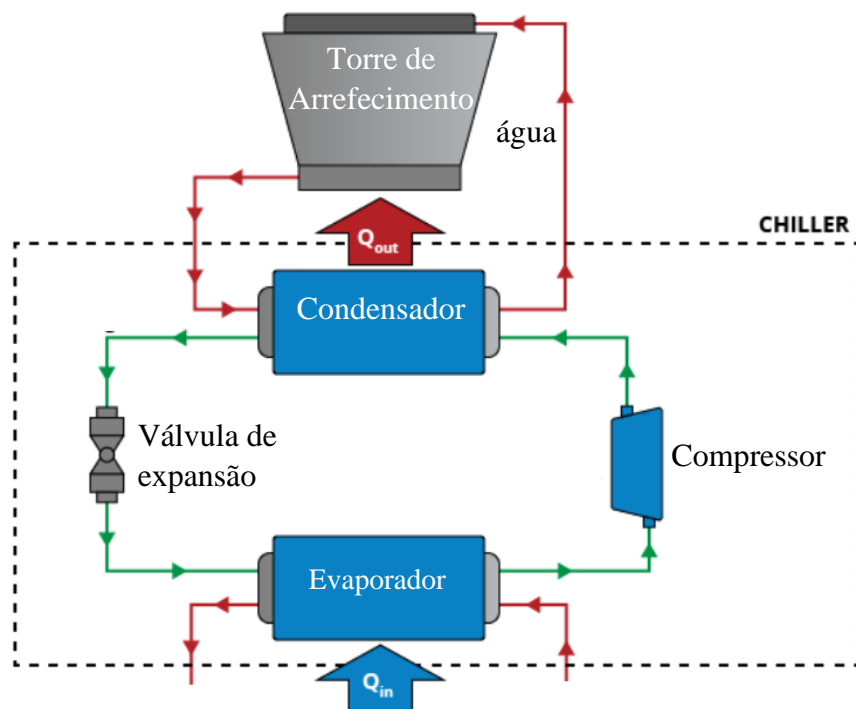


Figura 15 - Ciclo frigorífico de um Chiller de condensação a ar – adaptado de [21]

Os sistemas hidráulicos, também podem ser divididos pelo seu processo térmico. Ao produzirem só água arrefecida são designados por *Chiller* e se produzirem água arrefecida/aquecida ou as duas em simultâneo são designados por Bomba de Calor.

Uma unidade de tratamento de ar (UTA), é um equipamento que tem como principal objetivo garantir a qualidade e as características do ar exigidas pelo espaço que vai climatizar. A sua estrutura é constituída por painéis em chapa e pode agrupar vários módulos, como ilustrado na figura 16.

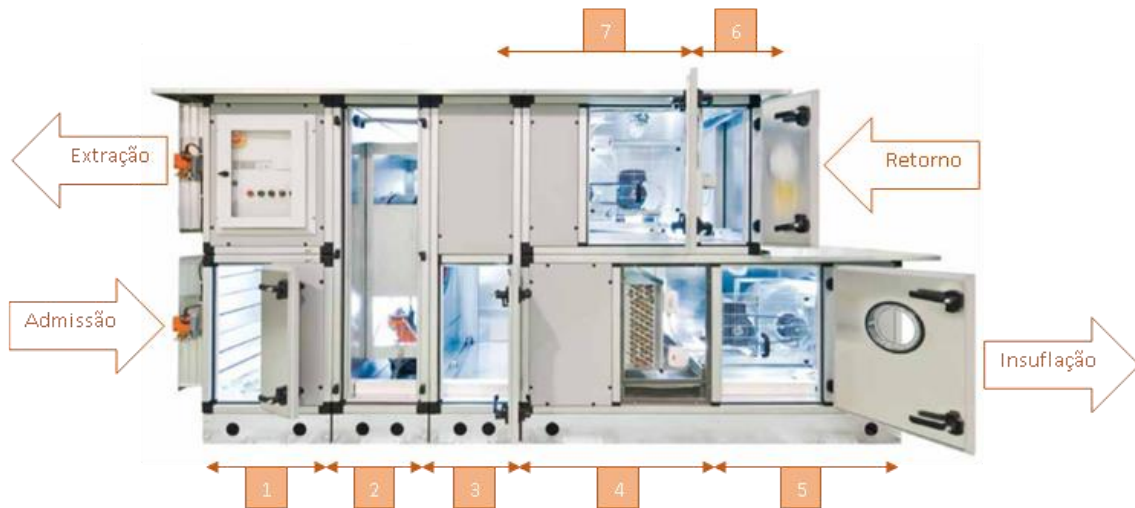


Figura 16 - Exemplo de Layout de uma UTA com recuperação de calor[24]

Os filtros (1 e 6) têm como função filtrar o ar, para garantir que não exista a entrada de poeiras para o interior da UTA. Na admissão geralmente é colocado dois filtros, um de malha mais grossa e um mais fina, visto que por esta secção vai ser admitido ar diretamente do exterior. No retorno, como se extrai o ar do espaço interior, basta um filtro de malha grossa.

O recuperador de calor (2) pode ser do tipo roda térmica e fluxos cruzados. O seu princípio de funcionamento é o mesmo, ou seja, o ar proveniente do exterior e o ar de retorno atravessam o recuperador com fluxos opostos e ao cruzarem-se permite que a energia do ar retorno seja transferida para o ar novo e este fique com condições melhores para a unidade, diminuindo assim o trabalho das baterias.

As baterias de arrefecimento ou aquecimento (4) são compostas por serpentinas em cobre ou alumínio, onde irá circular o fluido (água ou fluido frigorígeno) que é responsável por arrefecer ou aquecer o ar. Consoante as necessidades do espaço a climatizar, as baterias podem ser de arrefecimento, aquecimento e arrefecimento ou aquecimento.

Os ventiladores (5 e 7) têm como função fazer o ar circular ao longo da UTA até ao espaço a insuflar. Estes devem ser dimensionados de forma a proporcionar um caudal e uma pressão estática suficiente para superar as perdas de carga que são introduzidas no circuito.

2.3. Tecnologias de otimização

Perante a recessão mundial dos últimos anos, e com uma maior consciencialização para o uso de energias mais limpas, surge a necessidade do aperfeiçoamento e utilização de equipamentos considerados cada vez mais eficientes. Como a substituição de equipamentos existentes significaria um grande investimento, os fabricantes iniciaram o estudo de várias tecnologias aplicáveis aos seus equipamentos, que favorecem o aumento da sua eficiência energética.

Uma dessas tecnologias é a aplicação de um variador de frequência (VFD) num compressor de velocidade constante, que ao fazer variar a frequência do compressor, faz com que este tenha uma velocidade variável. Há duas razões pelas quais a instalação de um VFD num compressor pode ser um fator importante, uma delas é que uma mudança de velocidade do compressor pode permitir que este cumpra com a pressão e caudal necessário sem a intervenção externa. A segunda razão, ainda mais importante em muitos casos, é que uma mudança na velocidade do compressor pode efetuar uma redução bastante grande na potência consumida quando o a necessidade é menor do que o funcionamento a 100% [16,17].

Para aplicação em *Chillers* e também em *Rooftops* existe a tecnologia do arranque suave, que consiste na ligação de um dispositivo ao motor elétrico. O objetivo deste equipamento é a gestão da tensão de arranque do motor, de forma a evitar o desgaste mecânico dos seus enrolamentos. Assim o arranque do motor é controlado, proporcionando um aceleração suave e assim evita-se quedas de tensão elétrica bruscas na rede de alimentação, como ocorre em arranques diretos [18,19].

Outra forma de otimizar um *Chiller*, com condensação a ar, é a instalação de um kit evaporativo, que pode incluir uma estrutura de papel de celulose tratada ou uma malha, junto das suas baterias de condensação. O intuito da sua utilização é baixar a temperatura do ar antes de este atingir as serpentinas da unidade, aumentando assim a eficiência do arrefecimento mecânico [29].

Em muitas aplicações de *Chillers*, existe uma necessidade de arrefecimento e aquecimento em simultâneo e para beneficiar disto existe a opção de recuperação de energia. A recuperação de energia também é uma tecnologia para otimizar equipamentos de climatização, e o seu objetivo é fazer um aproveitamento do calor rejeitado por uma fonte quente. Esta recuperação, conforme ilustrado na figura 17, passa pela instalação de um permutador de calor auxiliar, entre o compressor e o condensador, com o objetivo de aproveitar o sobreaquecimento da descarga do compressor. Dependendo da temperatura solicitada, para o circuito de água quente, este permutador atua como apenas um arrefecimento sensível ou também como condensador [30].

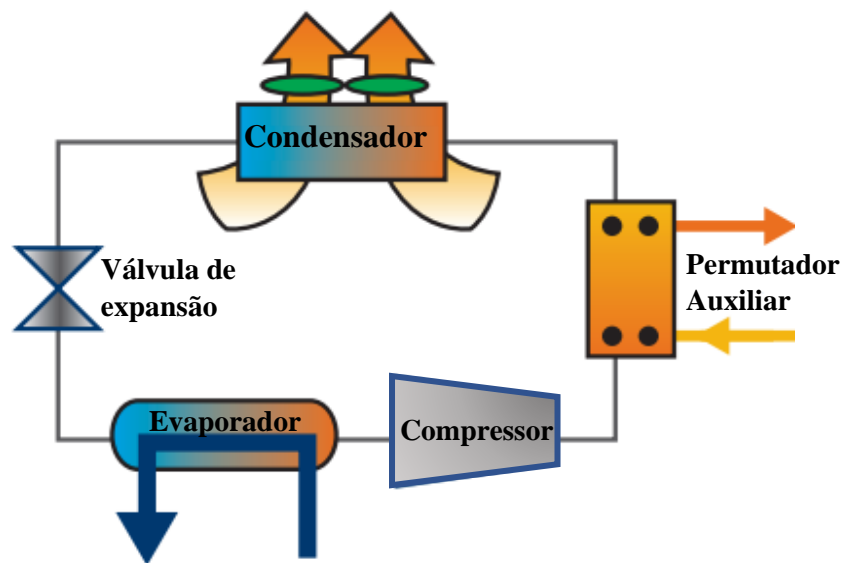


Figura 17 - Recuperação de energia em Chillers - adaptada de [22]

A recuperação de energia também pode ser feita em Rooftops e UTA, tendo o mesmo princípio de funcionamento. Em que, o ar proveniente do exterior e o ar de retorno atravessam o recuperador com fluxos opostos e ao cruzarem-se permitem que a energia do ar retorno seja transferida para o ar novo, ficando este com as características do ar pretendido do espaço a climatizar. Os recuperadores podem ser do tipo roda térmica, fluxos cruzados e run-around-roil.

Muitas instalações de AVAC requerem arrefecimento mesmo nos meses mais frios, devido às cargas internas proporcionadas por pessoas, computadores, máquinas e iluminação.

Um sistema hidrónico ao funcionar mesmo nos meses mais frios, de forma a satisfazer os requisitos de arrefecimento, torna-se dispendioso. Uma forma de otimizar o processo de arrefecimento e reduzir parte do consumo elétrico é recorrer à aplicação da tecnologia *free-*

cooling (FC) no equipamento produtor térmico, o *Chiller*. Esta tecnologia consiste em obter um maior partido das temperaturas baixas do ar exterior para auxiliar no arrefecimento da água, podendo até permitir que os compressores do *Chiller* sejam desligados, aumentando assim a sua eficiência[31].

O *free-cooling* pode ser uma escolha sábia para instalações em zonas de clima mais frio, sendo que as temperaturas podem satisfazer as necessidades de arrefecimento do edifício. Esta aplicação é muito apelativa, para instalações em edifícios que normalmente dispõem de um horário de funcionamento contínuo, consumindo assim grandes quantidades de energia e gerando enormes quantidades de calor, que por sua vez precisam de ser removidas para garantir a confiabilidade do serviço e a continuidade das operações [21,22].

3. *Free-cooling* Evaporativo

3.1. *Free-cooling* em Chillers

Um *Chiller* com a tecnologia de FC pode funcionar de três modos diferentes, dependendo das temperaturas exteriores e do regime de temperaturas de funcionamento da água [23,21]:

- Arrefecimento Total *Free-cooling* - este modo está ativo quando a temperatura do ar exterior é baixa o suficiente para satisfazer a necessidade de arrefecimento total. A capacidade de arrefecimento total é fornecida pelo ar exterior, através da sua permuta com a água nas baterias de FC, enquanto os compressores estão desligados;
- Arrefecimento Híbrido - este modo está ativo quando a temperatura do ar exterior é inferior à temperatura da água de retorno, mas não o suficiente para o módulo FC conseguir satisfazer a necessidade de arrefecimento total, por isso é necessário o apoio do funcionamento mecânico.
- Arrefecimento Mecânico (*Chiller* convencional) - este modo está ativo quando a temperatura do ar exterior é igual ou superior à temperatura da água de retorno.

De forma a demonstrar os diferentes modos de funcionamento, apresentam-se nas figuras 18, 19 e 20, o espetro de temperaturas exteriores de Londres, considerando as temperaturas de funcionamento de entrada e de saída da água de 23 °C e 18 °C, respetivamente.

Na figura 18, está representado o regime de temperaturas em que o modo de arrefecimento mecânico está ativo, verificando-se que este modo só está ativo quando a temperatura exterior é igual à temperatura de funcionamento de retorno (23 °C). Ao contrário do que se irá verificar nos outros dois modos de funcionamento, este apresenta menos horas de funcionamento, logo quer dizer que o funcionamento mecânico trabalha poucas horas a 100%.

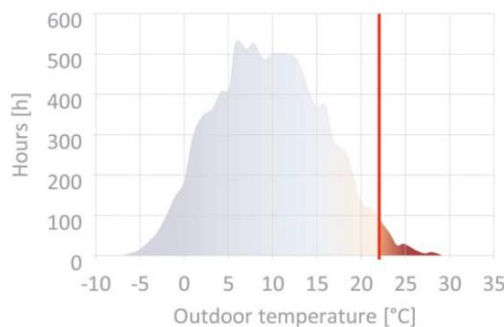


Figura 18 - Regime de temperaturas exteriores de funcionamento do arrefecimento mecânico[35]

Na figura 19, está representado o regime de temperaturas exterior em que o modo de arrefecimento híbrido está ativo, isto acontece entre os 6°C e os 23°C.

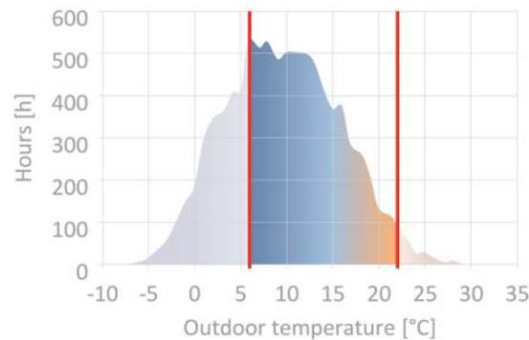


Figura 19 - Regime de temperaturas exteriores de funcionamento do modo arrefecimento híbrido [35]

O limite da temperatura mais alta para este modo de funcionamento é correspondente à temperatura da água de retorno, isto é, 23 °C. Também se pode verificar que, para a cidade de Londres, os modos só FC + híbrido são os que apresentam mais horas de funcionamento, o que demonstra que a utilização da tecnologia de FC é uma excelente otimização de instalação.

Na figura 20, está representado o regime de temperaturas exteriores em que o modo de arrefecimento total *free-cooling* está activo. O *free-cooling* está ativo até aos 6 °C, ou seja, esta é a temperatura máxima que permite que o componente de FC garanta a necessidade de arrefecimento sem apoio do funcionamento mecânico.

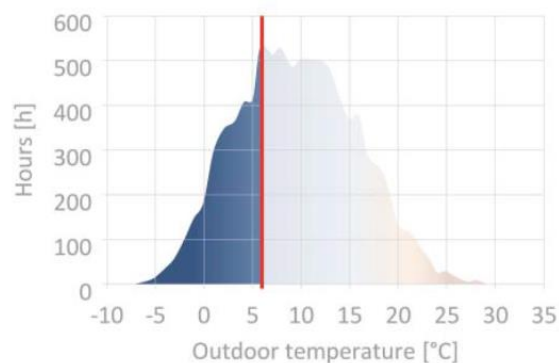


Figura 20 - Regime de temperaturas exteriores de funcionamento no modo de total Free-Cooling [35]

O *Free-Cooling* em *Chillers* pode ser conseguido a partir da utilização de três aplicações diferentes: permutador hidráulico remoto, módulo hidrónico e migração de fluido. Estas aplicações diferem na localização do módulo de FC, no entanto todas partilham o mesmo propósito, tirar partido da temperatura exterior baixa para arrefecer água com um consumo significativamente reduzido, face ao trabalho mecânico do ciclo frigorífico.

3.1.1. Permutador hidráulico remoto

A aplicação do permutador hidráulico remoto tem três técnicas distintas de obter FC, sendo elas: dispositivo remoto, baterias hidráulicas acopladas e o dispositivo modular. O princípio de funcionamento destas técnicas é o mesmo, ou seja, a instalação de um permutador remoto é ligada ao circuito hidráulico do *Chiller* e as principais diferenças são a localização das baterias desse permutador e como se realiza o seu controlo.

Uma das técnicas é designada por dispositivo remoto (*water cooler*), representado na figura 21.



Figura 21 - Representação do dispositivo remoto (*water cooler*)

Este dispositivo fica instalado remotamente do *Chiller* e conectado ao seu circuito hidráulico (figura 22). O controlo dos dois equipamentos é feito de forma independente.

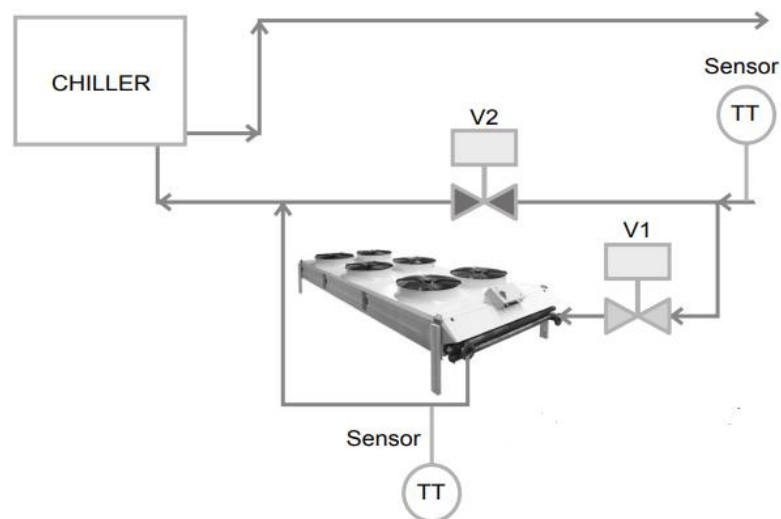


Figura 22 - Esquema de ligação de um dispositivo remoto a um *Chiller*— adaptado de [45]

A segunda técnica é baterias hidráulicas acopladas, que consiste na instalação das baterias do dispositivo remoto, descrito anteriormente em paralelo às baterias de condensação do *chiller*, tal como se pode verificar a vermelho na figura 23.



Figura 23 – Técnica baterias hidráulicas acopladas [32]

A terceira técnica é um dispositivo modular, disponível em vários tamanhos, podendo fornecer a quantidade apropriada de *free-cooling* para a aplicação, tal como representado na figura 24. Neste caso as baterias de FC e as baterias condensadoras estão em secções diferentes. Cada secção incorpora uma válvula de três vias à entrada, uma válvula de retenção e uma válvula de corte na tubagem que retorna do lado da bateria. Todas as secções modulares, independentemente do tamanho, têm um painel de controlo que não requer interação do usuário porque interage diretamente com o controlo do *Chiller*.

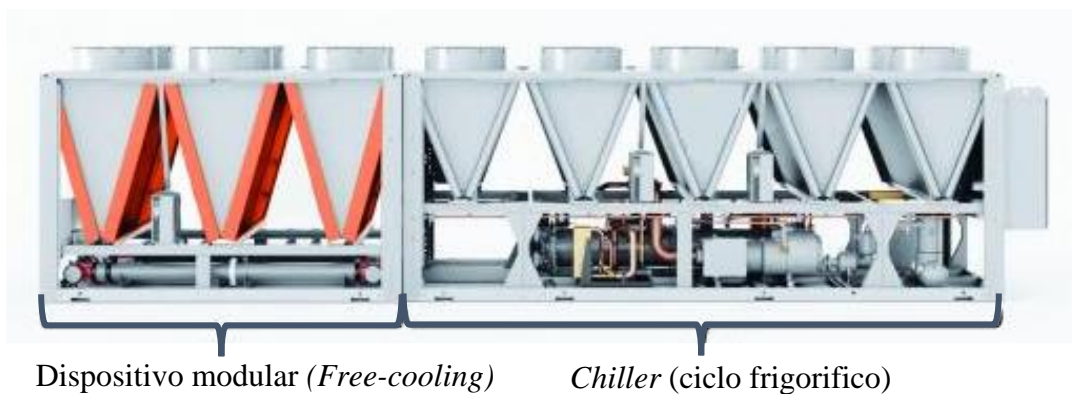


Figura 24 - Técnica de dispositivo modular [32]

Consoante o espaço existente na instalação, a técnica de dispositivo modular pode garantir um desempenho superior, dado que o módulo de FC pode ser dimensionado para otimizar o seu funcionamento. Um dos recursos mais vantajoso é a sua versatilidade de instalação, sendo possível personalizar o módulo de FC de acordo com o pretendido. Sendo modular permite diferentes configurações, variando assim no número de baterias e ventiladores, conforme demonstrado na figura 25 [32].

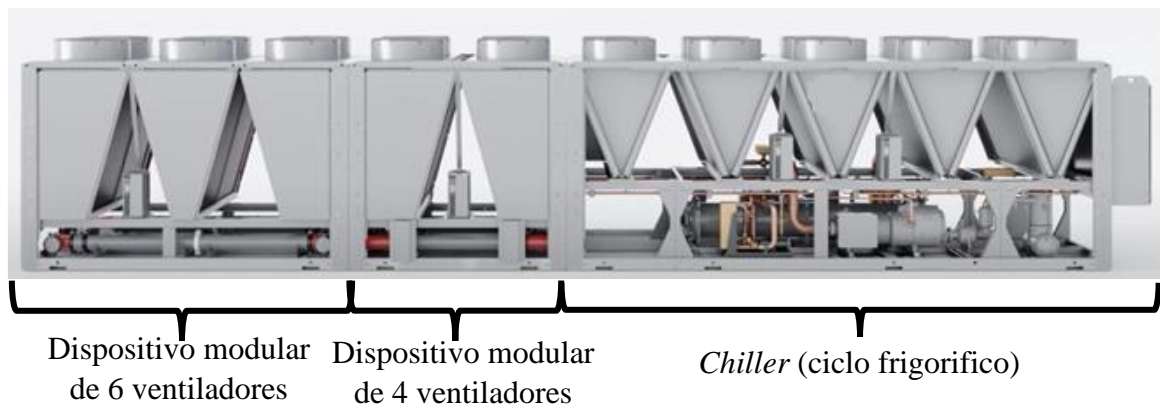


Figura 25 -Técnica de dispositivo modular com dois módulos de tamanhos diferentes – adaptada de [32]

Fazendo uma análise do funcionamento das técnicas baterias hidráulicas acopladas e dispositivo modular, pode-se verificar que com a primeira técnica operando em modo de arrefecimento híbrido, o ar precisa de passar pelas duas baterias condensadoras, as do *Chiller* e as do FC, ilustradas na figura 26. No entanto, existe um conflito no controlo dos ventiladores porque as baterias de *free-cooling*, para obterem a maior potência de arrefecimento, requerem um maior caudal de ar, que por sua vez requerem uma maior velocidade dos ventiladores. Mas, por outro lado, as baterias do circuito mecânico precisam que a velocidade dos ventiladores diminua, para garantir que a temperatura do fluido frigorígeno não fique muito baixa, prejudicando assim o set-point pretendido.

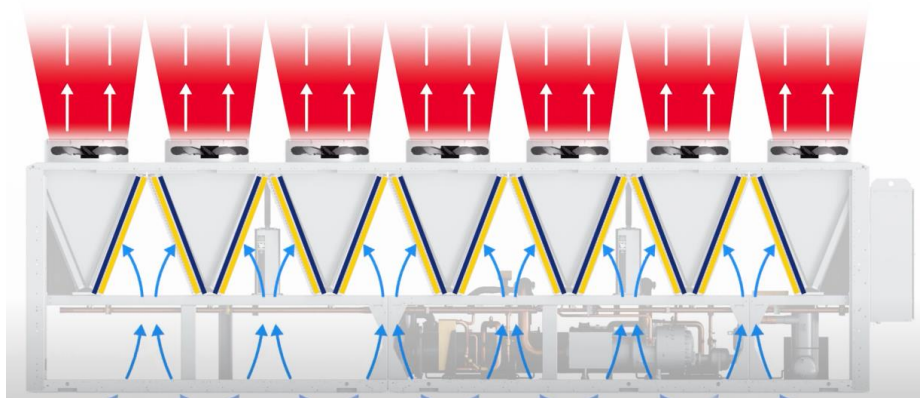


Figura 26 – Técnica baterias hidráulicas acopladas - Funcionamento em modo Híbrido ou Mecânico[32]

No modo de arrefecimento mecânico, com a técnica baterias hidráulicas acopladas, os ventiladores têm um consumo superior comparativamente a um *Chiller* igual sem o componente de FC. Sendo que, com esta técnica, os ventiladores são obrigados a vencer a perda de carga adicional correspondente às baterias de *free-cooling*, ao invés de vencerem apenas a perda de carga das baterias condensadoras do circuito mecânico do *Chiller*. No entanto apesar desta desvantagem, esta técnica torna-se mais rentável quando a utilização

for superior a meio ano em funcionamento híbrido + FC, assumindo uma necessidade de arrefecimento durante 365 dias.

No caso da aplicação do permutador hidráulico remoto com dispositivo modular, o conflito do controlo dos ventiladores fica resolvido porque o ar passa pelos dois conjuntos de baterias separadamente, como representado na figura 27. Os ventiladores do lado do *free-cooling* ajustam o seu funcionamento para tirar o maior partido das temperaturas exteriores. Ao mesmo tempo, que os ventiladores do *Chiller* podem funcionar em velocidades baixas, o que ajuda a manter a proteção do equipamento e o *set-point* pretendido.

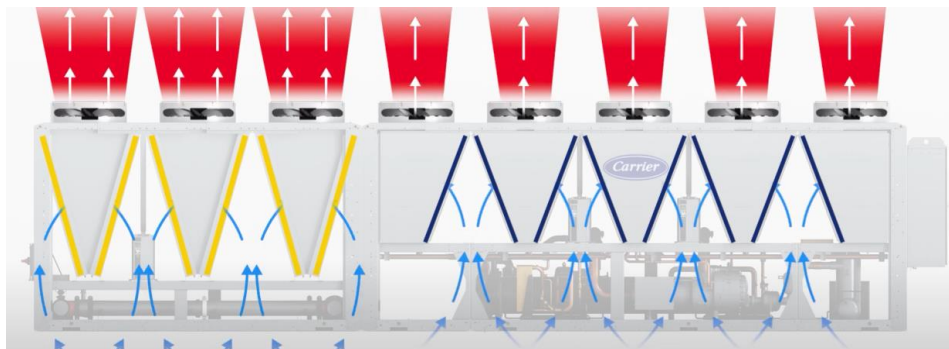


Figura 27 - Técnica de dispositivo modular - Funcionamento em modo Híbrido [32]

No caso do funcionamento no modo de arrefecimento mecânico desta técnica, o ar flui apenas nas baterias de condensação do *chiller* que estão em uso, enquanto os ventiladores do módulo de *free-cooling* encontram-se desligados, como demonstrado na figura 28, tornando esta instalação mais eficiente comparativamente à técnica baterias hidráulicas acopladas.



Figura 28 - Técnica de dispositivo modular - Funcionamento em modo mecânico [32]

No modo de arrefecimento total *free-cooling*, como se pode verificar na figura 29, os ventiladores do módulo de FC são os únicos ligados e a sua velocidade é ajustada de forma a maximizar o seu rendimento. Mais uma vez este tipo de instalação, torna-se mais eficiente energeticamente.

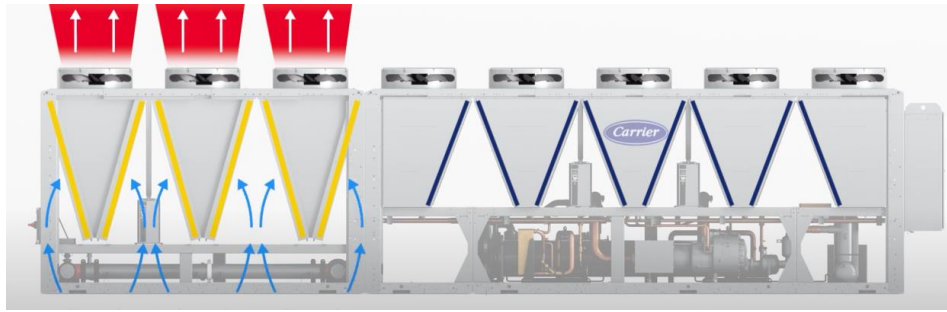


Figura 29 - Técnica de dispositivo modular - Funcionamento em modo total Free-Cooling[32]

A nível de manutenção, na técnica baterias hidráulicas acopladas, à medida que o ar passa pelas baterias, ambas vão ficando colmatadas, acumulando sujidade e detritos, conforme ilustrado na figura 30. Este facto obrigará a um trabalho superior por parte dos ventiladores devido ao aumento da perda de carga nas baterias e, conseqüentemente prejudicará a eficiência do *Chiller*. No entanto, a manutenção corretiva é mais célere, comparativamente à técnica de dispositivo modular devido a um número inferior de grupos de baterias no total do equipamento. Caso seja necessário a substituição de uma bateria, o trabalho irá ser superior comparativamente à técnica com a instalação de baterias em separado [36].

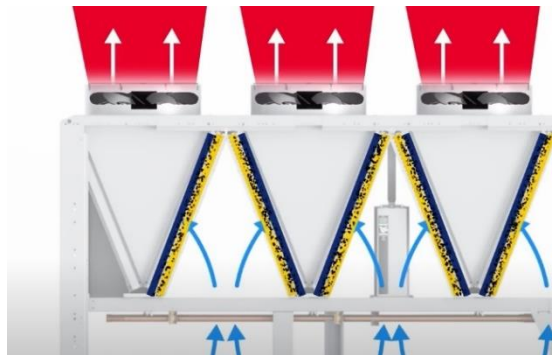


Figura 30 - Acumulação de sujidade na técnica baterias hidráulicas acopladas [33]

A técnica de dispositivo modular não tem apenas como vantagens o desempenho e a personalização do componente de FC, também apresenta vantagens de manutenção preventiva. Como por exemplo, tendo apenas uma bateria, a maior parte da sujidade é expelida pelos ventiladores existentes e, se não for esse o caso, uma lavagem normal da bateria pode retirar a sujidade restante. Além disso, a manutenção pode ser feita separadamente tanto no lado mecânico como no lado do *free-cooling de forma independente*, tal como ilustrado na figura 31.

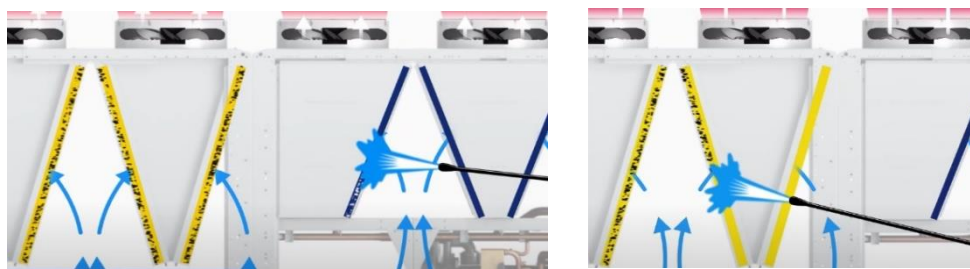


Figura 31 - Limpeza das baterias do Chiller e do módulo de Free-Cooling [36]

3.1.2. Módulo Hidrónico

A aplicação de permutador hidráulico remoto, como descrito no capítulo 3.1.1, consiste em interligar o circuito hidráulico em série à tubagem de retorno de água arrefecida, proveniente da instalação a montante do *Chiller*, tal como exemplificado na figura 33.

O módulo hidrónico, pode ser considerado como a simplificação da técnica baterias hidráulicas acopladas, pertencente à aplicação de permutador hidráulico remoto. As baterias do *Chiller* são constituídas por dois circuitos, um dedicado à condensação, (1), e outro ao arrefecimento no modo de FC, (2), tal como ilustrado na figura 32. As alhetas destas baterias, são em alumínio e têm um espaçamento suficiente para otimizar a eficiência da permuta de calor.

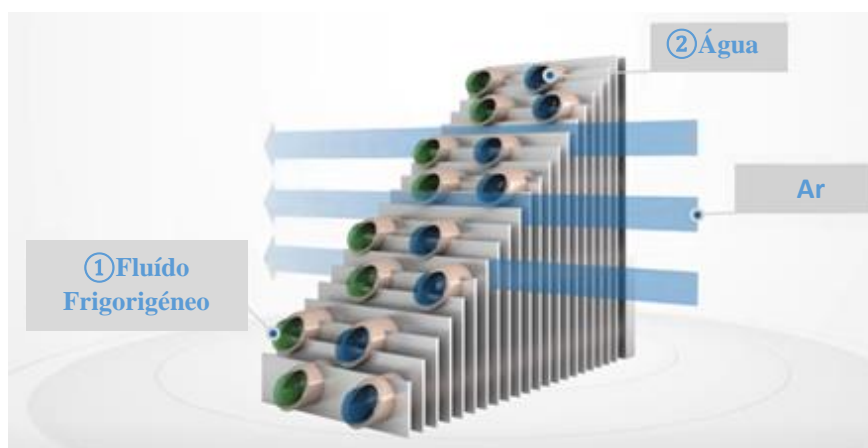


Figura 32 - Bateria de Chiller com Free-Cooling – adaptado de [33]

Ao contrário da aplicação permutador remoto, o módulo hidrónico não pode ser instalado em instalações existentes, ou seja, tem o *Chiller* tem de vir montado de fábrica.

Como já mencionado no capítulo aplicação em *Chillers*(capítulo 3.1), este método também funciona em três modos diferentes, de acordo com as condições do ar externo e a

temperatura de funcionamento da água , sendo eles: modo de arrefecimento mecânico, modo de arrefecimento híbrido e *free-cooling*.

No modo de arrefecimento mecânico, a capacidade de arrefecimento total é garantida através da unidade que funciona como um *Chiller* comum, utilizando em pleno os componentes do seu ciclo frigorífico, tal como ilustrado na figura 33.

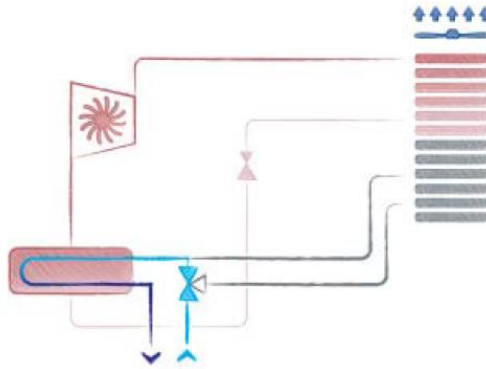


Figura 33 - Esquema de princípio do ciclo frigorífico no modo de arrefecimento mecânico[34]

Quando a temperatura exterior desce abaixo da temperatura da água de retorno, a válvula de três vias faz com que parte da água de retorno circule pelo circuito do FC, conforme ilustrado na figura 34. Parte da capacidade de arrefecimento é conseguida através da permuta com o ar exterior, através das baterias de FC, enquanto que a restante capacidade é adquirida pelo permuta com circuito frigorífico [34].

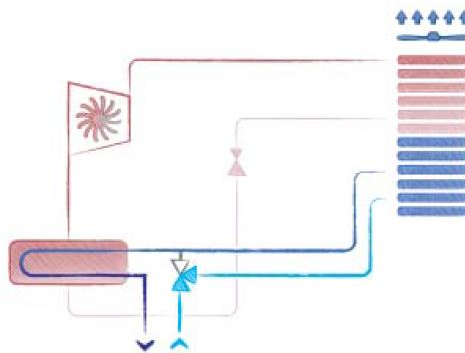


Figura 34 - Esquema de princípio do ciclo frigorífico do modo de arrefecimento híbrido [34]

Para temperaturas do exterior inferiores o suficiente para que o circuito do FC satisfaça a necessidade de arrefecimento total, o modo de só *free-cooling* é ativado. Nestas condições, a válvula de três vias desvia o fluxo na totalidade para o circuito de FC, tal como ilustrado a azul na figura 35.

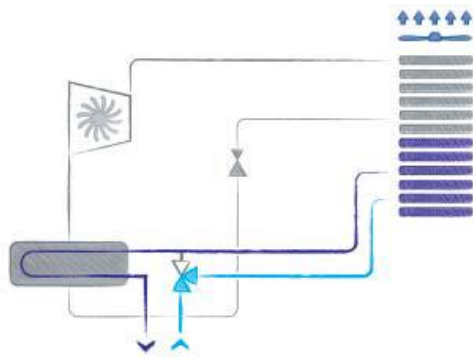


Figura 35 - Esquema de princípio do ciclo frigorífico do modo de arrefecimento total *free-cooling*[34]

3.1.3. Migração de fluido

O *free-cooling* por meio de migração de fluido ocorre devido à diferença de densidades do fluido frigorígeno saturado. Este tem a capacidade de migrar naturalmente para o condensador quando as condições o proporcionam, sem o auxílio de bombas circuladoras. Essencialmente, este tipo de *free-cooling* é baseado num conjunto de válvulas, que fazem com que o fluido frigorígeno vá diretamente do evaporador para o condensador e vice-versa. O fluido ao ser aquecido no evaporador, evapora e migra para o condensador. Onde é arrefecido e condensado, voltando assim ao evaporador, pronto para iniciar este processo novamente.

Os *Chillers* com este tipo de *free-cooling* são mais compactos do que aqueles que usam um módulo hidrónico. Isto acontece porque a tecnologia está integrada diretamente no circuito frigorífico do *Chiller*, mas também porque não existem componentes adicionais [33]. Este tipo de *free-cooling* tem dois modos de funcionamento: parcial e total.

O modo de funcionamento parcial, permite a migração natural do fluido frigorígeno do evaporador para o condensador, contornando simultaneamente os compressores e a válvula de expansão, através de um conjunto de válvulas para este efeito. A perda de carga reduzida dos permutadores evita a necessidade de dispositivos adicionais para bombear o fluido frigorígeno. A capacidade *free-cooling* varia até 25% da capacidade de arrefecimento nominal da unidade [37].

No *free-cooling* total, a evaporação do fluido é feita por meio de um permutador *tube and shell* inundado, que já por si tem uma eficiência bastante superior ao permutador de placas. Este permutador adicional, é instalado paralelamente ao permutador de calor de placas, compressor(es) e válvula de expansão, criando assim um *bypass* a estes componentes, de modo a reduzir a perda de carga ao fluido para obter um melhor desempenho.

Devido à disposição dos permutadores, existe uma distância menor entre o condensador e o permutador tube-and-shell, proporcionando assim uma perda de carga reduzida, obtendo-se nesta solução uma capacidade de *free-cooling* até 75% da capacidade nominal do *Chiller* [37].

3.2. Arrefecimento evaporativo

O arrefecimento evaporativo consiste na diminuição da temperatura do ar, através da mudança de fase da água do estado líquido para o estado de vapor. Este processo pode ser explicado de uma forma simplificada: o ar ao circular ao longo da superfície húmida transfere parte do seu calor para a água líquida e faz com que uma percentagem da mesma evapore. Por outro lado, o processo de transferência de calor proporciona o arrefecimento do ar que circula. Enquanto a superfície húmida apresentar uma temperatura inferior à temperatura do ar, sucede-se o arrefecimento evaporativo. A água presente na superfície irá absorver o calor sensível (calor que não promove uma mudança de estado físico, proporciona apenas alteração de temperatura) que posteriormente é convertido em calor latente (calor que promove uma mudança de estado físico). Durante o processo, a humidade relativa do ar aumenta e a sua temperatura seca diminui.

Este processo é influenciado principalmente pelas condições climáticas da região onde é instalado. Em algumas áreas geográficas existem alturas anuais de maior humidade e o calor latente no ar húmido é mais difícil de dissipar, o que torna o arrefecimento evaporativo menos eficiente [38].

3.2.1. Arrefecimento evaporativo direto

No processo de arrefecimento evaporativo direto, o ar atravessa uma superfície sólida húmida, designada por painel evaporativo e a sua constituição são painéis simétricos de papel. Ao atravessar esta superfície sucede-se um arrefecimento do ar, mas também um aumento da sua humidade relativa, tal como está ilustrado na figura 36. O aumento da humidade relativa (HR) por vezes pode ser prejudicial, uma vez que a capacidade de absorção de água por parte do ar é menor quando a HR é mais elevada [38].

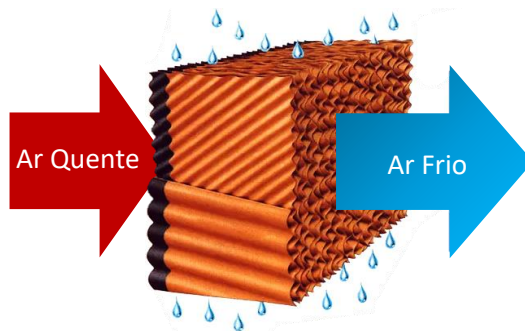


Figura 36 - Evolução do arrefecimento evaporativo direto – adaptada de [39]

Uma baixa humidade relativa e elevada temperatura do ar exterior, favorecem a eficiência deste processo, devido ao ar conseguir absorver uma maior quantidade de água. Já uma elevada humidade relativa exterior, prejudica a capacidade de arrefecimento, pois a absorção de água por parte do ar é limitada [40].

A quantidade de água evaporada é controlada através de uma válvula flutuante ou electroválvula, com interruptor flutuante num reservatório da água que não é absorvida pelo ar. Neste reservatório, a água é recirculada para os pulverizadores através de uma bomba de água. É recomendável o uso de água potável e filtros, para que os pulverizadores constituintes do sistema de vaporização não fiquem obstruídos pelo excesso de minerais [41].

O processo do arrefecimento evaporativo direto pode ser representado num diagrama psicrométrico, como o apresentado na figura 37. Verifica-se que durante este processo há diminuição da temperatura de bolbo seco e há um ganho de humidade relativa.

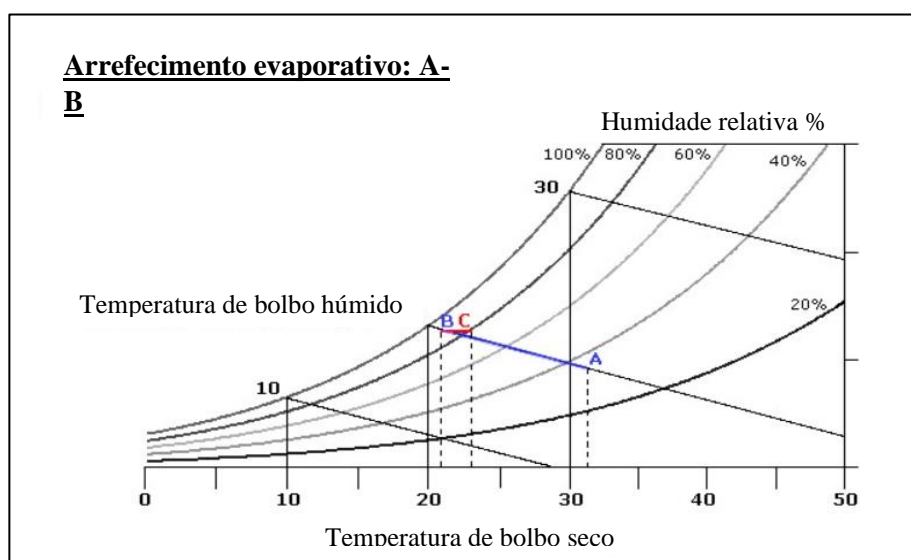


Figura 37 - Evolução do arrefecimento evaporativo no diagrama psicrométrico – adaptado de [45]

3.2.2. Arrefecimento evaporativo indireto

O arrefecimento evaporativo indireto utiliza dois caudais de ar diferentes, designados por primário e secundário. Estes caudais circulam em canais distintos num permutador de calor e sem que tenham contacto entre si, tal como ilustrado na figura 38.

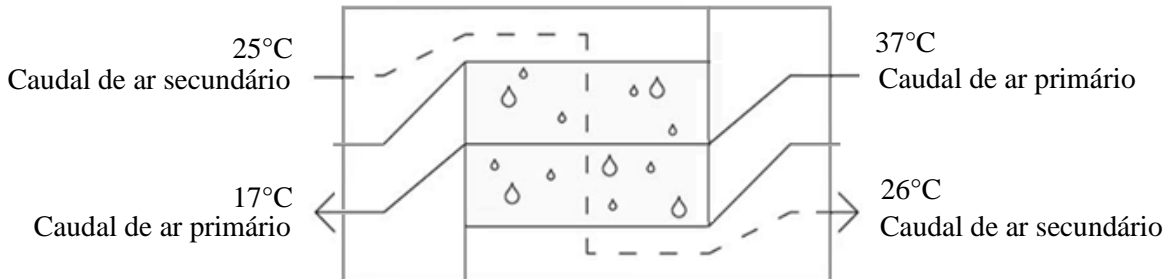


Figura 38 - Arrefecimento evaporativo indireto – adaptada de [46]

Neste processo, o ar secundário passa pelos canais húmidos, é arrefecido pela evaporação da água e arrefece a superfície do canal. O ar primário ao ter contacto com a superfície arrefecida pelo ar secundário, arrefece sem alterar a sua humidade específica [42].

A Figura 39 apresenta a evolução do processo de arrefecimento evaporativo indireto no diagrama psicrométrico. O primeiro estágio corresponde ao processo indireto (a), onde ocorre uma linha de humidade específica constante. No mesmo diagrama também se pode verificar o processo de arrefecimento evaporativo direto (b)[43].

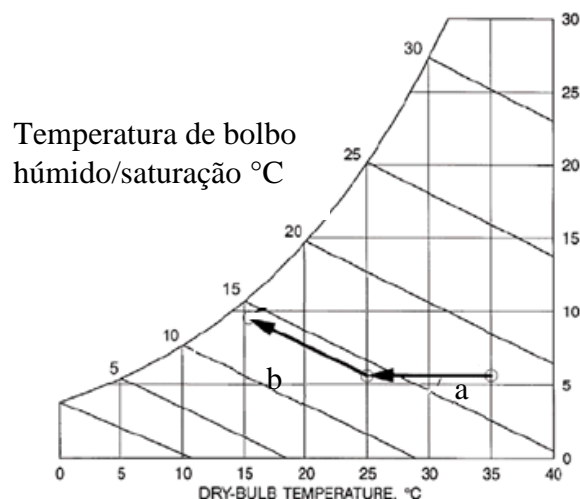


Figura 39 - Diagrama psicrométrico do processo indireto – adaptado de [43]

Em regiões onde o aumento da humidade relativa é indesejável, é possível o uso dos sistemas combinados que envolvam o arrefecimento evaporativo direto e indireto.

Na figura 40, no permutador ocorre um arrefecimento evaporativo indireto do ar e sucede-se a redução da sua temperatura de bolbo seco e a do bolbo húmido. Depois de sair do permutador, o ar fornecido passa por um processo de arrefecimento evaporativo direto e a sua humidade relativa aumenta, enquanto que a sua temperatura de bolbo húmido mantém-se constante [44].

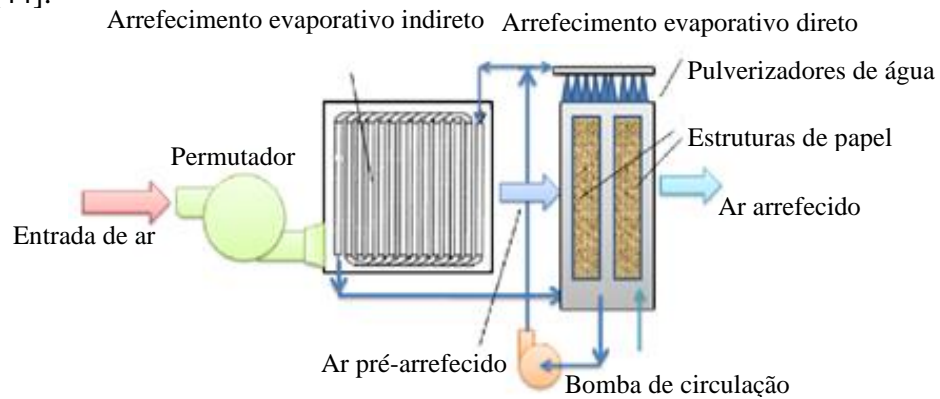


Figura 40 - Exemplo de combinação de arrefecimento evaporativo direto e indireto [41]

3.2.3. Aplicação em Chillers

O objetivo do arrefecimento evaporativo é promover a melhoria de eficiência do *Chiller*. De momento as tecnologias disponíveis para aplicação em *Chillers* são com base no arrefecimento evaporativo direto, sendo este o processo mais simples a nível de instalação. Esta tecnologia tem a capacidade de reduzir a temperatura do ar na entrada do condensador e desta forma, reduz a temperatura de descarga do compressor e reduz a pressão de condensação do ciclo.

Na figura 41 está representado no diagrama de *Mollier* o efeito da presença do arrefecimento evaporativo direto, nas condições de operação do ciclo frigorífico. Esta situação permite o aumento da eficiência do ciclo frigorífico, visto que a capacidade de arrefecimento se mantém, mas o trabalho do compressor diminui [45].

O arrefecimento evaporativo direto em *Chillers* pode ser obtido a partir de dois *kits* evaporativos diferentes, o integrado e o externo, ambos são instalados junto das baterias de condensação do *Chiller*. Ambos têm um objetivo comum, tirar partido do processo para arrefecer o ar antes deste entrar nas baterias do *Chiller* e como consequência otimizar o seu funcionamento.

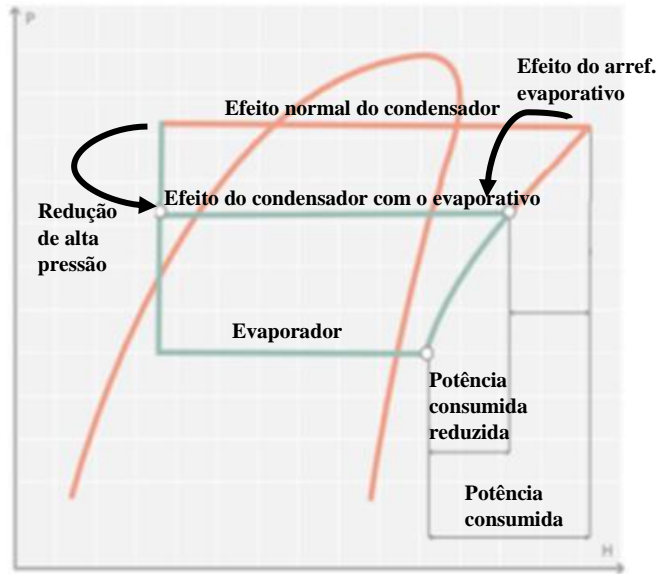


Figura 41 - Diagrama de Mollier com o efeito do kit evaporativo— adaptado de [42]

O sistema de arrefecimento evaporativo integrado nos *Chillers* é fornecido para instalações novas, ou seja, não pode ser adquirido para instalações existentes. Este sistema consiste numa secção, também designada por kit evaporativo, em que os seus principais constituintes são uma estrutura em papel de celulose tratada (i), um circulador de água (ii), múltiplos pulverizadores (iii), um tabuleiro de drenados (ii), tal como ilustrado na figura 42.

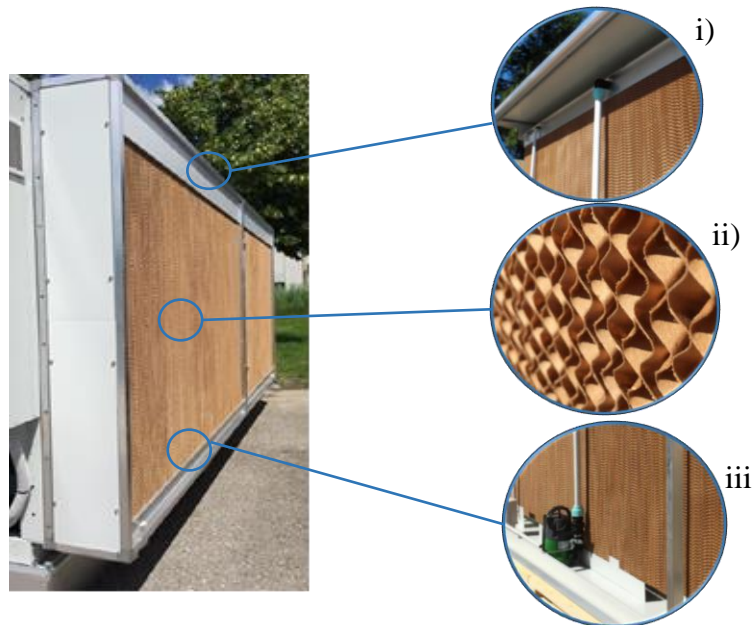


Figura 42 - Opcional de arrefecimento evaporativo instalado num Chiller – adaptado de [31]

A estrutura de papel de celulose (i) é um material e tem uma geometria que favorece uma elevada eficiência de evaporação. O papel é sujeito a um tratamento que o protege contra a sua decomposição.

O circulador de água (ii) é constituído por uma bomba de circulação de 0,3 kW que faz com que a água do tabuleiro de drenados chegue aos pulverizadores instalados na zona superior do sistema. A água que não evapora no fluxo de ar acumula-se no tabuleiro de drenagem e é recirculada para a estrutura de papel novamente.

Os pulverizadores (iii) garantem um abastecimento uniforme de água para a estrutura de papel, o que minimiza o risco de haver manchas secas. As calhas evitam que a água transborde.

O processo de arrefecimento evaporativo sucede quando o ar passa pela estrutura de papel humedecida e com a evaporação da água, o ar arrefece e entra nas baterias condensadoras da unidade com uma temperatura mais baixa (figura 43) [34].



Figura 43 - Evolução da temperatura do ar ao entrar no Chiller com arrefecimento evaporativo – adaptado de [34]

Após a passagem no condensador, o ar fica mais quente, devido ao processo de condensação, sendo posteriormente libertado para o exterior. Este processo resulta apenas da troca de calor entre o ar arrefecido pelo kit evaporativo e as baterias condensadoras do *Chiller*. A troca de calor é conseguida sem o auxílio do trabalho realizado pelos compressores devido ao circuito adicional que este tipo de *Chiller* contém (ver módulo hidrónico, capítulo 3.1.2). A utilização do kit evaporativo depende da temperatura de bolbo seco das condições exteriores. Assim, quando as temperaturas de bolbo seco do ar exterior são superiores a 6 °C, os ventiladores do *Chiller* devem ser ligados, de modo a permitir o deslocamento do ar desde o exterior até ao condensador. Adicionalmente, o circulador de água deve ser ligado, em funcionamento contínuo, de modo a permitir o deslocamento da

água para o arrefecimento evaporativo. A válvula do tabuleiro de drenados deve estar fechada, de modo a permitir a circulação da água. Caso as temperaturas de bolbo seco do ar exterior forem inferiores a 6 °C, o circulador de água deve desligar-se permitindo a condensação direta com o ar exterior e a válvula de condensados deve estar aberta de modo escoar os drenados [33].

No diagrama psicrométrico, representado na figura 44, pode-se observar que, quanto maior for a temperatura de bolbo seco e menor for a humidade relativa, mais útil é o arrefecimento evaporativo e mais eficiente se torna o processo. No arrefecimento evaporativo ocorre uma absorção de humidade no ar, logo quanto mais seco o ar, maior a sua capacidade de absorção [34].

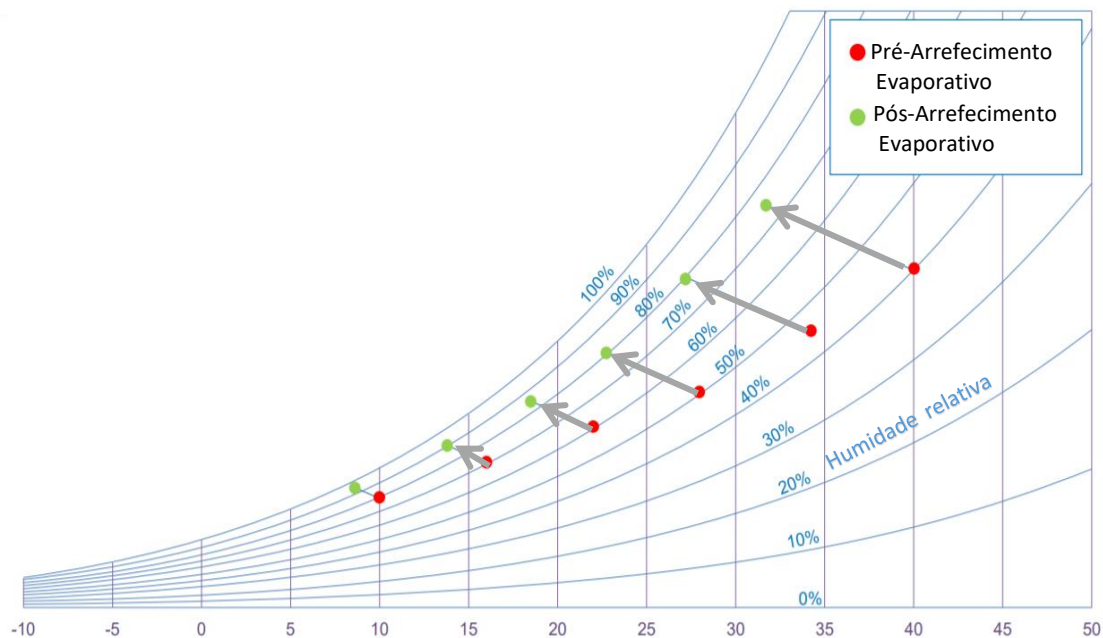


Figura 44 - Diagrama psicrométrico da evolução da temperatura do ar com o kit evaporativo— adaptado de [34]

O kit de arrefecimento evaporativo é fornecido em dois componentes individuais para cada lateral do *Chiller*, tal como se pode observar na figura 45.

A limpeza e manutenção do kit evaporativo integrado deverá ser feita de acordo com os seguintes pontos:

- Ciclos de lavagem programáveis para limpeza do tabuleiro de drenagem e proporcionam uma reposição completa da água, evitando bactérias e crescimento de algas;

- Limpeza das estruturas de papel de celulose e da calha a cada 6 meses para remover a incrustação de cálcio e sujidades;
- A substituição das estruturas de papel de celulose é recomendada a cada 3 a 4 anos;
- No caso de um longo período de inatividade (por exemplo, no inverno), as estruturas de papel podem ser removidas e armazenadas para melhor preservação.



Figura 45 - Módulos do kit evaporativo[34]

Alguns sistemas de refrigeração instalados funcionam fora dos parâmetros de projeto e normalmente apresentam um maior risco de avaria, custos de energia mais elevados e eficiência operacional reduzida. Perante estas instalações, que podem ter muitas consequências, tanto a nível mecânico como a nível económico, houve a necessidade de os fabricantes iniciarem o estudo de uma tecnologia aplicável aos seus equipamentos já instalados, que favoreça a diminuição dos problemas mencionados anteriormente. Essa tecnologia denomina-se de kit evaporativo externo e o seu conceito é baseado nas propriedades termodinâmicas naturais da água [46].

A água ao atravessar os painéis, como, evapora e ao absorver a humidade do ar, este arrefece antes de entrar nas baterias condensadoras. A redução da temperatura do ar pode ser até 20 °C, dependendo das condições de humidade relativa do ar exterior. Como já referido anteriormente, quanto menor for a HR maior é a capacidade do ar absorver a água. Este kit foi concebido para ser uma instalação versátil, simples e económica.

O kit evaporativo externo tem uma grande vantagem em relação ao kit evaporativo integrado, ou seja, como este é para ser instalado em instalações já existentes, os painéis de malha seccional podem ser adaptados para todos os modelos de *Chillers*.

O seu sistema de pulverização de água é composto por uma válvula reguladora de pressão, válvula solenoide e pulverizadores adequados para água filtrada com um mínimo de 2,5 bar. É aconselhável o uso de água sem componentes que possam incrustar na malha. A frequência e a duração da pulverização da água são cuidadosamente determinadas para corresponder aos requisitos do sistema, enquanto é minimizado o consumo de água [45].

Ao contrário do kit evaporativo integrado, a água é pulverizada por ciclos para uns painéis, que neste caso são constituídos por uma malha não metálica, instalados em frente às baterias condensadoras de *Chillers*, condensadores remotos e *Rooftops*, etc., tal como representado na figura 46.



Figura 46 - Representação do kit evaporativo externo[46]

A instalação do kit evaporativo externo tem como principal benefício o aumento da eficiência do *Chiller*, ou seja, no caso de uma redução fictícia de 10 °C na temperatura exterior ocorre uma redução de até 13% de consumo de energia [46].

4. Análise do funcionamento de um *Chiller* com *Free-cooling* evaporativo

4.1 Descrição da instalação e principais parâmetros

O presente caso de estudo incide sobre um *Chiller* que inclui o módulo de *free-cooling* hidrônico e um kit evaporativo, onde irá ocorrer como um arrefecimento evaporativo direto do ar antes de ter contacto com as baterias condensadoras do *Chiller*. Optou-se por este modelo de *Chiller* porque já inclui de fábrica, as duas tecnologias em estudo e dado que se trata de uma instalação nova. Assim a presente análise, tem como principal objetivo o estudo da influência do kit evaporativo em *Chillers* com módulo *free-cooling*.

Para o efeito foi selecionada uma instalação para um *data center* com uma carga térmica de 500 kW.

O perfil de ocupação do espaço a climatizar foi considerado como total (100%), sendo que estes edifícios normalmente dispõem de um horário de funcionamento de 24 horas por dia, 7 dias por semana, consumindo assim grandes quantidades de energia e gerando enormes quantidades de calor, que por sua vez precisam de ser removidas para garantir a confiabilidade do serviço e a continuidade das operações [21,22].

O regime de funcionamento de temperaturas da água considerado na rede hidráulica foi de 7 - 12 °C. A abordagem mais aplicada nestes espaços considera arquiteturas de corredores abertos com temperaturas de ar de retorno para as unidades de arrefecimento entre 22 - 26 °C e variando a temperatura de insuflação entre 10 - 14 °C. No entanto, existe uma alternativa com o uso da distribuição do ar inteligente, que permitem utilizar temperaturas na rede hidráulica mais elevadas, nomeadamente 20 - 26 °C [29].

A verificação da influência da utilização do arrefecimento evaporativo num *Chiller* foi realizada para os mesmos parâmetros de funcionamento, ou seja, manteve-se o regime de temperaturas da água e a potência do equipamento. Os modelos dos *Chillers* selecionados e apresentados na Tabela 1 são da marca Mitsubishi Electric, com condensadores a ar, compressores centrífugos e ambos têm como fluido frigorigéneo o R134a [47].

Tabela 1 - Modelos dos Chillers

Chiller	Modelo
Sem arrefecimento evaporativo	TRCS-FC-Z
Com arrefecimento evaporativo	TRCS-EFC-Z

Os Chillers selecionados são praticamente iguais, o que os distingue é a presença do kit evaporativo integrado. O fluido frigorigéneo do ciclo frigorífico por compressão de vapor em ambos os Chillers é o R134a. Apesar do fluido frigorigéneo R134a estar cada vez mais em desuso porque tem um potencial de aquecimento global (GWP) elevado e segundo a regulamentação do F-gas, em 2026 o limite de GWP em hidrofluorcarbonetos (HCF's) é 620[48]. Contudo, estes Chillers foram os selecionados porque eram a solução mais acessível para o estudo pretendido.

Na Figura 47 é apresentada uma imagem de cada modelo do Chiller, sem arrefecimento evaporativo e com arrefecimento evaporativo.



Figura 47 - TRCS-FC-Z à esquerda e TRCS-EFC-Z à direita [47]

A análise do funcionamento dos *Chillers* foi realizada através do *software* de seleção de equipamentos ELCA, disponibilizado pela *Mitsubishi Electric – Europe*. O ELCA é um *software* comercial que permite selecionar equipamentos e realizar análises energéticas e económicas entre equipamentos hidráulicos [49].

O programa disponibiliza espectros de temperatura para um ano das três principais cidades de Portugal (Lisboa, Faro e Porto) e também para outras cidades do mundo, ou mesmo tem a capacidade de importar perfis climáticos de vários locais. Após a seleção da cidade de projeto, o programa permite fazer a definição do perfil de ocupação do espaço a climatizar.

A figura 48 foi retirada do ELCA e exemplifica a seleção da cidade Lisboa [49].

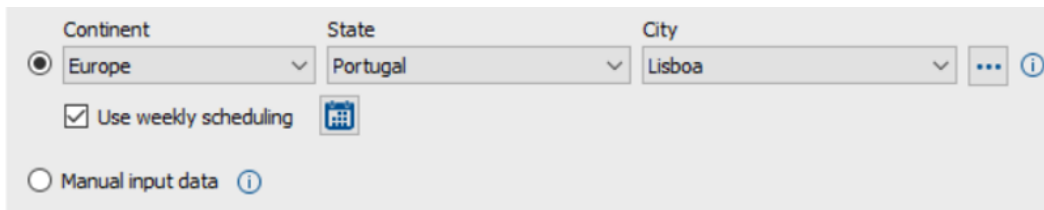


Figura 48 - Seleção da cidade para o estudo energético no ELCA [44]

Após a seleção da cidade pretendida para o estudo, é definido o perfil de ocupação para cada temperatura exterior e como, já referido anteriormente, os *data centers* têm uma ocupação de 100% independentemente da temperatura exterior. Na figura 49 podemos verificar a implementação do perfil de ocupação no *software* ELCA, para um perfil de refecimento.

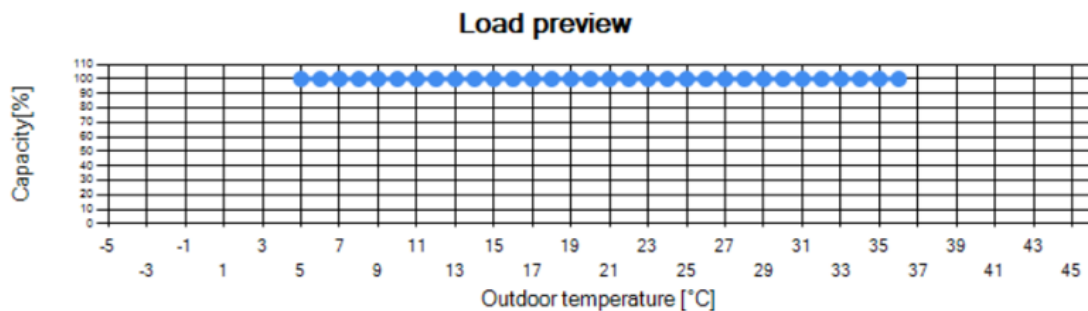


Figura 49 - Seleção do perfil de ocupação para o estudo energético no ELCA [49]

Após a seleção dos parâmetros supramencionados, foi realizada a seleção do tipo de *Chiller* pretendido, tal como demonstrado na figura 50. Neste caso foi selecionado o *Chiller* com *free-cooling*.



Figura 50 - Seleção do tipo de Chiller de projeto no ELCA [32]

O regime de temperaturas da água foi definido, conforme na figura 51, tendo neste caso selecionado o regime de 7 °C/12 °C para a temperatura de ida e retorno do *Chiller*, respetivamente.

HEAT EXCHANGER USER SIDE

°C
 °C

Figura 51 - Seleção do regime de temperaturas de água de projeto no ELCA [32]

A capacidade do *Chiller* a selecionar foi 500 kW, conforme apresentado na figura 52.

OTHER PARAMETERS

Type: Capacity [kW]:
 Noise [dB(A)]: Efficiency:

Figura 52 – Definição da capacidade de arrefecimento pretendida no equipamento no ELCA [32]

A seleção dos dois *Chillers* pretendidos foi realizada, obtendo-se através do programa a análise energética de cada um para as condições de projeto definidas (condições de temperatura de funcionamento da água, potência e cidade de estudo). A figura 53 mostra os resultados que se retira do *software*. Na tabela da esquerda, denominada por BIN, estão as temperaturas exteriores consideradas e as horas em que estas ocorreram. Na tabela da direita, estão apresentadas as capacidades de *free-cooling* e a capacidade proveniente do ciclo mecânico, a potência consumida e a eficiência da unidade. Estes valores são a base do estudo realizado.

BIN				TRCS-FC-Z				
Tempera [°C]	BIN of tempera	Cooling Load Demand [kW]	Cooling energy demand [kWh]	Freecooling [kW]	CC [kW]	Total PI [kW]	EER [kW/kW]	Annual EA [kWh/y]
5.0	1	500.0	500.0	209.1	290.9	44.96	11.12	44.96
6.0	3	500.0	1500	175.4	324.6	51.06	9.792	153.2
7.0	11	500.0	5500	141.7	358.3	57.26	8.732	629.9
8.0	24	500.0	12000	108.1	391.9	63.36	7.891	1521
9.0	24	500.0	12000	74.40	425.6	69.56	7.188	1669
10.0	79	500.0	39500	40.70	459.3	76.76	6.514	6064
11.0	83	500.0	41500	0.000	500.0	91.80	5.447	7619
12.0	127	500.0	63500	0.000	500.0	92.00	5.435	11684
13.0	161	500.0	80500	0.000	500.0	92.30	5.417	14860

Figura 53 - Resultados da análise energética comparativa do ELCA [32]

4.2 Dimensionamento e viabilidade da aplicação para Portugal Continental

Neste subcapítulo é analisada a influência das condições meteorológicas no modo de funcionamento dos dois tipos de *Chillers*, sem e com arrefecimento evaporativo para uma

instalação em Portugal. Para o efeito foi considerada a instalação localizada em 3 sítios distintos de Portugal continental, mais propriamente: Lisboa, Porto e Faro. A seleção destes locais foi devido a apresentarem temperaturas de bolbo seco e humidades do ar distintas, conforme demonstrado nas condições de projeto apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Condições de temperatura de projeto

Local	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)
Lisboa	35	33,3
Porto	30	40,2
Faro	35	43,6

4.2.1 Temperatura de funcionamento da água: 7/12 °C

Para verificar a influência do kit evaporativo no funcionamento de *Chiller*, foi feito um estudo para as temperaturas de funcionamento da água 7/12 °C, sendo este o regime de funcionamento mais usado em instalações em Portugal[50].

4.2.1.1 Instalação em Lisboa

A seleção do *Chiller* foi realizada para a cidade de Lisboa, considerando o perfil climático representado na tabela 3 e as condições de projeto apresentadas na Tabela 2.

Pode-se verificar na tabela 3, que a cidade de Lisboa apresenta valores de humidade relativa acima dos 70% para temperaturas exteriores baixas e para temperaturas mais altas a humidade relativa varia entre os 37-50%.

Tabela 3 - Perfil climático de Lisboa

Temp. [°C]	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
HR [%]	96	87	83	83	79	80	77	75	74	74	70	69	68	67	65	65
Horas	1	3	11	24	24	79	83	127	161	186	173	146	136	120	114	124
Temp. [°C]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
HR [%]	66	61	59	57	52	48	47	48	44	45	44	47	37	41	47	46
Horas	113	109	108	111	100	112	94	102	86	61	44	29	9	7	1	2

A análise energética realizada permitiu verificar a potência consumida para cada um dos *Chillers*, ao longo do ano. Adicionalmente, nessa análise visualizou-se o número de horas de funcionamento para as diferentes temperaturas exteriores. Os resultados obtidos para a localização de Lisboa encontram-se representados na figura 54.

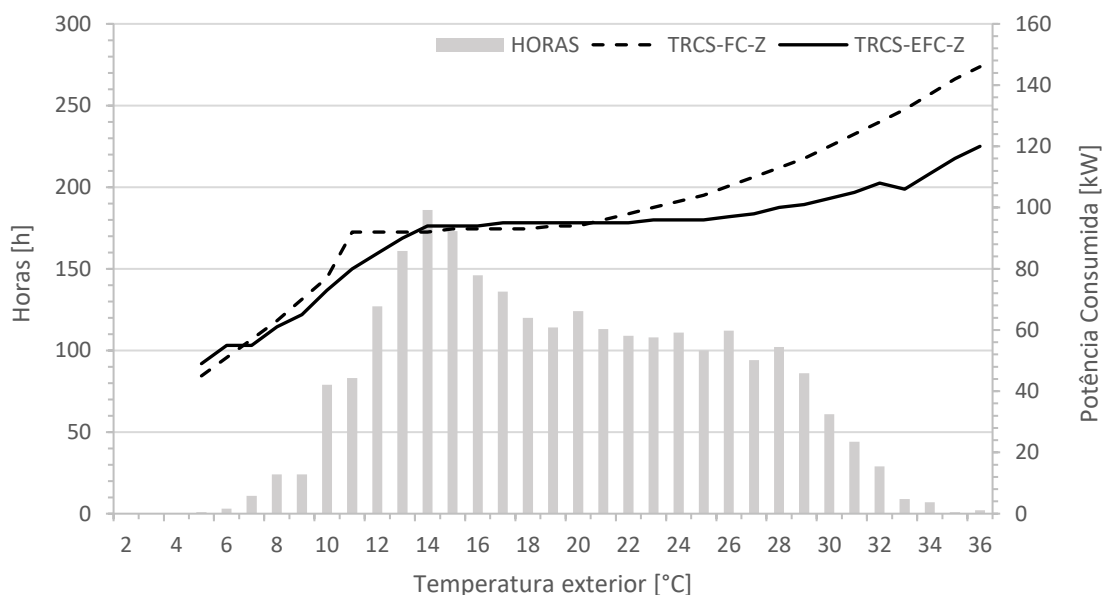


Figura 54 -Análise da potência consumida da instalação em Lisboa

No *Chiller* sem arrefecimento evaporativo (TRCS-FC-Z), verifica-se na figura 54 que existe um aumento de consumo proporcional entre 6 e 11 °C. Este aumento é devido ao acréscimo do trabalho de ventilação para transferir a mesma potência térmica. Enquanto no *Chiller* com arrefecimento evaporativo (TRCS-EFC-Z) verifica-se um comportamento diferente entre os 6 °C e os 14 °C.

A referir que entre os 5 °C e os 6 °C, o *Chiller* com arrefecimento evaporativo apresenta um consumo superior comparativamente à tecnologia sem arrefecimento evaporativo. O maior consumo é devido à maior perda de carga para a ventilação, originada pelos favos de papel de celulose destinados ao arrefecimento evaporativo, que exige mais trabalho dos ventiladores e consecutivamente um maior consumo elétrico superior. Contudo, entre os 6 °C a 14 °C, como se pode verificar na figura 54, existe um consumo inferior comparativamente à tecnologia sem arrefecimento evaporativo, uma vez que é a partir dos 6 °C que o sistema de arrefecimento evaporativo entra em funcionamento.

O arrefecimento evaporativo conseguido permite arrefecer o ar exterior, pelo efeito evaporativo, antes deste trocar calor com o condensador do *Chiller*, o que permite trabalhar

até aos 14 °C, de temperatura exterior sem o auxílio dos compressores do circuito frigorífico do *Chiller*, concluindo-se assim que o *Chiller* trabalha 27% do tempo de um ano em modo só FC.

Para a gama de temperaturas exteriores de 11 a 20 °C, no *Chiller* sem arrefecimento evaporativo, verifica-se uma potência mínima consumida de 90 kW com o circuito frigorífico em funcionamento.

É observado um ligeiro aumento de consumo até à temperatura exterior de 20 °C devido à redução da diferença de temperatura exterior face à temperatura de condensação do circuito frigorífico. No entanto, este aumento de consumo é praticamente desprezável pois este intervalo de temperaturas está bastante longe da temperatura de condensação, que tipicamente é de 45 °C. No modelo do *Chiller* com kit evaporativo, quando as temperaturas exteriores estão entre os 14 a 20 °C verifica-se um regime onde o consumo desta tecnologia é ligeiramente superior, isto porque os ganhos do arrefecimento evaporativo são inferiores ao consumo do respetivo circulador de água.

Com temperaturas acima dos 20 °C verifica-se um aumento de consumo para o *Chiller* sem arrefecimento evaporativo. Este aumento é proporcional ao trabalho do circuito frigorífico devido à redução abrupta da diferença de temperatura do ar exterior, face à temperatura de condensação do circuito frigorífico. Este é o regime de temperaturas onde exige um maior esforço do equipamento na sua totalidade. No *Chiller* com arrefecimento evaporativo para a mesma gama de temperaturas exteriores verifica-se que até aos 28 °C, o consumo manteve-se praticamente inalterável.

Acima dos 28 °C de temperatura exterior verifica-se um ligeiro aumento do consumo, no entanto este continua a ser 30 kW inferior do que quando não se utiliza o kit evaporativo. Neste intervalo de temperaturas exteriores, a humidade relativa varia entre 46% e 64%, o que proporciona ganhos significativos utilizando o arrefecimento evaporativo. Confirmando-se que quanto mais quente e seco for o local onde é instalado o kit evaporativo, maior será o benefício que se retira do arrefecimento evaporativo.

O rácio de eficiência energética (ERR) é a razão entre a potência frigorífica e a potência consumida, pelos compressores. Assim, para a mesma potência de arrefecimento, o EER varia de forma inversamente proporcional face à potência consumida, tal como se observa na figura 54 e figura 55.

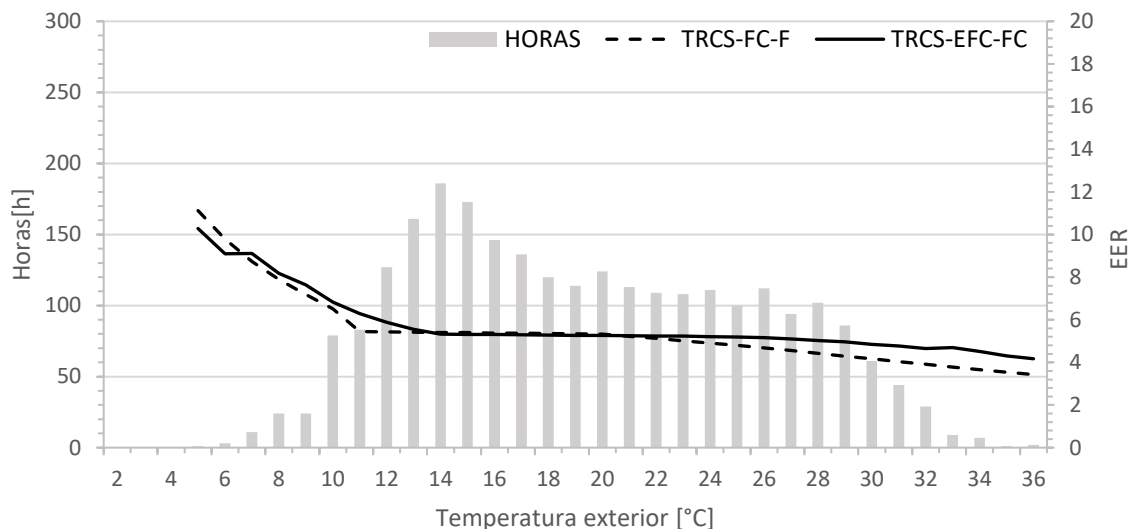


Figura 55 - Análise energética da instalação de Lisboa

Fazendo uma análise à figura 55, podemos verificar que ambos os equipamentos apresentam valores de EER elevados até aos 11 °C, 6,3 para o *Chiller* com kit evaporativo (TRCS-EFC-F) e 5,4 para *Chiller* apenas com *free-cooling* (TRCS-FC-F). Os valores de EER obtidos neste intervalo de temperaturas, deve-se ao modo só FC estar ativo, por isso o único consumo elétrico presente na instalação é dos ventiladores. No entanto o *Chiller* com o kit evaporativo, TRCS-EFC-F, apresenta um valor de EER mais elevado devido ao proveito proveniente do arrefecimento do ar antes de entrar nas baterias condensadoras do *Chiller*. Este proveito é conseguido pois o ganho do arrefecimento evaporativo é superior ao consumo dos ventiladores.

No intervalo de temperaturas 14 °C e 20 °C existe um ganho térmico do kit evaporativo inferior ao seu consumo, somando a este, o consumo superior dos ventiladores obtém-se um EER inferior, comparativamente ao *Chiller* sem kit evaporativo.

Para as temperaturas mais elevadas podemos verificar que o *Chiller* com o kit evaporativo apresenta maior valor de EER de cerca de 22%. Esta ocorrência era expetável, sendo que é necessário menos trabalho mecânico porque o ar é pré-arrefecido antes de entrar em contacto com as baterias do condensador.

4.2.1.2 Instalação no Porto

De modo a verificar se existe influência das condições meteorológicas nas análises realizadas anteriormente, a mesma instalação foi projetada com os mesmos parâmetros de funcionamento, adaptando apenas as condições de projeto à cidade em estudo.

Considerou-se as condições exteriores de projeto para a cidade do Porto, conforme enunciado na tabela 2 e o perfil climático apresentado na tabela 4.

Tabela 4 - Perfil climático do Porto

Temp. [°C]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
HR [%]	90	80	82	85	85	79	78	79	73	72	73	13	71	73	67	71
Horas	3	2	5	4	20	16	32	53	78	88	178	215	253	194	171	205
Temp. [°C]	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
HR [%]	68	69	70	65	60	56	52	50	46	45	45	42	41	36	46	
Horas	188	211	160	143	131	61	46	44	29	25	15	10	14	5	1	

Analisando a tabela 4, pode-se verificar que a cidade do Porto tem um espectro de temperaturas mais frio do que a cidade de Lisboa. Assim, é expectável que a influência do kit evaporativo seja menos notória para temperaturas altas e o contrário para temperaturas baixas, uma vez que aumenta o modo de funcionamento só FC.

Na figura 56 apresentam-se os resultados obtidos na análise da potência consumida para a cidade do Porto.

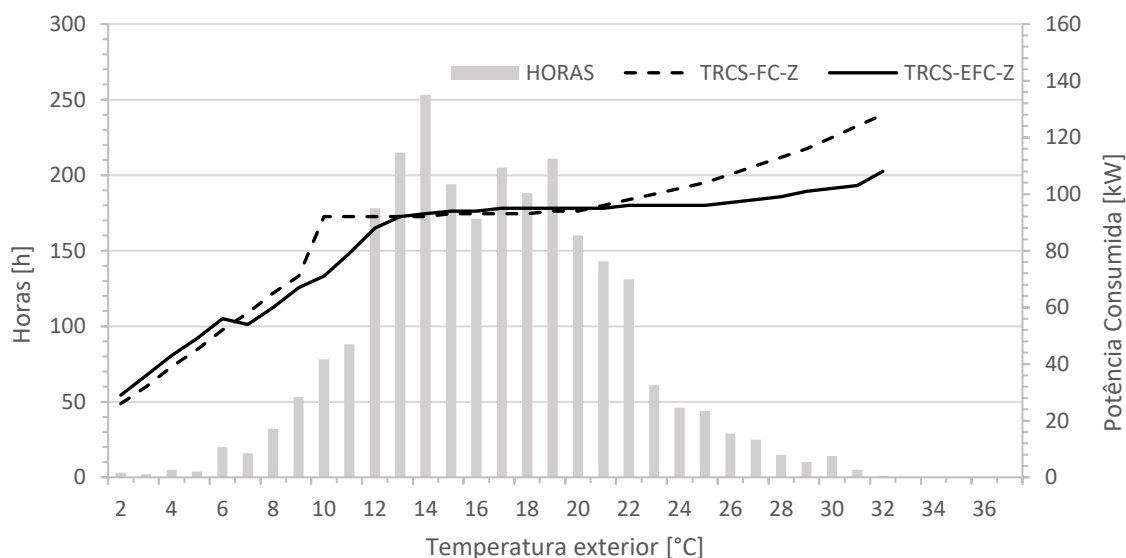


Figura 56 - Análise da potência consumida da instalação no Porto

No Porto verifica-se poucas horas com temperaturas exteriores inferiores a 5 °C, o que não ocorre em Lisboa. No entanto, em Lisboa ainda se verifica algumas horas de temperaturas exteriores acima dos 32 °C. Em Lisboa a gama de temperaturas entre 10 °C e 29 °C ocorre

para um número de horas acima das 80, demonstrando que a temperatura ao longo do ano é mais amena que no Porto.

O maior número de horas no Porto surge para as temperaturas exteriores entre 12 °C e 22 °C, onde a utilização do kit de arrefecimento evaporativo não obtém melhores resultados, visto que para estas temperaturas o *Chiller* TRCS-EFC apresenta maior potência consumida.

Comparativamente ao Porto, a instalação localizada em Lisboa apresenta um maior número de horas acima dos 22 °C, o que conduz a um maior aproveitamento do funcionamento do arrefecimento evaporativo, tornando-se uma instalação mais eficiente. Este facto, proporciona um menor consumo da instalação devido a um maior número de horas de condensação sem a utilização dos compressores do circuito frigorífico do *Chiller*.

Na figura 57 encontram-se os resultados obtidos na análise da eficiência para a cidade do Porto.

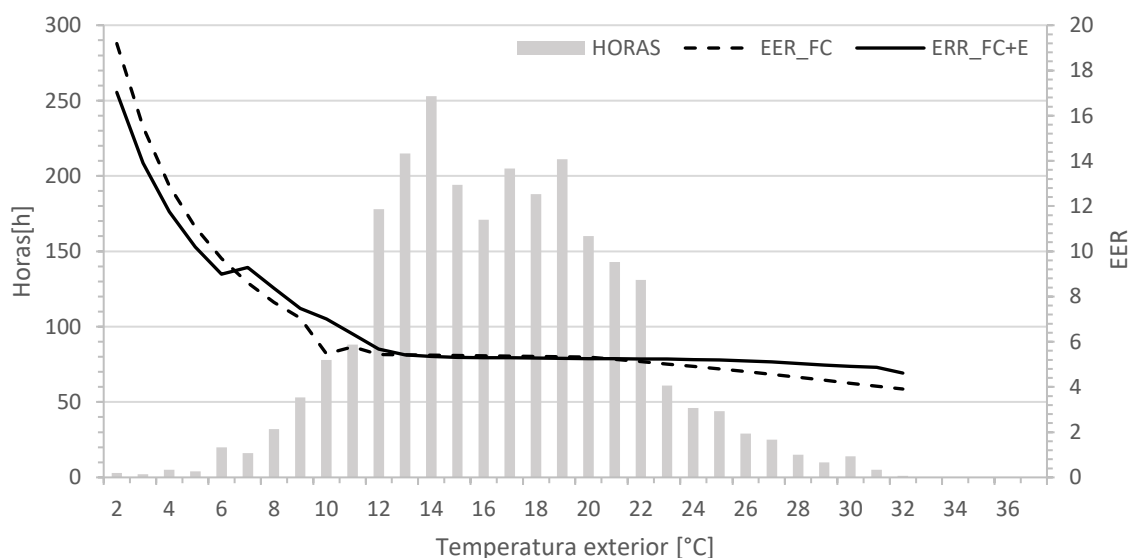


Figura 57 - Análise energética da instalação do Porto

Sendo que a cidade do Porto apresenta temperaturas mais baixas do que Lisboa, a utilização do kit evaporativo não influencia muito a nível de eficiência energética do *Chiller*, tal como se pode verificar na figura 57.

Verifica-se que a instalação do Porto apresenta valores de EER mais altos para temperaturas mais baixas, comparativamente a Lisboa, isto deve-se ao facto desta cidade

apresentar um perfil climático mais frio, concretamente menos 3 °C e neste intervalo de temperaturas, o *Chiller* tem ativado o modo total *free-cooling*,

Na figura 57 são apresentados valores de EER fora do comum para *Chillers* (valores acima de 4), isto acontece porque este valor é calculado através da divisão da potência gerada pela potência consumida. No gráfico da figura 57 já tinha sido verificado que, para temperaturas mais baixas, há um consumo de energia baixo e como a potência gerada é constante(500kW), é espectável os valores do EER serem elevados.

4.2.1.3 Instalação em Faro

Para finalizar a análise da instalação de *Chillers* com o kit evaporativo em Portugal, foi realizado o mesmo dimensionamento para a cidade de Faro.

Considerou-se as condições exteriores de projeto para a cidade de Faro, conforme enunciado na tabela 2 e o perfil climático apresentado na tabela 6.

Tabela 5 - Perfil climático de Faro

Temp. [°C]	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
HR [%]	67	47	72	67	83	68	72	69	70	70	71	69	68	69	68	66	64
Horas	2	1	4	5	14	30	37	62	87	125	173	193	164	162	140	138	141

Temp. [°C]	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
HR [%]	65	65	56	56	52	49	49	44	43	43	33	38	20	27	14	20
Horas	189	216	177	170	135	84	69	42	14	9	7	1	5	1	1	2

De acordo com o perfil climático desta cidade, pode-se concluir que se trata de um clima mais quente do que Lisboa. Verifica-se também que para temperaturas mais baixas apresenta aproximadamente menos 30% de humidade relativa e nas temperaturas mais altas apresenta mais 20% do que Lisboa.

Na figura 58 encontram-se os resultados obtidos na análise da potência consumida para a cidade do Faro.

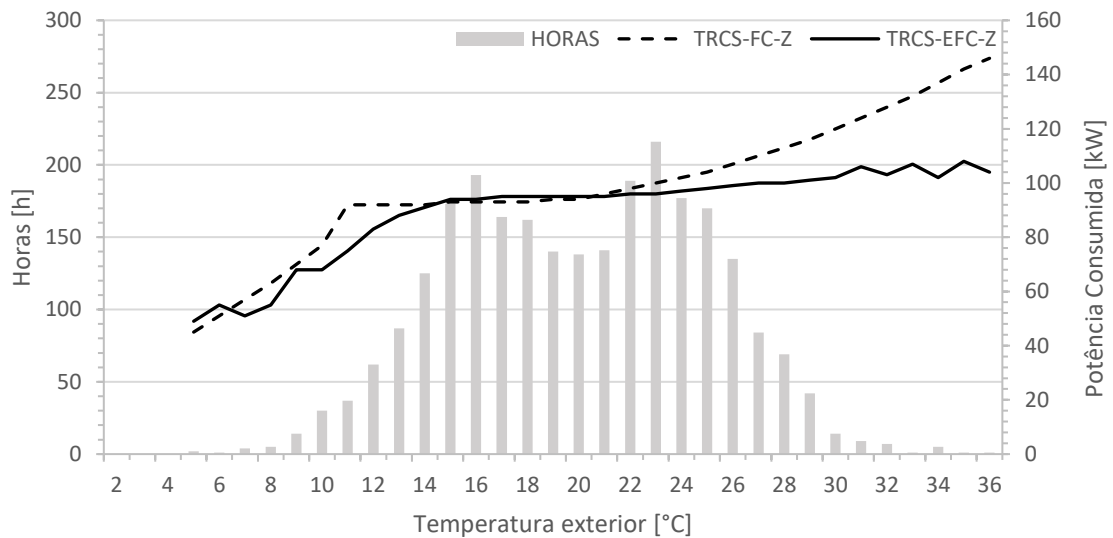


Figura 58 - Análise da potência consumida da instalação em Faro

Em Faro, verifica-se que a gama de temperaturas exteriores é muito semelhante à de Lisboa, contudo o somatório de horas referente a temperaturas inferiores a 11 °C nesta cidade é cerca de metade das de Lisboa, tendo como consequência um aproveitamento inferior da tecnologia *free-cooling*.

Para temperaturas exteriores acima de 29 °C, Faro apresenta um número de horas inferior ao de Lisboa, mas em maior número que no Porto. Verifica-se que ocorre uma maior variação de temperatura na cidade de Faro comparativamente à do Porto.

Na figura 58 verifica-se que o número de horas em que ocorre diminuição do consumo devido à utilização do kit evaporativo, é superior em Faro do que em Lisboa, e por sua vez esta última é superior à do Porto. Verifica-se que para as temperaturas mais elevadas o proveito da utilização de *Chillers* com kit evaporativo é maior em Faro, devendo-se isto ao facto desta cidade apresentar valores de humidades relativas menores do que Lisboa. Segundo o processo de arrefecimento evaporativo, quanto menor for a humidade relativa, mais eficiente é o processo, por isso a influência do kit evaporativo nesta cidade deve ser mais notório do que na cidade de Lisboa.

Para todas as cidades verifica-se que acima dos 21 °C de temperatura exterior, a utilização do arrefecimento evaporativo num *Chiller* é benéfica permitindo a diminuição do consumo do sistema em média 15kW. Situação oposta verifica-se para as temperaturas exteriores inferiores a 6 °C, situação essa explicável devido ao não funcionamento do kit evaporativo nestas temperaturas, ou seja, há um ligeiro aumento de 4kW na potência consumida.

Na figura 59 encontram-se os resultados obtidos na análise da eficiência para a cidade de Faro.

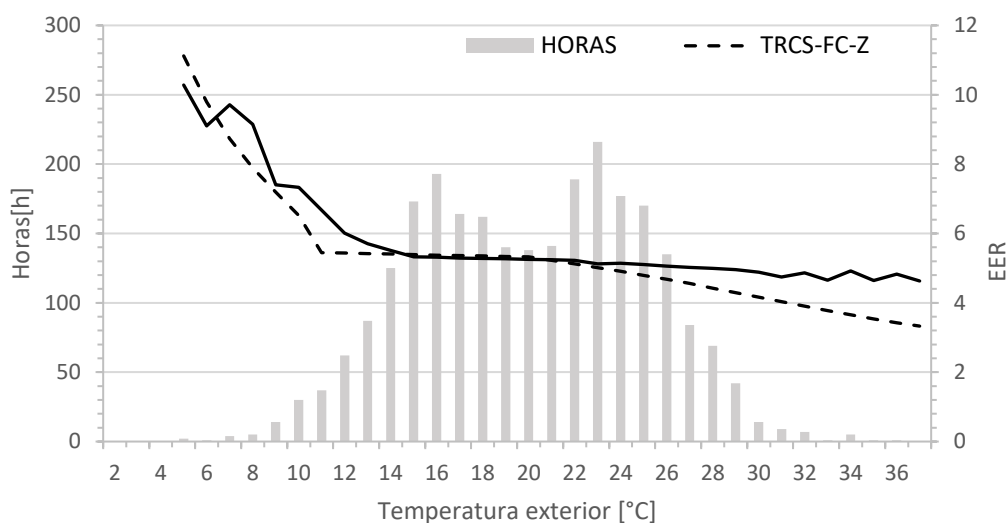


Figura 59 - Análise energética da instalação em Faro

Analisando a figura 59 verifica-se que o *Chiller* com o kit evaporativo se torna numa solução mais eficiente para esta cidade, chegando a ter diferenças de EER acima de 1 nas temperaturas mais elevadas. Esta diferença não acontece nas outras cidades, por isso é possível concluir-se que Faro é a melhor cidade, das três estudadas, para ser instalado um *Chiller* com kit evaporativo. Esta conclusão já era o esperado porque Faro é a cidade que apresenta humidades relativas mais baixas.

No intervalo de temperaturas 14 °C e 22 °C existe um ganho térmico do kit evaporativo inferior ao seu consumo, somando a este, o consumo superior dos ventiladores obtém-se um EER muito semelhante ao *Chiller* sem kit evaporativo.

4.2.2 Temperatura de funcionamento da água – 20/26 °C

Numa perspetiva de perceber qual a influência das temperaturas da água no funcionamento do *Chiller* com FC, incluindo ou não o kit evaporativo, foi realizado um dimensionamento para a mesma instalação, mas com temperaturas de funcionamento de 20/26 °C, dado que cada vez mais são utilizadas outras temperaturas, que não as típicas 7/12 °C.

Para fazer a seleção dos *Chillers* com as temperaturas de funcionamento de água 20/26 °C, foi necessário considerar um opcional que permite temperaturas de evaporação mais

elevadas devido a um trabalho inferior do compressor, ou seja, uma taxa de compressão igualmente inferior, traduzindo-se numa eficiência maior.

Para este dimensionamento foi considerado as condições de projeto, já usadas anteriormente, de 35 °C para a temperatura de bolbo seco e 33,3% de humidade relativa, da cidade de Lisboa (Tabela 2) e o perfil climático apresentado na tabela 7.

Tabela 6 - Perfil climático de Lisboa

Temp. [°C]	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
HR [%]	96	87	83	83	79	80	77	75	74	74	70	69	68	67	65	65
Horas	1	3	11	24	24	79	83	127	161	186	173	146	136	120	114	124

Temp. [°C]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
HR [%]	66	61	59	57	52	48	47	48	44	45	44	47	37	41	47	46
Horas	113	109	108	111	100	112	94	102	86	61	44	29	9	7	1	2

Os resultados de potência consumida para a cidade de Lisboa encontram-se representados na figura 60.

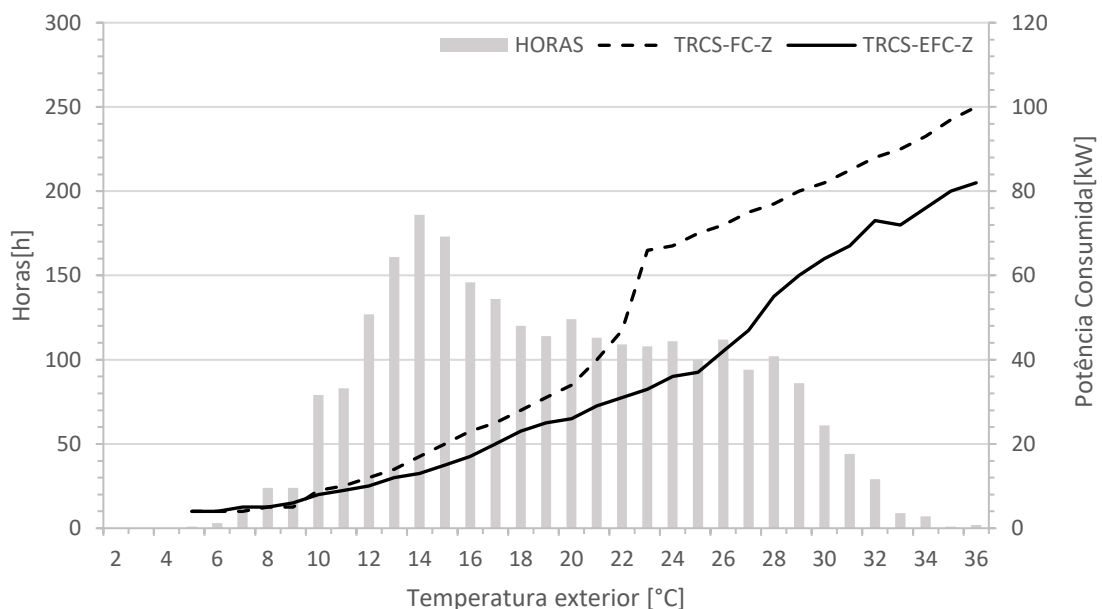


Figura 60 - Análise da potência consumida da instalação em Lisboa – 20/26°C

Numa primeira análise pode-se verificar que o comportamento do *Chiller* é totalmente diferente do dimensionamento feito para as temperaturas de funcionamento da água de 7/12°C. Verifica-se que os valores da potência consumida são muitos mais reduzidos para a seleção feita com os 20/26°C. Isto acontece porque as temperaturas de evaporação consideradas neste dimensionamento (20/26°C) tendem a aproximar-se das temperaturas de condensação, logo aumenta a eficiência do equipamento devido à redução do trabalho dos compressores.

Na figura 60 verifica-se que o efeito do *free-cooling* se prolonga por uma gama de temperaturas exteriores maior do que o dimensionamento feito anteriormente para a cidade de Lisboa, utilizando temperaturas 7/12 °C. Este facto é uma vantagem muito grande porque o *free-cooling* torna-se mais eficiente e permite a diminuição de horas do funcionamento a 100% do ciclo mecânico, uma vez que o FC dá apoio no arrefecimento da água. Com a presença do kit evaporativo este modo é prolongado até temperaturas mais elevadas, neste caso até aos 31 °C.

É de aferir que até aos 11 °C, os *Chillers* estão no modo só *free-cooling* e apresenta valores muito reduzidos de potência consumida porque a diferença de temperatura do exterior e da temperatura de evaporação ronda os 10 - 15 °C e faz com que os ventiladores funcionem a velocidades baixas porque é necessário pouco caudal.

Para temperaturas compreendidas entre 11 °C e 22 °C, o *Chiller* TRCS-FC está em modo híbrido, isto significa que tem o apoio do FC durante o arrefecimento. Com o aumento da temperatura exterior, o contributo do FC vai-se tornando cada vez mais reduzido o que resulta num aumento de potência consumida de forma exponencial.

No caso do TRCS-EFC, podemos verificar o efeito do arrefecimento evaporativo no atraso do funcionamento do modo híbrido, ou seja, este é prolongado até à temperatura de 31 °C. Como o arrefecimento mecânico e o *free-cooling* estão equilibrados durante mais temperaturas, esta unidade apresenta valores de energia consumida mais baixos. Ainda nesta unidade verificamos um pico na energia consumida nos 32 °C, acontecendo isto porque é quando o *Chiller* entra no modo só arrefecimento mecânico e existe um valor de humidade relativa mais acentuado, o que torna menos favorável o ganho do arrefecimento evaporativo comparativamente aos 31 °C, onde existe um maior ganho.

Os resultados obtidos na análise da eficiência para a cidade em Lisboa estão apresentados na figura 61.

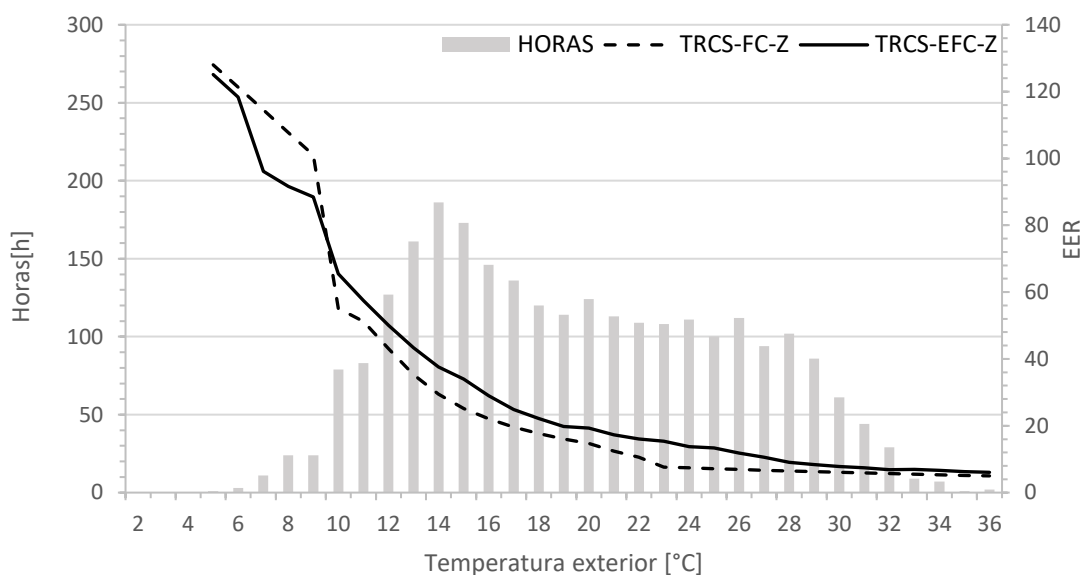


Figura 61 - Análise energética da instalação de Lisboa - 20/26°C

Na figura 61 podemos averiguar que o *Chiller* com o kit evaporativo apresenta valores de EER mais elevados a partir dos 10 °C, isto acontece devido ao arrefecimento evaporativo.

O ar é pré-arrefecido antes de entrar nas baterias condensadoras e como a diferença de temperatura entre as temperaturas da água e as do exterior é mais baixa, há uma menor necessidade de trabalho do compressor e dos ventiladores. Por outro lado, para temperaturas mais baixas o *Chiller* sem o kit evaporativo apresenta eficiências mais altas porque o *Chiller* com o kit evaporativo tem mais consumo por parte dos ventiladores devido à perda de carga imposta pelo próprio kit evaporativo.

Esta solução torna-se mais vantajosa porque como podemos observar no figura os valores do EER aumentam em relação à utilização das temperaturas 7/12°C, por exemplo no caso da temperatura de 14C, temperatura que apresenta mais horas de funcionamento, o EER do *Chiller* com o kit evaporativo aumenta de 5 para 38.

4.3 Utilização em diferentes zonas geográficas

De forma a estudar a influência da humidade relativa no kit evaporativo, foram seleccionadas duas cidades com valores de humidade relativa diferentes de Lisboa. Para ambas as cidades, foi considerado o mesmo equipamento e as mesmas temperaturas de projeto de Lisboa.

4.3.1 Instalação na Líbia

Para a cidade na Líbia, considerou-se o perfil climático presente na tabela 8.

Tabela 7 - Perfil climático na Líbia

Temp. [°C]	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
HR [%]	90	87	80	83	84	77	79	77	74	73	69	69	65	64	61	61	56
Horas	1	4	3	10	17	23	40	44	56	69	88	89	109	103	125	110	95
Temp. [°C]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
[%]	57	56	56	56	51	52	49	48	49	45	42	40	36	34	33	33	
Horas	82	77	85	94	107	107	108	102	89	108	86	106	98	88	66	45	

Analisando os valores da tabela 8 podemos concluir que esta cidade apresenta valores de humidade relativa mais alto para temperaturas mais baixas e o contrário para temperaturas mais altas, comparativamente à cidade de Lisboa. Também é possível verificar que esta cidade apresenta mais horas para temperaturas elevadas, ou seja, esta cidade tem um clima mais quente do que Lisboa.

Os resultados de potência consumida para a cidade da Líbia encontram-se representados na figura 62.

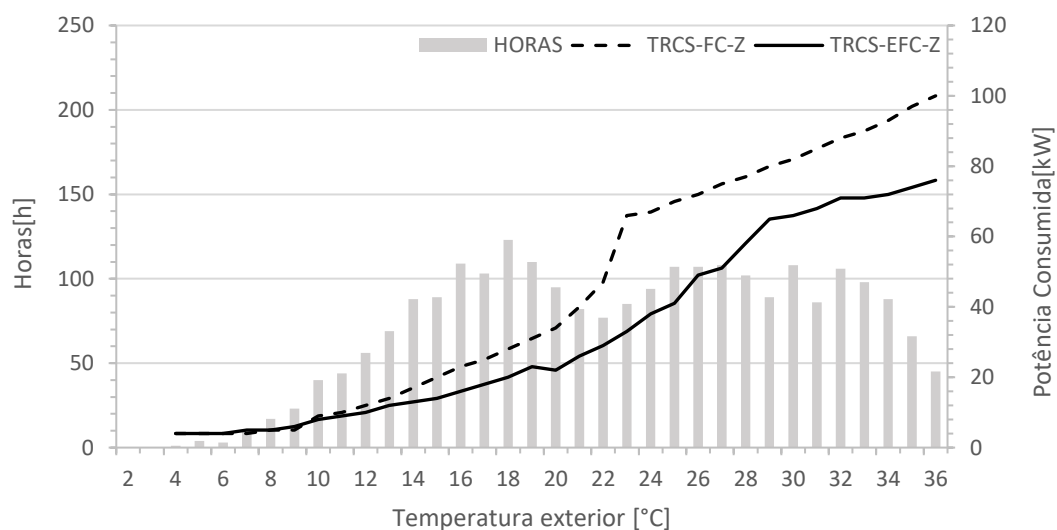


Figura 62 - Análise da potência consumida da instalação na Líbia

À semelhança do gráfico da cidade de Lisboa, na figura 62 nota-se um acréscimo de potência consumida com a diminuição do aproveitamento do FC no equipamento TRCS-FC, estando esta diretamente relacionada com o aumento das temperaturas exteriores.

Face a uma progressão linear, as variações de potência consumida em elevadas temperaturas, ou seja, acima de 27 °C, no equipamento TRCS-EFC devem-se essencialmente à variação da humidade relativa no exterior, alterando desta forma o potencial do arrefecimento evaporativo.

Ainda sobre o potencial do arrefecimento evaporativo, nesta cidade o benefício do *free-cooling* é prolongado por mais temperaturas exteriores (até aos 34°C), comparativamente a Lisboa (até aos 31°C), verificando-se assim, a influencia desta tecnologia, na eficiência do *free-cooling*.

Na tabela 9, pode-se verificar o consumo elétrico por hora para o intervalo de temperaturas 30°C a 36°C para as cidades de Lisboa e Líbia e a respetiva diferença.

Tabela 8 - Consumo elétrico por hora das cidades Lisboa e Líbia

Consumo elétrico por hora (kW/h)			
Temperatura(°C)	Lisboa	Líbia	Diferença (%)
30	63,8	66,4	4
31	66,9	67,8	1
32	72,7	70,6	-3
33	71,7	71,3	-1
34	75,6	71,8	-5
35	80,0	74,3	-7
36	82,5	76,3	-8

Analisando os valores de potência consumida elétrica por hora para as temperaturas mais elevadas do *Chiller* com kit evaporativo apresentados na tabela 9, podemos verificar que a Líbia apresenta um valor inferior ao de Lisboa, alcançando uma diferença de 8%. Isto acontece porque a Líbia tem mais benefício com o kit evaporativo, dado que para temperaturas mais elevadas tem humidade relativa mais baixa do que Lisboa.

Na figura 63 encontram-se os resultados obtidos na análise da eficiência para a cidade da Líbia.

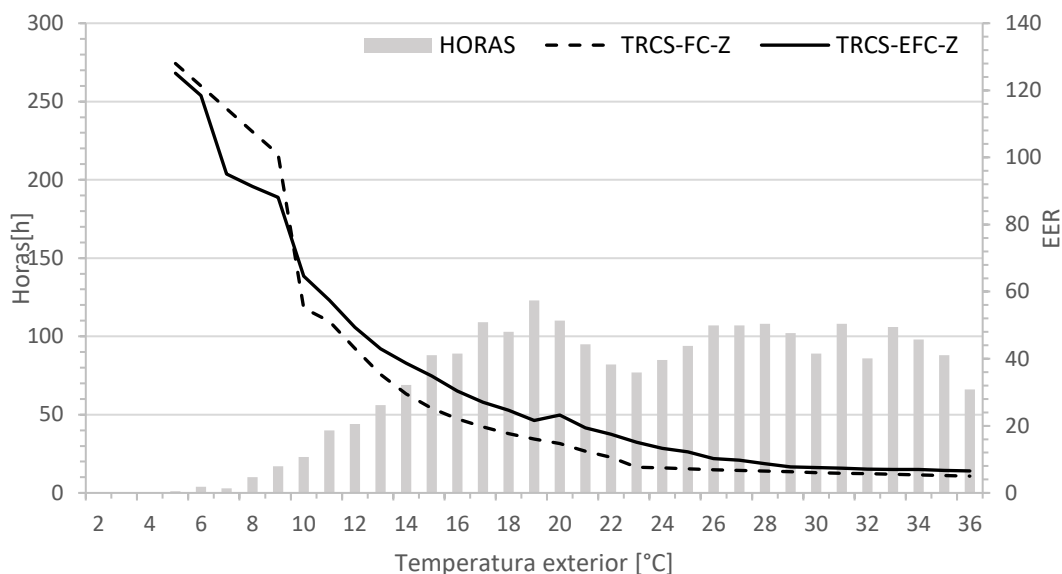


Figura 63 - Análise energética da instalação na Líbia

Tal como já tinha sido verificado nas cidades anteriormente estudadas, na figura 63 são apresentados valores de EER fora do comum para *Chillers*, isto acontece porque este valor é calculado através da divisão da potência gerada pela potência consumida. No gráfico da figura 62 já tinha sido verificado que, para temperaturas mais baixas, há um consumo de energia baixo e como a potência gerada é constante(500kW), é espectável os valores do EER serem elevados.

Na linha característica da eficiência energética do *Chiller* com kit evaporativo, nota-se que há um declive acentuado nos 6 °C, isto deve-se ao facto dos ventiladores serem acionados para o kit evaporativo, logo há um maior consumo de energia elétrica, o que prejudica a sua eficiência. Ainda neste gráfico verificamos um pico no EER nos 20 °C, e isto acontece porque é quando o *Chiller* está no modo híbrido e existe um valor de humidade relativa mais acentuado, o que torna menos favorável o ganho do arrefecimento evaporativo, visto que o arrefecimento evaporativo tem mais ganho quanto menor for o valor da humidade relativa

Comparativamente com a cidade de Lisboa, a instalação do *Chiller* com kit evaporativo na Líbia torna-se mais eficiente, apresentando valores de EER mais elevados, tal acontece devido ao benefício do evaporativo que esta cidade tem, uma vez que apresenta valores de humidade relativa mais baixos, logo o kit evaporativo tem um rendimento mais elevado. Ou seja, o equipamento está em modo híbrido por mais tempo, logo os compressores consomem menos energia elétrica.

4.2.3 Instalação numa cidade na China

De forma a estudar a influência da humidade relativa no kit evaporativo numa cidade com humidade mais elevada com temperaturas mais quentes e humidade mais baixa para temperaturas mais baixas, foi dimensionada uma instalação equivalente à de Lisboa, numa cidade na China. Para esta cidade na China, considerou-se o perfil climático presente na tabela 10.

Tabela 9 - Perfil climático na China

Temp. [°C]	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
HR [%]	80	74	79	79	75	73	69	68	69	66	66	63	65	62	68	66	64
Horas	1	1	3	13	17	35	57	75	58	68	72	68	74	79	92	89	103
Temp. [°C]	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
HR [%]	64	64	66	66	67	69	71	71	71	69	67	62	62	60	56	55	
Horas	106	109	140	157	173	162	152	136	137	128	120	77	54	35	8	1	

É de notar que o perfil climático da cidade localizada na China apresenta mais horas para temperaturas acima dos 21 °C e os valores de HR apresentam um decréscimo linear, sem picos. Os resultados de potência consumida durante um ano para a cidade localizada na China encontram-se representados na figura 64.

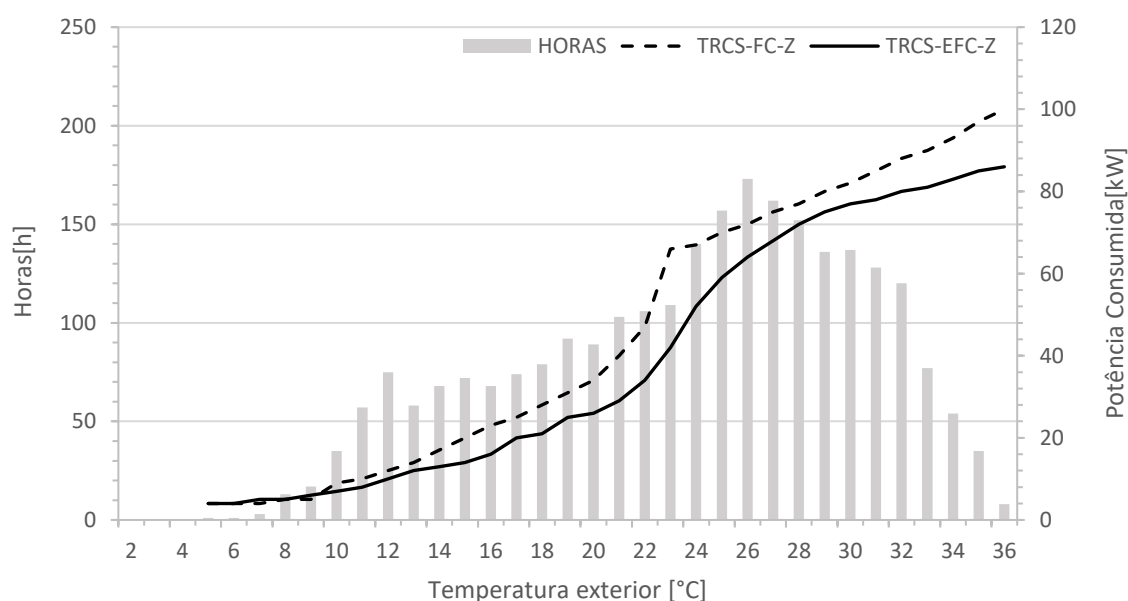


Figura 64 - Análise da potência consumida da instalação na China

A linha representativa da potência consumida do TRCS-FC, *Chiller* sem arrefecimento evaporativo, nesta cidade é equivalente à cidade de Lisboa, porque esta unidade depende principalmente da temperatura exterior e como o perfil de temperaturas é igual, já era expectável que não houvesse grandes diferenças. Já para o outro equipamento, nota-se que a linha é mais linear, sem picos, isto acontece porque esta cidade apresenta valores de HR pouco variáveis entre temperaturas.

Na figura 64, também se pode verificar que as linhas das potências consumidas estão muito próximas, tal acontece porque esta cidade apresenta valores de humidade relativa mais elevados para temperaturas mais elevadas, logo o equipamento TRCS-EFC tem menos benefício como evaporativo do que Lisboa, confirmando assim o fundamentado teoricamente.

Na tabela 11, pode-se verificar o consumo elétrico por hora para o intervalo de temperaturas 30°C a 36°C para as cidades de Lisboa e China e a respetiva diferença.

Tabela 10 - Consumo elétrico por hora das cidades Lisboa e China

Consumo elétrico por hora (kW/h)			
Temperatura(°C)	Lisboa	China	Diferença (%)
30	63,8	76,6	21
31	66,9	78,1	17
32	72,7	79,7	10
33	71,7	81,1	13
34	75,6	83,1	10
35	80,0	85,1	6
36	82,5	86,3	4

Analisando os valores de potência consumida elétrica por hora para as temperaturas mais elevadas do *Chiller* com kit evaporativo apresentados na tabela 11, podemos verificar que a China apresenta um valor superior ao de Lisboa, alcançando uma diferença de 21%. Isto acontece porque a China tem menos benefício com o kit evaporativo, dado que para temperaturas mais elevadas tem humidade relativa mais alta do que Lisboa.

Na figura 65 encontram-se os resultados obtidos na análise da eficiência para a cidade localizada na China.

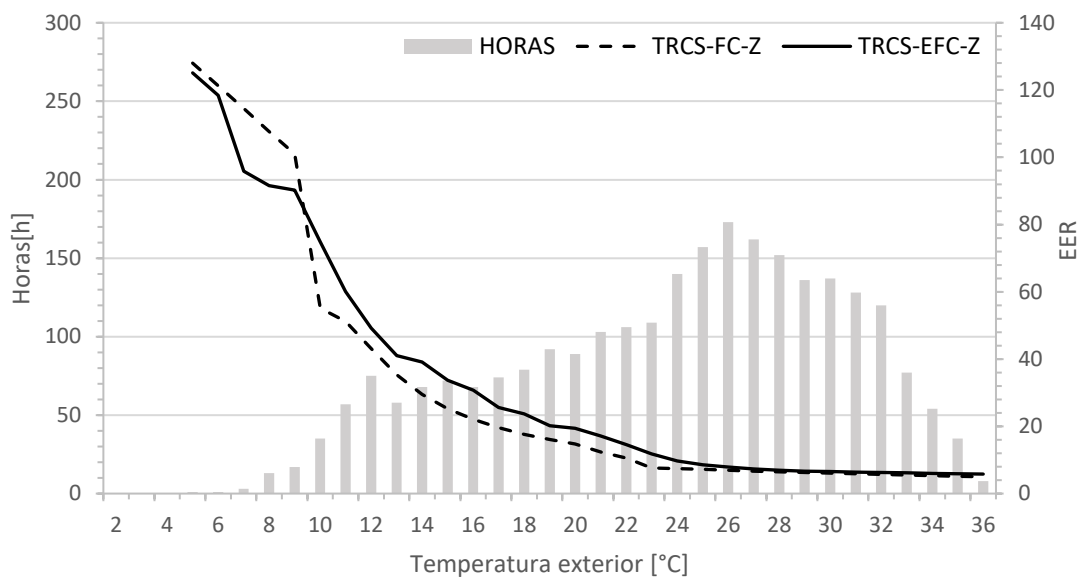


Figura 65 - Análise energética da instalação na China

Analisando a figura 65, podemos verificar logo de partida que é praticamente igual ao gráfico da cidade de Lisboa, tal como já tinha sido constatado no gráfico das potências consumidas e a explicação de isto acontecer é a mesma já enunciada referente na figura 64. No entanto o *Chiller* com o kit evaporativo, dispõem de valores de EER mais baixos, comparativamente a Lisboa, visto que esta cidade apresenta valores de HR mais elevados. Na figura 65, verifica-se que as linhas dos equipamentos estão muito próximas, o que significa que para esta cidade, mais concretamente para este clima, o kit evaporativo não é muito benéfico.

5. Conclusão

Após o enquadramento dos vários tipos de *free-cooling* e kits evaporativos disponíveis para instalação em *Chillers*, foi feita a análise da influência destas tecnologias no funcionamento de um *Chiller* que inclui *free-cooling* do tipo hidrônico juntamente com o kit evaporativo integrado.

A análise da influência do *free-cooling* evaporativo num modelo específico de *Chiller*, foi realizada através de várias seleções do equipamento, incluindo ou não o kit evaporativo, para um *data center* com uma carga térmica de 500 kW. Neste estudo foi verificada a influência de 5 climas distintos no software de seleção ELCA e analisou-se as características de funcionamento para essas condições. Adicionalmente, as temperaturas de funcionamento da água no *Chiller* também foram verificadas para a cidade de Lisboa.

A utilização do *Chiller* com arrefecimento evaporativo pode proporcionar uma diminuição em cerca de 30 kW no consumo da instalação, o que podem ser muito significativos quando ocorrem muitas horas nessas condições meteorológicas. As temperaturas máximas em Faro e Lisboa são de 37 e 36 °C, respetivamente, sendo superiores aos 32 °C do Porto. No entanto, as humidades relativas coincidentes com as temperaturas exteriores máximas são de 20% em Faro, 46% em Lisboa e Porto. Estas condições exteriores permitiram verificar a sua influência relativamente ao modo de funcionamento do *Chiller* com ou sem arrefecimento evaporativo.

Para todas as cidades verifica-se que acima dos 21 °C de temperatura exterior, a utilização do arrefecimento evaporativo num *Chiller* é benéfica permitindo a diminuição do consumo do sistema. Verifica-se que quanto maior for a temperatura exterior maior é a redução no consumo da instalação quando se utiliza o kit evaporativo no *Chiller*, situação que ocorreu melhor na cidade de Lisboa comparativamente à do Porto.

A eficiência para a instalação de Faro foi potenciada relativamente à de Lisboa, apesar da temperatura de projeto ser igual, devido principalmente ao maior efeito evaporativo que ocorre em locais mais secos como os encontrados em Faro.

A análise dos vários dimensionamentos para Portugal permitiu concluir que o kit evaporativo é mais benéfico, cerca de 13% para o sul do país no intervalo de temperaturas mais elevadas, considerando as temperaturas de funcionamento da água de 7/12°C. No entanto para as temperaturas mais baixas, torna-se mais benéfico no norte do país porque

há um maior número de horas no modo de funcionamento de arrefecimento total *free-cooling*, sendo este um dos benefícios do kit evaporativo.

O dimensionamento para as temperaturas de funcionamento da água do *Chiller* de 20/26°C, na cidade de Lisboa, demonstrou que esta solução apresenta mais vantagens porque prolonga o modo só FC e o modo híbrido, tornando assim a instalação mais eficiente, isto quando comparado com o dimensionamento com temperaturas 7/12°C.

Ao fazer o estudo para as duas cidades fora de Portugal, permitiu concluir que quanto mais seco (HR baixa), for o clima mais proveito se tira do kit evaporativo e mais eficiente se torna a instalação. No caso das cidades estudadas, a Líbia (cidade com HR mais baixa) apresenta uma HR inferior à cidade de Lisboa de, em média, 4%, e tem uma melhoria no consumo eléctrico por hora de, em média, 10%.

Dado que cada vez mais são registadas temperaturas ambiente mais elevadas, este tipo de tecnologia, apresenta condições e resultados para ser um bom investimento para futuras instalações e permite tirar o melhor partido das condições de humidade relativa.

Em termos económicos existe a necessidade de verificar a frequência dos períodos em que existe o ganho energético, de forma a estimar o tempo de retorno do investimento. A utilização de um *Chiller* com arrefecimento evaporativo demonstra ser uma solução bastante interessante nos locais em que têm temperaturas exteriores consideravelmente elevadas e humidade relativa baixa. A principal desvantagem desta solução é o elevado consumo de água, no entanto a sua instalação e manutenção são de carácter simples e tendo um investimento reduzido, proporciona um retorno financeiro viável.

De forma a completar este estudo, pensei em elaborar uma análise económica com a aplicação das tecnologias estudadas neste trabalho, mas por falta de disponibilidade não foi possível. No entanto, sugiro que em trabalhos futuros seja feita essa análise económica para ter a percepção se o retorno económico faz compensar o investimento inicial.

Referências

- [1] V. M. G. Lopes, “Sistemas de AVAC-Estratégias de operação para redução de custos energéticos,” Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia do Porto, 2017.
- [2] HowMechanismWorks, “What is All Air System? Advantages / Disadvantages / Applications.” <https://www.howmechanismworks.com/2018/08/what-is-all-air-system-advantages.html> (accessed Oct. 25, 2021).
- [3] L. F. B. Marques, “Avaliação Técnico-Económica de Sistemas de AVAC,” Dissertação de Mestrado - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2011.
- [4] S. M. Gheji, K. S. Kamble, A. A. Gavde, and S. P. Mane, “Basic Classification of HVAC Systems for Selection Guide,” *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol. (An ISO)*, vol. 3297, 2007.
- [5] S. Seyam, “Types of HVAC Systems,” in *HVAC System*, M. S. Kandelousi, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2018.
- [6] “Comparing Two-Pipe and Four-Pipe HVAC Systems with Water-Source Heat Pumps.” <https://www.ny-engineers.com/blog/comparing-two-and-four-pipe-hvac-with-water-source-heat-pumps> (accessed Feb. 12, 2022).
- [7] Renesas, “HVAC Systems.” <https://www.renesas.com/eu/en/application/industrial/building-home-automation/hvac-systems> (accessed Dec. 01, 2021).
- [8] “Fan Coil Units - ProBalance from Crane Fluid Systems.” <https://www.cranefs.com/page/systems/fan-coil-units> (accessed Nov. 20, 2021).
- [9] J. Marques, “Manutenção de Uma Instalação de AVAC das Áreas Limpas de Uma Indústria Farmacêutica,” Dissertação de Mestrado- Faculdade de Engenharia do Porto, 2005.
- [10] Carrier, “Induction Beams Engineered Comfort for Today’s Buildings,” 2013.
- [11] Casaca/Cláudia and Cardoso/João, “Sistemas de Climatização,” 2020.
- [12] A. Lee, “Direct Expansion Air Conditioning Systems.” BCcampus, Apr. 06, 2021.
- [13] Daikin, “O ciclo do frigorigéneo: o que é?” https://www.daikin.pt/pt_pt/faq/the-refrigerant-cycle--what-is-it-.html (accessed Nov. 03, 2021).

- [14] “Tipos Ar Condicionado.” <https://www.keroclima.pt/Ajuda/TiposArCondicionado>. (accessed Feb. 07, 2022).
- [15] D. B.- Climaveneta, “Cooled, A I R Units, Rooftop,” pp. 0–19.
- [16] Carrier, “Unidades monobloco (‘rooftop’) | Aquecimento, ventilação e ar condicionado.” <https://www.carrier.com/commercial/pt/pt/produtos/tratamento-de-ar/unidades-monobloco-autonomas-rooftop/> (accessed Nov. 11, 2022).
- [17] Trane, “Unidades rooftop | Trane Portugal.” [Online]. Available: <https://www.trane.com/commercial/europe/portugal/pt/products-systems/equipment/rooftops.html>.
- [18] Data Book - Mitsubishi Electric, “Rc for it cooling rc approach for perfect data center cooling the future of data centers.”
- [19] Systemair, “Close Control units - DX (Refrigerant) systems - Systemair.” <https://shop.systemair.com/en/close--control--units/c44824>. (accessed Nov. 23, 2022).
- [20] Carrier, “Variable Refrigerant Flow (VRF) Systems Flexible Solutions for Comfort,” 2013.
- [21] Trane, “VRV/VRF SYSTEM ACMV INSTALLATION.” [https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/learning-center/ashrae-articles/Variable-Primary-Flow Systems.pdf](https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/learning-center/ashrae-articles/Variable-Primary-Flow%20Systems.pdf). (accessed Jan. 20, 2022).
- [22] “Refrigeração por absorção Portal da Refrigeração.” https://refrigeracao.net/topicos/refrigeracao_absorcao (accessed Jun. 14, 2022).
- [23] HVAC Investigators, “The Basics of Chillers.” <https://www.hvacinvestigators.com/webinars/the-basics-of-chillers-how-they-work-where-theyre-used-and-common-problems/> (accessed Nov. 16, 2022).
- [24] Daikin, “Unidades de Tratamento de Ar,” pp. 1–66, 2014.
- [25] C. Ritter, H. Kobi, and P. Morf, “Utilization of Soft-Starter VFD in Compressor Applications Prague, Czech Republic Drive Train.”
- [26] Y. Li and Y. Li, “Variable Frequency Drive Applications in HVAC Systems,” *New Appl. Electr. Drives*, Dec. 2015, doi: 10.5772/61782.

- [27] A. I. R. C. Chillers and F. O. R. O. Installation, “G01 g05,” pp. 1–24, 1838.
- [28] “Como funciona um arrancador suave?” <https://zeben.pt/pt/como-funciona-um-arrancador-suave> (accessed Feb. 03, 2022).
- [29] VERTIV, “Freecooling, Evaporative and Adiabatic Cooling Technologies in Data Center,” 2016.
- [30] Daikin, “Air-cooled chillers,” 2008.
- [31] Trane, “Air-cooled Chiller Applications Meet New Energy Codes and Requirements,” 2021.
- [32] Carrier, “Product Data AquaForce® Variable Speed Chillers 30XV140-500,” 2021.
- [33] Daikin, “Daikin free cooling options - Daikin Applied Europe.” <https://www.daikinapplied.eu/news-center/about-free-cooling-options-and-where-partial-free-cooling-has-its-place/> (accessed Jan. 20, 2022).
- [34] M. B.-P. Chillers, “Air source chiller with free-cooling function,” 2020.
- [35] D. M. E. E. Book, “TECS-FC 0211 - 1204 EXTREMELY SILENT OPERATION.” .
- [36] “Waterside Economizer for Air-Cooled Chillers | Chiller & Cooling Best Practices.” <https://coolingbestpractices.com/technology/dry-coolers/waterside-economizer-air-cooled-chillers> (accessed Apr. 15, 2022).
- [37] Daikin, “EWAT-B Chiller.”
- [38] D. Ara, “Estudo comparativo entre o sistema convencional de arrefecimento e o arrefecedor evaporativo para os edifícios industriais portugueses,” Dissertação de Mestrado - Instituto de Engenharia do Porto, 2014.
- [39] Munters, “Munters evaporative cooling pad. The industry’s first choice for evaporative coolers.” <https://www.munters.com/pt/about-us/history-of-munters/history-news2/munters-evaporative-cooling-pad.-the-industrys-first-choice-for-evaporative-coolers/> (accessed Apr. 15, 2022).
- [40] G. de A. B. Carossi and O. S. H. Mendoza, “Resfriamento Evaporativo : Estudo Do Potencial De Sua Aplicação No Brasil,” p. 59, 2006.
- [41] 2007 ASHRAE, “Evaporative Cooling. HVAC Applications,” 2007.

- [42] Seeley International, “Indirect Evaporative Air Conditioning.”
<https://www.seeleyinternational.com/eu/commercial/products/cooling/indirect-evaporative-air-conditioning-commercial-emea/> (accessed Jan. 20, 2022).
- [43] 2008 ASHRAE, “Evaporative Air-Cooling Equipment. HVAC Systems and Equipment,” p. Chapter 40.
- [44] S. C. M. Hui and W. . Cheung, “Two-stage evaporative cooling systems in hot and humid climate,” *Proc. Tianjin-Hong Kong Jt. Symp.*, no. May, pp. 64–76, 2009.
- [45] Trane, “Adiabatic Cooling Trane Building Advantage,” 2021.
- [46] Trane, “Adiabatic Cooling | Trane Europe.”
<https://www.trane.com/commercial/europe/ua/en/services/services/trane-building-advantage/optimize/adiabatic-cooling.html>. (accessed Apr. 12, 2022).
- [47] M. Electric, “Close Control Air Conditioners for Control For Hugh Density Racks And Blade Servers Chillers,” p. 281;295.
- [48] Daikin, “New F-gas Regulation No HFC ban but a phase down , why ?,” 2012.
- [49] M. Electric, “Software ELCA.” 2020.
- [50] A. C. Silva, “Estudo da viabilidade da utilização do Arrefecimento Evaporativo em Chillers,” 2022.

ANEXOS

ENERGY ANALYSIS

Software version: ELCA World

User: Catarina Silva

Database version: 1.7.2.0

Print data: 19/12/2021 17:18

Energy Analysis

New plant room

UNIT GROUPS**TRCS-FC-Z**

Name	Fluid	Glycol	Fouling	Quantity	Redundant	Staging order	Price [€]
TRCS-FC-Z /K /0552	ETHYLENE GLYCOL	30	0.000000	1	0	0	15,000
				1			15,000.00

TRCS-EFC-Z

Name	Fluid	Glycol	Fouling	Quantity	Redundant	Staging order	Price [€]
TRCS-EFC-Z /K /0552	ETHYLENE GLYCOL	30	0.000000	1	0	0	20,000
				1			20,000.00

ANALYSIS CONDITIONS

Max cooling load demand	Years Analysis	Inflation rate	Interest rate	Energy bill
500.0 kW	10	3 %	6 %	0.1662 €/kWh
Continent - State - City				Maximum temperature
Europe - Portugal - Lisboa				36.0 °C

The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

ENERGY ANALYSIS

Software version: ELCA World

User: Catarina Silva

Database version: 1.7.2.0

Print data: 19/12/2021 17:18

Energy Analysis

New plant room

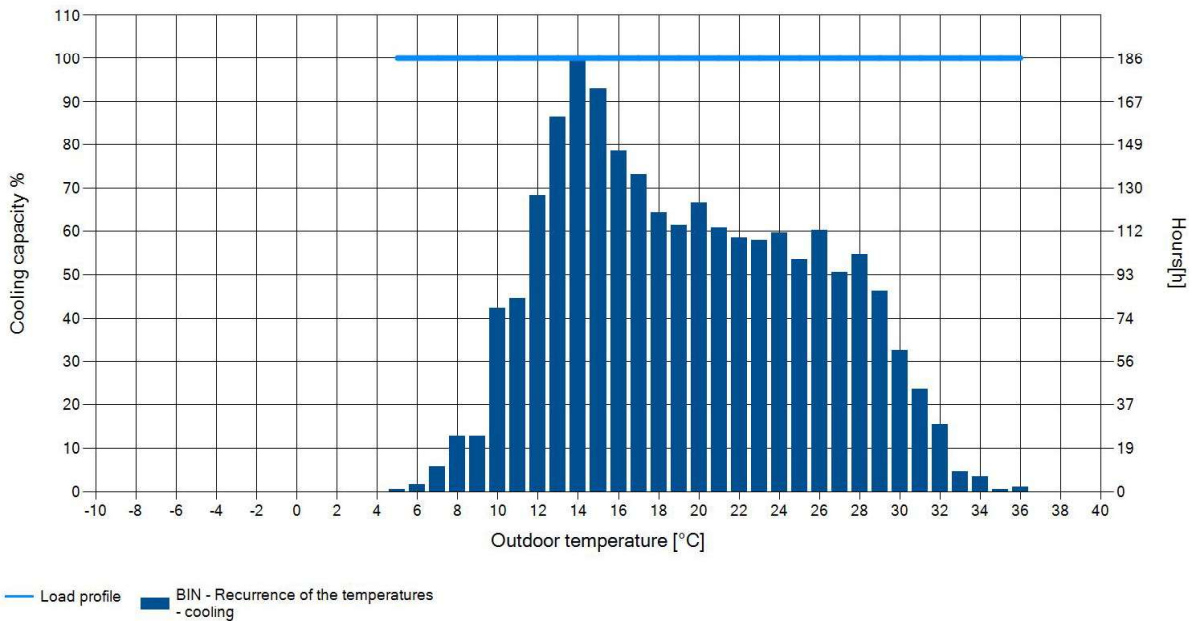
BIN

Temperature [°C]	Relative humidity	Cooling Load Demand [kW]	BIN of temperatures
5.0	96	500.0	1
6.0	87	500.0	3
7.0	83	500.0	11
8.0	83	500.0	24
9.0	79	500.0	24
10.0	80	500.0	79
11.0	77	500.0	83
12.0	75	500.0	127
13.0	74	500.0	161
14.0	74	500.0	186
15.0	70	500.0	173
16.0	69	500.0	146
17.0	68	500.0	136
18.0	67	500.0	120
19.0	65	500.0	114
20.0	65	500.0	124

Temperature [°C]	Relative humidity	Cooling Load Demand [kW]	BIN of temperatures
21.0	96	500.0	113
22.0	87	500.0	109
23.0	83	500.0	108
24.0	83	500.0	111
25.0	79	500.0	100
26.0	80	500.0	112
27.0	77	500.0	94
28.0	75	500.0	102
29.0	74	500.0	86
30.0	74	500.0	61
31.0	70	500.0	44
32.0	69	500.0	29
33.0	68	500.0	9
34.0	67	500.0	7
35.0	65	500.0	1
36.0	65	500.0	2

BIN AND LOAD DISTRIBUTION

Cooling load profile



The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

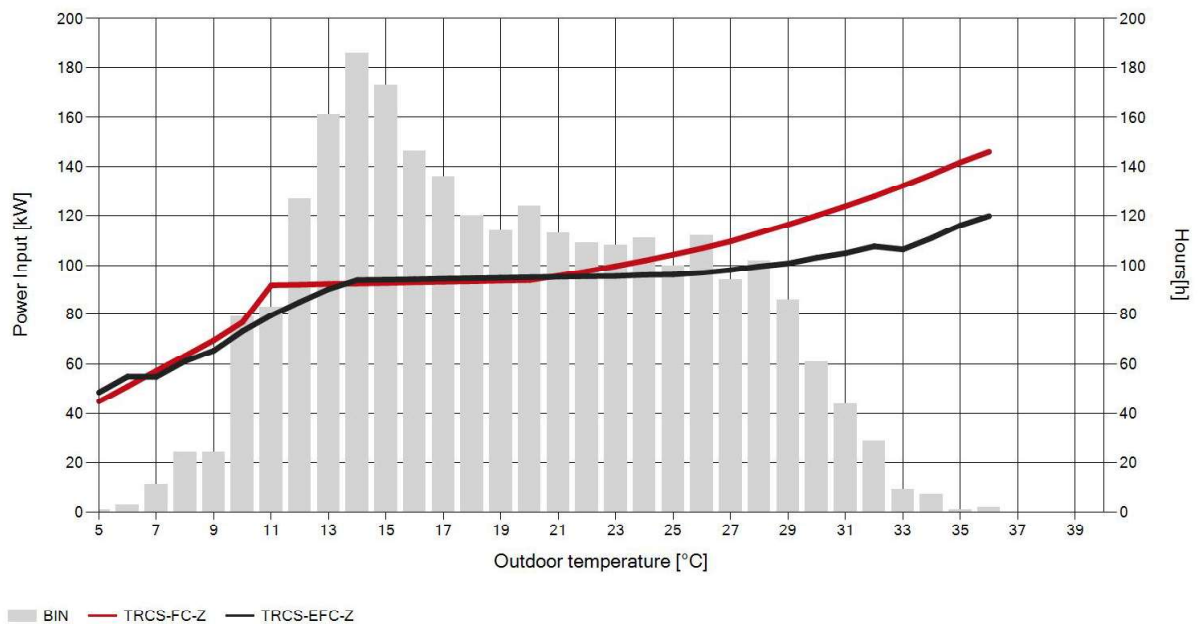


SUMMARY OF ENERGY, ENVIRONMENTAL AND FINANCIAL DATA

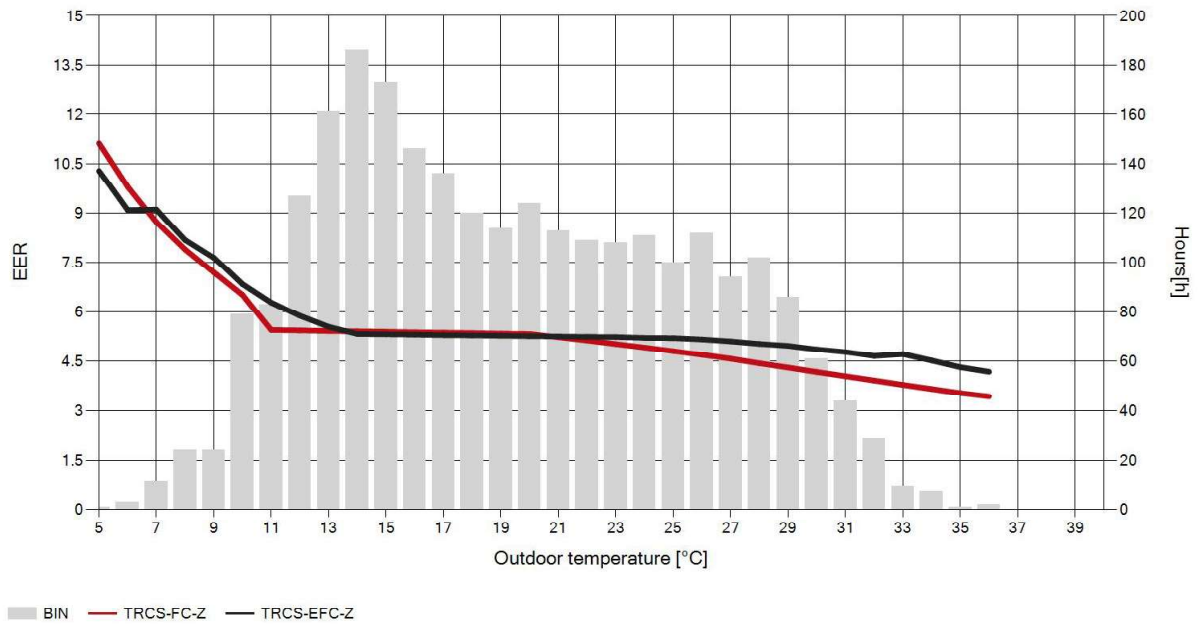
Group 1	Group 2	Energy consumption [%] [%]	CO2 balance (Group 1 vs Group 2) [ton CO2]	Payback time	NPV (Net Present Value) after 10 year
TRCS-EFC-Z	VS TRCS-FC-Z	-4.49	-6.28	2 years and 10 months.	11,264.41

ENERGY COMPARISON

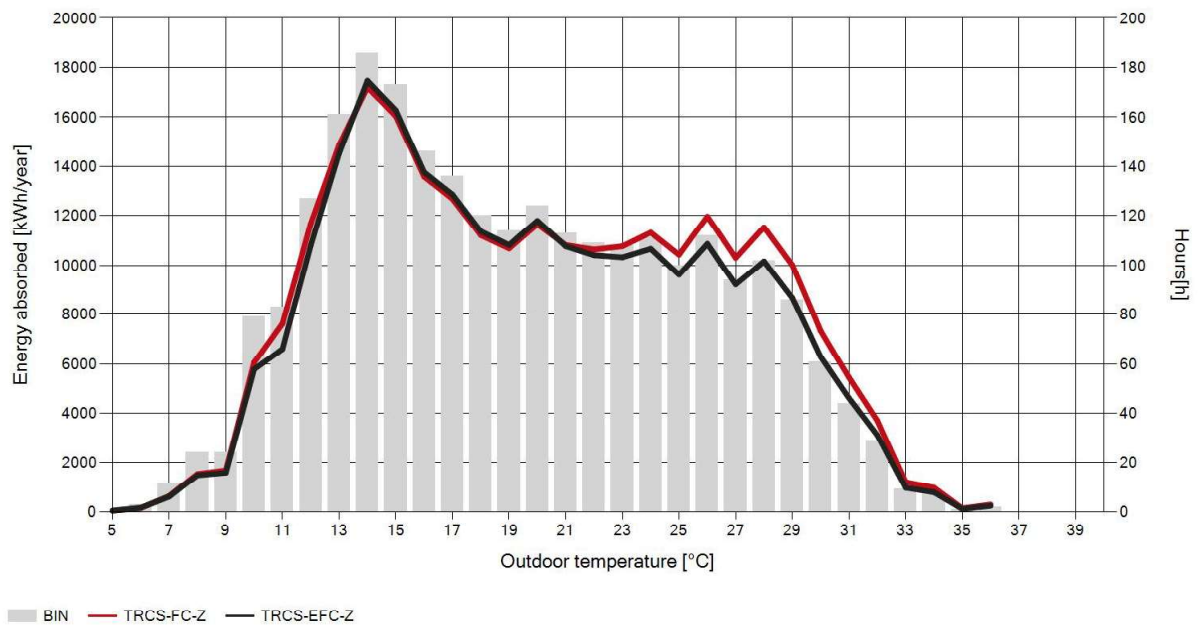
Istantaneous consumption



EER



Annual energy consumption



The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

ENERGY ANALYSIS

Software version: ELCA World

User: Catarina Silva

Database version: 1.7.2.0

Print data: 31/12/2021 17:27

Energy Analysis

New plant room

UNIT GROUPS**NEW UNITS GROUP 0**

Name	Fluid	Glycol	Fouling	Quantity	Redundant	Staging order	Price [€]
TRCS-FC-Z /K /0552	ETHYLENE GLYCOL	30	0.000000	1	0	0	10,000
				1			10,000.00

NEW UNITS GROUP 1

Name	Fluid	Glycol	Fouling	Quantity	Redundant	Staging order	Price [€]
TRCS-EFC-Z /K /0552	ETHYLENE GLYCOL	30	0.000000	1	0	0	15,000
				1			15,000.00

ANALYSIS CONDITIONS

Max cooling load demand	Years Analysis	Inflation rate	Interest rate	Energy bill
500.0 kW	10	3 %	6 %	0.1662 €/kWh
Continent - State - City				Maximum temperature
Europe - Portugal - Porto				32.0 °C

The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

ENERGY ANALYSIS

Software version: ELCA World

User: Catarina Silva

Database version: 1.7.2.0

Print data: 31/12/2021 17:27

Energy Analysis

New plant room

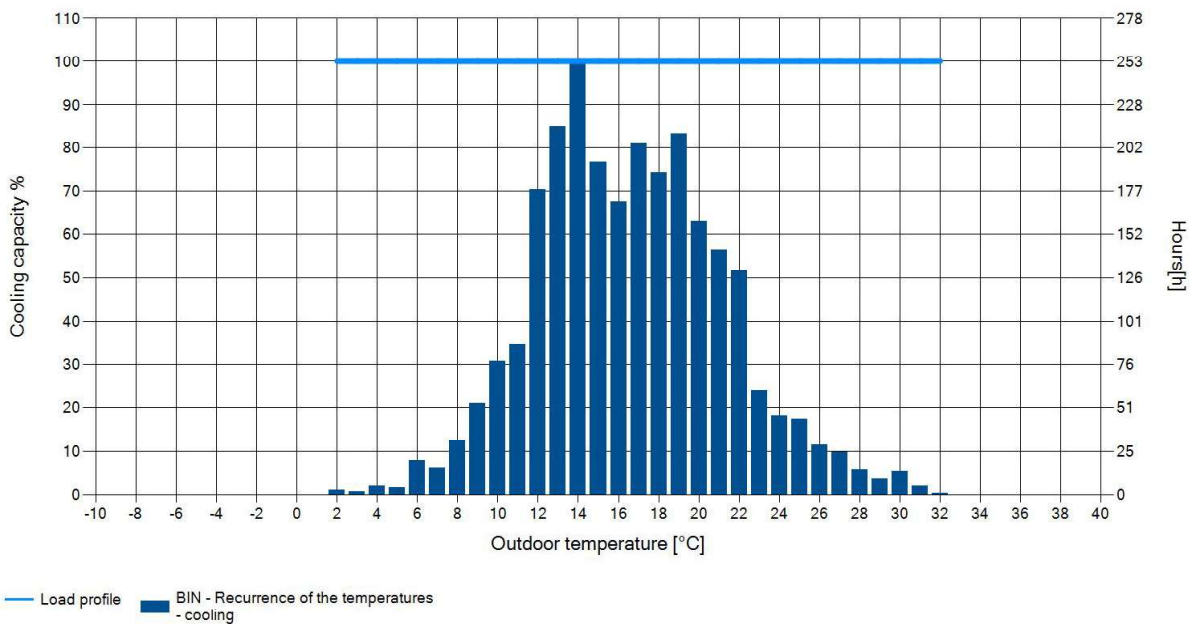
BIN

Temperature [°C]	Relative humidity	Cooling Load Demand [kW]	BIN of temperatures
2.0	90	500.0	3
3.0	80	500.0	2
4.0	82	500.0	5
5.0	85	500.0	4
6.0	85	500.0	20
7.0	79	500.0	16
8.0	78	500.0	32
9.0	79	500.0	53
10.0	73	500.0	78
11.0	72	500.0	88
12.0	73	500.0	178
13.0	73	500.0	215
14.0	71	500.0	253
15.0	73	500.0	194
16.0	67	500.0	171
17.0	71	500.0	205

Temperature [°C]	Relative humidity	Cooling Load Demand [kW]	BIN of temperatures
18.0	90	500.0	188
19.0	80	500.0	211
20.0	82	500.0	160
21.0	85	500.0	143
22.0	85	500.0	131
23.0	79	500.0	61
24.0	78	500.0	46
25.0	79	500.0	44
26.0	73	500.0	29
27.0	72	500.0	25
28.0	73	500.0	15
29.0	73	500.0	10
30.0	71	500.0	14
31.0	73	500.0	5
32.0	67	500.0	1

BIN AND LOAD DISTRIBUTION

Cooling load profile



The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

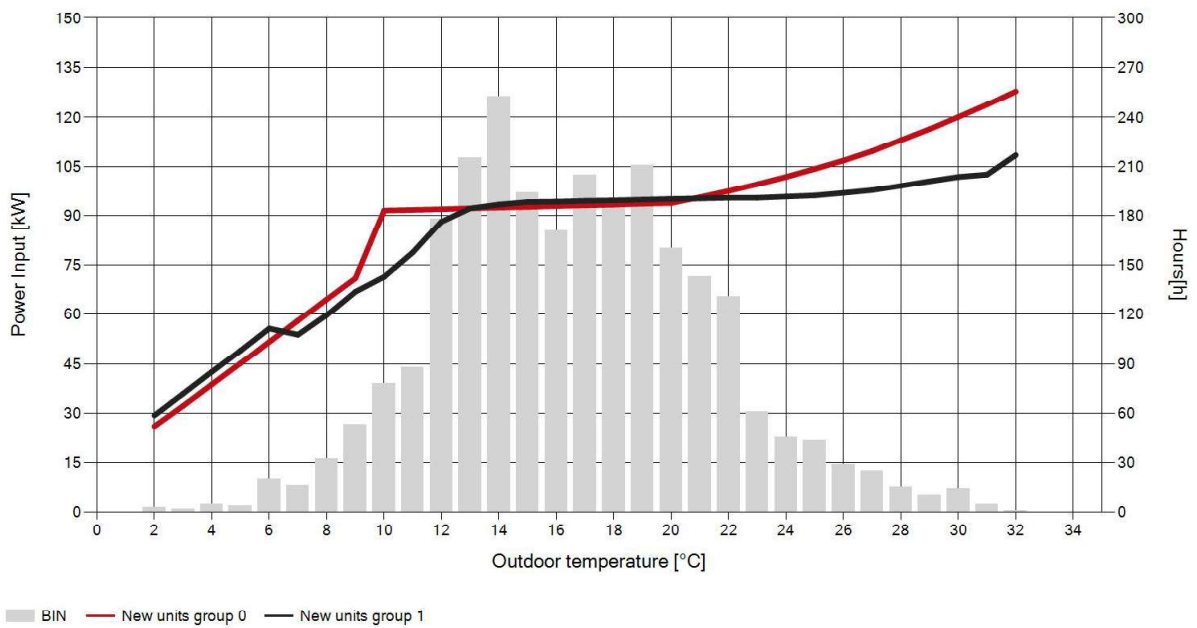


SUMMARY OF ENERGY, ENVIRONMENTAL AND FINANCIAL DATA

Group 1	Group 2	Energy consumption [%] [%]	CO2 balance (Group 1 vs Group 2) [ton CO2]	Payback time	NPV (Net Present Value) after 10 year
New units group 1	VS New units group 0	-1.86	-2.47	7 years and 7 months.	1,403.56

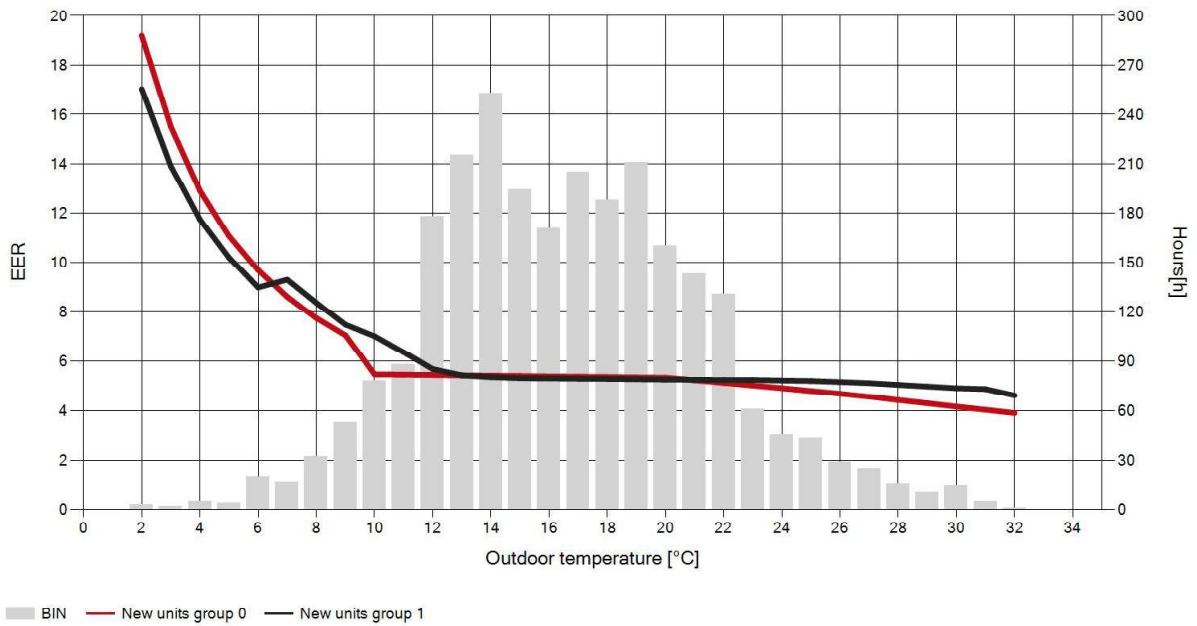
ENERGY COMPARISON

Istantaneous consumption

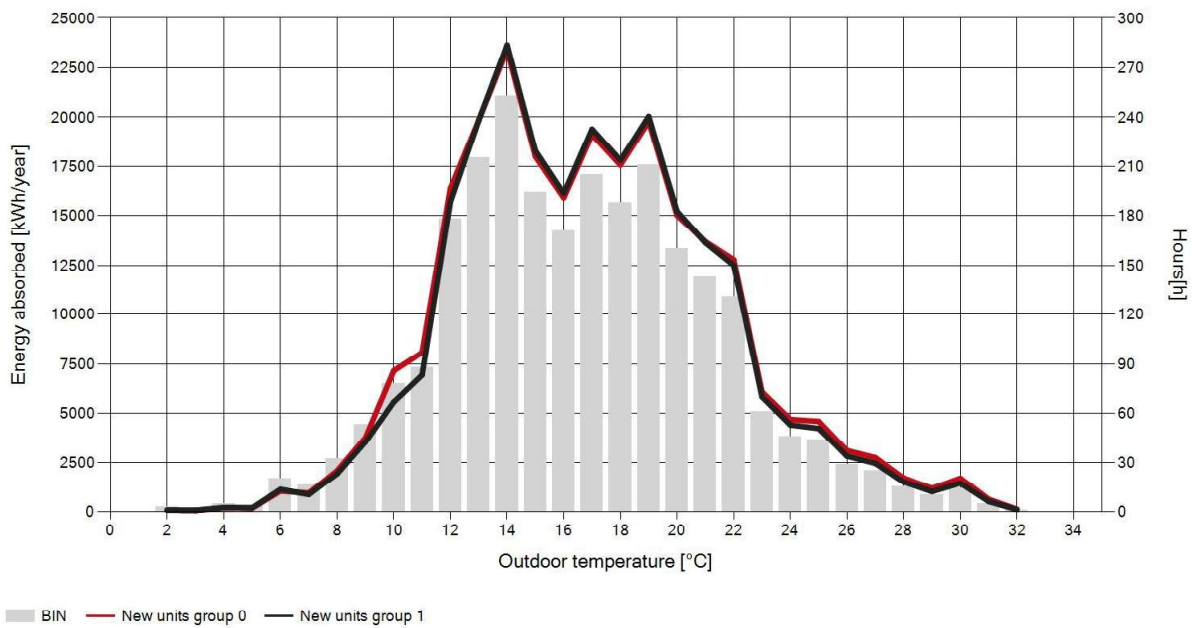


The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

EER



Annual energy consumption



The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

ENERGY ANALYSIS

Software version: ELCA World

User: Catarina Silva

Database version: 1.7.2.0

Print data: 29/12/2021 23:14

Energy Analysis

New plant room

UNIT GROUPS**TRCS-FC-Z**

Name	Fluid	Glycol	Fouling	Quantity	Redundant	Staging order	Price [€]
TRCS-FC-Z /K /0552	ETHYLENE GLYCOL	30	0.000000	1	0	0	15,000
				1			15,000.00

TRCS-EFC-Z

Name	Fluid	Glycol	Fouling	Quantity	Redundant	Staging order	Price [€]
TRCS-EFC-Z /K /0552	ETHYLENE GLYCOL	30	0.000000	1	0	0	20,000
				1			20,000.00

ANALYSIS CONDITIONS

Max cooling load demand	Years Analysis	Inflation rate	Interest rate	Energy bill
500.0 kW	10	3 %	6 %	0.1662 €/kWh
Continent - State - City				Maximum temperature
Europe - Portugal - Faro				37.0 °C

The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

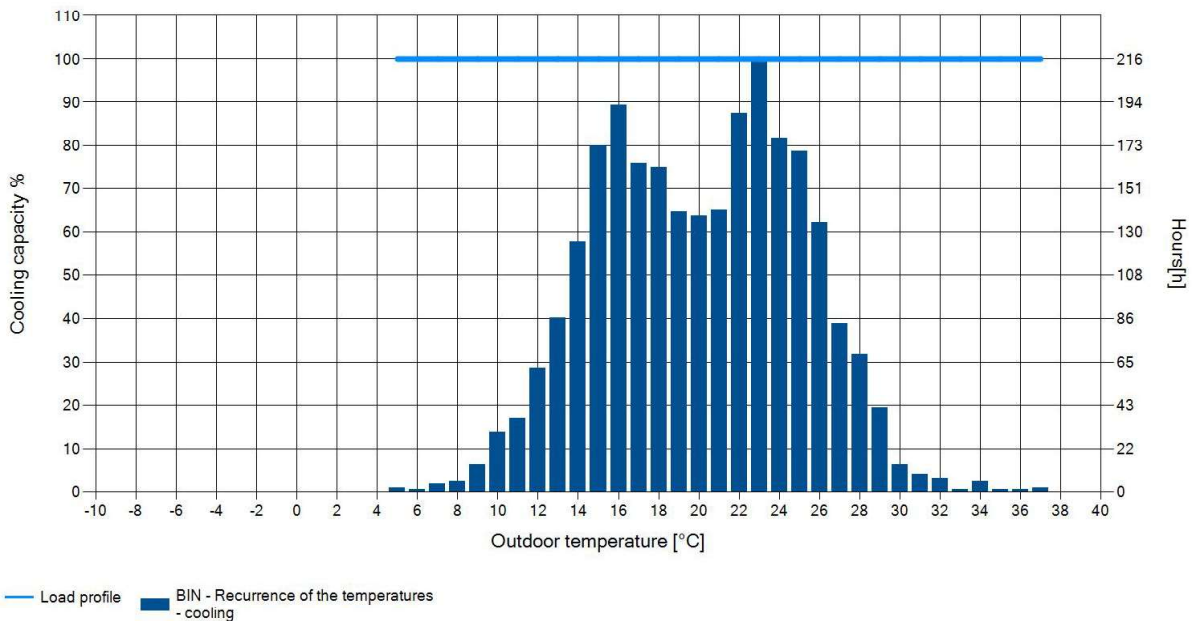
BIN

Temperature [°C]	Relative humidity	Cooling Load Demand [kW]	BIN of temperatures
5.0	67	500.0	2
6.0	47	500.0	1
7.0	72	500.0	4
8.0	67	500.0	5
9.0	83	500.0	14
10.0	68	500.0	30
11.0	72	500.0	37
12.0	69	500.0	62
13.0	70	500.0	87
14.0	70	500.0	125
15.0	71	500.0	173
16.0	69	500.0	193
17.0	68	500.0	164
18.0	69	500.0	162
19.0	68	500.0	140
20.0	66	500.0	138
21.0	64	500.0	141

Temperature [°C]	Relative humidity	Cooling Load Demand [kW]	BIN of temperatures
22.0	67	500.0	189
23.0	47	500.0	216
24.0	72	500.0	177
25.0	67	500.0	170
26.0	83	500.0	135
27.0	68	500.0	84
28.0	72	500.0	69
29.0	69	500.0	42
30.0	70	500.0	14
31.0	70	500.0	9
32.0	71	500.0	7
33.0	69	500.0	1
34.0	68	500.0	5
35.0	69	500.0	1
36.0	68	500.0	1
37.0	66	500.0	2

BIN AND LOAD DISTRIBUTION

Cooling load profile



The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

ENERGY ANALYSIS

Software version: ELCA World

User: Catarina Silva

Database version: 1.7.2.0

Print data: 29/12/2021 23:14

Energy Analysis

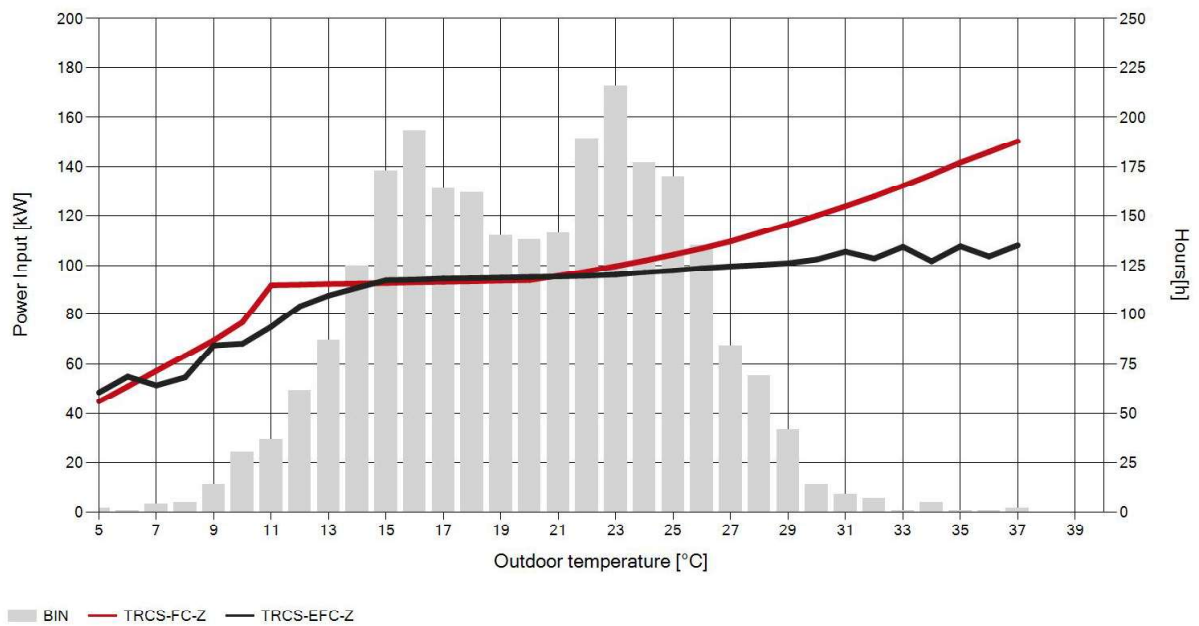
New plant room

SUMMARY OF ENERGY, ENVIRONMENTAL AND FINANCIAL DATA

Group 1	Group 2	Energy consumption [%] [%]	CO2 balance (Group 1 vs Group 2) [ton CO2]	Payback time	NPV (Net Present Value) after 10 year
TRCS-EFC-Z	VS TRCS-FC-Z	-3.32	-4.64	3 years and 10 months.	7,007.53

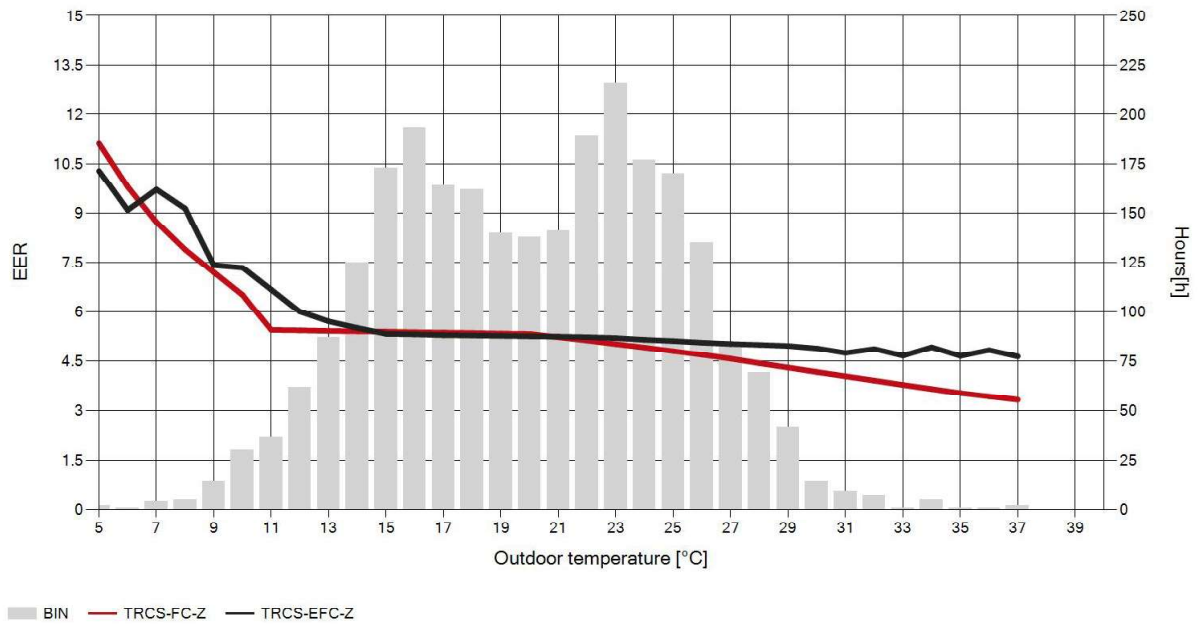
ENERGY COMPARISON

Istantaneous consumption

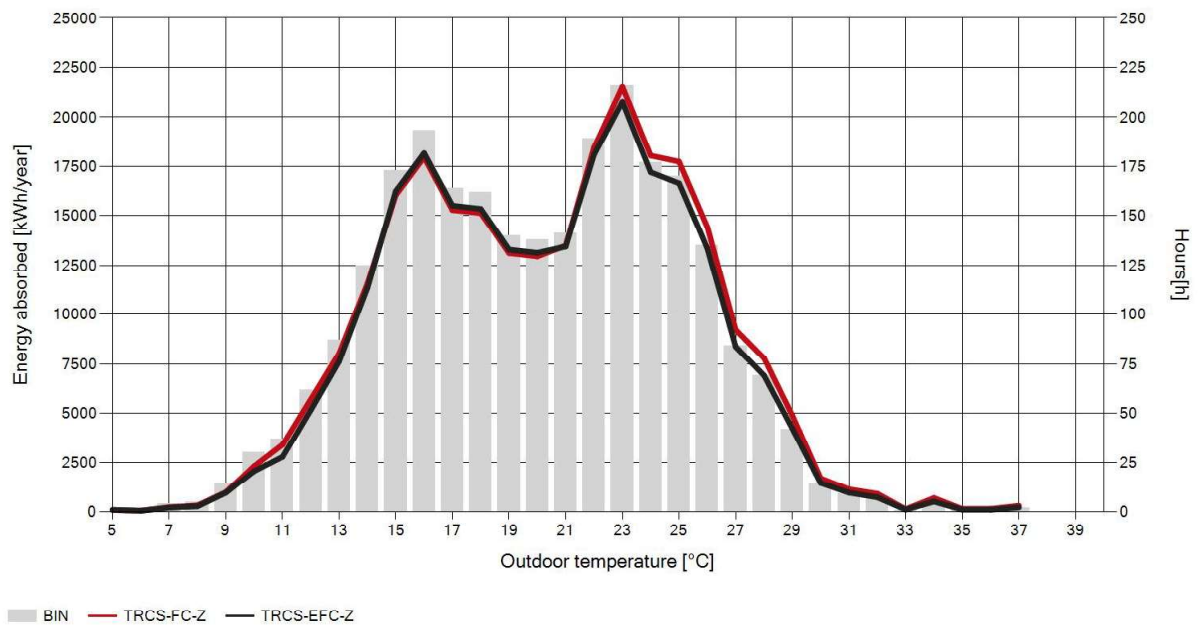


The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

EER



Annual energy consumption



ENERGY ANALYSIS**Energy Analysis**

New plant room

UNIT GROUPS**TRCS-FC**

Name	Fluid	Glycol	Fouling	Quantity	Redundant	Staging order	Price [€]
TRCS-FC-Z /K /0552 /HELWT	ETHYLENE GLYCOL	30	0.000000	1	0	0	0
				1			0.00

TRCS-EFC

Name	Fluid	Glycol	Fouling	Quantity	Redundant	Staging order	Price [€]
TRCS-EFC-Z /K /0552 /HELWT	ETHYLENE GLYCOL	30	0.000000	1	0	0	0
				1			0.00

ANALYSIS CONDITIONS

Max cooling load demand	Years Analysis	Inflation rate	Interest rate	Energy bill
500.0 kW	10	3 %	6 %	0.1662 €/kWh
Continent - State - City				Maximum temperature
Europe - Portugal - Lisboa				36.0 °C

ENERGY ANALYSIS

Software version: ELCA World

User: Catarina Silva

Database version: 1.8.0.0

Print data: 17/06/2022 19:06

Energy Analysis

New plant room

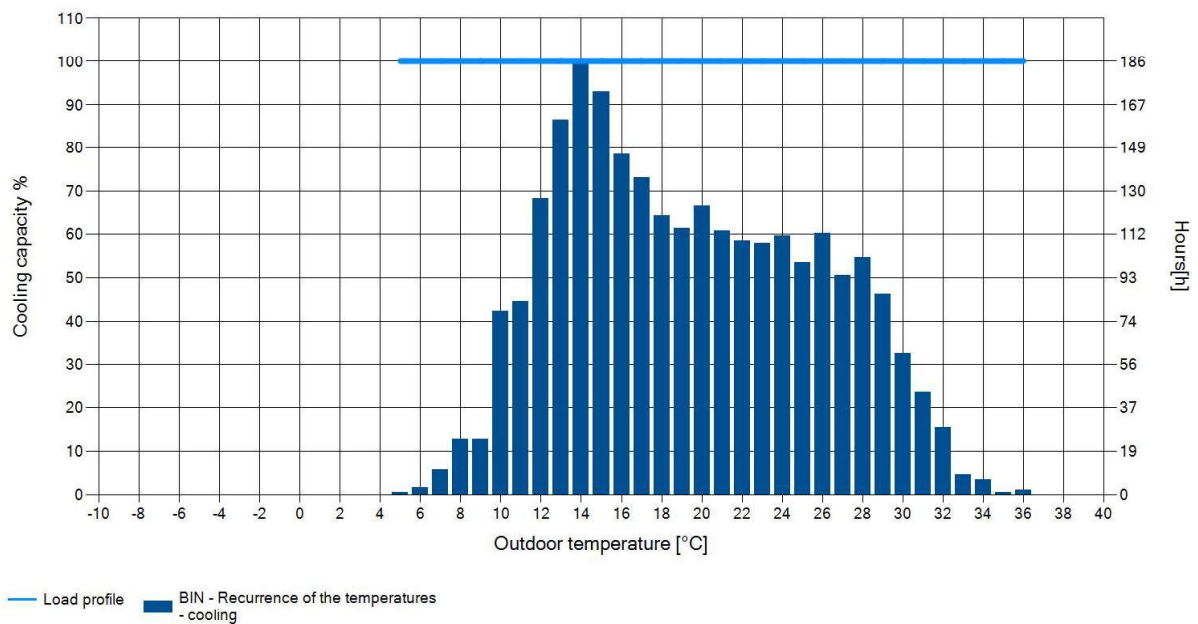
BIN

Temperature [°C]	Relative humidity	Cooling Load Demand [kW]	BIN of temperatures
5.0	96	500.0	1
6.0	87	500.0	3
7.0	83	500.0	11
8.0	83	500.0	24
9.0	79	500.0	24
10.0	80	500.0	79
11.0	77	500.0	83
12.0	75	500.0	127
13.0	74	500.0	161
14.0	74	500.0	186
15.0	70	500.0	173
16.0	69	500.0	146
17.0	68	500.0	136
18.0	67	500.0	120
19.0	65	500.0	114
20.0	65	500.0	124

Temperature [°C]	Relative humidity	Cooling Load Demand [kW]	BIN of temperatures
21.0	96	500.0	113
22.0	87	500.0	109
23.0	83	500.0	108
24.0	83	500.0	111
25.0	79	500.0	100
26.0	80	500.0	112
27.0	77	500.0	94
28.0	75	500.0	102
29.0	74	500.0	86
30.0	74	500.0	61
31.0	70	500.0	44
32.0	69	500.0	29
33.0	68	500.0	9
34.0	67	500.0	7
35.0	65	500.0	1
36.0	65	500.0	2

BIN AND LOAD DISTRIBUTION

Cooling load profile



The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

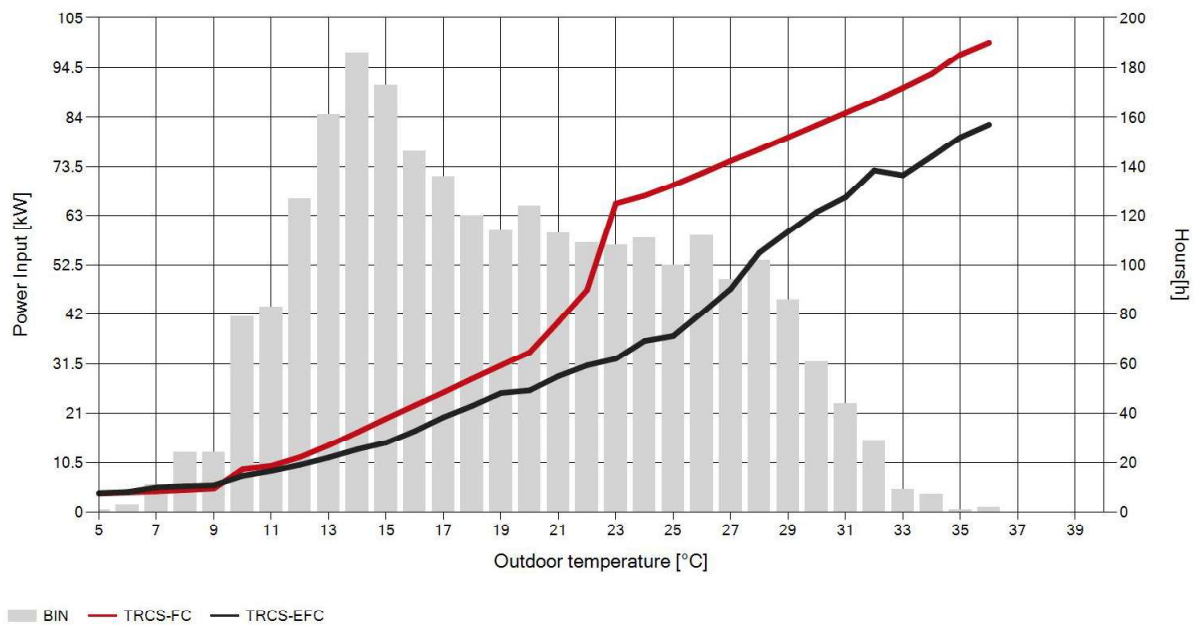


SUMMARY OF ENERGY, ENVIRONMENTAL AND FINANCIAL DATA

Group 1	Group 2	Energy consumption [%] [%]	CO2 balance (Group 1 vs Group 2) [ton CO2]	Payback time	NPV (Net Present Value) after 10 year
TRCS-FC	VS TRCS-EFC	44.47	17.64	No payback	-45,669.38

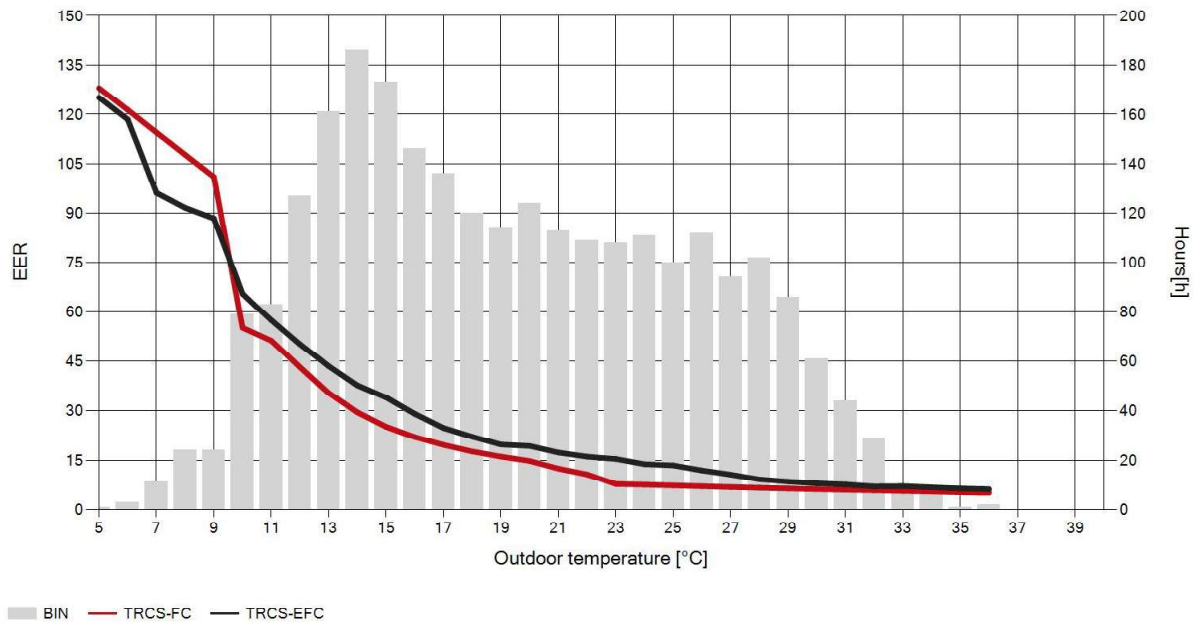
ENERGY COMPARISON

Istantaneous consumption

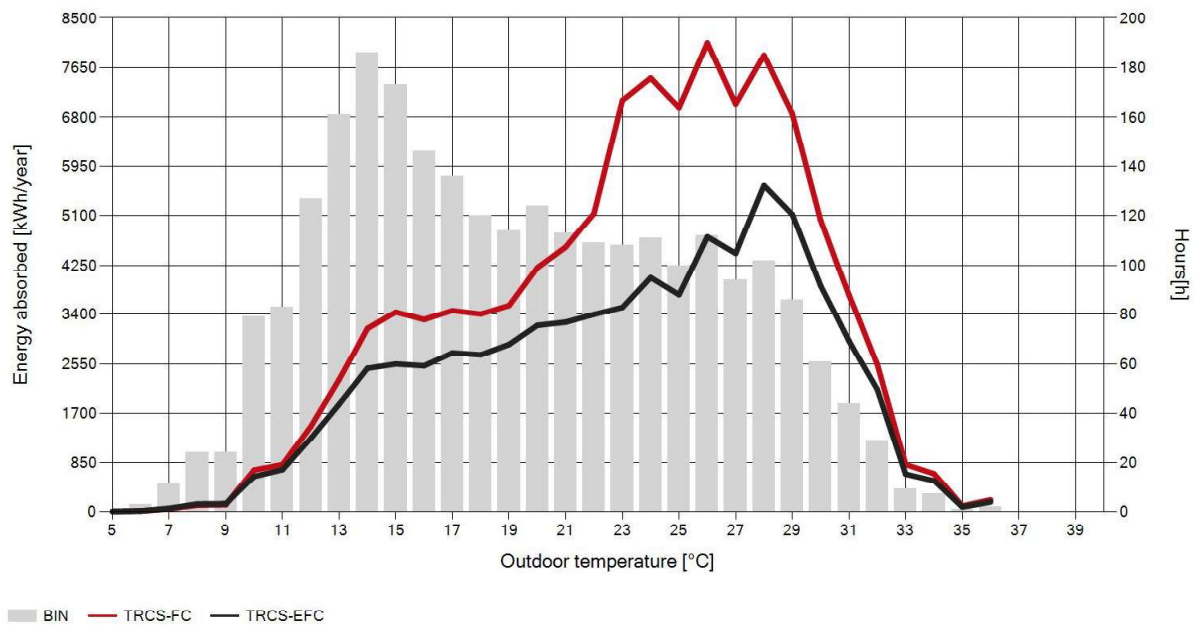


The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

EER



Annual energy consumption



The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

ENERGY ANALYSIS

Software version: ELCA World

User: Catarina Silva

Database version: 1.8.0.0

Print data: 17/06/2022 19:22

Energy Analysis

New plant room

UNIT GROUPS**TRCS-FC**

Name	Fluid	Glycol	Fouling	Quantity	Redundant	Staging order	Price [€]
TRCS-FC-Z /K /0552 /HELWT	ETHYLENE GLYCOL	30	0.000000	1	0	0	0
				1			0.00

TRCS-EFC

Name	Fluid	Glycol	Fouling	Quantity	Redundant	Staging order	Price [€]
TRCS-EFC-Z /K /0552 /HELWT	ETHYLENE GLYCOL	30	0.000000	1	0	0	0
				1			0.00

ANALYSIS CONDITIONS

Max cooling load demand	Years Analysis	Inflation rate	Interest rate	Energy bill
500.0 kW	10	3 %	6 %	0.1662 €/kWh
Continent - State - City				Maximum temperature
Africa - Libya - Tripoli				46.0 °C

The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

ENERGY ANALYSIS

Software version: ELCA World

User: Catarina Silva

Database version: 1.8.0.0

Print data: 17/06/2022 19:22

Energy Analysis

New plant room

BIN

Temperature [°C]	Relative humidity	Cooling Load Demand [kW]	BIN of temperatures
4.0	90	500.0	1
5.0	87	500.0	4
6.0	80	500.0	3
7.0	83	500.0	10
8.0	84	500.0	17
9.0	77	500.0	23
10.0	79	500.0	40
11.0	77	500.0	44
12.0	74	500.0	56
13.0	73	500.0	69
14.0	69	500.0	88
15.0	69	500.0	89
16.0	65	500.0	109
17.0	64	500.0	103
18.0	61	500.0	125
19.0	61	500.0	110
20.0	56	500.0	95
21.0	57	500.0	82
22.0	56	500.0	77
23.0	56	500.0	85
24.0	56	500.0	94
25.0	51	500.0	107

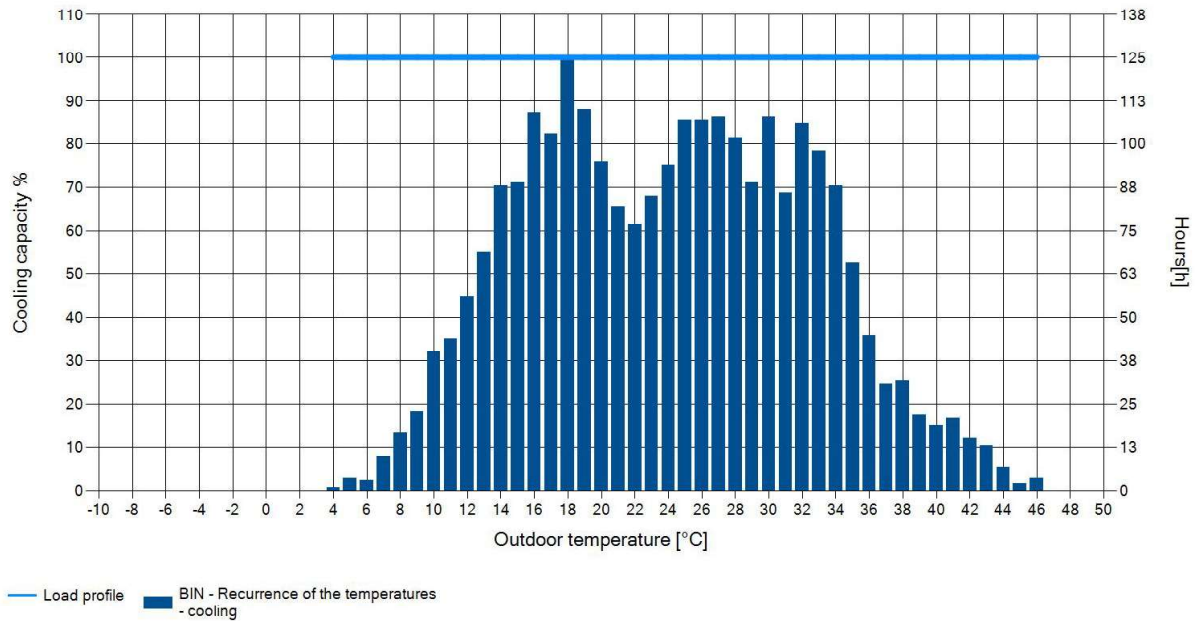
Temperature [°C]	Relative humidity	Cooling Load Demand [kW]	BIN of temperatures
26.0	90	500.0	107
27.0	87	500.0	108
28.0	80	500.0	102
29.0	83	500.0	89
30.0	84	500.0	108
31.0	77	500.0	86
32.0	79	500.0	106
33.0	77	500.0	98
34.0	74	500.0	88
35.0	73	500.0	66
36.0	69	500.0	45
37.0	69	500.0	31
38.0	65	500.0	32
39.0	64	500.0	22
40.0	61	500.0	19
41.0	61	500.0	21
42.0	56	500.0	15
43.0	57	500.0	13
44.0	56	500.0	7
45.0	56	500.0	2
46.0	56	500.0	4

The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0



BIN AND LOAD DISTRIBUTION

Cooling load profile



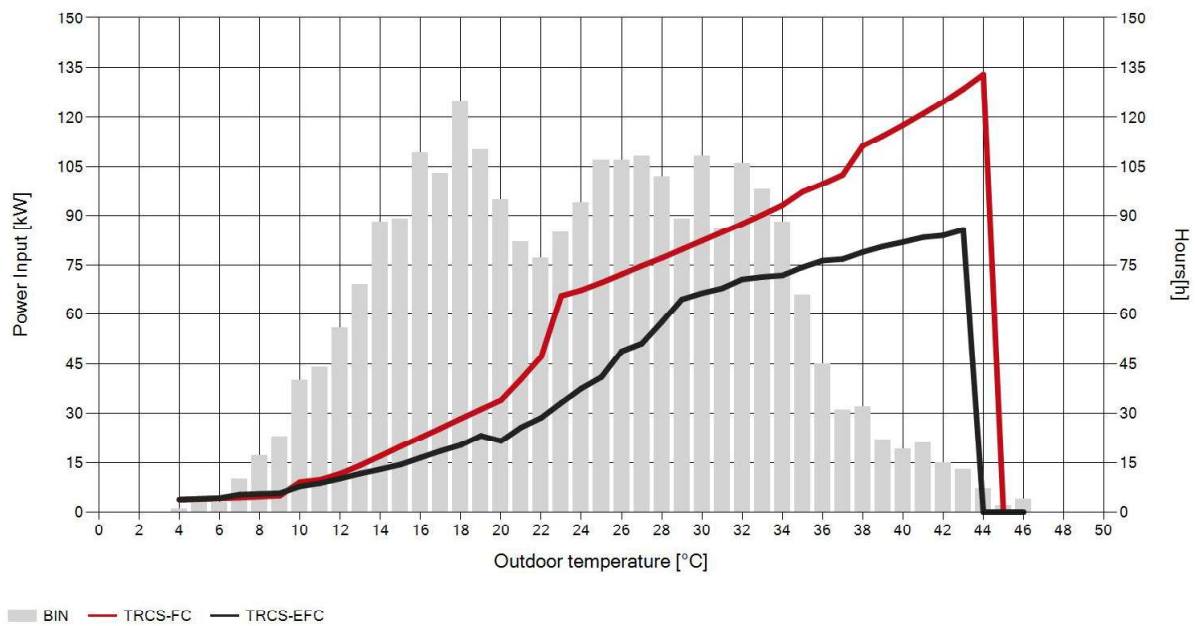
The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

SUMMARY OF ENERGY, ENVIRONMENTAL AND FINANCIAL DATA

Group 1	Group 2	Energy consumption [%] [%]	CO2 balance (Group 1 vs Group 2) [ton CO2]	Payback time	NPV (Net Present Value) after 10 year
TRCS-FC	VS TRCS-EFC	39.70	23.48	No payback	-60,786.44

ENERGY COMPARISON

Istantaneous consumption



The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

ENERGY ANALYSIS

Software version: ELCA World

User: Catarina Silva

Database version: 1.8.1.0

Print data: 25/06/2022 16:57

Energy Analysis

New plant room

UNIT GROUPS**TRCS-FC-Z**

Name	Fluid	Glycol	Fouling	Quantity	Redundant	Staging order	Price [€]
TRCS-FC-Z /K /0552 /HELWT	ETHYLENE GLYCOL	30	0.000000	1	0	0	0
				1			0.00

NEW UNITS GROUP 1

Name	Fluid	Glycol	Fouling	Quantity	Redundant	Staging order	Price [€]
TRCS-EFC-Z /K /0552 /HELWT	ETHYLENE GLYCOL	30	0.000000	1	0	0	0
				1			0.00

ANALYSIS CONDITIONS

Max cooling load demand	Years Analysis	Inflation rate	Interest rate	Energy bill
500.0 kW	10	3 %	6 %	0.1662 €/kWh
Continent - State - City				Maximum temperature
Asia - China - Guangzhou				37.0 °C

The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

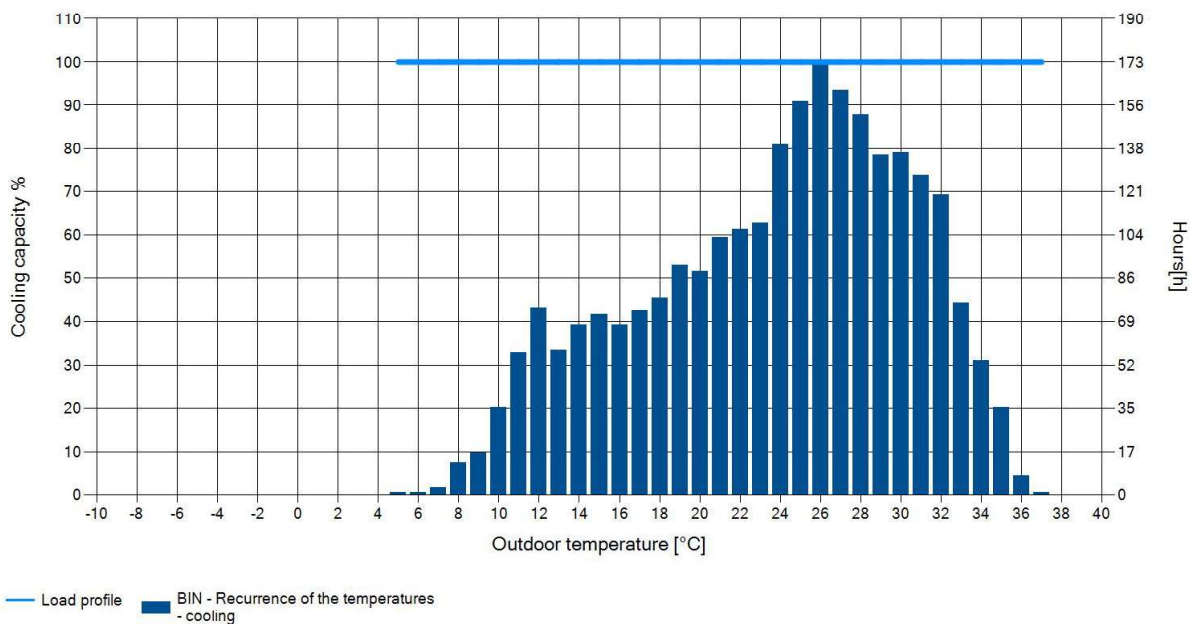
BIN

Temperature [°C]	Relative humidity	Cooling Load Demand [kW]	BIN of temperatures
5.0	80	500.0	1
6.0	74	500.0	1
7.0	79	500.0	3
8.0	79	500.0	13
9.0	75	500.0	17
10.0	73	500.0	35
11.0	69	500.0	57
12.0	68	500.0	75
13.0	69	500.0	58
14.0	66	500.0	68
15.0	66	500.0	72
16.0	63	500.0	68
17.0	65	500.0	74
18.0	62	500.0	79
19.0	68	500.0	92
20.0	66	500.0	89
21.0	64	500.0	103

Temperature [°C]	Relative humidity	Cooling Load Demand [kW]	BIN of temperatures
22.0	80	500.0	106
23.0	74	500.0	109
24.0	79	500.0	140
25.0	79	500.0	157
26.0	75	500.0	173
27.0	73	500.0	162
28.0	69	500.0	152
29.0	68	500.0	136
30.0	69	500.0	137
31.0	66	500.0	128
32.0	66	500.0	120
33.0	63	500.0	77
34.0	65	500.0	54
35.0	62	500.0	35
36.0	68	500.0	8
37.0	66	500.0	1

BIN AND LOAD DISTRIBUTION

Cooling load profile



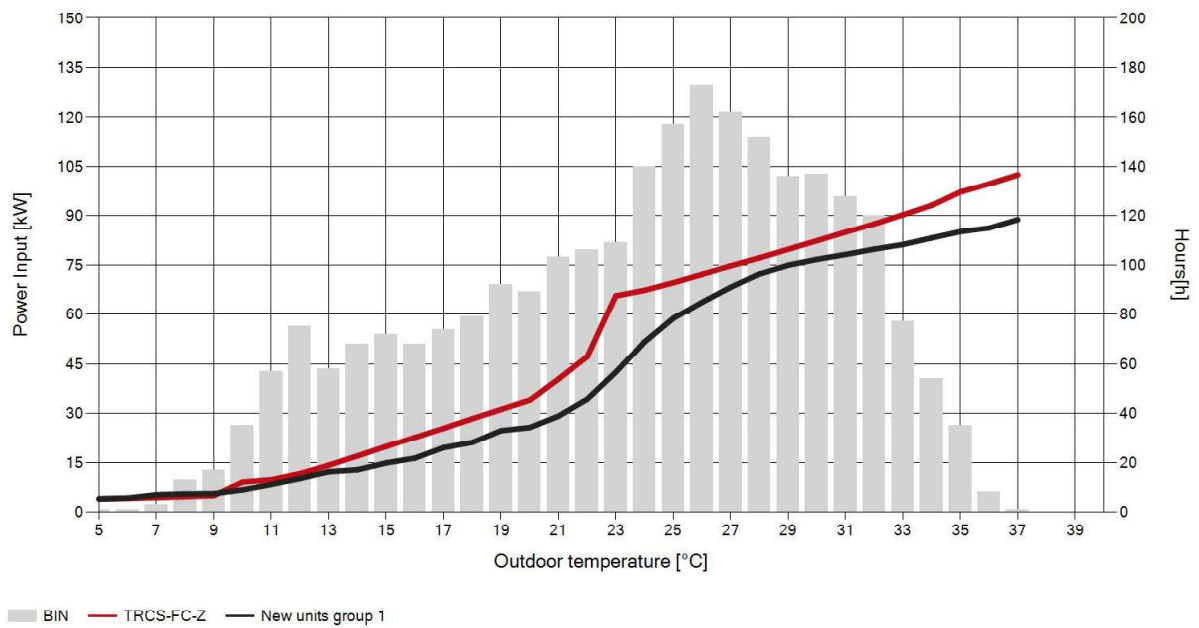
The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

SUMMARY OF ENERGY, ENVIRONMENTAL AND FINANCIAL DATA

Group 1	Group 2	Energy consumption [%] [%]	CO2 balance (Group 1 vs Group 2) [ton CO2]	Payback time	NPV (Net Present Value) after 10 year
TRCS-FC-Z	VS New units group 1	16.34	11.55	No payback	-29,912.47

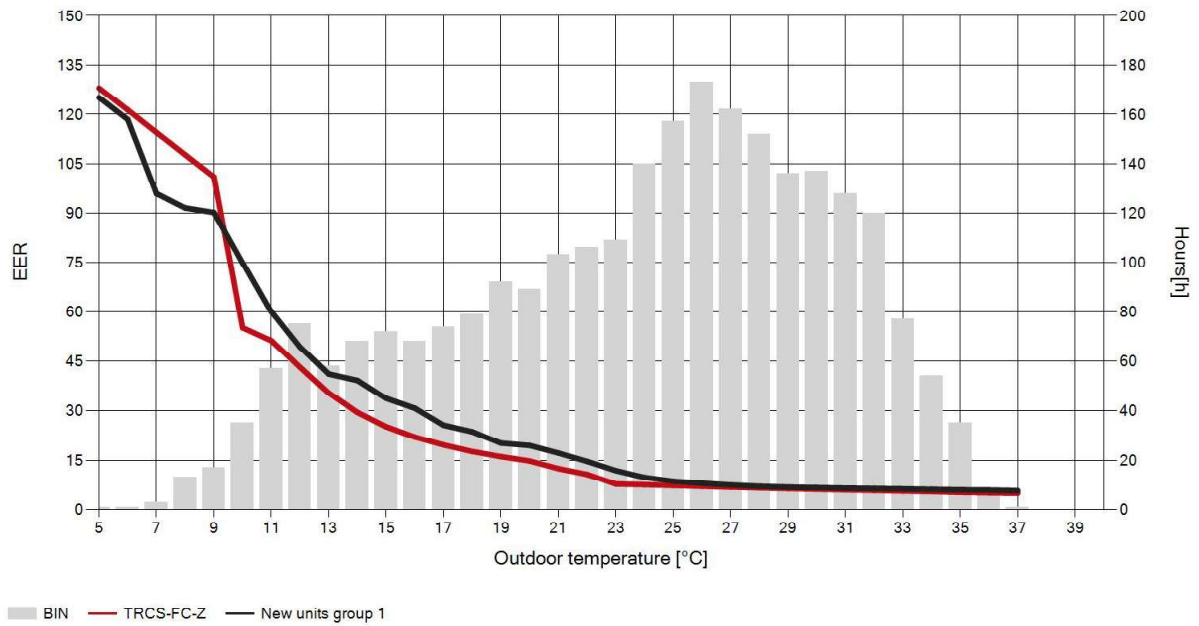
ENERGY COMPARISON

Istantaneous consumption

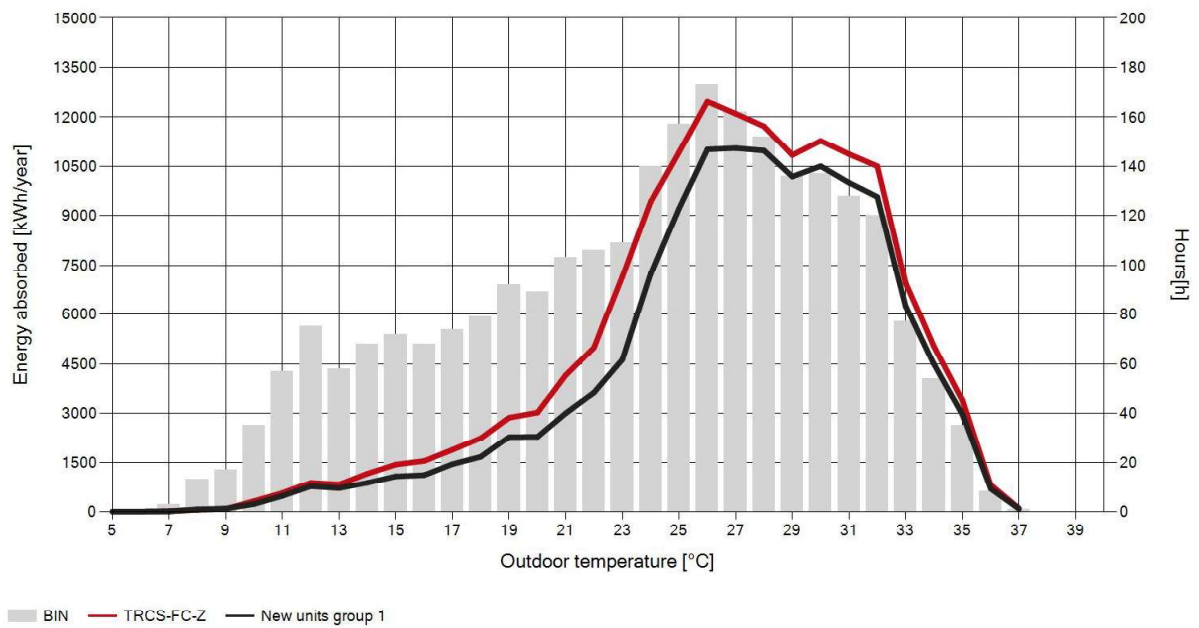


The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0

EER



Annual energy consumption



The performance shown are obtained from theoretical calculations and tolerances will apply. Rpt.version:1.0.3.0