



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de ferramenta para avaliação do desempenho energético de *Chillers/Bombas-de-calor* para climatização

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Development of a software for evaluation of energy performance of Chiller/Heat-pump on buildings air conditioning

Autor

Miguel José Ribeiro Ferreira

Orientadores

Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo
Engenheira Ana Cecília Rodrigues Guimarães Simões

Júri

Presidente Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Engenheira Ana Cecília Rodrigues Guimarães Simões
Gestora de Projeto na *Virtual Power Solutions*

Colaboração Institucional



**VPS - Virtual Power
Solutions**

Coimbra, julho, 2016

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho aqui apresentado não seria possível sem a colaboração e apoio de várias pessoas, às quais gostaria de prestar o meu reconhecimento.

Ao Professor Doutor António Raimundo, pelos conselhos e conhecimentos transmitidos nos momentos cruciais deste trabalho.

À engenheira Ana Guimarães, pela orientação e por todo o apoio prestado durante o decorrer do estágio, não esquecendo as oportunidades dadas e a amizade que sempre demonstrou.

Ao Professor Francisco Lamas, pela partilha da sua experiência profissional, imprescindível na fase inicial do trabalho desenvolvido.

Aos colegas e amigos na *VPS*, em especial à equipa de gestão de energia, pela integração, camaradagem e ajuda ao longo do semestre.

Por último, aos meus pais e à Sara, pelo apoio incondicional. A eles ficarei sempre grato.

Resumo

Atualmente, no sector dos edifícios, o consumo de energia do sistema de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) pode representar mais de 50% do consumo total do edifício. Neste sentido, o desempenho energético dos equipamentos mais consumidores, como é o caso dos *Chillers* / Bombas-de-calor, assume a maior importância, apesar das dificuldades na sua avaliação em instalações reais existentes.

O trabalho que aqui se apresenta tinha como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta informática de apoio à realização de auditorias de avaliação do desempenho energético de *Chillers*/Bombas-de-calor pertencentes aos sistemas de climatização instalados nos edifícios.

Os trabalhos decorreram sob a forma de estágio em ambiente empresarial, enquadrado na equipa de gestão de energia da empresa *Virtual Power Solutions*, em parceria com a Universidade de Coimbra.

A ferramenta foi desenvolvida em *MS Excel + VBA* e assenta na comparação do desempenho energético do equipamento instalado em ambiente real (funcionando a carga parcial ou total) com duas referências: o desempenho que este equipamento teria se fosse “novo” e o de um dos melhores equipamentos existentes no mercado. Quando aliada a outras ferramentas de simulação dinâmica permite obter estimativas de gastos anuais para os cenários considerados e assim ajudar na tomada de decisões sobre eventuais medidas de melhoria do desempenho energético dos equipamentos auditados.

O tempo disponível para realizar este trabalho não permitiu que fosse viável testar a ferramenta em situação de auditoria real a *Chillers* / Bombas-de-calor de sistemas de climatização de edifícios. Para contornar esta limitação recorreu-se a simulações produzidas por um *software* de simulação dinâmica detalhada monozona, tendo-se assim criado auditorias energéticas (hipotéticas) a uma Clínica privada e a uma Escola secundária.

Analisando os resultados obtidos para os dois casos selecionados para testar o comportamento da ferramenta informática desenvolvida, constatou-se a sua grande utilidade na previsão do desempenho energético dos *Chillers* / Bombas-de-calor auditados.

Palavras-chave: Eficiência energética em edifícios, Auditoria energética a *Chillers* / Bombas-de-calor, *EER*, *COP*, *Chiller* / Bomba-de-calor.

Abstract

Nowadays, in the buildings' sector, the energy consumption of HVAC (Heating Ventilation and Air Conditioning) systems can represent more than 50% of the building's total consumption. Therefore, the energy performance of the most consuming equipment, such as Chillers / Heat-pumps, assumes major importance, despite all the difficulties in its evaluation in real existing installations.

This thesis's main objective was the development of an informatics tool to support energy performance evaluation audits of Chillers / Heat-pumps, belonging to the buildings' air conditioning system.

The work was developed in the course of an internship in professional environment, framed in the energy management team of the enterprise Virtual Power Solutions, in partnership with University of Coimbra.

The tool was developed in MS Excel + VBA and is based on the comparison between the energy performance of the equipment installed in the real environment (operating at partial or total load) and two references: the performance of this equipment if it was "new" and the one of the best equipment on the market. When combined with other dynamic simulation tools allows the estimation of annual expenses for the considered scenarios and therefore help in decision-making about potential measures for the improvement of the energy performance of the audited equipment.

The time available to prepare this dissertation wasn't enough to test the tool in real audit situation to Chillers / Heat-pumps of air conditioning buildings' systems. To work around this limitation, simulations were produced by a mono-zone dynamic simulation software, having thus created (hypothetical) energy audits to a private clinic and to a high school.

The analysis of the results obtained for the two selected cases to test the developed software tool revealed its great utility in predicting the energy performance of the Chillers / Heat-pumps audited.

Keywords Building energy efficiency, Chiller / Heat-pump energy audit, EER, COP, Chiller / Heat-pump.

Índice

Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	x
Simbologia, Siglas e Acrónimos	xi
Simbologia.....	xi
Siglas e Acrónimos.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Estado da arte.....	3
1.3. Objetivos.....	5
2. ESTÁGIO NA EMPRESA <i>VPS</i>	7
2.1. Planeamento do estágio	7
2.2. Gestão de Energia	9
3. FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE <i>CHILLERS/BOMBAS-DE-CALOR</i>	11
3.1. Metodologia de cálculo.....	11
3.2. Módulos principais do programa	14
3.2.1. Módulo Informação Geral	14
3.2.2. Módulo Auditoria	15
3.2.3. Módulo Simulação.....	18
3.2.4. Módulo Resultados.....	19
3.3. Manual de utilizador	19
4. CASOS E METODOLOGIA DE TESTE AO FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA	22
4.1. Clínica privada.....	23
4.2. Escola secundária.....	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS TESTES AO FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA	26
5.1. Clínica privada.....	26
5.2. Escola secundária.....	32
6. CONCLUSÕES	39
7. REFERÊNCIAS	41
ANEXO A – SIMULAÇÃO ANUAL NA CLÍNICA.....	43
ANEXO B – SIMULAÇÃO ANUAL NA ESCOLA SECUNDÁRIA.....	48
ANEXO C – RELATÓRIO <i>VPS</i>	53
APÊNDICE A – INFORMAÇÃO TÉCNICA DOS EQUIPAMENTOS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.Dependência energética na EU-28 em 2014 (Adaptado de Eurostat, 2014a).	2
Figura 1.2.Percentagem de energia renovável no consumo final na EU-28 em 2014 (Adaptado de Eurostat, 2014b).....	2
Figura 2.1.Planeamento inicial do estágio.....	7
Figura 2.2.Alterações ao planeamento do estágio.....	8
Figura 3.1.Exemplo de EER a cargas parciais de <i>Chiller</i>	14
Figura 3.2.Diagrama de funcionamento do separador Informação geral.	16
Figura 3.3.Medições a realizar na Auditoria (Adaptado de <i>The Cooper Union</i> , 2016).	17
Figura 3.4.Esquema de comunicações com a <i>cloud</i>	17
Figura 3.5.Diagrama de funcionamento do separador Auditoria.	18
Figura 3.6. Aspeto do separador Referência.....	20
Figura 3.7. Adição de um <i>Chiller</i> à base de dados.	20
Figura 3.8. Base de dados de <i>Chillers</i>	20
Figura 3.9. Separador Auditoria.	21
Figura 5.1.Clínica – Desempenho do <i>Chiller</i> real, do de referência e do ideal em função da temperatura do ar exterior.	26
Figura 5.2. Clínica -Nº de horas a cada valor de temperatura do ar exterior, durante os 15 dias da auditoria.....	27
Figura 5.3. Clínica - Nº de horas de a cada valor de temperatura do ar exterior, durante os 15 dias da auditoria, com o <i>Chiller</i> em funcionamento.	27
Figura 5.4. Clínica - Potência útil necessária para o arrefecimento e temperatura do ar exterior durante o período da auditoria.	28
Figura 5.5. Clínica – Potência útil necessária para o arrefecimento do edifício e potência consumida pelo <i>Chiller</i> durante o período da auditoria.	29
Figura 5.6. Clínica - Potências consumidas pelos <i>Chillers</i> : real, de referência e ideal, durante o período da auditoria.....	29
Figura 5.7. Clínica – <i>EER</i> do <i>Chiller</i> real, do de referência e do ideal durante o período da auditoria.....	30
Figura 5.8.Escola secundária - Desempenho do <i>Chiller</i> real, do de referência e do ideal em função da temperatura do ar exterior.....	33
Figura 5.9.Escola secundária - Nº de horas a cada valor de temperatura do ar exterior, durante os 15 dias da auditoria.	33

Figura 5.10. Escola secundária - Nº de horas de a cada valor de temperatura do ar exterior, durante os 15 dias da auditoria, com o <i>Chiller</i> em funcionamento.....	34
Figura 5.11. Escola secundária - Potência útil necessária para o arrefecimento e temperatura do ar exterior durante o período da auditoria.	34
Figura 5.12. Escola secundária - Potência útil necessária para o arrefecimento do edifício e potência consumida pelo <i>Chiller</i> durante o período da auditoria.....	35
Figura 5.13. Escola secundária - Potências consumidas pelos <i>Chillers</i> : real, de referência e ideal durante o período da auditoria.	36
Figura 5.14. Escola secundária - <i>EER</i> do <i>Chiller</i> real, do de referência e do ideal durante o período da auditoria.....	36
Figura A.1. Clínica - Desempenho real, de referência e ideal do <i>Chiller</i> em modo de arrefecimento em função da temperatura do ar exterior.....	43
Figura A.2. Clínica - Somatório anual de horas a cada temperatura do ar exterior em Coimbra.....	43
Figura A.3. Clínica - Somatório anual de horas de funcionamento do <i>Chiller</i>	44
Figura A.4. Clínica - Potência útil necessária para o arrefecimento do edifício durante 1 ano.	44
Figura A.5. Clínica – Potência necessária para o arrefecimento do edifício e potência consumida pelo <i>Chiller</i> durante 1 ano.....	45
Figura A.6. Clínica - Potências consumidas pelo <i>Chiller</i> em modo de arrefecimento em função do tempo: real, de referência e ideal.....	46
Figura A.7. Clínica – <i>EER</i> do <i>Chiller</i> em modo de arrefecimento em função do tempo: <i>EER</i> real, <i>EER</i> de referência e <i>EER</i> ideal.....	47
Figura B.1. Escola secundária - Desempenho real, de referência e ideal do <i>Chiller</i> em modo de arrefecimento em função da temperatura do ar exterior.....	48
Figura B.2. Escola secundária - Somatório anual de horas a cada temperatura do ar exterior em Coimbra.	48
Figura B.3 Escola secundária - Somatório anual de horas de funcionamento do <i>Chiller</i> . ..	49
Figura B.4. Escola secundária - Potência útil necessária para o arrefecimento do edifício durante 1 ano.	49
Figura B.5. Escola secundária – Potência necessária para o arrefecimento do edifício e potência consumida pelo <i>Chiller</i> durante 1 ano.	50
Figura B.6. Escola secundária - Potências consumidas pelo <i>Chiller</i> em modo de arrefecimento em função do tempo: real, de referência e ideal.....	51
Figura B.7. Escola secundária – <i>EER</i> do <i>Chiller</i> em modo de arrefecimento em função do tempo: <i>EER</i> real, <i>EER</i> de referência e <i>EER</i> ideal.....	52
Figura C.1. Exemplo de relatório de auditoria (página 1).....	53
Figura C.2. Exemplo de relatório de auditoria (página 2).	54

Figura C.3. Exemplo de relatório de auditoria (página 3). 55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Temperaturas exteriores para obtenção do desempenho a cargas parciais para <i>Chillers</i> do tipo ar-água (<i>Eurovent</i> , 2016).....	13
Tabela 3.2. Valores de <i>EER</i> a cargas parciais do modelo RTAF 125HSELN (TRANE, 2016).....	13
Tabela 4.1. Equipamentos de referência e ideal para o caso da clínica.....	24
Tabela 4.2. Equipamentos de referência e ideal da escola secundária.	25
Tabela 5.1. Clínica - Resultados da auditoria (hipotética).	31
Tabela 5.2. Clínica - Resultados da simulação anual.	31
Tabela 5.3. Clínica - PVP dos equipamentos e respetivo <i>payback</i>	32
Tabela 5.4. Escola secundária - Resultados da auditoria (hipotética) ao <i>Chiller</i>	37
Tabela 5.5. Escola secundária - Resultados da simulação anual.	37
Tabela 5.6. Escola secundária – Custo do investimento e respetivo <i>payback</i>	38

SIMBOLOGIA, SIGLAS E ACRÓNIMOS

Simbologia

c_p – Calor específico a pressão constante [J/kg °C]

P_C – Potência de arrefecimento [W]

P_E – Potência elétrica consumida [W]

P_H – Potência de aquecimento [W]

q – Caudal volúmico [m³/s]

ΔT – Diferença de Temperatura [°C]

ρ – Massa volúmica. [kg/m³]

Siglas e Acrónimos

AQS – Águas Quentes Sanitárias

AVAC – Aquecimento Ventilação e Ar-Condicionado

COP – *Coefficient of Performance*

DGEG - Direcção Geral de Energia e Geologia

EER – *Energy Efficiency Ratio*

ESEER – *European Seasonal Energy Efficiency Ratio*

EU – *European Union*

GE – Gestão de Energia

GEE - Gases com Efeito de Estufa

MS – *Microsoft*

VBA – *Visual Basic for Applications*

VPS – *Virtual Power Solutions*

1. INTRODUÇÃO

A escassez de recursos energéticos, a dependência da importação de combustíveis fósseis e a necessidade de reduzir a poluição do meio ambiente faz com que as políticas energéticas internacionais ganhem cada vez mais relevância. A Diretiva 2012/27/UE do Parlamento Europeu e do Conselho (Diretiva 2012/27/UE, 2012) aponta para 2020 uma redução de 20% do consumo de energia primária, 20% nas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e um aumento de 20% no peso das energias renováveis no consumo final de energia relativamente à projeção do consumo para 2020 (efetuada a partir do *Baseline 2007* por aplicação do modelo PRIMES da Comissão Europeia). Neste sentido, a eficiência energética assume especial importância, uma vez que o seu aumento leva às reduções do consumo de energia e, conseqüentemente, de emissões de GEE.

1.1. Enquadramento

Na perspectiva do consumidor de energia, a eficiência energética significa também poupança nos gastos com a energia. Esta poupança pode ser usada para tornar os preços de produtos e serviços mais competitivos, traduzindo-se num maior poder de compra para o consumidor final. Estes fatores influenciam a própria economia de um país, principalmente se este tiver forte dependência da importação de recursos primários, como é o caso de Portugal (DGEG, 2015). Na Figura 1.1 é feita a comparação entre os países da União Europeia e a média europeia dos 28 estados-membros quanto à dependência energética em 2014 face a países terceiros. Já na Figura 1.2 é feita a comparação relativamente à percentagem de utilização de energias renováveis no consumo final, também em 2014. Analisando as duas figuras, constata-se que apesar da elevada dependência energética, Portugal já possui políticas de energia que visam minimizar esta dependência e aumentar o consumo de energias com fonte renovável.

Energy dependence
%
All products

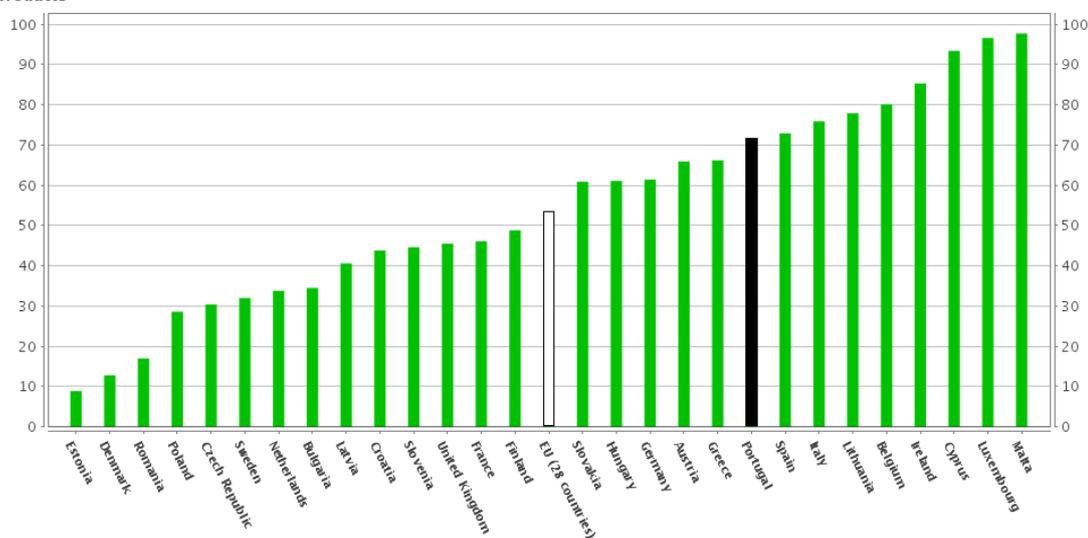


Figura 1.1. Dependência energética na EU-28 em 2014 (Adaptado de Eurostat, 2014a).

Share of renewable energy in gross final energy consumption
%

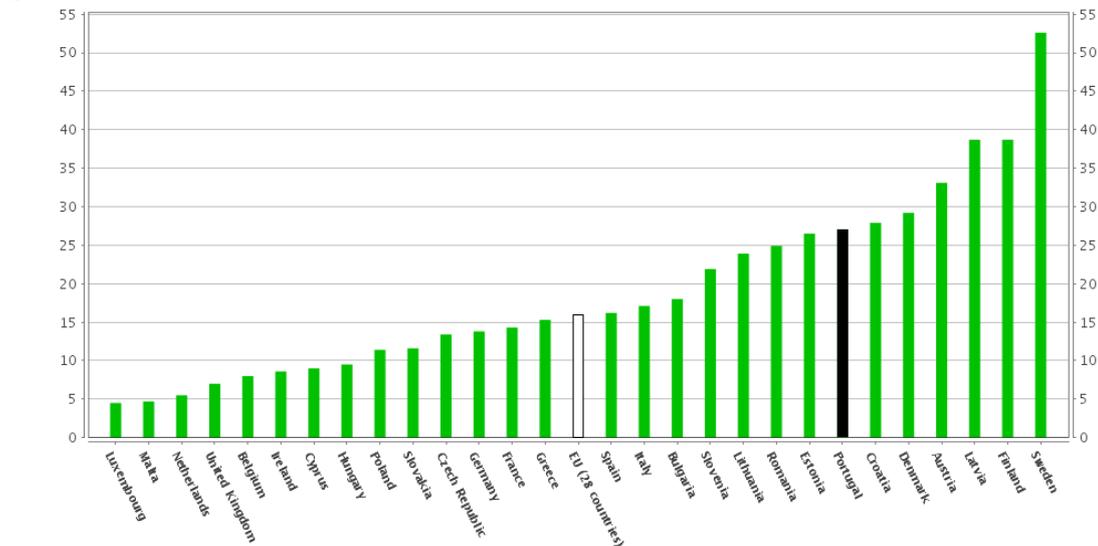


Figura 1.2. Percentagem de energia renovável no consumo final na EU-28 em 2014 (Adaptado de Eurostat, 2014b).

Atualmente na Europa, cerca de 40% do consumo total de energia deve-se ao setor dos edifícios (ADENE, 2016), existindo legislação que contém requisitos e procedimentos para a sua certificação em termos de desempenho energético. Para os edifícios de serviços, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) contém os requisitos legais relativos à eficiência de edifícios novos,

edifícios sujeitos a grandes intervenções e edifícios já existentes (Decreto-Lei 28/2016). No setor dos edifícios de comércio e de serviços o consumo dos equipamentos de Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) pode representar mais de 50% do consumo total de energia do edifício (Chua *et al.*, 2013), onde os compressores dos *Chillers* ou bombas-de-calor são os maiores consumidores de energia. Para *Chillers*, quando se pretende estimar os custos de operação e poupanças energéticas de medidas de *retrofit*, os parâmetros que mais influenciam e aumentam a incerteza da estimativa são: a carga no equipamento, o indicador de desempenho *EER* global do sistema, a ocupação do edifício, cargas internas de iluminação, horas de funcionamento do ar-condicionado e os *set-points* de temperaturas (Lee *et al.*, 2015).

Para que seja possível quantificar as poupanças geradas com medidas de eficiência energética de forma transparente e eficiente é necessária uma monitorização e verificação regular dos recursos (IEA, 2016). Existem já empresas cuja principal área de ação é a monitorização, gestão da energia e consultoria na área da eficiência energética. Posteriormente nesta dissertação será explicado de forma geral como surge a necessidade de desenvolver novas ferramentas neste tipo de empresas como é o caso da *VPS – Virtual Power Solutions* instituição onde foi realizado o estágio.

1.2. Estado da arte

Para analisar o desempenho energético de sistemas de ar-condicionado em edifícios, é necessário recorrer a ferramentas informáticas de análise (Afram e Janabi-Sharifi, 2014). Devido a isto é habitual os fabricantes de equipamentos de produção de energia térmica para climatização desenvolverem ferramentas de cálculo para determinar o seu desempenho. No entanto, estes *softwares* normalmente assumem que os equipamentos funcionam segundo condições normalizadas em ambiente controlado, não sendo indicados para usar com os equipamentos em funcionamento real. Sabe-se que algumas empresas focadas no desempenho dos sistemas desenvolvem *software* para avaliar e simular a eficiência de equipamentos, não só para as condições nominais, mas também em função da temperatura exterior e para várias tipologias. Com base nos valores da eficiência em função da temperatura exterior, em previsões climáticas e no custo de energia elétrica é possível obter uma estimativa de custos de operação anual na instalação de um novo equipamento e

também qual o tempo de retorno de um investimento dedicado à sua substituição. No entanto, não se conhecem os modelos em que assentam, tornando difícil o exercício de validação dos resultados que produzem.

Atualmente existem três abordagens comuns para estimar poupanças na substituição deste tipo de equipamentos, nomeadamente métodos simplificados de engenharia, modelos de regressão linear e modelos de simulação numérica (Lee *et al.*, 2015). Com os métodos simplificados de engenharia obtém-se rapidamente uma estimativa, com as poupanças energéticas a serem calculadas com base na comparação dos coeficientes de desempenho (*COP* e *EER*) entre o equipamento proposto, o existente no local e o perfil anual de necessidade do edifício. Contudo, este método falha por não considerar o funcionamento dos equipamentos a cargas parciais, que dependendo do clima, pode mesmo representar até 97% das horas de funcionamento durante um ano (Eurovent, 2016).

Geralmente, as auditorias energéticas aos sistemas de climatização instalados nos edifícios de comércio e nos de serviços dividem-se em quatro fases (Adnot *et al.*, 2007, Bertagnolio *et al.*, 2009):

- A fase de “*benchmarking*”, que serve para decidir se é necessário realizar uma auditoria completa. São recolhidos dados de faturas de energia, os quais através de cálculos simples são comparados com valores de referência.
- A pré-auditoria, que tem como objetivo identificar as oportunidades de melhoria de desempenho energético. Os resultados serão utilizados para orientar uma futura auditoria detalhada. A análise é feita com a verificação visual dos equipamentos e de dados de operação e de consumos recolhidos.
- A auditoria detalhada, como o nome sugere, é uma auditoria que assenta na avaliação pormenorizada das instalações bem como a comparação com as oportunidades identificadas anteriormente.
- Por último são realizados estudos económicos para justificar o custo dos investimentos nas medidas de *retrofit*.

Surge assim a necessidade de desenvolver ferramentas que permitam preencher as lacunas muitas vezes encontradas na informação recolhida. Neste relatório é apresentada

uma dessas ferramentas, desenvolvida para servir de apoio às duas primeiras fases da auditoria.

1.3. Objetivos

Tendo em conta as dificuldades em avaliar o desempenho de sistemas de climatização em edifícios e no âmbito do protocolo de estágio entre a Universidade de Coimbra e a empresa *VPS (Virtual Power Solutions)*, esta dissertação tinha como objetivo desenvolver uma ferramenta de simulação simples que pudesse servir de apoio à equipa de Gestão de Energia (GE) da *VPS* na avaliação do desempenho dos sistemas de produção de energia térmica para climatização de edifícios de comércio e de serviços baseados em equipamentos do tipo *Chiller / Bomba-de-calor* e na identificação de oportunidades de melhoria do seu desempenho energético.

De forma a perceber a realidade deste tipo de empresas e a necessidade de desenvolver este tipo de ferramentas, era importante a integração do autor deste relatório na equipa de gestão de energia da *VPS* e a sua participação em algumas tarefas incluindo auditorias e visitas a instalações.

Só após identificação das necessidades da equipa de GE da *VPS* se desenvolverá a ferramenta de cálculo. Posteriormente, a mesma será testada em situação de visita ou auditoria energética. Para o efeito, será verificada a sua capacidade e fiabilidade na verificação do desempenho energético do *Chiller / Bomba-de-calor* em estudo em situação real (*COP* e *EER* reais) e a comparação destes parâmetros de desempenho com os indicados pelo respetivo fabricante para as mesmas condições (*COP* e *EER* de referência) e com os que ocorreriam se fosse utilizado em alternativa um dos melhores equipamentos equivalentes existente no mercado (*COP* e *EER* ideais).

Era objetivo testar o programa em situação de auditoria real aos *Chillers / Bombas-de-calor* de pelo menos dois edifícios de comércio ou de serviços. Lamentavelmente o período de tempo disponível para a realização deste trabalho foi demasiado curto para que isto fosse possível. No sentido de contornar esta limitação recorreu-se a simulações produzidas pela versão 3.1 do programa de simulação dinâmica detalhada monozona *SEnergEd* (Raimundo, 2016). Com a ajuda deste *software* realizou-se

uma auditoria hipotética a uma Clínica privada e a uma Escola secundária, ambas localizadas em Coimbra.

Por último, recorrendo ao programa *SEnergEd* para simular as cargas térmicas necessárias dos dois edifícios para um ano, à ferramenta de análise energética de *Chillers / Bombas-de-calor* desenvolvida para determinação dos indicadores de desempenho *COP* e *EER* e a uma folha de cálculo em *MS Excel* com integração de um simulador de tarifas de eletricidade, realizar-se-á uma simulação no sentido de prever os gastos anuais em energia elétrica na situação de utilização de cada um dos três equipamentos alternativos: o equipamento real, o equipamento de referência e o equipamento ideal.

2. ESTÁGIO NA EMPRESA VPS

A VPS (*Virtual Power Solutions*) é uma empresa sediada em Coimbra e dedicada aos sectores da energia, da água e do ambiente. A sua missão é apoiar os seus clientes na melhoria da sua eficiência na gestão dos recursos energéticos nos sectores residencial, empresarial e industrial. A VPS desenvolve e implementa soluções integradas de monitorização, alarmística, controlo, *software* de gestão remota e de melhoria da eficiência energética.

2.1. Planeamento do estágio

Inicialmente estava previsto que após a integração na empresa e de alguma contextualização relativamente ao estado da arte, se desse início ao desenvolvimento da ferramenta, com a ocasional participação nos trabalhos da equipa de GE da VPS, nomeadamente auditorias energéticas e visitas a instalações. O planeamento inicial está ilustrado no diagrama representado na Figura 2.1.

Tarefa	2016																								
	Fevereiro				Março				Abril				Maio				Junho				Julho				
	8	15	22	29	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25
Integração na empresa	█	█																							
Estado de arte	█	█	█	█																					
Trabalhos de Gestão de Energia		█	█		█	█	█		█										█	█					
Desenvolvimento do programa																									
Escrita da dissertação																									

Legenda	
█	Tarefa realizada
█	Auditoria energética / visita a instalação

Figura 2.1. Planeamento inicial do estágio

Na primeira fase do desenvolvimento, face ao número de processos manuais que estavam planeados para o programa e aos esforços da empresa em otimizar e agilizar os processos internos, sentiu-se a necessidade de dedicar algum tempo na procura de uma solução integrada, em que todos os processos lentos, manuais e repetitivos fossem eliminados. A finalidade era que o utilizador do programa se pudesse centrar na análise crítica dos resultados e evitar erros comuns nestes processos. As funcionalidades e a apresentação de resultados foram desenvolvidas com base nas opiniões da equipa de gestão de energia, sofrendo várias vezes alterações durante o estágio. Também a aprendizagem da linguagem VBA, não prevista, decorreu ao longo de todo o estágio, à medida que as necessidades assim o exigiam.

Para testar e validar a ferramenta no terreno, estava agendada uma auditoria no mês de junho a um hotel, onde seria instalado um *Chiller* novo. Devido a fatores alheios à equipa de GE, a instalação foi adiada para uma data posterior ao estágio, o que impossibilitou a realização deste teste.

Por todas estas razões, o estágio não decorreu como planeado, acabando por sofrer várias alterações, conforme representado no diagrama da Figura 2.2.

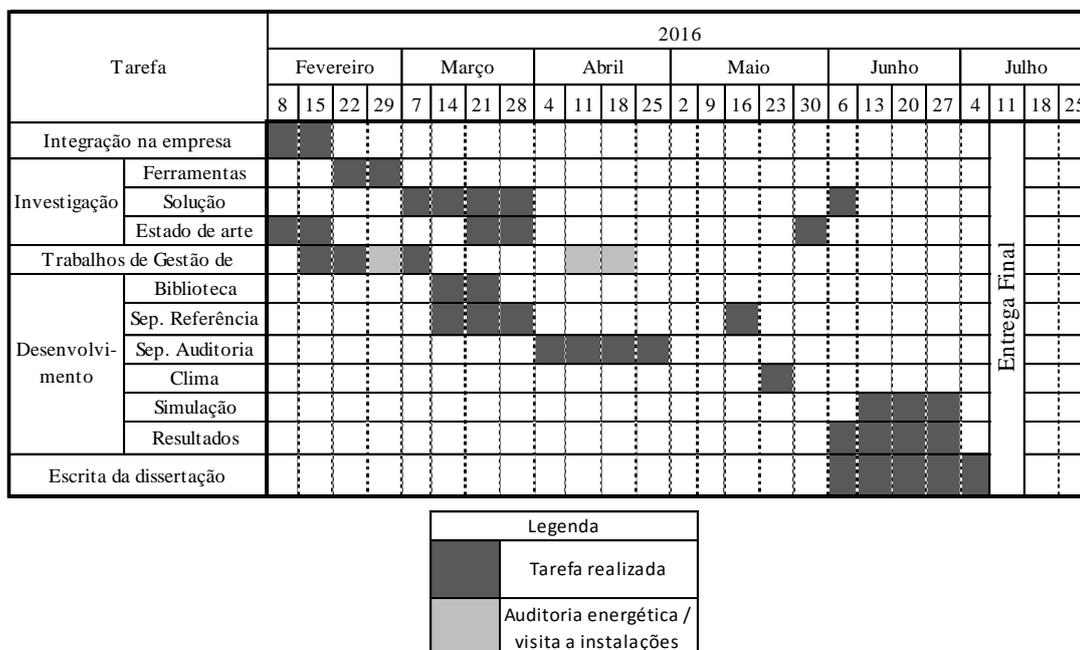


Figura 2.2. Alterações ao planeamento do estágio

O período de investigação engloba o levantamento do estado de arte, a aprendizagem do VBA e a esquematização da solução a desenvolver. Este período mostrou-se valioso, uma vez que a solução ficou mais completa do que a inicialmente proposta, traçaram-se novos objetivos e proporcionou a oportunidade de aprender uma ferramenta que não era conhecida, o VBA, o que tornou o programa final mais compacto e de rápida utilização.

2.2. Gestão de Energia

O trabalho de um gestor de energia tem como principal objetivo obter poupanças no consumo e nos gastos com a energia. Numa fase inicial de um projeto comercial ou industrial, a equipa de GE é responsável por identificar oportunidades de melhoria do desempenho energético e de reduções no consumo, calcular o retorno financeiro e o *payback* do investimento e definir *baselines* de consumo de acordo com o *International Performance Measurement & Verification Protocol* (IPMVP, 2012). Após o projeto estar delineado, é responsável por definir a alarmística, analisar os dados de monitorização e os alarmes despoletados e calcular as poupanças tendo em conta os ajustes necessários à *baseline*. Além disso, tem também o papel de definir a melhor estratégia a adotar de forma a obter o máximo de poupança e por elaborar relatórios para cada cliente. O planeamento dos trabalhos é semanal, com base em princípios de metodologia *Agile*. No início de cada semana é feito o planeamento e são discutidos os pontos-chave da semana anterior. Esta forma de planeamento permitiu ajustar o trabalho desenvolvido às necessidades que iam surgindo e também ouvir as sugestões de toda a equipa naquilo que consideravam mais importante.

De todas estas tarefas, as que apresentam maior dificuldade são aquelas relativas à fase inicial do projeto, principalmente na identificação de oportunidades, uma vez que cada projeto é diferente, quer seja no edifício, na iluminação, nas estratégias de ventilação e ar-condicionado, na preparação de AQS, tipo de serviços prestados, perfis de funcionamento, etc. Nesta fase, as visitas às instalações, também por vezes chamadas de pré-auditorias, desempenham um papel fulcral na identificação de oportunidades de melhoria do desempenho energético.

Devido à complexidade dos sistemas de ar-condicionado encontrados, surgiu a necessidade de desenvolver uma ferramenta que determine qual o desempenho do grupo de

produção de energia térmica, ou se é justificável realizar uma análise aprofundada do sistema. Para isso, a ferramenta desenvolvida deve apresentar resultados num curto intervalo de tempo, para que seja possível tirar as conclusões com brevidade. Tendo em conta o tempo disponível, foram tidos em conta alguns aspetos:

- As metodologias e a linguagem de programação a utilizar para desenvolver a nova ferramenta deveriam ser conhecidas ou de rápida aprendizagem;
- Dar prioridade à função de arrefecimento em detrimento da de aquecimento;
- Com o intuito de, no futuro, dar continuidade a esta ferramenta, com a adição de outros sistemas, tipologias e análises, decidiu-se utilizar o *MS Excel* com macros de *VBA*.

3. FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE CHILLERS/BOMBAS-DE-CALOR

O principal objetivo do presente trabalho assenta no desenvolvimento e teste de uma ferramenta de cálculo capaz de, em situação de visita ou de auditoria energética, avaliar quanto os indicadores de desempenho (*COP* e *EER*) dos *Chillers* – Bombas-de-calor utilizados na climatização de edifícios se desviam dos valores indicados pelos fabricantes dos mesmos e dos indicadores de desempenho dos melhores equipamentos equivalentes existentes no mercado (indicadores ideais).

Neste Capítulo apresenta-se a metodologia de cálculo utilizada, explica-se de que modo a mesma foi implementada numa folha de cálculo em *MS Excel* e *Visual Basic for Applications* (*VBA*), expõem-se os seus módulos principais da ferramenta desenvolvida e faz uma breve descrição de como a mesma deve ser utilizada.

3.1. Metodologia de cálculo

O desempenho de *Chillers* e de Bombas-de-calor é definido pelo valor dos indicadores de desempenho *EER* e de *COP*, respetivamente para as funções de arrefecimento e de aquecimento. Estes coeficientes são obtidos com base nas expressões:

$$EER = \frac{P_C}{P_E} \quad (3.1)$$

$$COP = \frac{P_H}{P_E} \quad (3.2)$$

em que

- P_E é a potência elétrica consumida [W];
- P_C é a potência útil para arrefecimento [W];
- P_H é a potência útil para aquecimento [W].

Por sua vez, as potências térmicas úteis para arrefecimento e para aquecimento dos *Chillers* / Bombas-de-calor ar-água ou água-água são obtidos com base nas expressões (EN 14511, 2013)

$$P_C = q \rho c_p \Delta T_C \quad (3.3)$$

$$P_H = q \rho c_p \Delta T_H \quad (3.4)$$

em que

q é o caudal volúmico da água [m^3/s];

ρ é a massa volúmica da água [kg/m^3];

c_p é calor específico a pressão constante da água [$\text{J}/\text{kg } ^\circ\text{C}$].

ΔT_C é a diferença de temperaturas da água na entrada e na saída do equipamento em modo de arrefecimento [$^\circ\text{C}$].

ΔT_H é a diferença de temperaturas da água na entrada e na saída do equipamento em modo de aquecimento [$^\circ\text{C}$].

Estes coeficientes variam com a temperatura e são definidos para as condições nominais de funcionamento. No entanto, estes equipamentos apenas funcionam nas condições nominais num limitado intervalo de tempo. Desta forma, a utilização dos valores de *EER* e *COP* para prever o desempenho deste tipo de equipamentos em função da temperatura exterior resultaria em valores de consumo de energia estimados demasiado elevados. Por isso, utilizaram-se os valores de desempenho a cargas parciais, isto é, para além de 100% (carga máxima) também se considerou a possibilidade de 75%, 50% e 25% da carga máxima. A temperatura exterior que define a carga parcial varia com o tipo de equipamento. Em *Chillers* do tipo ar-água estas cargas parciais correspondem ao funcionamento com uma temperatura exterior de 35°C, 30°C, 25°C e 20°C (*Eurovent*, 2016), resumido na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Temperaturas exteriores para obtenção do desempenho a cargas parciais para *Chillers* do tipo ar-água (Eurovent, 2016)

Carga parcial [%]	Temperatura do ar exterior [°C]
100	35
75	30
50	25
25	20

Estes valores são determinados pelos fabricantes em ambiente controlado para o cálculo dos coeficientes de desempenho sazonais. Na Tabela 3.2 são resumidos os valores de *EER* a cargas parciais de um *Chiller* disponibilizados pela empresa TRANE.

Tabela 3.2. Valores de *EER* a cargas parciais do modelo RTAF 125HSELN (TRANE, 2016)

Carga parcial [%]	Temperatura do ar exterior [°C]	<i>EER</i>
100	35	3,14
75	30	3,79
50	25	4,91
25	20	5,99

Estes valores são disponibilizados pelos fabricantes deste tipo de equipamentos, normalmente sob consulta, e são utilizados para o cálculo do *European Seasonal Energy Efficiency Ratio (ESEER)*. Este coeficiente sazonal, direcionado para o clima europeu, engloba o funcionamento a carga parcial e o seu peso respetivo (Eurovent, 2016).

Neste trabalho não é utilizado diretamente o valor de *ESEER* mas apenas os valores do desempenho a cargas parciais. Com o objetivo de estimar o desempenho para valores da temperatura dentro e fora dos intervalos recorre-se à interpolação e extrapolação linear. Apesar de este método ter ainda algum erro associado, uma vez que cada tipo de

compressor tem um comportamento diferente, ilustra bem a variação do desempenho com a temperatura do ar exterior, visível na Figura 3.1.

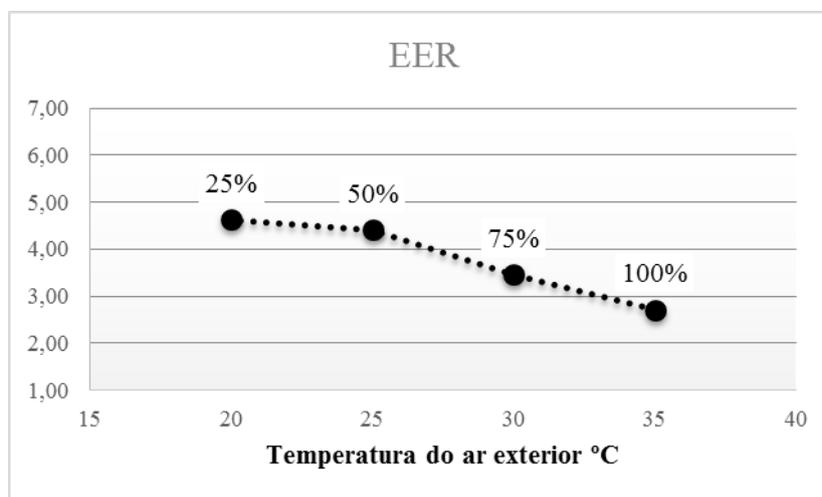


Figura 3.1.Exemplo de EER a cargas parciais de Chiller.

3.2. Módulos principais do programa

Este programa foi dividido globalmente em quatro separadores, que contêm as principais funções: Informação geral, Auditoria, Resultados e Simulação.

3.2.1. Módulo Informação Geral

Neste módulo são definidas as condições que servem de referência para os restantes separadores do programa. Em primeiro lugar identificam-se: o grupo de produção, o edifício, o concelho e o país do sistema em análise. Esta informação serve apenas para identificação do sistema, à excepção do concelho que é também usado para carregar os dados meteorológicos do local. Nesta dissertação foram utilizados dados do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG).

Um dos objetivos traçados já no decorrer do estágio era a possibilidade de prever os consumos de energia anuais para os cenários considerados. No entanto, com o tempo disponível não foi possível desenvolver esta componente, mesmo que através do método simplificado da assinatura térmica do edifício. Assim, decidiu-se utilizar os dados obtidos por programas de simulação dinâmica detalhada, ficando esta componente em espera. Embora esta decisão torne o programa desenvolvido dependente destas simulações, garante

maior precisão nos resultados. Ainda assim, neste separador, é possível carregar os valores horários da temperatura do ar exterior e da radiação global. Caso se trate de um concelho ou um local fora do país que não esteja na base de dados, o utilizador deverá criar um ficheiro idêntico aos já existentes com a identificação do local e com os dados de temperatura do ar exterior e da radiação global correspondentes. Por último selecionam-se os equipamentos: o real (que está a ser analisado), o de referência (igual ao anterior, mas em estado novo) e o ideal, isto é, o equipamento com melhor desempenho existente no mercado para a mesma gama de potência. A biblioteca de equipamentos deverá estar o mais completa possível, para que se possa fazer uma comparação entre diversas marcas e de forma a abranger todas as gamas de potência necessárias.

Neste separador é também possível ter uma percepção gráfica do desempenho a cargas parciais dos dois cenários, o de referência e o ideal.

Na Figura 3.2 é apresentado um fluxograma que resume este módulo.

3.2.2. Módulo Auditoria

Na auditoria realizam-se as seguintes medições: o caudal volúmico (q) e a temperatura da água à entrada do equipamento (T_1), a temperatura da água à saída (T_2), a temperatura do ar exterior (T_3) e o consumo de energia elétrica (E). Na Figura 3.3 estão representados os pontos de medição recomendados em situação de auditoria.

Este separador é responsável pelo cálculo dos coeficientes de desempenho *COP* e *EER*, utilizando para isso os valores medidos, e foi dividido em duas partes.

A primeira parte foi desenvolvida para que os valores medidos na auditoria possam ser carregados para o programa automaticamente, de forma a poupar tempo e a evitar erros que o utilizador poderia cometer no processo. Neste tipo de instalações, para que a análise tenha valor e que os valores medidos não sejam “mascarados” pela inércia térmica, é importante que estas medições sejam feitas durante alguns dias, de preferência ao longo de uma semana ou mais. Para o efeito, a *VPS* desenvolveu um equipamento constituído por um conjunto de sensores (incluindo contador de energia) e por um *datalogger* que será responsável por registar e enviar, de minuto a minuto, as medições para uma *cloud*. Os dados são armazenados, para cada *ID*, isto é, para cada sensor, com o valor medido e o período a que ocorreu a medição. No entanto, a forma como são armazenados os dados não é prática de usar, sendo necessário agrupar todos os valores medidos em função do tempo a que

ocorreram as medições. Para isso descarregam-se os dados da nuvem utilizando uma *query* em MySQL e cria-se o ficheiro com esses dados já no formato de leitura. Na Figura 3.4 estão esquematizadas as comunicações realizadas desde a auditoria até à requisição de dados pelo utilizador deste programa.

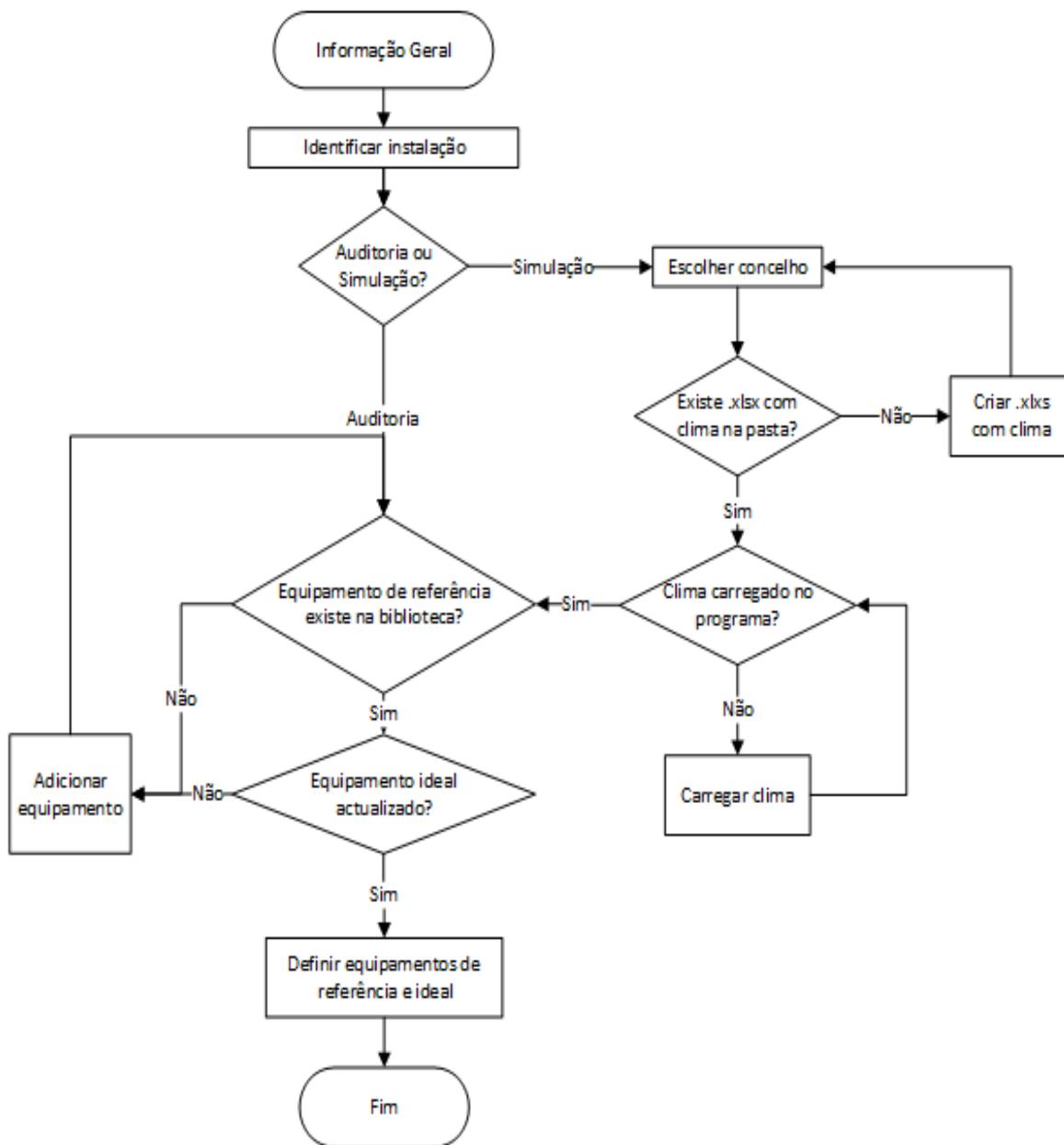


Figura 3.2. Diagrama de funcionamento do separador Informação geral.

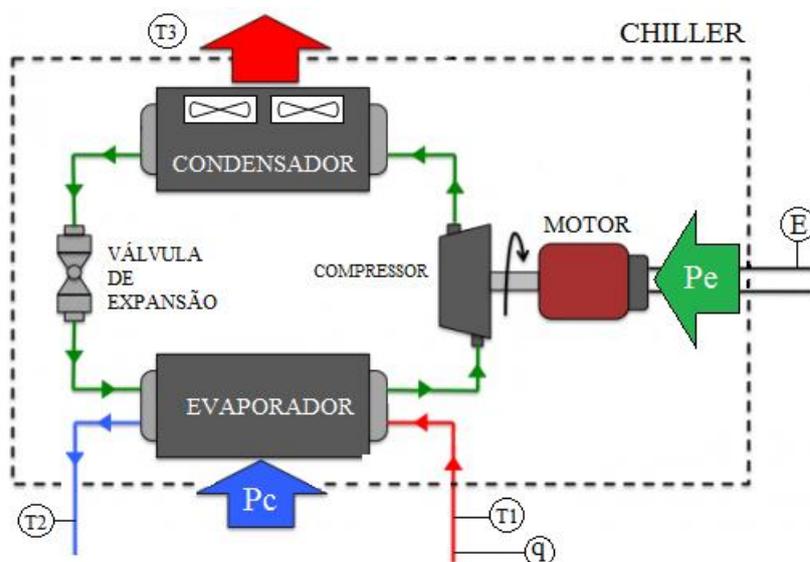


Figura 3.3. Medições a realizar na Auditoria (Adaptado de *The Cooper Union*, 2016).

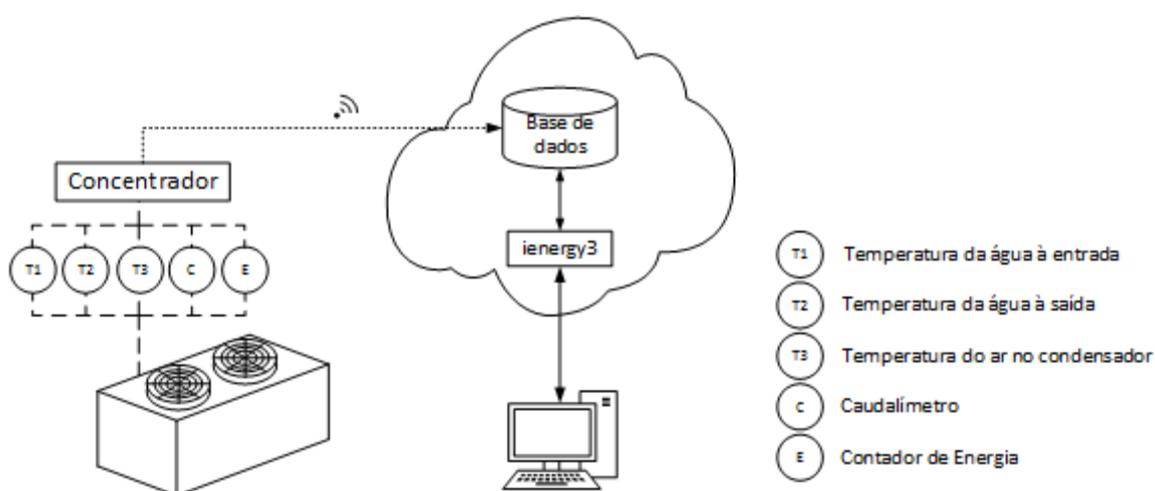


Figura 3.4. Esquema de comunicações com a *cloud*.

A segunda parte consiste na escolha do ficheiro com os dados da auditoria e no cálculo da potência de arrefecimento ou aquecimento fornecida pelo equipamento (3.3) (3.4), a potência elétrica consumida pelo sistema, o desempenho do equipamento e a comparação com os desempenhos de referência (3.1) (3.2).

Na Figura 3.5 está representado, de forma resumida, este módulo do programa.

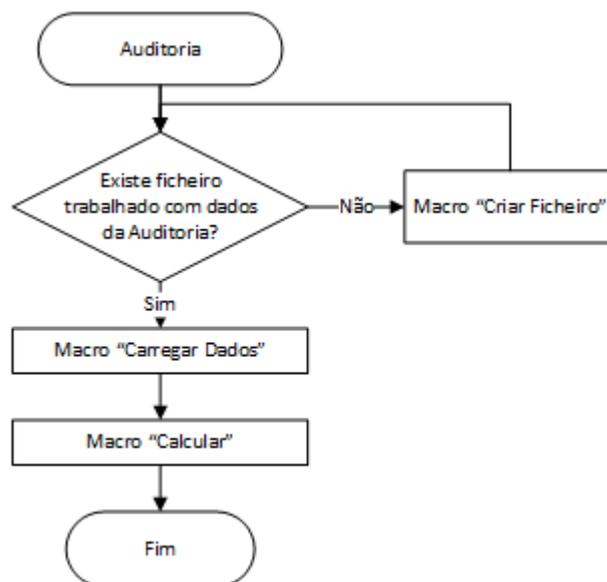


Figura 3.5. Diagrama de funcionamento do separador Auditoria.

3.2.3. Módulo Simulação

Este módulo realiza a simulação anual levando para isso em consideração a informação resultante dos módulos Informação geral e Auditoria. Para que esta simulação seja possível é ainda necessário definir a assinatura térmica do edifício, isto é, quais as cargas térmicas de arrefecimento necessárias face à variação da temperatura do ar exterior e da radiação global. Para este efeito sugere-se o recurso a programas de simulação dinâmica detalhada. Quanto mais pormenorizada for a simulação detalhada, mais precisos serão os valores obtidos para o consumo anual de energia e para as poupanças com o *retrofit* dos *Chillers* / Bombas-de-calor. No caso de não ser possível realizar a simulação dinâmica, é necessário determinar pelo menos a assinatura térmica do edifício, mesmo que de forma simplificada.

Com as previsões das necessidades térmicas do edifício e temperatura do ar exterior para o ano completo e sabendo o desempenho dos equipamentos em função da temperatura exterior, é possível calcular o consumo de energia anual (3.1) (3.3).

3.2.4. Módulo Resultados

Este módulo sumariza os resultados na forma de tabelas, simples e dinâmicas, com a informação organizada e são gerados gráficos resultantes dessas tabelas. De entre os gráficos gerados destacam-se os de:

- Desempenhos do *Chiller* / Bomba-de-calor real, de referência e ideal em função da temperatura exterior;
- Potência térmica e potência elétrica consumida em função do tempo;
- Potências consumidas real, de referência e ideal em função do tempo;
- Desempenhos real, de referência e ideal em função do tempo;
- Total do número de horas em funcionamento durante um ano para cada temperatura do ar exterior.

Com esta informação pretende-se uma análise do desempenho e do consumo de energia do equipamento, e do perfil de temperaturas a que o equipamento está sujeito. Na prática, esta última informação implica saber se este está a funcionar mais tempo próximo das condições nominais ou das cargas parciais. Assim, em caso da avaliação de propostas de substituição e dependendo da severidade do clima, é possível ajustar o equipamento cujo desempenho melhor se adequa às temperaturas exteriores.

3.3. Manual de utilizador

Neste subcapítulo são demonstrados os passos a realizar para obter os resultados desejados sobre o *Chiller* / Bomba-de-calor que se pretende avaliar.

No separador Referência, o utilizador deve preencher os campos com a informação relativa à instalação, conforme ilustrado na Figura 3.6. Estes campos são: grupo de produção, edifício, concelho, país, equipamento que se encontra instalado e o equipamento ideal, para a mesma gama de potência.

Aqui também se adicionou uma componente dedicada à simulação anual para prever os consumos, onde é possível carregar para o programa as previsões de temperaturas do ar exterior e da radiação global para o concelho definido. Esta funcionalidade foi pensada para que no futuro seja integrada no programa a capacidade de determinação da assinatura térmica do edifício e, por sua vez, realizar a simulação anual sem que seja necessário recorrer a programas “externos” de simulação dinâmica do comportamento energético dos edifícios.

No entanto, devido ao tempo disponível e à complexidade de determinar com o mínimo de rigor a assinatura térmica do edifício, esta componente não foi desenvolvida.

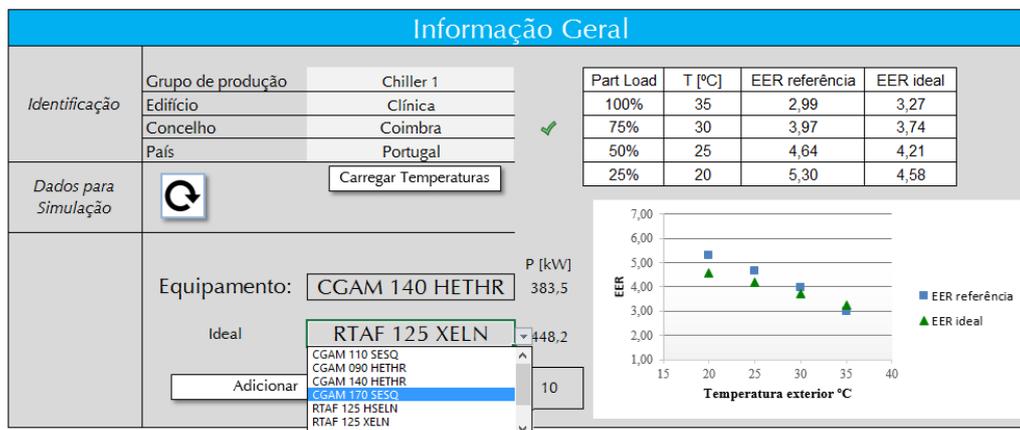


Figura 3.6. Aspeto do separador Referência.

Caso o equipamento auditado não esteja disponível na lista, este deverá ser adicionado através do botão “Adicionar”, conforme exemplificado na Figura 3.7. Aqui, esta macro adiciona o equipamento à biblioteca e atribui-lhe a classificação de desempenho de acordo com o RECS (Decreto-Lei 28, 2016). A biblioteca está demonstrada na Figura 3.8.

Figura 3.7. Adição de um Chiller à base de dados.

Marca	Modelo	Capacidade de Arrefecimento [kW]	EER	ESEER	Potência Elétrica [kW]	Rating RECS	EER			
							Full Load 100%	Part Load 75%	Part Load 50%	Part Load 25%
TRANE	CGAM 45 HE	128,3	3,14	4,2	40,9	A	3,14	3,73	4,47	4,63
TRANE	CGAM 45 SE	121,9	2,74	3,8	44,5	C	2,74	3,33	4	4,18
TRANE	RTAF 125 HSELN	453	3,14	4,74	144,3	A	3,14	3,79	4,91	5,99
TRANE	CGAM 170 SESQ	453,1	2,87	4,4	158,1	C	2,87	3,92	4,50	4,91

Figura 3.8. Base de dados de Chillers.

Depois de estabelecidas as condições que servirão de referência e de descarregados os dados da *cloud* para o período considerado, é necessário carregar o programa com as medições. Para isso, é necessário criar o ficheiro de auditoria, onde são armazenadas e organizadas as medições, em função do tempo, utilizando a macro criada para o efeito “Criar ficheiro”. De seguida a macro “Carregar dados” faz o preenchimento automático da folha de cálculo com as medições. Por último, a macro “Calcular” realiza o cálculo, para cada instante, da potência térmica do *Chiller*/Bomba-de-calor, dos desempenhos: real, de referência e ideal, e das potências consumidas: real, de referência e ideal. Este separador está representado na Figura 3.9.

C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	V
	Ambiente	Medição				Cálculo			Ajuste da Referência				Δt (minutos)
Tempo	Temperatura exterior [°C]	Temperatura avanço [°C]	Temperatura retorno [°C]	Caudal volumico [m³/s]	Energia Consumida [kWh]	Capacidade de Arrefecimento [kW]	Potência Absorvida [kW]	EER (real)	EER (referência)	EER (ideal)	Potência Referência [kW]	Potência Ideal [kW]	60
11/8/16 9:00	22,2	7	7,62	5,7	5,557	-14,83	5,557	2,7	4,10	4,56	3,62	3,25	<input type="button" value="Criar ficheiro"/> <input type="button" value="Importar dados"/> <input type="button" value="Limpar Folha"/> <input type="button" value="Calcular"/>
11/8/16 10:00	24,5	7	8,02	5,7	10,669	-24,42	10,669	2,3	4,02	4,49	6,07	5,44	
11/8/16 11:00	26,8	7	8,43	5,7	17,022	-34,24	17,022	2,0	3,76	4,20	9,11	8,15	
11/8/16 12:00	28,5	7	8,76	5,7	22,815	-42,15	22,815	1,9	3,53	3,95	11,94	10,67	
11/8/16 13:00	29,5	7	9	5,7	27,275	-47,90	27,275	1,8	3,40	3,80	14,09	12,60	
11/8/16 14:00	29,7	7	9,12	5,7	29,442	-50,77	29,442	1,7	3,37	3,77	15,07	13,47	
11/8/16 15:00	29,1	7	9,1	5,7	28,085	-50,29	28,085	1,8	3,45	3,86	14,58	13,03	
11/8/16 16:00	27,8	7	8,93	5,7	24,074	-46,22	24,074	1,9	3,62	4,06	12,77	11,38	
11/8/16 17:00	25,9	7	8,07	5,7	12,286	-25,61	12,286	2,1	3,88	4,34	6,60	5,90	
11/8/16 18:00	23,8	7	7,79	5,7	7,754	-18,90	7,754	2,4	4,04	4,51	4,68	4,19	
11/8/16 19:00	21,9	7	7,55	5,7	4,862	-13,15	4,862	2,7	4,11	4,57	3,20	2,88	

Figura 3.9. Separador Auditoria.

Por último, no separador Resultados, basta clicar no botão “Resultados” e são gerados os gráficos com as análises predefinidas, bem como as tabelas com os dados caso seja do interesse do utilizador analisá-los ao pormenor.

No separador Relatório, são organizados os resultados de forma a este poder ser entregue a outros departamentos na empresa ou até ao cliente. Apresenta-se no Anexo C um relatório para servir de exemplo do tipo de informação que inclui.

4. CASOS E METODOLOGIA DE TESTE AO FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA

No decorrer do estágio não foi possível realizar as auditorias previstas para testar a ferramenta em situações de auditoria real. Assim sendo, utilizaram-se dados relativos a simulações realizadas a dois edifícios, uma Clínica privada e uma Escola secundária, obtidos com recurso à versão 3.1 do programa de simulação dinâmica detalhada monozona *SEnergEd*, desenvolvido no DEM-FCTUC (Raimundo, 2016).

A primeira fase foi criar um *Chiller* / Bomba-de-calor do tipo ar-água fictício, com valores de desempenho a cargas parciais modestos, quando comparados com outros equipamentos previamente introduzidos na base de dados da ferramenta desenvolvida. Este equipamento procurou ilustrar o comportamento de um equipamento comum em instalações reais, com alguns anos de uso e com algum desgaste.

De seguida realizaram-se, para ambos os casos, duas simulações com o programa de simulação dinâmica *SEnergEd*. A primeira simulação, para um período de quinze dias, serviu para obter os mesmos dados que no futuro se irão medir nas auditorias energéticas. Uma vez que o *SEnergEd* realiza as simulações para intervalos de uma hora, as medições das auditorias hipotéticas são, conseqüentemente, assumidas com períodos de uma hora. A segunda simulação foi realizada para um ano inteiro, com o intuito de prever, com base nas necessidades térmicas dos edifícios e nas temperaturas do ar exterior, como será o desempenho dos três equipamentos considerados (o real, o de referência e o ideal) e o custo associado ao funcionamento de cada um nesse ano.

Tendo em conta os equipamentos encontrados nas instalações de clientes da *VPS*, maioritariamente *Chillers* ar-água para o arrefecimento e caldeiras de combustão para o aquecimento, decidiu-se considerar para teste apenas o período de arrefecimento.

Para criar artificialmente uma auditoria a um *Chiller* / Bomba-de-calor de cada um dos edifícios foi necessário desagregar o funcionamento da climatização dos edifícios pelos períodos de arrefecimento, de aquecimento e de *standby* do sistema (entendendo-se por climatização apenas as funções de arrefecimento e de aquecimento). Seguidamente recorreu-se à estratégia apropriada, da qual se segue a sua descrição para os períodos de

arrefecimento. Começou por arbitrar-se que o *Chiller* / Bomba-de-calor fictício funciona em condições nominais, ou seja, à sua potência nominal e com temperaturas de retorno e de avanço da água em circulação de 12°C e 7°C, respetivamente. De seguida calculou-se o caudal de água através da expressão (3.3). Agora, conhecendo as necessidades de arrefecimento em cada hora e assumindo constantes o caudal de água do circuito de distribuição e a temperatura de avanço da mesma (imposta igual a 7°C), determinou-se para cada instante a temperatura de retorno da água. Tendo em consideração as necessidades de arrefecimento do edifício em questão, as temperaturas do ar exterior e os valores do indicador de desempenho *EER* em cada estado de carga, calculou-se a potência elétrica consumida em cada hora pelos três *Chiller* / Bomba-de-calor em comparação (o real, que neste caso é o fictício; o de referência, igual ao real mas novo; e o ideal). O procedimento para criar uma auditoria fictícia ao *Chiller* / Bomba-de-calor durante os períodos de aquecimento é em tudo idêntica a esta, pelo que se omite a sua descrição.

4.1. Clínica privada

A simulação incide numa fração autónoma de serviços destinada a clínica privada com internamento pertencente a um pequeno edifício de serviços, o qual é constituído por esta clínica (com 1 059 m² de área total de pavimento, dos quais 927 m² climatizados) e uma farmácia (com 25 m² de área total de pavimento), existindo ainda áreas exteriores destinadas a circulação, a estacionamento automóvel e ajardinadas. A Clínica desenvolve-se em dois pisos, tem um pé-direito médio de 3,73 m e é constituída por 70 espaços interiores que incluem consultórios médicos, salas de tratamento, quartos para internamento, pavilhão de fisioterapia, salas de armazenamento de medicamentos, circulações, cozinha, despensa, sala de refeições, salas para o pessoal, instalações sanitárias, lavandaria, zonas de guarda de roupa limpa, zonas de depósito de roupa suja, escritórios, espaços para equipamentos técnicos e armazéns gerais. As simulações foram realizadas para as condições meteorológicas do concelho de Coimbra. Informação mais detalhada acerca deste edifício pode ser encontrada nos apontamentos dos Cursos de Certificação Energética de Edifícios ministrados pelo DEM-FCTUC (Raimundo et al. 2011).

Os resultados da simulação dinâmica realizada pelo programa SEnergEd sugerem uma potência térmica útil instalada para a função de arrefecimento do sistema de climatização de 117 kW. Selecionaram-se dois Chillers do tipo ar-água da marca TRANE: um para representar o Chiller real e o de referência (o modelo instalado) e um dos melhores desta marca nesta gama de potência para representar o equipamento ideal. A informação relevante sobre estes modelos está representada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Equipamentos de referência e ideal para o caso da clínica.

Cenário	Modelo	Potência Nominal [kW]	EER			
			35°C	30°C	25°C	20°C
Real e de Referência	CGAM 45 SE	121,9	2,74	3,33	4,00	4,18
Ideal	CGAM 45 HE	128,3	3,14	3,73	4,47	4,63

A simulação dinâmica para obter os dados relativos à auditoria fictícia foi realizada levando em consideração o funcionamento do sistema de climatização da clínica durante os primeiros quinze dias de agosto.

4.2. Escola secundária

O segundo caso assenta numa Escola secundária localizada na cidade de Coimbra. Este edifício foi analisado em termos energéticos por Claro (2015) no âmbito da sua tese de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (MIEM).

Não incluindo os espaços considerados exteriores (onde está incluído o Pavilhão gimnodesportivo, campos de jogos, recreios, etc.), o edificado da Escola secundária tem um pé-direito médio de 3 m e uma área total de pavimento de 11 644 m², dos quais 11 246 m² são climatizados. Da área climatizada, 7 669 m² são referentes às salas de aula, 3 171 m² referentes a circulações e 406 m² são ocupados pelos balneários. Esta escola é constituída por cinco blocos, os quais têm entre 1 e 4 pisos. Para mais detalhes sobre este edifício consultar o relatório da dissertação de MIEM de Claro (2015).

Os resultados do programa *SEnergEd* mostram que a potência útil de arrefecimento necessária para a climatização do edifício é de 417 kW. Foram escolhidos dois Chillers do tipo ar-água, também da empresa TRANE: um para representar o Chiller real e o de referência (o modelo instalado) e um dos melhores desta marca nesta gama de potência para representar o equipamento ideal. A informação relevante sobre estes Chillers está representada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Equipamentos de referência e ideal da escola secundária.

Cenário	Modelo	Potência Nominal [kW]	EER			
			35°C	30°C	25°C	20°C
Real e de Referência	CGAM 170 SESQ	453,1	2,87	3,92	4,50	4,91
Ideal	RTAF 125 HSELN	453	3,14	3,79	4,91	5,99

A simulação para adquirir os dados relativos à auditoria fictícia foi realizada levando em consideração o funcionamento do sistema de climatização da clínica durante os últimos quinze dias de setembro.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS TESTES AO FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA

Neste Capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos no decurso dos testes à aplicabilidade e ao desempenho da ferramenta de análise desenvolvida. Os resultados foram obtidos para os períodos de funcionamento em modo de arrefecimento dos Chillers incorporados nos sistemas de climatização dos dois edifícios descritos no Capítulo anterior: uma Clínica privada com internamento e uma Escola secundária, ambos localizados em Coimbra.

5.1. Clínica privada

Nesta Secção são discutidos os resultados da auditoria (hipotética) realizada à Clínica e da subsequente simulação anual.

Na Figura 5.1 estão representados os valores estimados para o indicador de desempenho EER, em função da temperatura do ar exterior, assim como os valores de referência para comparação.

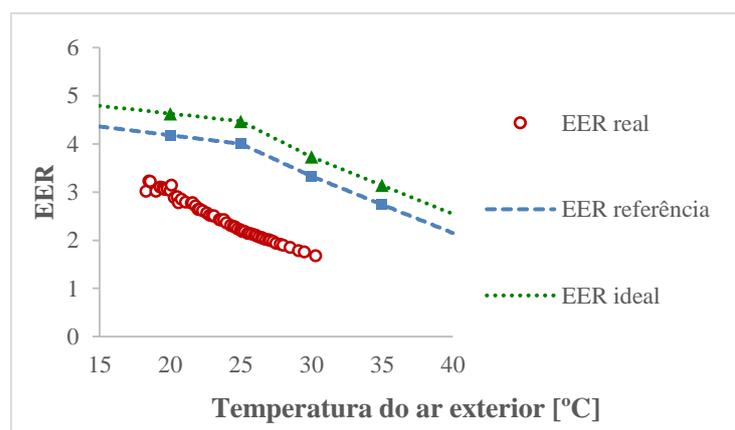


Figura 5.1. Clínica – Desempenho do *Chiller* real, do de referência e do ideal em função da temperatura do ar exterior.

Como se pode verificar, o desempenho do *Chiller* real é substancialmente inferior ao do mesmo equipamento quando novo (o de referência), sendo a diferença maior para valores de temperatura próximos dos 25°C. Esta diferença indica que pode existir algum problema com o equipamento ou este apresentar já bastante desgaste, levantando questões acerca de ser ou não vantajoso continuar a sua utilização.

Apresenta-se na Figura 5.2 o número de horas para cada valor em concreto da temperatura do ar exterior, durante os 15 dias (primeira quinzena de agosto) em que decorreu a auditoria “fictícia”. Na Figura 5.3 apresentam-se apenas o número de horas para cada valor em concreto da temperatura do ar exterior, em que o *Chiller* esteve em funcionamento.

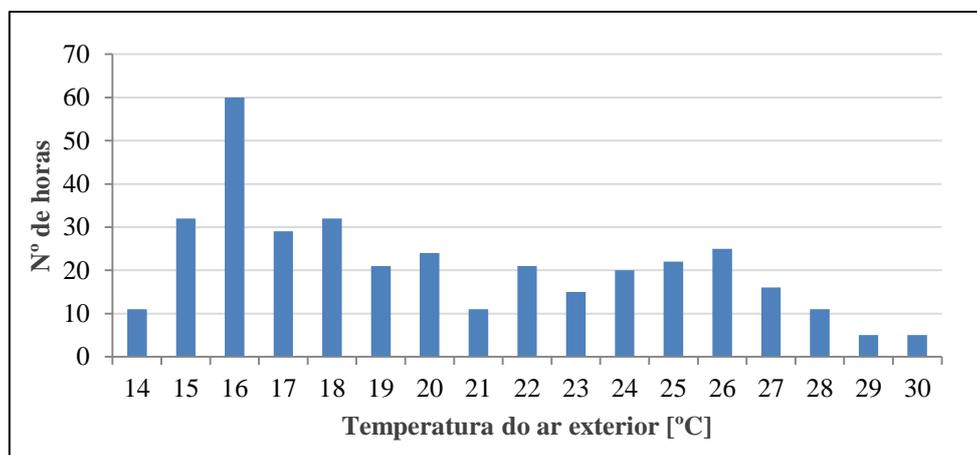


Figura 5.2. Clínica -Nº de horas a cada valor de temperatura do ar exterior, durante os 15 dias da auditoria.

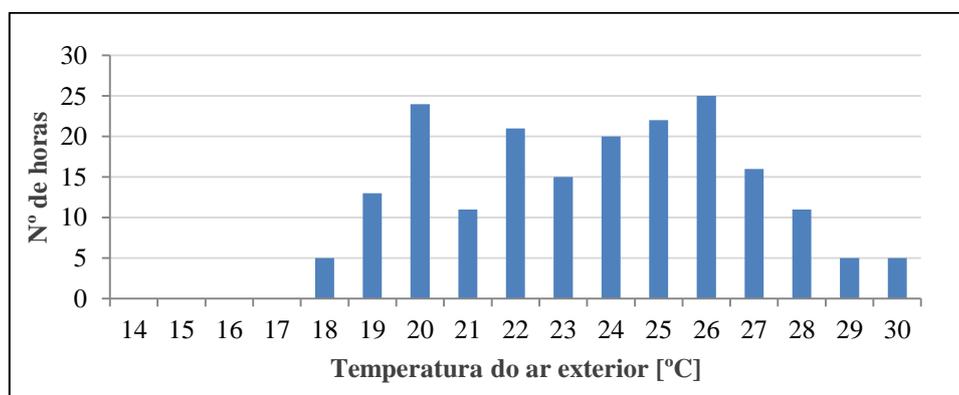


Figura 5.3. Clínica - Nº de horas de a cada valor de temperatura do ar exterior, durante os 15 dias da auditoria, com o *Chiller* em funcionamento.

Analisando os gráficos apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3 é possível perceber que as temperaturas do ar exterior durante este período de 15 não foram altas, atingindo por pouco tempo os 30°C. No caso de um estudo de substituição do *Chiller*, este perfil de temperaturas pode induzir que a eficiência global seja beneficiada com um equipamento com melhor desempenho a cargas parciais, embora o período considerado seja demasiado curto para estimativas fiáveis.

Na Figura 5.4 estão representadas a potência térmica necessária para o arrefecimento no edifício e as temperaturas do ar exterior durante o período de 15 dias em que decorreu a auditoria. Quando não há necessidades de arrefecimento, apesar de existir na realidade consumo de *standby*, este foi desprezado neste estudo.

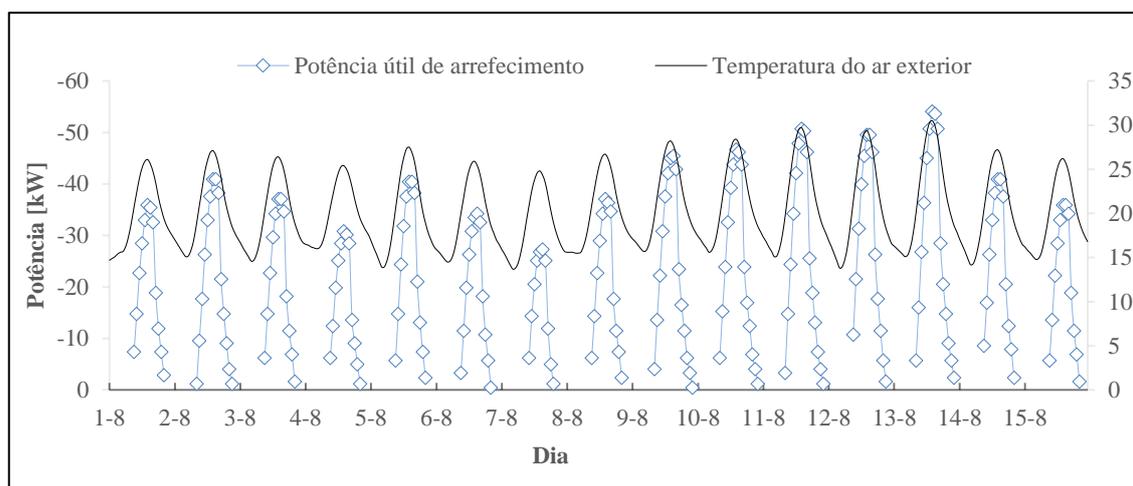


Figura 5.4. Clínica - Potência útil necessária para o arrefecimento e temperatura do ar exterior durante o período da auditoria.

Como era expectável, as necessidades de arrefecimento do edifício aumentam com o aumento da temperatura do ar exterior. Por convenção decidiu-se utilizar o sinal negativo para representar as potências de arrefecimento, uma vez que é energia retirada do sistema.

Na Figura 5.5 está representada, a par da potência necessária para o arrefecimento do edifício, a potência elétrica consumida pelo equipamento durante o período em que decorreu a auditoria fictícia.

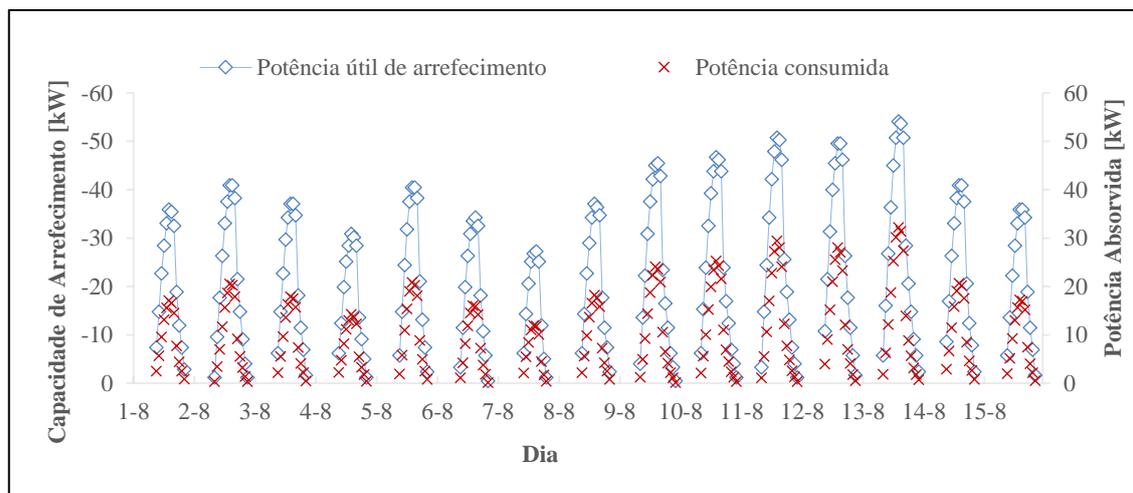


Figura 5.5. Clínica – Potência útil necessária para o arrefecimento do edifício e potência consumida pelo *Chiller* durante o período da auditoria.

A potência consumida pelo *Chiller* será tanto menor quanto maior o seu desempenho, para a mesma necessidade de arrefecimento do edifício. As potências consumidas dos três equipamentos, do real, do de referência e do ideal estão representadas na Figura 5.6. Constata-se que a potência consumida pelo equipamento ideal e pelo de referência é bastante menor do que a consumida pelo equipamento real, uma vez que o seu desempenho é substancialmente maior.

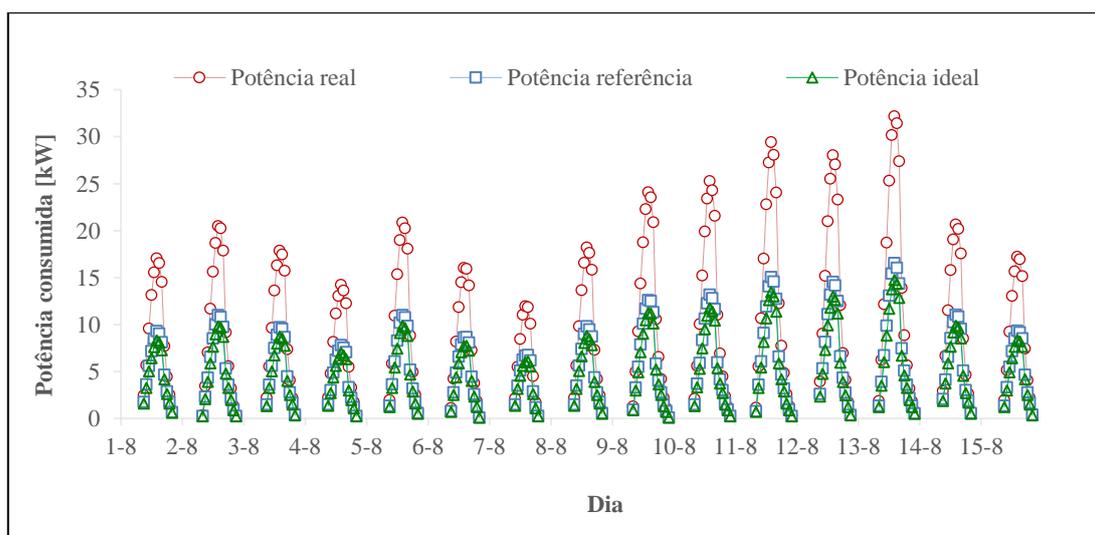


Figura 5.6. Clínica - Potências consumidas pelos *Chillers*: real, de referência e ideal, durante o período da auditoria.

Na Figura 5.7 está representado o indicador de desempenho *EER* estimado para o *Chiller* real, para o de referência e para o ideal, no decurso do período de duração da auditoria. Verifica-se que o desempenho diminui até ao período da tarde devido ao aumento da temperatura do ar exterior e volta a aumentar com a diminuição desta temperatura.

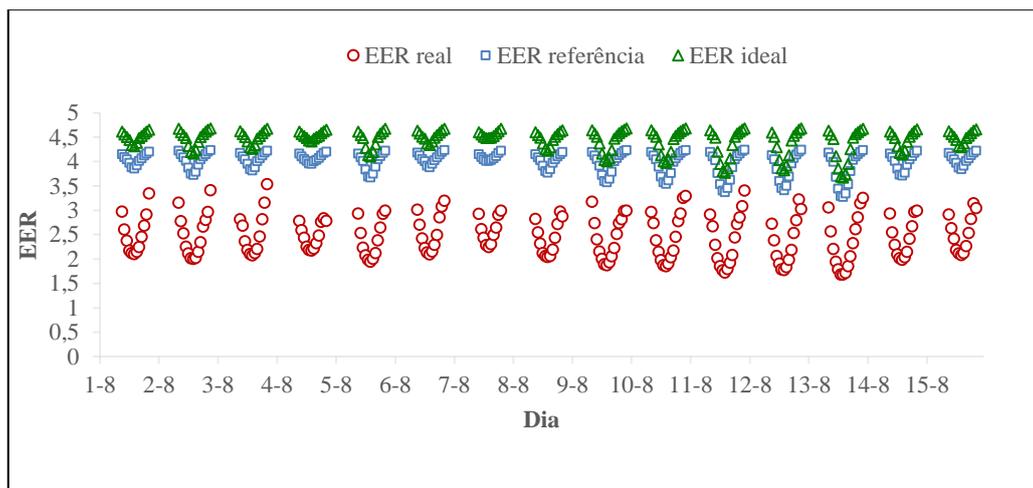


Figura 5.7. Clínica – *EER* do *Chiller* real, do de referência e do ideal durante o período da auditoria.

Para obter o custo de funcionamento dos três cenários considerados, fez-se o somatório dos consumos, em kWh, e de seguida foi integrado no programa um simulador de tarifários de energia elétrica desenvolvido pela equipa de GE. Este simulador calcula o preço da energia tendo em conta os períodos horários (super-vazio, vazio, cheia, ponta) que variam com a hora legal de Inverno e de Verão, e dias da semana, úteis e não úteis. Para esta situação considerou-se um contrato de energia de Baixa Tensão Especial (BTE), podendo ser integrado nesta ferramenta o simulador de qualquer tipo de tensão.

Na Tabela 5.1 estão sumarizados os resultados para o período de duração da auditoria, apresentando-se o consumo de energia de cada equipamento, o correspondente gasto e a poupança conseguida em cada cenário face à situação real. Verifica-se que, num período de 15 dias, o equipamento gastou mais 134 euros do que gastaria, nas mesmas condições, o equipamento de referência, e mais 150 euros do que gastaria o equipamento ideal.

Tabela 5.1. Clínica - Resultados da auditoria (hipotética).

Auditoria	Consumo [kWh]	Gasto [€]	Poupança [€]
Real	2 031,9	304	---
Referência	1 134,1	170	134
Ideal	1 015,4	154	150

O período de 15 dias é demasiado curto para se poder estimar um retorno financeiro de um investimento de *retrofit*. Desta forma, realizou-se uma simulação para o ano completo com os mesmos equipamentos. Devido à elevada densidade de pontos na simulação anual, os gráficos relativos à simulação encontram-se no anexo A. Os resultados estimados encontram-se resumidos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Clínica - Resultados da simulação anual.

Simulação Anual	Consumo [kWh/ano]	Gasto [€/ano]	Poupança [€/ano]
Real	19 855,6	2 482	---
Referência	11 003,7	1 389	1 093
Ideal	9 851,5	1 244	1 238

Considerando o período anual, percebe-se que a poupança anual (estimada) no caso de repor o equipamento às condições de referência e de substituição pelo equipamento ideal são de 1 093 e 1 238 euros anuais, respetivamente. Face a este valor, poderá ser vantajoso investir no arranjo/*retrofit* do equipamento, mais até do que na substituição pelo equipamento ideal.

De modo a realizar uma análise económica simplificada, na Tabela 5.3 está representado o preço de venda ao público (PVP) de cada equipamento e respetivo *payback*.

Verifica-se que o *payback* de ambos investimentos de substituição é cerca de 13 anos. Acrescem ainda os custos de transporte, instalação e ensaio de arranque, os quais levariam a que o *payback* tenha ainda um valor ligeiramente superior. Como não se sabe à

partida qual o custo de uma intervenção no equipamento existente, seria interessante, neste caso, fazer um estudo detalhado do equipamento, para perceber que componentes deveriam ser arrançados, melhorados ou substituídos.

Tabela 5.3. Clínica - PVP dos equipamentos e respetivo *payback*.

	Investimento [€]	<i>Payback</i> [anos]
(referência) CGAM 45 SE	13 917 (PVP)	12,7
(ideal) CGAM 45 HE	16 361 (PVP)	13,2

5.2. Escola secundária

Neste subcapítulo são apresentados os resultados da auditoria (hipotética) realizada à Escola secundária e da subsequente simulação anual.

Na Figura 5.8 está representado o resultado obtido para o indicador de desempenho *EER*, a cada temperatura do ar exterior, para os três *Chillers* testados: o instalado (designado por real), o de referência (igual ao real mas em estado novo) e o ideal (um dos melhores dentro da gama de potência em questão). Tal como verificado no caso da clínica, o desempenho do *Chiller* real é substancialmente inferior ao dos equipamentos de referência e ideal.

Neste caso também pode haver algum problema com o equipamento real ou este estar já bastante degradado. No entanto, esta informação é insuficiente para saber se este deve ser substituído ou arrançado.

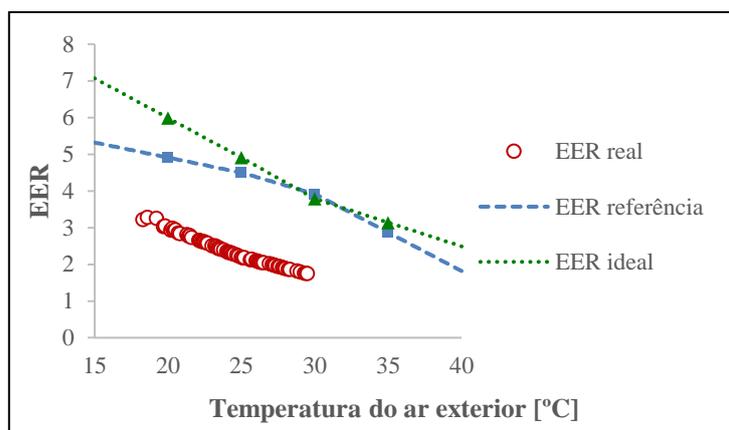


Figura 5.8. Escola secundária - Desempenho do *Chiller* real, do de referência e do ideal em função da temperatura do ar exterior.

Na Figura 5.9 e Figura 5.10 estão representados o acumulado das temperaturas exteriores durante o período de funcionamento e total.

Apresenta-se na Figura 5.9 o número de horas para cada valor em concreto da temperatura do ar exterior, durante os 15 dias (segunda quinzena de setembro) em que decorreu a auditoria “fictícia”. Na Figura 5.10 apresentam-se apenas o número de horas para cada valor em concreto da temperatura do ar exterior em que o *Chiller* esteve em funcionamento.

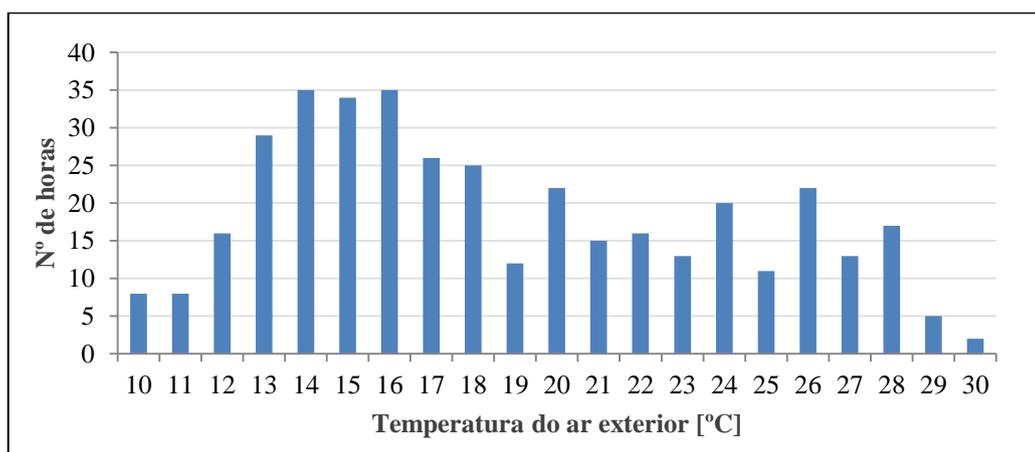


Figura 5.9. Escola secundária - Nº de horas a cada valor de temperatura do ar exterior, durante os 15 dias da auditoria.

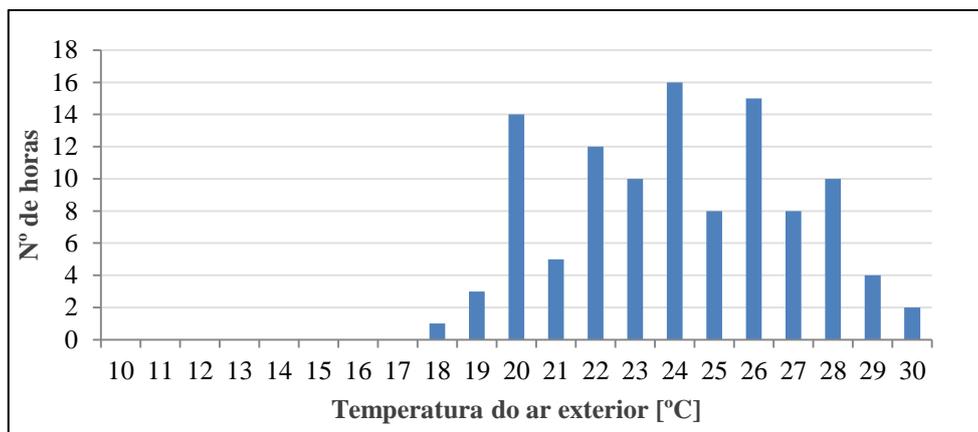


Figura 5.10. Escola secundária - Nº de horas de a cada valor de temperatura do ar exterior, durante os 15 dias da auditoria, com o *Chiller* em funcionamento.

Na Figura 5.11 estão representadas a potência térmica necessária para o arrefecimento no edifício e as temperaturas do ar exterior durante o período de 15 dias em que decorreu a auditoria.

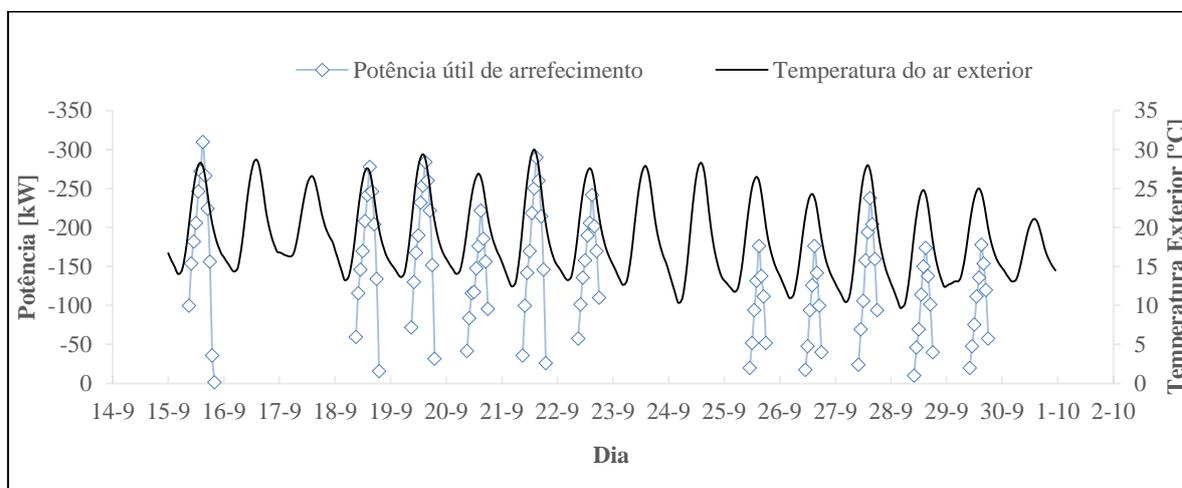


Figura 5.11. Escola secundária - Potência útil necessária para o arrefecimento e temperatura do ar exterior durante o período da auditoria.

Neste caso, também foi desprezado o consumo de *standby* nos períodos em que não há necessidades de arrefecimento. Aqui é possível identificar os dias de fim de semana, uma vez que este edifício está encerrado e as necessidades de arrefecimento não existem.

Na Figura 5.12 está representada, a par da necessidade térmica para o arrefecimento da Escola, a potência elétrica consumida pelo equipamento real durante o período de 15 dias em que decorreu a auditoria.

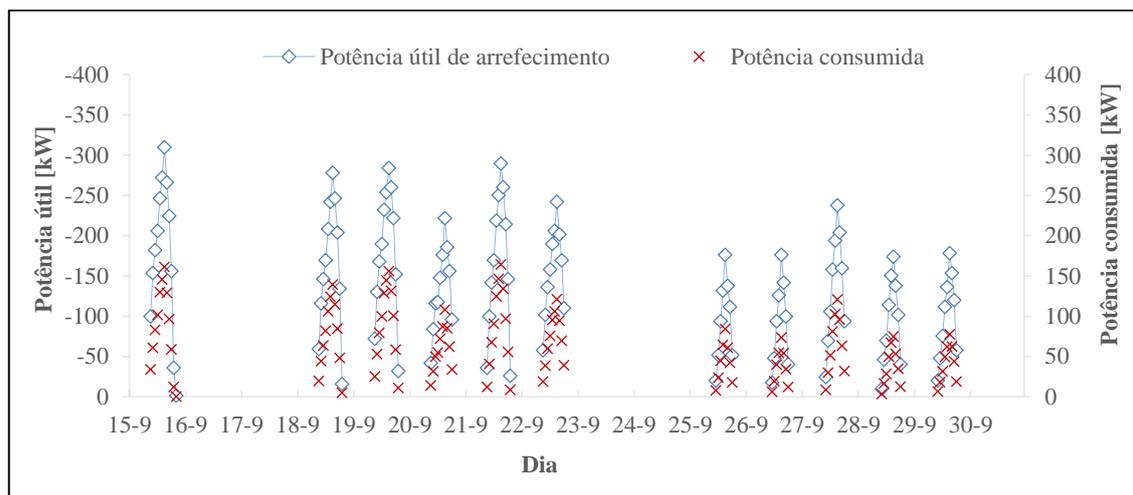


Figura 5.12. Escola secundária - Potência útil necessária para o arrefecimento do edifício e potência consumida pelo Chiller durante o período da auditoria.

A potência consumida será tanto menor quanto maior o desempenho do equipamento em questão., para a mesma necessidade de arrefecimento. As potências consumidas pelos três *Chillers* alternativos para o arrefecimento da Escola durante o período em que supostamente decorreu a auditoria estão representados na Figura 5.13. Verifica-se que a potência consumida pelo equipamento real é consideravelmente superior à consumida pelos outros dois equipamentos.

Na Figura 5.14 está representado o indicador de desempenho *EER* estimado para o *Chiller* real, para o de referência e para o ideal no decurso do período de duração da auditoria. Verifica-se que, para todos eles, o desempenho diminui até ao período da tarde devido ao aumento da temperatura do ar exterior e volta a aumentar com a diminuição desta temperatura.

Tal como na simulação realizada na Clínica, para se obter o gasto em energia pelos três *Chillers* alternativos, considerados para a Escola secundária, foram inseridos os consumos, em kWh, no simulador de tarifários de energia elétrica.

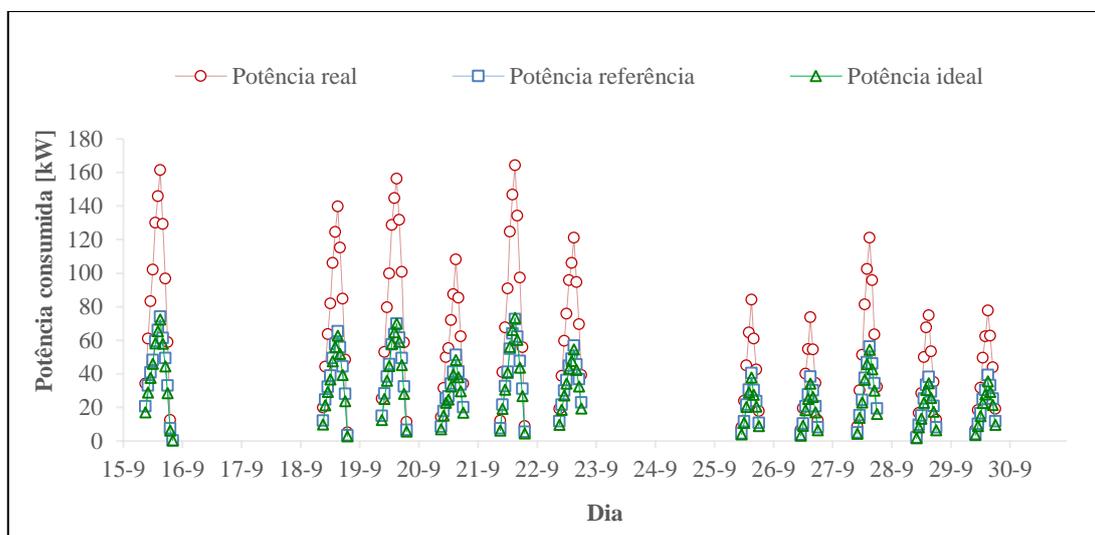


Figura 5.13. Escola secundária - Potências consumidas pelos Chillers: real, de referência e ideal durante o período da auditoria.

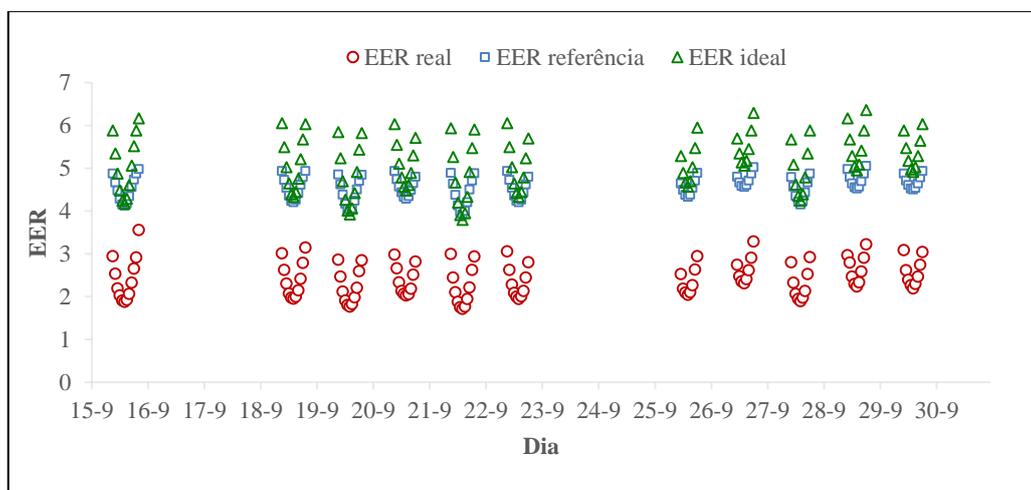


Figura 5.14. Escola secundária - EER do Chiller real, do de referência e do ideal durante o período da auditoria.

Na Tabela 5.4 estão sumarizados os resultados para o período de duração da auditoria, apresentando-se o consumo de energia de cada equipamento, o correspondente gasto e a poupança conseguida em cada cenário em relação à situação real. Verifica-se que, num período de duas semanas, o equipamento gastou em energia mais 537 euros do que gastaria, nas mesmas condições, o equipamento de referência, e mais 574 euros do que gastaria o equipamento ideal.

Tabela 5.4. Escola secundária - Resultados da auditoria (hipotética) ao *Chiller*.

Auditoria	Consumo [kWh]	Gasto [€]	Poupança [€]
Real	7 039,7	1056	-
Referência	3 460,5	519	537
Ideal	3 212,9	482	574

Mais uma vez, para se poder estimar o retorno financeiro de um investimento de *retrofit*, realizou-se uma simulação, para o ano completo, com os mesmos equipamentos. Devido à elevada densidade de pontos na simulação anual, os gráficos relativos à simulação encontram-se no anexo B. Os resultados estimados encontram-se resumidos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Escola secundária - Resultados da simulação anual.

Simulação Anual	Consumo [kWh/ano]	Gasto [€/ano]	Poupança [€/ano]
Real	88 972,9	10 605	-
Referência	45 717,9	5 451	5 154
Ideal	41 343,8	4 906	5 699

Considerando o período anual, percebe-se que a poupança anual (estimada) no caso de repor o equipamento às condições de referência e de substituição pelo equipamento ideal são de 5 154 e 5 699 euros anuais, respetivamente. Importa saber agora qual o custo de cada solução e calcular *payback*.

De modo a realizar uma análise económica simplificada, na Tabela 5.6 está representado o preço de venda ao público (PVP) de cada equipamento e respetivo *payback* de cada solução: *retrofit* do equipamento existente e substituição pelo equipamento ideal.

Tabela 5.6. Escola secundária – Custo do investimento e respetivo *payback*.

	Investimento [€]	<i>Payback</i> [anos]
(referência) CGAM 170 SESQ	20 000 (especulado)	3,9
(ideal) RTAF 125 HSELN	63 886 (PVP)	11,2

Especulando um custo de 20 000 euros no arranjo/*retrofit* do *Chiller* instalado, que aumente o seu desempenho para os valores originais de referência, o *payback* seria de aproximadamente 4 anos. Verifica-se que no caso da substituição do equipamento pelo modelo ideal o *payback* passa para cerca de 11 anos. No caso do *Chiller* ideal acrescem ainda os custos de transporte, instalação e ensaio de arranque, os quais levariam a que o *payback* tenha ainda um valor ligeiramente superior a 11 anos. Esta análise motiva mais uma vez um estudo minucioso do *Chiller* instalado para perceber qual o custo de *retrofit*, uma vez que o tempo de retorno na substituição pelo modelo ideal é demasiado longo.

6. CONCLUSÕES

A presente dissertação decorreu sob a forma de estágio em ambiente empresarial. O objetivo do trabalho centrou-se no desenvolvimento de uma ferramenta informática de apoio à realização de auditorias de avaliação do desempenho energético de *Chillers*/bombas-de-calor pertencentes aos sistemas de climatização instalados nos edifícios.

A ferramenta desenvolvida assenta na comparação do indicador de desempenho do equipamento instalado em ambiente real (funcionando a carga parcial ou total) com duas referências: os valores de desempenho do equipamento auditado em “novo” e do melhor equipamento existente no mercado. Quando aliada a outras ferramentas de simulação dinâmica permite obter estimativas de custos anuais para os cenários considerados e assim tomar decisões sobre eventuais medidas de melhoria do desempenho energético dos equipamentos auditados.

Chegado o fim desta dissertação pode-se afirmar que quase todos os objetivos propostos foram cumpridos. Durante este percurso retiraram-se as conclusões que se apresentam a seguir.

- No processo de desenvolvimento de uma ferramenta ou produto a fase do planeamento é essencial. O tempo usado para investigar e definir a melhor solução, embora pareça inicialmente um impasse, pode levar a melhores resultados no futuro.
- O *MS Excel*, por se tratar de um *software* baseado em folhas de cálculo, é uma ferramenta universal em engenharia, com uma grande capacidade de ajustar as soluções desenvolvidas a novas dificuldades e de integrar outras ferramentas *Excel*, ou parte delas.
- O *VBA*, apesar de dificultar e tornar um pouco mais lenta a fase do desenvolvimento, compensa aquando da utilização do programa na rapidez de processamento, na organização de processos e eliminação de tarefas morosas e repetitivas.

- Apesar de não ter existido uma auditoria real, com as auditorias hipotéticas criadas, foi possível testar as capacidades e a funcionalidade da ferramenta desenvolvida. Os resultados da auditoria são obtidos quase instantaneamente (depois de recolhidos os valores obtidos nas medições) e permitem avaliar com facilidade o desempenho do equipamento instalado e compará-lo com o do mesmo equipamento em estado novo e com o de um equipamento semelhante de performance superior.
- Para que os resultados sejam fiáveis as auditorias devem decorrer durante pelo menos uma semana. Numa auditoria real, as medições podem trazer incertezas e flutuações com impacto significativo sobre a análise, potenciando erros na fase de tomada de decisão. Quanto maior o período de amostragem menor será a presença destes fatores.
- Analisando os resultados obtidos para os dois casos selecionados para testar o comportamento da ferramenta informática desenvolvida, constatou-se a sua grande utilidade na previsão dos indicadores de desempenho dos Chillers / Bombas-de-calor auditados e na sua comparação com o desempenho do mesmo equipamento em estado novo e com o de um equipamento semelhante de performance superior. É obvio que esta informação é necessária, mas não é suficiente, para uma tomada de decisão suficientemente informada sobre a substituição ou o *retrofit* dos equipamentos, a qual terá de assentar também numa análise de viabilidade económica.

7. REFERÊNCIAS

- ADENE (2016), Certificação energética de edifícios. Acedido a 25 de Maio de 2016, em: <http://www.adene.pt/certificacao-energetica-de-edificios>
- Adnot, J. et al. (2007). Field benchmarking and Market development for Audit methods in Air Conditioning (AUDITAC) final report. Intelligent Energy Europe.
- Afram, A., Janabi-Sharifi, F. (2014). Review of modeling methods for HVAC systems, *Applied Thermal Engineering*, 67, pp. 507–519.
- Bertagnolio, S., LeBrun, J., André, P. (2009). Development and use of equation based simulation tools to support audit of commercial buildings.
- Chua K.J., Chou S.K., Yang W.M., Yan J. (2013). Achieving better energy-efficient air conditioning – a review of technologies and strategies. *Applied Energy* 2013,104, pp. 87–104.
- Claro, J.A. (2015). Viabilidade da instalação em escolas secundárias de sistemas de geração em regime de produção para autoconsumo, Tese de MIEM (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Coimbra, Julho de 2015.
- Cooper Union Engineering Faculty (2016), “Building Sustainability into Control Systems”. Acedido em 29 de Junho de 2016, em <https://engfac.cooper.edu/melody/411>
- Decreto-Lei 28/2016 (2016). Republicação do Decreto-Lei 118/2013, Regime do Sistema de Certificação Energética de Edifícios, Diário da República, 1ª série - N.º 119, de 23 de junho de 2016.
- DGEG (2015), ENERGIA em Portugal 2013. Direcção Geral de Energia e Geologia
- Directiva 2012/27/UE (2102). Diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de Outubro de 2012 relativa à eficiência energética que altera as Directivas 2009/125/CE e 2010/30/EU e revoga as Directivas 2004/8/CE e 2006/32/CE
- EN 14511 (2013), Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling- Part 3: Test methods. European Committee for standardization. Brussels
- Eurostat (2014a), Energy dependence. <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/graph.do?tab=graph&plugin=1&pcode=tsdcc310&language=en&toolbox=data>, Acedido em 1 Junho de 2016.
- Eurostat (2014b), Share of renewable energy in gross final energy consumption, http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/graph.do?tab=graph&plugin=1&pcode=t2020_31&language=en&toolbox=data, Acedido em 1 Junho de 2016.
- Eurovent (2016), Eurovent certification program (LCP-HP, http://www.eurovent-certification.com/en/Certification_Programmes/Programme_Descriptions.php?lg=en&rub=03&srub=01&select_prog=LCP-HP, Acedido em 1 Junho de 2016.

- IEA (2016). Energy Policies of IEA Countries, Portugal 2016 Review. International Energy Agency.
- IPMVP (2012). International Performance Measurement & Verification Protocol (vol 1, 2 & 3), Efficiency Valuation Organization, www.evo-world.org.
- Lee, P., Lam, P.T.I., Lee, W.L., Chan, E.H.W. (2015). Analysis of an air-cooled chiller replacement project using a probabilistic approach for energy performance contracts, Applied Energy, 171,pp. 415-428.
- Raimundo, A.M.; Gaspar, A.R. e Lamas, F.B. (2011), Projeto RSECE de um edifício de serviços (caso prático), Cursos de formação sobre SCE, DEM-FCTUC.
- Raimundo, A.M. (2016). SEnergEd - *software* de simulação do comportamento energético de edifícios, versão 3.1, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- TRANE (2016). Catálogo técnico RTAF 125HSELN, CGAM 170 SESQ CGAM 45 SE, CGAM 45 HE.

ANEXO A – SIMULAÇÃO ANUAL NA CLÍNICA

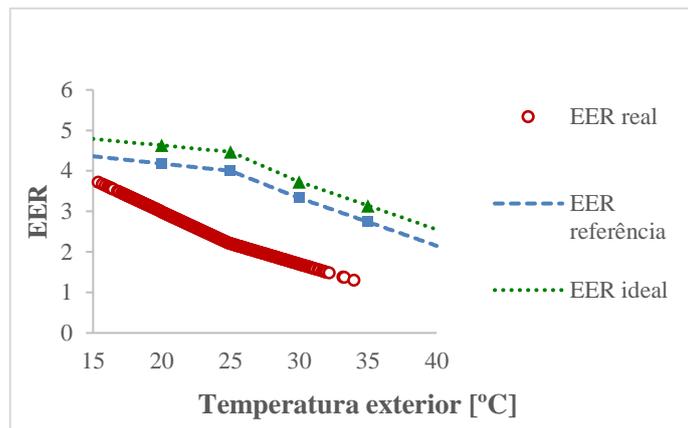


Figura A.1. Clínica - Desempenho real, de referência e ideal do *Chiller* em modo de arrefecimento em função da temperatura do ar exterior.

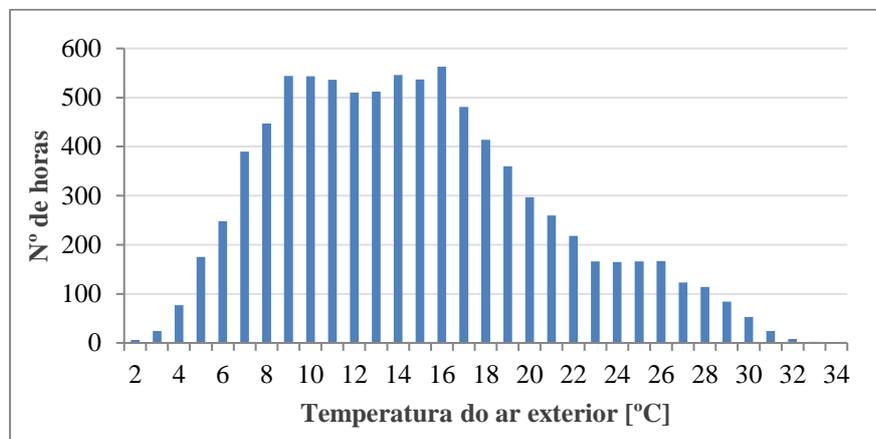


Figura A.2. Clínica - Somatório anual de horas a cada temperatura do ar exterior em Coimbra.

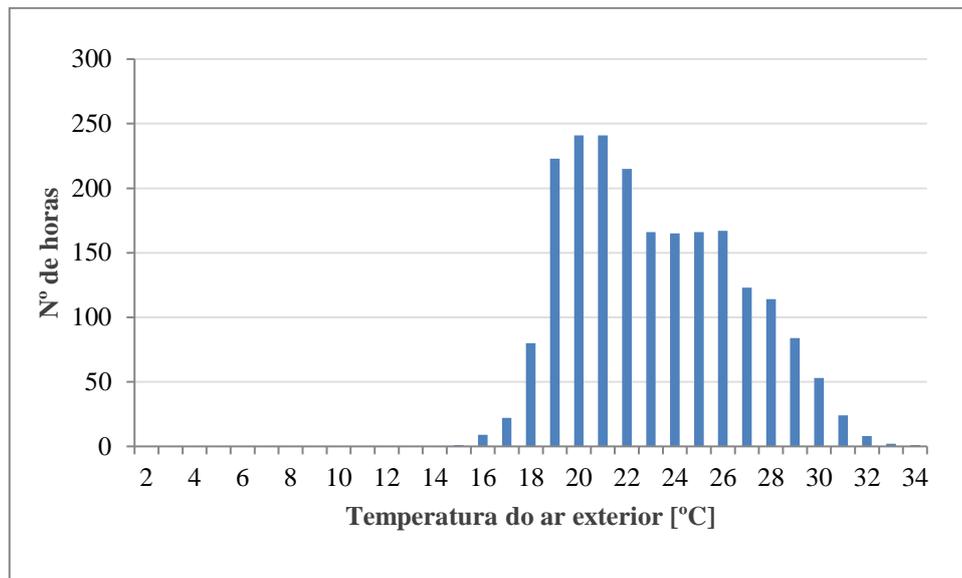


Figura A.3. Clínica - Somatório anual de horas de funcionamento do *Chiller*.

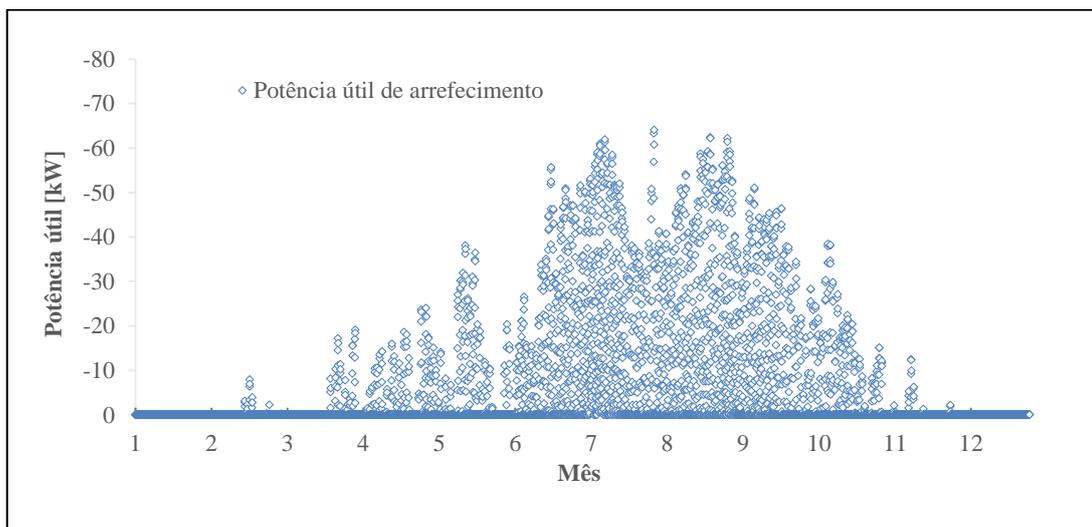


Figura A.4. Clínica - Potência útil necessária para o arrefecimento do edifício durante 1 ano.

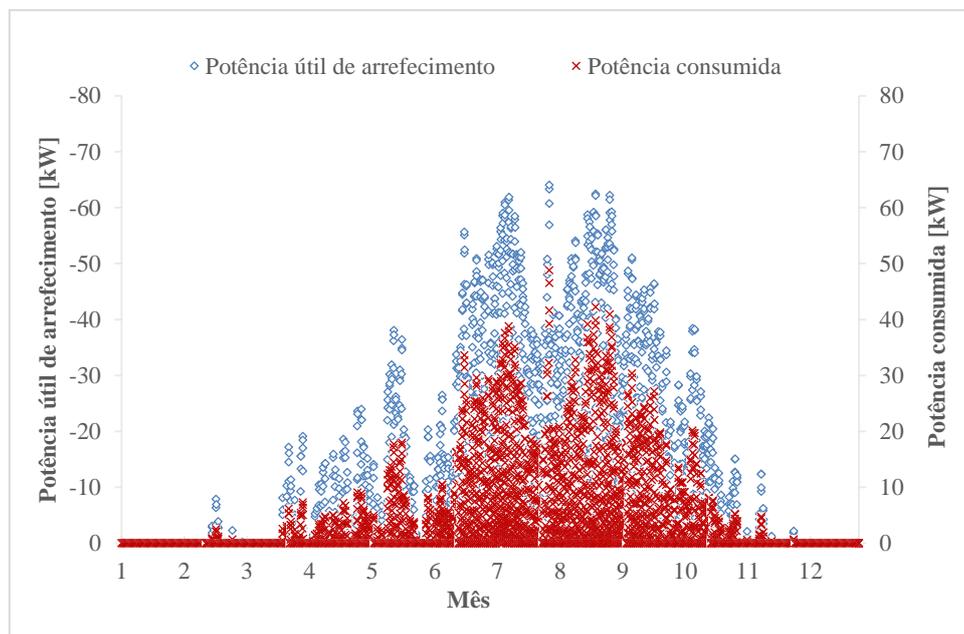


Figura A.5. Clínica – Potência necessária para o arrefecimento do edifício e potência consumida pelo *Chiller* durante 1 ano.

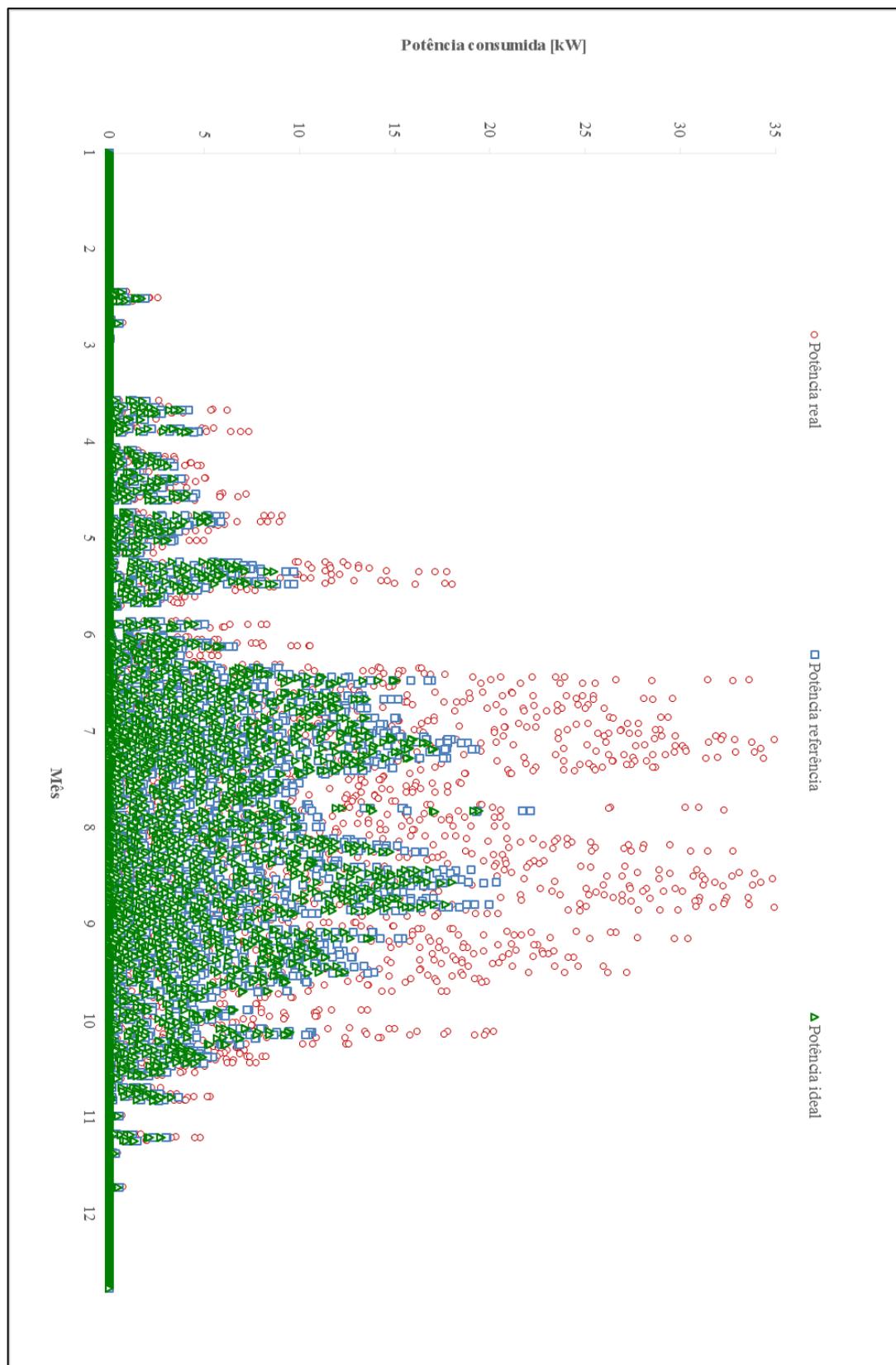


Figura A.6. Clínica - Potências consumidas pelo *Chiller* em modo de arrefecimento em função do tempo: real, de referência e ideal.

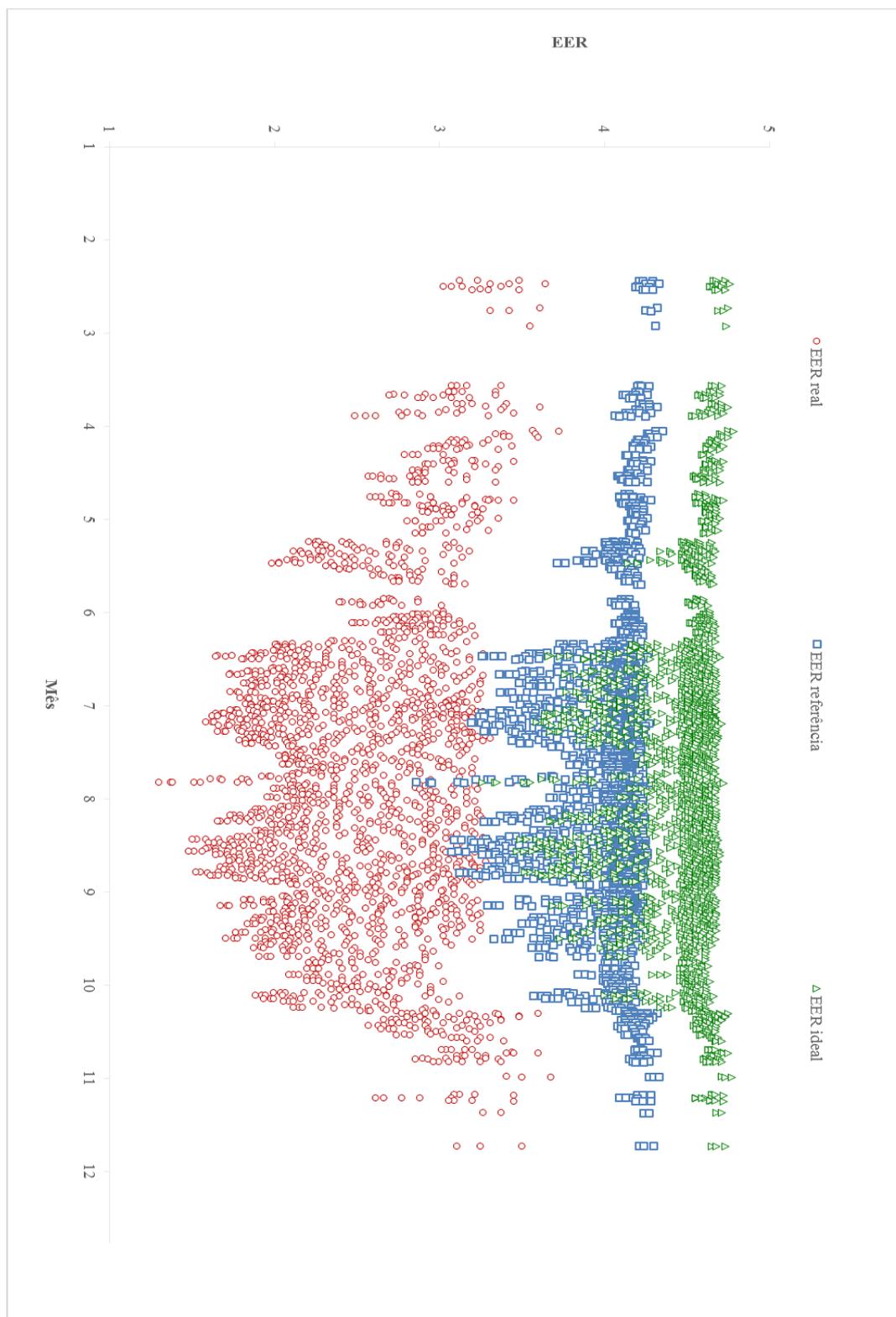


Figura A.7. Clínica – EER do Chiller em modo de arrefecimento em função do tempo: EER real, EER de referência e EER ideal.

ANEXO B – SIMULAÇÃO ANUAL NA ESCOLA SECUNDÁRIA

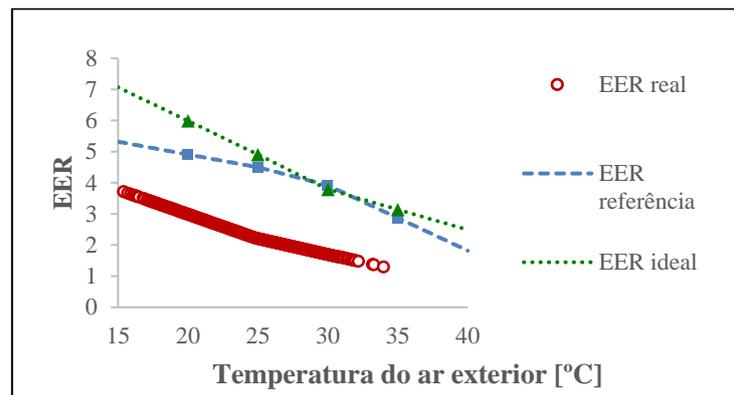


Figura B.1. Escola secundária - Desempenho real, de referência e ideal do *Chiller* em modo de arrefecimento em função da temperatura do ar exterior.

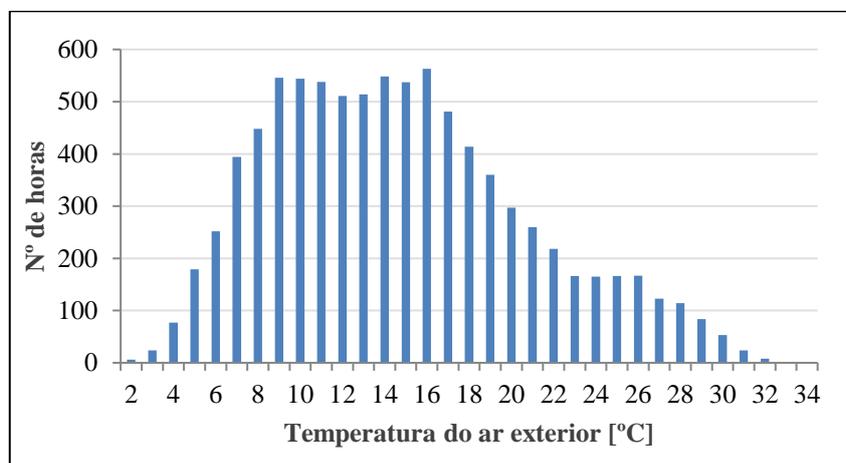


Figura B.2. Escola secundária - Somatório anual de horas a cada temperatura do ar exterior em Coimbra.

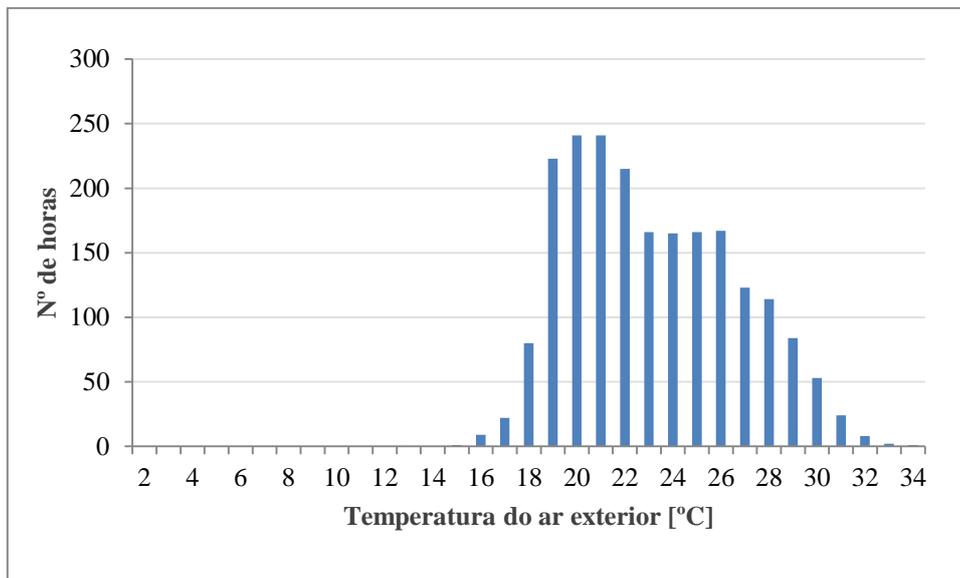


Figura B.3 Escola secundária - Somatório anual de horas de funcionamento do *Chiller*.

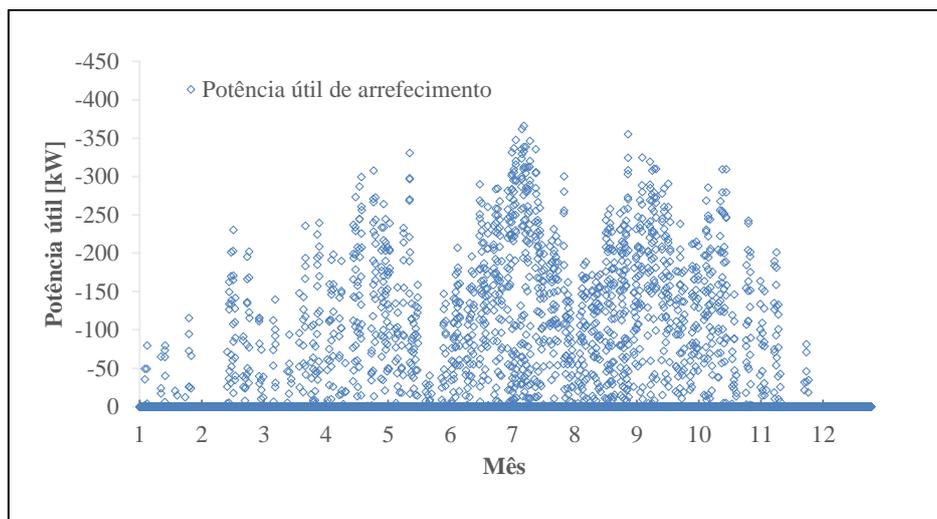


Figura B.4. Escola secundária - Potência útil necessária para o arrefecimento do edifício durante 1 ano.

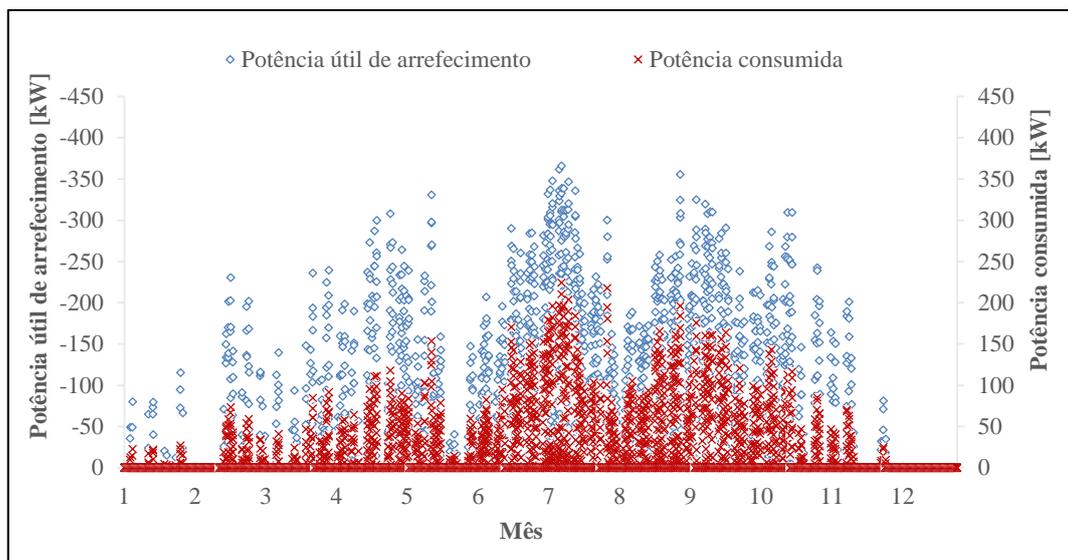


Figura B.5. Escola secundária – Potência necessária para o arrefecimento do edifício e potência consumida pelo *Chiller* durante 1 ano.

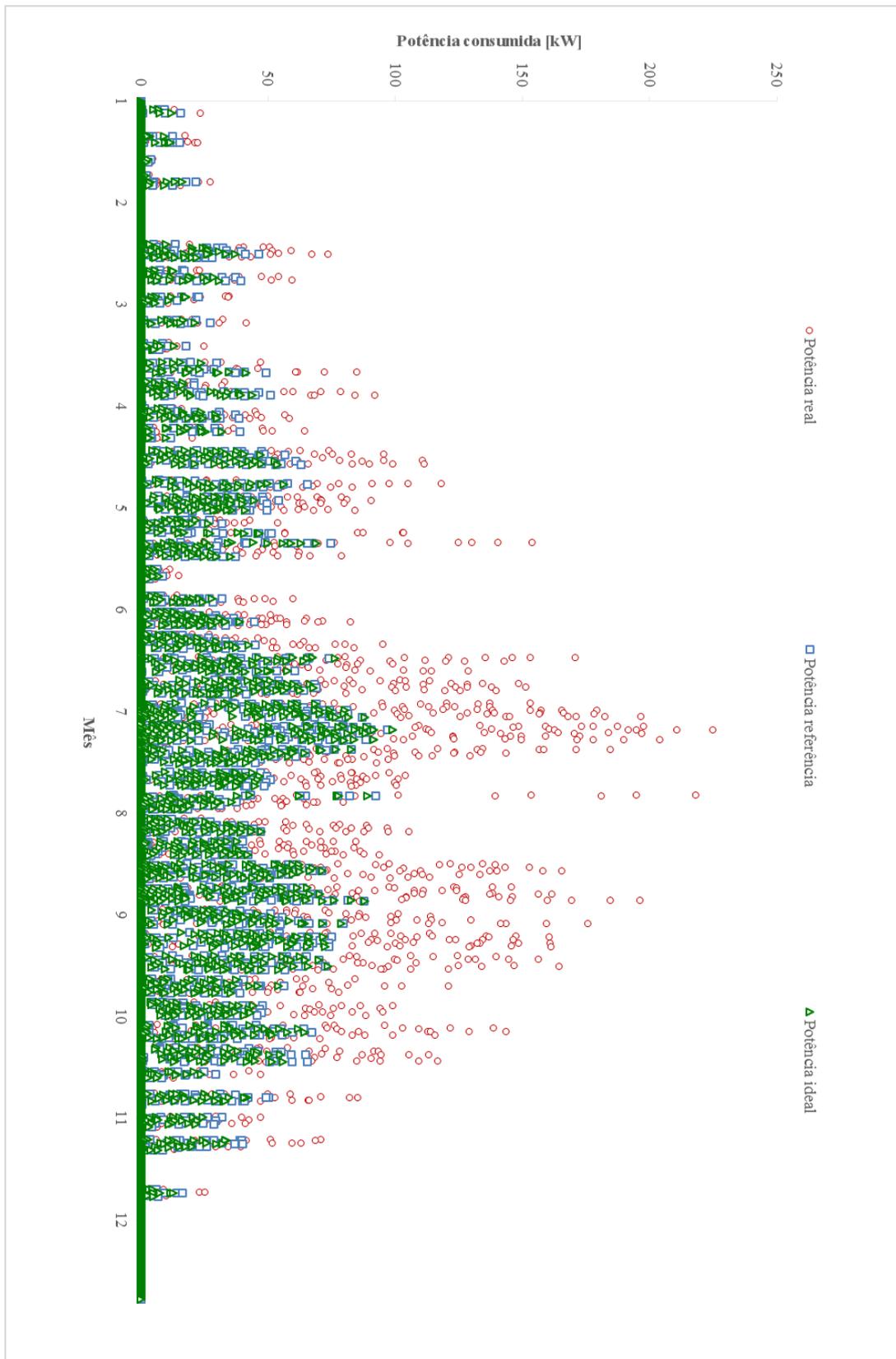


Figura B.6. Escola secundária - Potências consumidas pelo Chiller em modo de arrefecimento em função do tempo: real, de referência e ideal.

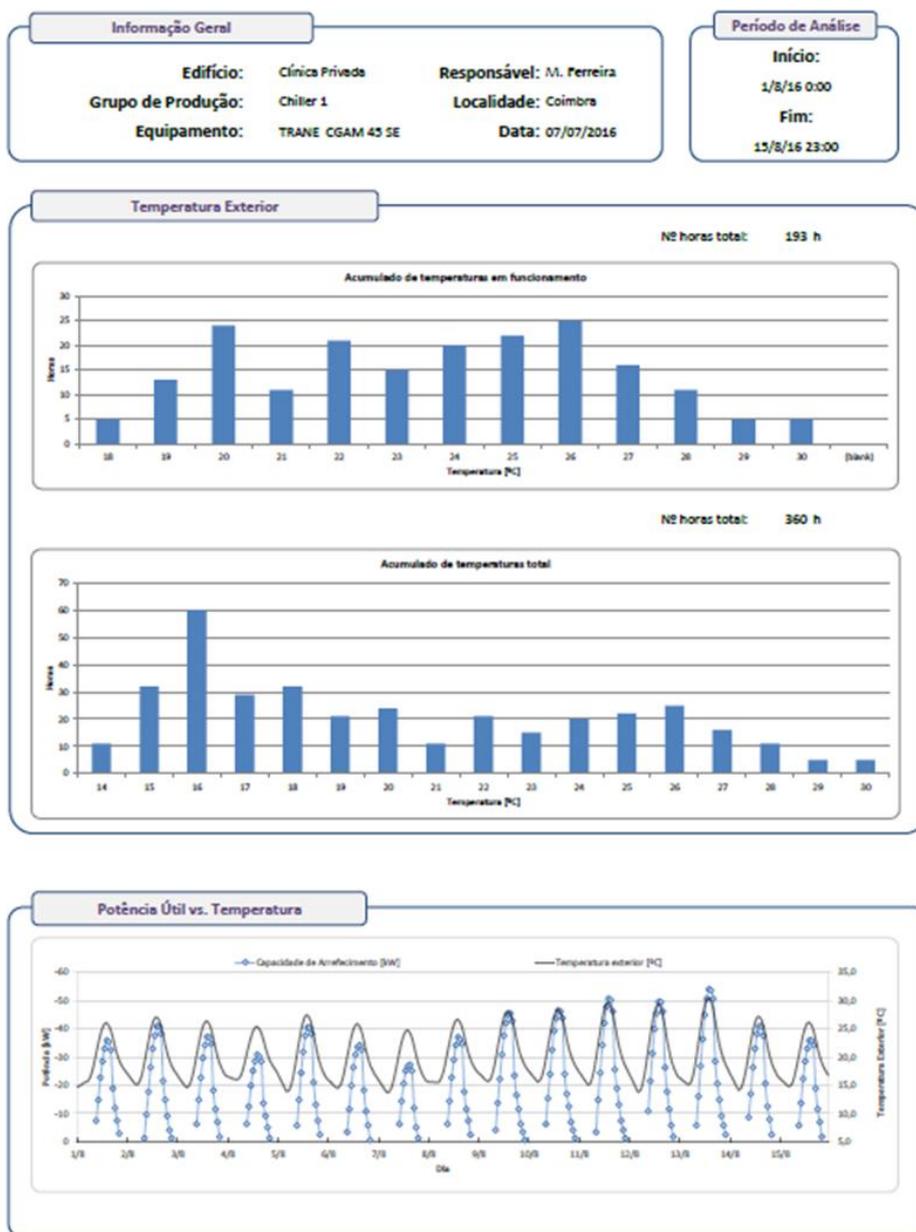


Figura B.7. Escola secundária – EER do Chiller em modo de arrefecimento em função do tempo: EER real, EER de referência e EER ideal.

ANEXO C – RELATÓRIO VPS



Relatório de Auditoria



Pág. 1 / 3



Figura C.1. Exemplo de relatório de auditoria (página 1)

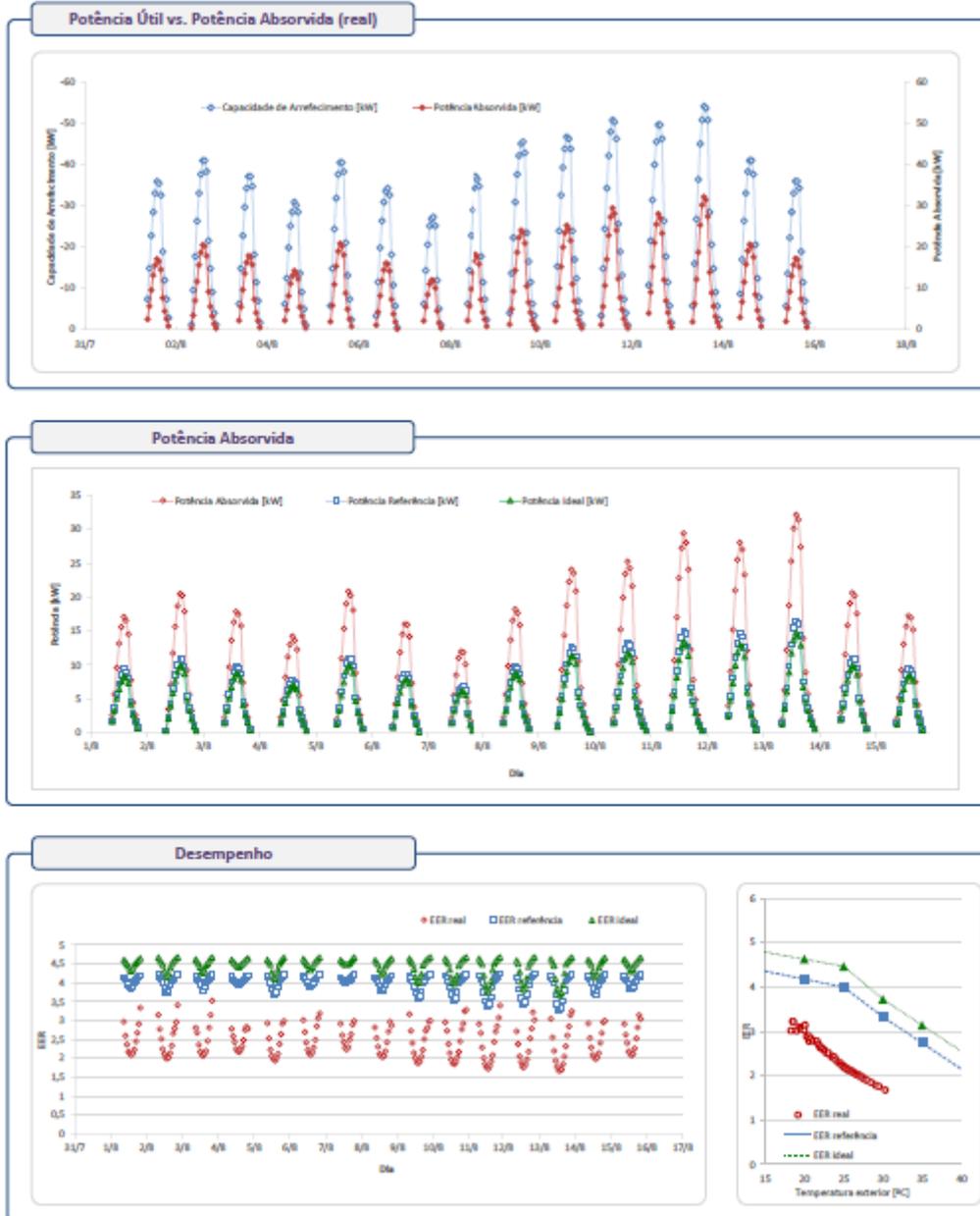


Figura C.2. Exemplo de relatório de auditoria (página 2).



Relatório de Auditoria

Notas



Figura C.3. Exemplo de relatório de auditoria (página 3)

APÊNDICE A – INFORMAÇÃO TÉCNICA DOS EQUIPAMENTOS

CGAM 45 SE									
Part Load Performance - ESEER									
Gross ESEER = 3.8									
Net ESEER = 3.51									
% LoadCapacity		LWT Evap	EWT Evap	Flow Evap	WPD Ambient Evap		Kw	Efficiency	
100	121.9	7.0	12.0	5.8	68.9	35.0	44.5	2.74	
75	91.5	7.0	10.7	5.8	68.9	30.0	27.5	3.33	
50	61.0	7.0	9.5	5.8	68.9	25.0	15.2	4.00	
25	30.5	7.0	8.2	5.8	68.9	20.0	7.3	4.18	

Figura D.1. Chillers TRANE, modelo CGAM 45 SE.

CGAM 45 HE									
Part Load Performance - ESEER									
Gross ESEER = 4.2									
Net ESEER = 3.96									
% LoadCapacity		LWT Evap	EWT Evap	Flow Evap	WPD Ambient Evap		Kw	Efficiency	
100	128.3	7.0	12.0	6.1	50.5	35.0	40.9	3.14	
75	96.3	7.0	10.7	6.1	50.5	30.0	25.8	3.73	
50	64.2	7.0	9.5	6.1	50.5	25.0	14.4	4.47	
25	32.1	7.0	8.2	6.1	50.5	20.0	6.9	4.63	

Figura D.2. Chillers TRANE, modelo CGAM 45 HE.

CGAM 170SESQ
Part Load Performance - ESEER
Gross ESEER = 4.4

% Load	Capacity	LWT Evap	EWT Evap	Flow Evap	WPD Ambient	Evap	Gross kW	Gross EER
100	453.1	7.0	12.0	21.6	82.0	35.0	158.1	2.87
75	339.9	7.0	10.7	21.6	82.0	30.0	86.9	3.92
50	226.6	7.0	9.5	21.6	82.0	25.0	50.3	4.50
25	113.3	7.0	8.2	21.6	82.0	20.0	23.1	4.91

Figura D.3. Chillers TRANE, modelo CGAM 170 SESQ.

RTAF 125HSELN
Part Load Performance - ESEER
Gross ESEER = 4.74

% Load	Gross Cap.	LWT Evap	EWT Evap	Flow Evap	WPD Ambient	Evap	Gross kW	Gross EER
100	453.0	7.0	12.1	21.6	32.1	35.0	144.3	3.14
75	339.7	7.0	10.8	21.6	32.1	30.0	89.6	3.79
50	226.5	7.0	9.5	21.6	32.1	25.0	46.1	4.91
25	113.2	7.0	8.3	21.6	32.1	20.0	18.9	5.99

Figura D.4. Chillers TRANE, modelo RTAF 125 HSELN.