



Carlos Emanuel Teixeira Sopas

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Auditoria Energética e Aplicação de Medidas de
Eficiência Energética a uma Instalação Industrial do
Sector Farmacêutico**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Daniel Cardoso Vaz, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Co-Orientador: Engenheiro Carlos Alberto Nascimento Guimarães

Presidente: Professor Doutor António José Freire Mourão

Vogal: Professor Doutor José Fernando de Almeida Dias

Vogal: Engenheiro Carlos Alberto Nascimento Guimarães



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2015

Auditoria Energética e Aplicação de Medidas de Eficiência Energética a uma Instalação Industrial do sector Farmacêutico

Copyright © Carlos Emanuel Teixeira Sopas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao Engenheiro Domingos Guimarães e ao Engenheiro Carlos Guimarães, pela possibilidade de efetuar a minha dissertação na Auditene e por todos os meios e condições de trabalho que proporcionaram.

Ao Engenheiro Carlos Guimarães mais uma vez pela orientação prestada, assim como ao Professor Daniel Vaz que apesar da distância, as reuniões foram sempre proveitosas.

Agradeço a todo o corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologias pelos ensinamentos transmitidos ao longo dos 5 anos de curso.

Deixo aqui os meus agradecimentos a todos os colegas da Auditene em especial ao Marcos Dias e ao Tiago Moutinho, por toda a ajuda que me deram.

À minha família em especial aos meus avós, à minha tia e à minha prima, por todo o apoio que me deram ao longo do meu percurso académico.

A todos os meus amigos que estiveram comigo ao longo destes anos e em especial ao Rafael Marques e Fábio Dias, por todas as horas de estudo e trabalho juntos.

Resumo

A evolução das sociedades encontra-se assente num aumento dos consumos de energia, de origem fóssil sobretudo. Países com escassos recursos neste tipo de fontes de energia, encontram-se energeticamente dependentes face ao exterior, como é o caso de Portugal.

Torna-se uma questão chave, a forma como a energia é utilizada, sendo o processo de auditorias energéticas uma ferramenta essencial para o efeito. Uma auditoria energética, é uma análise as condições de utilização de energia, com vista a identificação de oportunidades de racionalização do consumo de energia.

Esta dissertação tem como caso de estudo a realização de uma auditoria energética e avaliação de medidas de eficiência energética a uma instalação industrial do sector farmacêutico, que no ano civil de 2014 apresentou um consumo global de 682 tep e ao abrigo do Decreto-Lei n.º 68-A/2015 de 30 de abril, encontra-se na obrigatoriedade de efetuar uma auditoria energética, que incida sobre as condições de utilização de energia.

Nas medidas de eficiência energética avaliadas, que tiveram como suporte os resultados com a realização da auditoria energética, avaliou-se o potencial em termos económicos e ambientais, que de entre 4 medidas avaliadas destaca-se o estudo de viabilidade para implementação de uma central de trigeriação.

PALAVRAS-CHAVE: Energia, Medidas de Eficiência Energética, Auditoria Energética, Trigeriação.

Abstract

The evolution of society is based on an increase in energy consumption, especially from fossil fuels. Countries with scarce resources in this kind of energy sources are energy dependent concerning foreign countries, as is the case of Portugal.

The key issue is the way energy is used and the process of energy audits is an essential tool for this purpose.

An energy audit is an analysis of the conditions of use of energy, with a view to identifying opportunities for rationalization of energy consumption.

This dissertation has as a case study for an energy audit and evaluation of energy efficiency measures at an industrial facility in the pharmaceutical sector.

In the year 2014, this industrial facility, presented a global consumption of 682 tep and pursuant to Decree-Law no. 68-A/2015, 30th April, it is obliged to perform an energy audit, relating to the conditions of use of energy.

In the evaluated energy efficiency measures, which had as support the results of the energy audit, was assessed the potential in economic and environmental terms. Between the 4 measures evaluated stands out the feasibility study for implementation of a Trigeneration central.

KEYWORDS: Energy, Energy Efficiency Measure, Energy Audit, Trigeneration.

Índice

Agradecimentos	V
Resumo	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xvii
Lista de Siglas e Acrónimos	xix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Apresentação da Empresa, Auditene	4
1.3 Objetivos e Metodologia	5
1.4 Organização da Tese	6
2 ESTUDO ENERGÉTICO DE UNIDADES INDUSTRIAIS	8
2.1 Auditoria Energética	8
2.1.1 Definição e objetivos	8
2.1.2 Tipos de auditoria energética: macro- e micro-	9
2.1.3 Metodologia para a realização de uma auditoria energética.....	10
2.1.4 Medições em auditorias energéticas.....	11
2.1.5 Legislação em Portugal	12
2.2 Medidas de Eficiência Energética Transversais à Indústria	15
2.2.1 Produção combinada de energia elétrica e térmica.....	16
3 APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	24
3.1 A Instalação Industrial	24
3.2 Descrição do Processo Produtivo Industrial	25
3.3 Serviços Auxiliares e Equipamentos	26
3.3.1 Energia elétrica	26
3.3.2 Gás natural.....	27
3.3.3 Central de tratamento de água	27
3.3.4 Central de ar comprimido.....	28
3.3.5 Central térmica	32
3.3.6 Iluminação	34
3.3.7 Unidades de tratamento de ar, desumidificadores e equipamentos de ar condicionado.....	34
3.3.8 Ventiladores.....	36

3.3.9 Central de água fria.....	36
3.4 Procedimentos de Medida	38
3.4.1 Consumos de energia elétrica	38
3.4.2 Composição dos gases de combustão	40
3.4.3 Eficiência energética dos <i>chillers</i>	43
3.4.4 Temperatura, humidade relativa e velocidade de escoamento.....	44
3.5 Ferramentas Revelantes para a Avaliação de Medidas de Eficiência Energética.....	46
3.5.1 <i>Adsorptive Gas Dryer</i>	46
3.5.2 Avaliação de um sistema de trigeriação	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DA AUDITORIA	56
4.1 Macro -Auditoria.....	56
4.1.1 Consumo elétrico.....	56
4.1.2 Consumo de gás natural	58
4.1.3 Distribuição do consumo global de energia	59
4.1.4 Indicadores de referência	60
4.1.5 Enquadramento legislativo	62
4.2 Micro-Auditoria	62
4.2.1 Central de ar comprimido.....	63
4.2.2 Central térmica	68
4.2.3 Central de água fria.....	71
4.2.4 Unidades de tratamento de ar e desumidificadores.....	75
4.2.5 Distribuição dos consumos de energia elétrica.....	78
4.2.6 Distribuição dos consumos de gás natural	84
4.3 Proposta e Avaliação de Medidas de Eficiência Energética	86
4.3.1 Implementação de uma central de trigeriação	86
4.3.2 Ajustagem do Queimador da Caldeira de Vapor 2	93
4.3.3 Alteração da prioridade de utilização dos <i>chillers</i>	94
4.3.4 Alteração do ponto de orvalho por pressão	95
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	98
Bibliografia.....	101
Anexos	107

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Evolução do consumo de energia primária em Portugal [8].....	2
Figura 2.1 – Etapas de uma auditoria energética.	10
Figura 2.2 - Sistema de gestão dos consumidores intensivos de energia [20]	13
Figura 2.3 - Tipologia de medidas aplicáveis à indústria transformadora [14].....	16
Figura 2.4 - Produção convencional de energia elétrica e térmica [24]	18
Figura 2.5 - Produção combinada de energia elétrica e térmica [24].....	18
Figura 2.6 - Esquema de cogeração com ciclo de turbina a vapor de extração [25]	19
Figura 2.7 - Esquema de uma central de cogeração com turbina a gás (adaptado de [26])	20
Figura 2.8 - Esquema de cogeração de ciclo combinado (adaptado de [27])	21
Figura 2.9 - Esquema de princípio do sistema de cogeração com motor de combustão interna (adaptado de [27])	22
Figura 3.1 - Diagrama do processo fabril.	26
Figura 3.2 - Esquema da central de ar comprimido.	28
Figura 3.3 - Secadores de adsorção.....	30
Figura 3.4 - Diagrama pneumático do secador de adsorção de autorregeneração (adaptado de [30]).....	31
Figura 3.5 - Esquema simplificado da central de água fria e equipamentos do <i>chiller</i>	37
Figura 3.6 - Diagrama T-s do ciclo frigorífico [35]	37
Figura 3.7 - Analisador de energia elétrica <i>MI-2892 Master Power</i> [36].....	38
Figura 3.8 – Configuração da ligação do analisador de energia elétrica aos quadros elétricos .	39
Figura 3.9 - Pinça amperimétrica <i>UNIT-T UT231</i> [37]	39
Figura 3.10 - Analisador de gases de combustão <i>TESTO 340</i>	40
Figura 3.11 - Procedimento de medição dos gases de combustão [38]	40
Figura 3.12 - Manómetro da bomba do circuito primário do <i>chiller</i> novo e pressão a jusante e a montante da mesma	44
Figura 3.13 - Manómetro de pressão da bomba do circuito primário do <i>chiller</i> mais antigo	44
Figura 3.14 - Equipamento de medição multifunções portátil [39]	45
Figura 3.15 - Processo de arrefecimento e aquecimento numa unidade de tratamento de ar e representação esquemática do processo no diagrama psicométrico	45
Figura 3.16 - Esquema de análise para balanços mássicos e volúmicos dos secadores de adsorção (adaptado de [30]).....	48
Figura 4.1 - Distribuição mensal da energia elétrica consumida por período horário	57
Figura 4.2 - Percentagem anual do consumo elétrico por período horário.....	57
Figura 4.3 - Consumo elétrico mensal.....	58
Figura 4.4 - Consumo mensal de gás natural no ano civil de gás natural	59
Figura 4.5 - Evolução mensal do consumo específico.....	60
Figura 4.6 - Evolução mensal da intensidade energética e do VAB	61
Figura 4.7 - Evolução mensal da intensidade carbónica	61
Figura 4.8 - Consumo de ar comprimido.....	64
Figura 4.9 - Potência absorvida pelos compressores.....	64
Figura 4.10 - Ponto de orvalho por pressão e temperatura do ar comprimido à saída dos secadores durante 2 dias de medição.....	65
Figura 4.11 - Ponto de orvalho por pressão à saída dos secadores e potência absorvida pelos compressores	67

Figura 4.12 – Instantes em que se iniciam as regenerações da 00:59 - 09:59.....	67
Figura 4.13 - Consumo de ar comprimido 00:59 - 09:59	67
Figura 4.14 – Entradas e saídas de matérias e energia num gerador de calor	68
Figura 4.15 - Potência absorvida pelo <i>chiller</i> mais recente do 12:28 - 14:12	72
Figura 4.16 - Variação do EER e do regime de carga do <i>chiller</i> mais recente do 12:28 - 12:46..	72
Figura 4.17 - Potência absorvida pelo <i>chiller</i> mais antigo das 10:54 - 01:14	73
Figura 4.18 – Variação do EER e do Regime de carga do <i>chiller</i> mais antigo do 12:25 - 13:18...	73
Figura 4.19 - Esquema de princípio dos desumidificadores de adsorção	77
Figura 4.20 - Distribuição dos consumos de energia eléctrica nos serviços auxiliares.....	81
Figura 4.21 - Repartição do consumo de energia eléctrica nos diversos setores e equipamentos	82
Figura 4.22 - Distribuição dos consumos de energia eléctrica por serviços auxiliares, produção e edifícios administrativos	83
Figura 4.23 – Potência térmica requerida pela instalação ao longo do ano e prestações do motor.....	89
Figura 4.24 - Variação do ponto de orvalho por pressão e do caudal de ar comprimido	95
Figura 4.25 - Espaçamento temporal entre as regenerações	95

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Principais características do transformador	27
Tabela 3.2 - Características principais dos compressores de ar comprimido	28
Tabela 3.3 - Características principais dos secadores de ar comprimido	28
Tabela 3.4 - Características técnicas dos <i>chillers</i>	36
Tabela 4.1 - Energia consumida no ano civil de 2014	60
Tabela 4.2 - Gases de efeito estufa produzidos no ano civil de 2014	62
Tabela 4.3 - Eficiência das caldeiras e parâmetros associados	69
Tabela 4.4 - Valores padrão do teor dos gases de combustão para uma boa eficiência dos geradores de calor a gás natural, adaptado [31]	70
Tabela 4.5 - Análise de eficiência energética aos <i>chillers</i> de compressão	73
Tabela 4.6 - Valores de EER do <i>chiller</i> mais recente em função	74
Tabela 4.7 - Dados climáticos da temperatura média mensal e humidade relativa na zona da instalação industrial	75
Tabela 4.8 - Condições de entrada e saída do caudal de extração das unidades de tratamento de ar de climatização e potência de recuperação	76
Tabela 4.9 - Caudal de insuflação e potências térmicas das unidades de tratamento de climatização.....	76
Tabela 4.10 - Resultados das medições às unidades de tratamento de processo e respetivas potências aquecimento.....	77
Tabela 4.11 - Valores de temperatura, humidade relativa e caudal nos desumidificadores em vários pontos dos desumidificadores.....	78
Tabela 4.12 - Potências térmicas dos desumidificadores	78
Tabela 4.13 - Consumo elétrico anual da instalação industrial das diversas centrais constituintes da instalação industrial	79
Tabela 4.14 - Consumo elétrico anual da instalação industrial nod diversos edifícios, luminárias, ventiladores, equipamentos de ar condicionados e UTA's.....	80
Tabela 4.15 - Consumo elétrico nos serviços auxiliares em energia primária e a sua contribuição relativa	81
Tabela 4.16 - Distribuição dos consumos de energia elétrica nos diversos setores e equipamentos e	82
Tabela 4.17 - Distribuição dos consumos de energia elétrica por serviços auxiliares, produção e edifícios administrativos em termos de energia primária e a sua contribuição relativa	83
Tabela 4.18 - Distribuição do consumo de gás natural nas UTA's de climatização	84
Tabela 4.19 - Distribuição do consumo de gás natural nas UTA's de processo	84
Tabela 4.20 - Distribuição do consumo de gás natural nos desumidificadores	85
Tabela 4.21 - Consumo de gás natural para aquecimento de AQS.....	85
Tabela 4.22 - Distribuição do consumo de gás natural em vapor, água quente para AVAC e águas quentes sanitárias em energia primária e a sua contribuição relativa.....	85
Tabela 4.23 - Custo variável da energia elétrica nos diferentes períodos horários.....	88
Tabela 4.24 - Resultados da análise energética anual	90
Tabela 4.25 – Resultados da análise económica.....	91
Tabela 4.26- Resultados económicos da trigeração para a modalidade geral do Decreto-Lei n.º 23/2010, 25 de março	92
Tabela 4.27 - Resultados da afinação do Queimador da Caldeira de Vapor 2.....	93
Tabela 4.28 - Resultados da alteração da prioridade de utilização dos <i>chillers</i>	94

Lista de Siglas e Acrónimos

ARCE - Acordo de Racionalização dos Consumos de Energia

AT - Alta Temperatura

AVAC - Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado

BT - Baixa Temperatura

DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia

ECO.AP - Programa de Eficiência Energética para a Administração Pública

ISP - Imposto sobre Produtos Petrolíferos Liquefeitos

IVA - Imposto sobre o Valor Acrescentado

PCI - Poder Calorífico Inferior

PCS - Poder Calorífico Superior

PEP - Poupança de Energia Primária

POP - Ponto de Orvalho por Pressão

PNAEE - Plano Nacional de Ação para Eficiência Energética

PNAER - Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis

PREn - Plano de Racionalização de Energia

PRM - Posto de Regulação e Medida

QGBT-E - Quadro Geral de Baixa Tensão de Emergência

QGBT-N - Quadro Geral de Baixa Tensão Normal

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

REE - Rendimento Elétrico Equivalente

REP - Relatório de Execução e Progresso

RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios

SGCIE - Sistema de Gestão dos Consumidores Intensivos de Energia

TIR - Taxa Interna de Rentabilidade

TSD - Total de Sólidos Dissolvidos

UTA - Unidade de Tratamento de Ar

VAL - Valor Atual Líquido

Nomenclatura

\dot{m}_{H_2O} - caudal mássico de água

cp_{H_2O} - calor específico da água a pressão constante

m_a - massa de ar seco

m_v - massa de vapor

Q_u - calor útil

ω - humidade absoluta

P_a - potência de arrefecimento

P_c - potência de aquecimento

k_{gep} - kilograma equivalente de petróleo

kWe – kilowatt eléctrico

kWt – kilowatt térmico

$m^3(n)$ - metro cúbico normal

MW – megawatt

tep - tonelada equivalente de petróleo

1

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A Revolução industrial, iniciada em Inglaterra no século XVIII, marcou o início de uma etapa de grandes consumos energéticos (queima de carvão) e trouxe inúmeras vantagens para as sociedades, em termos de desenvolvimento industrial e económico. A baixa eficiência dos processos industriais na altura acarretou elevados desperdícios energéticos [1].

A difusão da revolução industrial pela Europa e Estados Unidos da América e a grande abundância de combustíveis fósseis a baixo custo aliada à necessidade de desenvolvimento e de melhoria das condições económicas das populações, aumentaram a utilização e procura destes recursos energéticos esgotáveis.

As políticas de desenvolvimento económico assentes no aumento do consumo de energias não renováveis acarretam também repercussões negativas, nomeadamente:

- Escassez de recursos energéticos fósseis não renováveis (petróleo, carvão, gás natural);
- Dependência económica dos países mais consumidores de energia face aos países produtores desses combustíveis (com consequente especulação dos preços dos combustíveis);
- Alterações ambientais.

Entre as alterações com impacto ambiental negativo, resultantes da queima de combustíveis fósseis, destacam-se:

- Aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico (na atualidade, cerca de ¾ do CO₂ atmosférico provem da queima de combustíveis fósseis);
- Aumento da emissão de gases com efeito de estufa (GEE);
- Alterações climáticas. [1-4]

Os países da União Europeia (UE) têm batalhado por um desenvolvimento sustentável que permita a redução da emissão de GEE, a redução do consumo energético e a diminuição das suas dependências energéticas face aos países produtores de fontes combustíveis. A meta de 20% de energias renováveis, 20% de eficiência energética e uma redução de 20% na emissão de gases com efeito de estufa para o ano 2020 é uma orientação da UE para os países europeus [5].

Historicamente, Portugal apresenta uma dependência energética elevada face ao exterior por não dispor de recursos fósseis endógenos como o petróleo e o gás natural. A energia é um dos maiores constrangimentos económicos de Portugal. Os custos energéticos representam uma fatia muito importante nos encargos financeiros da maioria das empresas [6, 7], quer pelo seu impacto direto nas receitas, quer pela perda de competitividade face a concorrentes com acesso a energia mais barata. Este facto pode originar, num futuro próximo, a inviabilidade de algumas das empresas consumidoras intensivas de energia [8].

Na Figura 1.1 mostra a evolução do consumo energético, em termos de energia primária, nos últimos 40 anos em Portugal. Podemos constatar que o consumo energético teve uma tendência de aumento até 2004 e uma redução a partir de 2005. É ainda possível verificar que nos últimos anos o gás natural tem tido expressão cada vez maior em termos de energia primária consumida.

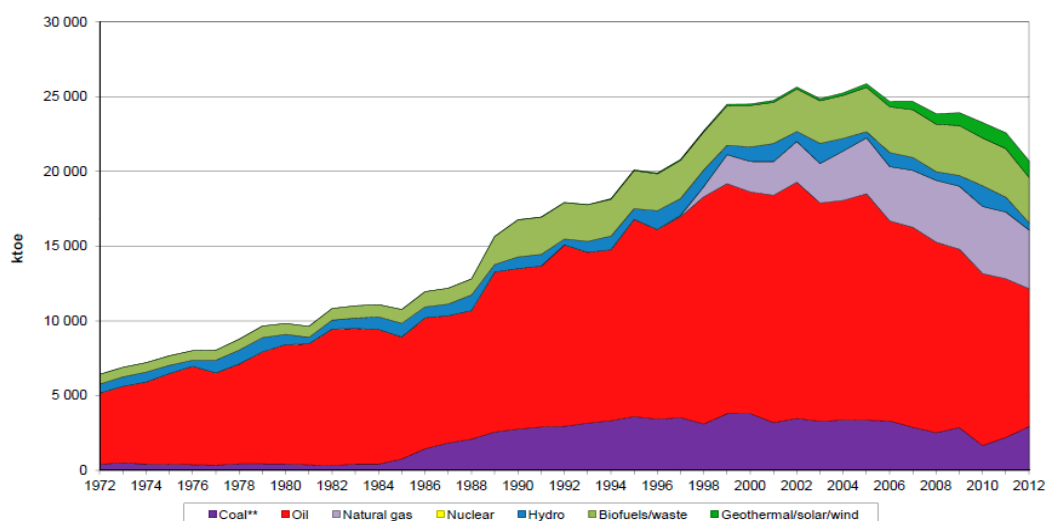


Figura 1.1 - Evolução do consumo de energia primária em Portugal [8]

O sector da indústria depende de várias fontes de energia e representou cerca de 30% do total de energia primária consumida em Portugal no ano de 2013, segundo dados da Pordata [10].

Os elevados encargos com as faturas energéticas nos custos finais da produção devem incentivar os decisores económicos das empresas, a investir na racionalização dos consumos energéticos. De forma a que os produtos produzidos atinjam preços mais competitivos face aos preços da concorrência e aumentar a competitividade das empresas.

Consciente desta situação, o estado português tem produzido legislação nacional para o setor energético.

O enquadramento legal do sistema energético português decorre da implementação do denominado "Terceiro Pacote Energético" (TPE) da UE, do qual fazem parte dois Regulamentos e duas Diretivas transpostos para o regime jurídico português sob a forma de Decreto-Lei n.º 77/2011 (para o setor do gás natural) e do Decreto-Lei n.º 78/2011 (para o setor da eletricidade), ambos de 20 de junho. Os Decretos-Lei n.º 215-A/2012 e n.º 215-B/2012, ambos de 8 de outubro, completaram a transposição da Diretiva 2009/72/CE, 13 de julho, que estabelece as regras comuns para o mercado interno de eletricidade.

A legislação nacional estabelece a obrigatoriedade das empresas quanto à criação de planos de eficiência energética e de diversificação dos consumos de energia, quanto ao cumprimento dos valores de consumo energético intensivo definidos, quanto à redução de GEE, sem comprometer a competitividade das empresas nem a qualidade de vida dos cidadãos.

No âmbito da política energética nacional – assente na racionalidade económica e na sustentabilidade - foram igualmente desenvolvidos os seguintes programas e planos que incentivam a aposta na eficiência energética e na utilização de energias renováveis [11]:

- PNAEE 2016 - Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética para o ano 2016
- PNAER 2013-2020- Plano Nacional de Ação sobre Energias Renováveis para 2013-2020
- ECO.AP - Programa de Eficiência Energética para a Administração Pública

O Regulamento de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (RGCE) foi criado pelo estado português com o objetivo de melhorar a eficiência energética, ou seja consumir menos energia por quantidade de produto produzido [1, 12]. A sua revisão, sob a forma de Decreto-Lei n.º 71/2008, de 15 de abril, vem regulamentar o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) aplicável às instalações consumidoras intensivas de energia (com consumos superiores a 500 toneladas equivalentes de petróleo (tep) por ano).

As imposições legais decorrentes da legislação setorial em vigor e os critérios definidos pelos programas de incentivo à eficiência energética obrigam as empresas consumidoras intensivas de energia a realizarem auditorias energéticas periódicas e a implementarem planos de eficiência energética. A gestão eficaz da energia deve alicerçar-se no levantamento de dados

históricos sobre o uso da energia na empresa, em dados concretos fornecidos pelas auditorias energéticas periódicas, em objetivos numéricos pretendidos, no planeamento e controlo de medidas de eficiência energética. Além disso, também contribui para eventuais ajustamentos das políticas governamentais setoriais.

Como tal, abre-se espaço para o surgimento de empresas habilitadas a proceder a auditorias energéticas, a identificar oportunidades de melhoria no uso de energia e a propor planos de eficiência energética adequados às empresas auditadas. A identificação destas oportunidades passa pelo acompanhamento dos dados sobre o consumo energético, pela análise de parâmetros medidos, bem como pela realização de auditorias [14] e programas de *benchmarking* implementados combinadamente com novos regulamentos ou medidas financeiras. Grande parte das medidas recomendadas centra-se na “intensificação de processos” mediante o desenvolvimento de novas técnicas (mais económicas e sustentáveis) e de novos equipamentos, diminuindo a razão “tamanho do equipamento/ capacidade de produção”, e mediante a utilização de fontes energéticas mais rentáveis [14].

A responsabilidade por acompanhar o cumprimento da regulamentação do sector energético em Portugal pertence à Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG).

1.2 Apresentação da Empresa, Auditene

Esta dissertação, foi desenvolvida em âmbito empresarial, na Auditene, fundada em 1989 sediada na Rua Brito Capelo n.º825, Matosinhos, Portugal.

A empresa atua nas áreas da engenharia mecânica e eletrotécnica, sendo que inicialmente prestava serviços de auditorias energéticas, mas face às solicitações do mercado evoluiu para a área de projetos. Estando habilitada a oferecer os seguintes serviços: auditoria energética, consultoria técnica nas áreas de energia e fluidos, estudos de viabilidade, engenharia básica, engenharia de detalhe e licenciamentos

Desde 1992 que a Auditene integra o grupo Iperforma, que inclui um grupo de empresas especializadas em áreas complementares à Auditene de entre quais temos, desenvolvimento de projetos de arquitetura e engenharia civil, gestão, fiscalização de obras e gestão de património.

1.3 Objetivos e Metodologia

A presente dissertação tem como objetivos gerais a identificação, a avaliação e proposta de medidas de eficiência energética, com potencial técnico-económico, aplicáveis a uma instalação industrial do setor farmacêutico cliente da Auditene.

Os objetivos específicos pretendidos por esta dissertação são os seguintes:

- Identificação e caracterização dos principais consumidores de energia;
- Quantificação do consumo energético global, por setor e por equipamento;
- Enquadramento do consumo energético da empresa face à legislação em vigor;
- Avaliação de eficiência energética a equipamentos;
- Avaliação do desempenho dos sistemas de transformação e utilização de energia;
- Identificação e sugestão de medidas de eficiência energéticas.

O cumprimento dos objetivos específicos teve como base a realização de uma auditoria energética.

Pretende-se que as medidas de eficiência energética propostas nesta dissertação possam contribuir para reduzir o elevado consumo energético que no ano civil de 2014 (ano de referência) foi de 682 tep e o peso que a fatura energética representa nos custos finais.

A auditoria energética envolveu visitas às instalações fabris da empresa farmacêutica para:

- Recolher informações gerais sobre a empresa;
- Recolher informação sobre a faturação de consumos energéticos;
- Fazer o levantamento dos principais equipamentos consumidores de energia;
- Proceder a um conjunto de medições de parâmetros importantes associados ao consumo energético dos equipamentos e distintos setores da empresa.

Ao longo do estudo suportado por esta dissertação privilegiou-se o contato com funcionários da instalação, por forma a obter a informação necessária para o presente trabalho.

Durante as visitas houve a necessidade de estudar diferentes processos de transformação de energia de forma a avaliar se estes se enquadram com os processos atuais e se estão de acordo com as normas para este tipo de instalação.

No estudo realizado à instalação industrial, foi efetuada uma análise global e detalhada. A análise global teve como suporte as faturas de energia no ano civil de 2014 e permitiu determinar o consumo energético no ano de referência e efetuar o enquadramento legislativo da instalação industrial, que segundo o Decreto-Lei n° 71/2008, de 15 de abril, alterado pelo Decreto-Lei n°68-A/2015, de 30 de abril, é considerada um consumidor intensivo de energia. Para a análise detalhada, que assentiu essencialmente num conjunto de medições efetuadas,

foi possível efetuar a repartição dos consumos de energia pelos diversos setores e determinar a eficiência energética de alguns equipamentos. Esta última alude aos setores e equipamentos com oportunidades de racionalização do consumo de energia.

1.4 Organização da Tese

Para além da presente introdução a tese, inclui mais quatro capítulos.

O capítulo 2 aborda a temática da auditoria energética, o enquadramento legislativo para execução de auditorias energéticas na indústria, o processo para execução das mesmas e a instrumentação utilizada. São abordadas medidas de eficiência energética transversais à indústria e em específico a cogeração.

No capítulo 3 apresenta-se o caso de estudo, são descritos e analisados os diversos serviços auxiliares e equipamentos são explicados os procedimentos das medições efetuadas e descritas as ferramentas relevantes para a avaliação das medidas de eficiência energética.

O capítulo 4 apresenta os resultados da auditoria energética e avaliação de medidas de eficiência energéticas fundamentadas nos resultados obtidos da auditoria energética.

No capítulo 5 retiram-se conclusões às condições de utilização de energia e às medidas de eficiência energética avaliadas. São ainda efetuadas propostas para trabalho futuro.

2

ESTUDO ENERGÉTICO DE UNIDADES INDUSTRIAIS

Neste capítulo efetua-se uma revisão sobre o processo de auditorias energéticas na indústria em Portugal, os seus objetivos e potencial económico e ambiental, a metodologia e instrumentação usada, o seu modo de execução, assim como a legislação em vigor para instalações consumidoras intensivas de energia. Abordam-se, medidas de eficiência energética transversais à indústria e em particular a cogeração.

2.1 Auditoria Energética

Existem vários tipos de auditorias energéticas que podem ser realizadas, entre elas as auditorias energéticas a edifícios, a frotas de transporte e a instalações industriais. O objetivo desta secção é fornecer informação necessária sobre o processo das auditorias energéticas na indústria em Portugal, quais os seus objetivos e potencial económico e ambiental. Apresenta-se a metodologia de execução e a instrumentação de medida geralmente utilizada nas auditorias.

Efetua-se um resumo da legislação em Portugal para a realização das auditorias energética na indústria, onde se referencia o seu enquadramento legal, âmbito de aplicação e entidades intervenientes no processo e respetivas funções.

2.1.1 Definição e objetivos

Uma auditoria energética é uma “radiografia” às condições de utilização de energia de uma instalação, que permite identificar potências de poupança energética, tendo como objetivo:

- Verificar as diferentes formas de energia utilizadas pela instalação;
- Avaliar as condições de utilização de energia;
- Desagregar os consumos energéticos por setor, produção ou equipamento;

- Relacionar o consumo de energia com a produção;
- Identificar potências de poupança energética;
- Analisar técnica e economicamente as soluções encontradas;
- Recomendar um esquema operacional para a gestão de energia;
- Sugerir a substituição de equipamentos ligados ao processo por outros mais eficientes;
- Propor a alteração de fontes energéticas, caso se torne necessário.

Assim a auditoria energética constitui uma ferramenta estratégica indispensável à elaboração do planeamento energético numa empresa, isto é, um instrumento fundamental na gestão de energia [16].

2.1.2 Tipos de auditoria energética: macro- e micro-

Em função dos objetivos pretendidos com a auditoria energética, esta pode ser decomposta em macro e micro auditoria [17].

A macro-auditoria baseia-se numa análise geral às instalações a analisar, fornecendo uma orientação adequada, para uma análise posterior mais minuciosa. Nesta fase é efetuado um levantamento dos diversos equipamentos existentes em cada setor e suas características, os tipos de energia consumidos e as respetivas faturas de energia. Se a instalação a auditar possuir contadores parciais de energia, procede-se à recolha dos seus valores de consumo. Efetua-se um levantamento relativo à quantidade de produtos produzido, o seu volume de produções e ao número de horas de funcionamento das diversas áreas e equipamentos. Com os dados recolhidos das faturas de energia é possível obter o consumo global de energia consumida, utilizando como unidade de energia a, tonelada equivalente de petróleo (tep) [3].

Na micro-auditoria pretende-se obter uma análise detalhada de cada setor, avaliando os processos de transformação de energia, nesta fase é efetuado o reconhecimento dos setores e equipamentos que é imprescindível proceder a medições, para caracterização dos fluxos energéticos e caracterização energética dos diferentes equipamentos.

2.1.3 Metodologia para a realização de uma auditoria energética

A definição das etapas a seguir para execução de uma auditoria é de extrema importância. A Figura 2.1 representa as quatro etapas sequenciais de um exemplo de metodologia passível de ser implementada.

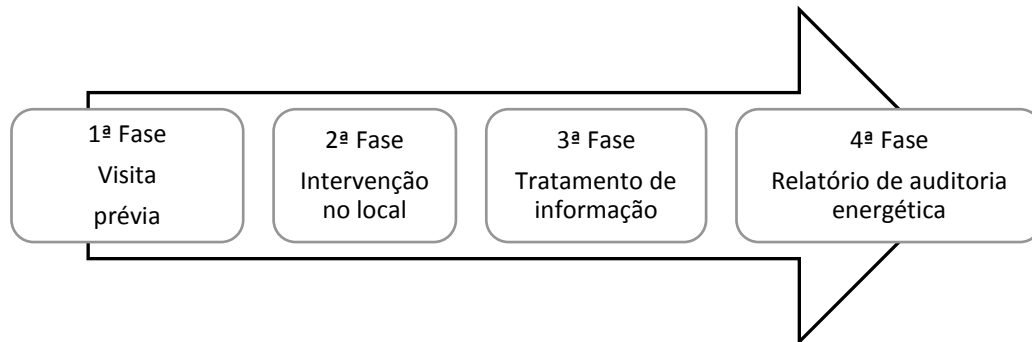


Figura 2.1 – Etapas de uma auditoria energética.

A primeira etapa da auditoria corresponde à visita prévia às instalações, de modo a analisar os equipamentos e processo produtivo. Nesta fase é efetuado um inventário dos equipamentos existentes na instalação, o levantamento das suas características e respetivas fichas técnicas (se possível).

O inventário aos equipamentos permite uma ulterior comparação entre as tecnologias usadas e as existentes no mercado que possam melhorar o rendimento energético da instalação/ empresa. Ainda nesta visita prévia é efetuado o levantamento do regime de laboração da instalação, do período de funcionamento de cada setor ou equipamento, assim como dos processos produtivo e energético. Recolhem-se os dados históricos da empresa quanto a faturas energéticas e verificados os pontos para medições.

Na segunda fase do processo, o auditor analisa as condições de utilização de energia na instalação, efetua medições, registos e análises que deverão permitir caracterizar em termos de eficiência os equipamentos, determinar os consumos finais de energia nos diversos setores da instalação, elaborar balanços energéticos em equipamentos de processo, determinar os consumos específicos e globais e por tipo de produto. A qualidade final da auditoria depende fortemente da qualidade do trabalho desenvolvido nesta fase.

Após a intervenção no local procede-se ao tratamento de toda a informação recolhida, de forma a obter-se o consumo global de energia, a conhecer-se a distribuição dos consumos de energia por setor e equipamento, e ainda avaliar-se a eficiência energética dos equipamentos.

Nesta fase estudam-se as soluções tecnológicas ou intervenções a serem implementadas que possam reduzir a fatura de energia e o consumo global de energia.

O relatório da auditoria é a última etapa do processo, nesta fase é apresentada a informação básica da empresa, a análise global e análise detalhada de cada setor e equipamento. Efetuam-se recomendações às situações anómalas detetadas, quantificam-se as oportunidades de economia de energia com viabilidade do ponto de vista técnico e económico [18, 19].

2.1.4 Medições em auditorias energéticas

Como referido anteriormente o trabalho de campo corresponde à fase de recolha de toda a informação.

A quantificação global das diferentes energias utilizadas numa instalação efetua-se através das faturas de energia. No entanto, esta informação não é suficiente para os requisitos básicos que constituem a realização de uma auditoria energética, torna-se essencial durante o trabalho de campo proceder a um conjunto de medições de forma a quantificar o consumo de energia por setor e equipamento e aferir sobre o rendimento dos equipamentos.

A realização destas medições pressupõe a utilização de equipamentos de recolha de dados. Em seguida apresentam-se as medições efetuadas nas auditorias energéticas e os equipamentos utilizados:

- Medição de grandezas elétricas – de entre os diversos equipamentos existentes para analisar os níveis de energia elétrica existe o multímetro, a pinça amperimétrica e o analisador de energia elétrica. Este último é bastante utilizado quando se pretende uma monitorização instantânea durante um período alargado de tempo.
- Medições de caudal de gases – podem ser efetuadas por medidores de caudal por diferencial de pressão e por velocidade. Os medidores de caudal por diferencial de pressão mais utilizados são o tubo de *Pitot* e o de *Venturi*. Os medidores de caudal por velocidade, utilizados são o anemómetro de turbina e térmico.
- Medições de temperatura – podem ser realizadas por diferentes métodos, nomeadamente: termopares, termistor e termómetros de infravermelhos.
- Medição da humidade – medições de humidade relativa do ar é efetuada com recurso a higrómetros digitais.

- Analisadores de gases de combustão - são equipamentos de fácil transporte e utilização os utilizados em auditorias energéticas, geralmente utilizam-se em geradores de calor, com o intuito de se aferir sobre a eficiência da combustão. Medem o teor de oxigénio, dióxido de carbono e monóxido de carbono nos gases de combustão. [19]

2.1.5 Legislação em Portugal

A legislação em vigor que regula o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) disposta pelo Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de abril retificado pela Lei n.º 7/2013 de 22 Janeiro e pelo Decreto-Lei n.º 68-A/2015 de 30 de abril tem por objetivo promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos das instalações consumidoras intensivas de energia. Para esse efeito as instalações ao abrigo da presente legislação têm a obrigatoriedade de realizar periodicamente auditorias energéticas e estabelecer Planos de Racionalização de Energia (PREn) com a Direção Geral da Energia e Geologia (DGEG) promovendo a eficiência energética.

A atual legislação aplica-se a todas as instalações que no ano civil anterior tenham tido um consumo de energia superior a 500 tep/ano. No entanto ficam excluídas das obrigações impostas por aquele diploma as instalações de cogeração juridicamente autónomas, empresas de transportes com frotas próprias consumidoras intensivas de energia e edifícios abrangidos pelo Decreto-Lei n.º 78/2006, 79/2006 e 80/2006, de 4 de abril, exceto quando integrados na área de uma instalação industrial consumidora de energia. Está ainda prevista a possibilidade de empresas com um consumo energético inferior a 500 tep/ano celebrarem voluntariamente acordos de racionalização de energia.

As instalações consideradas como consumidoras intensivas de energia são subdivididas em dois escalões com base no consumo de energia anual:

- Instalações com um consumo de energia anual entre os 500 e os 1000 tep têm a obrigatoriedade de realizar uma auditoria energética com uma periodicidade de 8 anos para elaboração de um PREn, tendo como metas a atingir nesse mesmo período de tempo, uma redução da intensidade energética e consumo específico de 4% e a manutenção dos índices de intensidade carbónica. Sendo que no final do quarto ano ao abrigo do Artigo 12º do Decreto-Lei n.º 68-A/2015 deverá ser realizada uma auditoria intermédia.

- Instalações com um consumo de energia superior a 1000 tep/ano têm a obrigatoriedade de realizar uma auditoria energética com a periodicidade de 8 anos, para elaboração de um PReN, tendo como metas a atingir nesse mesmo período de tempo, uma redução da intensidade energética e consumo específico em 6%. Sendo que no final do quarto ano ao abrigo do Artigo 12º do Decreto-Lei n.º 68-A/2015 deverá ser realizada uma auditoria intermédia.

Os indicadores de energia, intensidade energética, consumo específico e intensidade carbónica a determinar numa auditoria são medidos da seguinte forma:

- Intensidade energética - quociente entre o consumo total de energia e o valor acrescentado bruto. No caso da energia consumida ser proveniente de um recurso endógeno ou de uma fonte de energia renovável só é considerado 50% do seu valor;
- Consumo específico - quociente entre o consumo total de energia e o volume de produção. No caso da energia consumida ser proveniente de um recurso endógeno só é considerado 50% do seu valor.
- A intensidade carbónica - quociente entre o valor das emissões dos gases de efeito estufa resultante das diferentes formas de energia de energia consumidas e o consumo total dessa energia.

O processo de controlo por parte do Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia, desde a fase de inscrição das indústrias no portal da SGCIE até à fase de avaliação do cumprimento da legislação em vigor, está representado resumidamente na Figura 2.2.

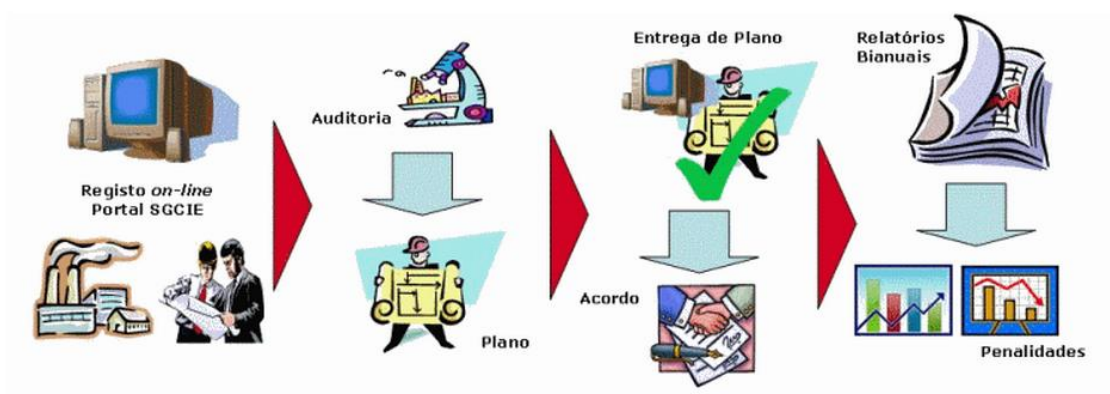


Figura 2.2 - Sistema de gestão dos consumidores intensivos de energia [20]

De acordo com a legislação em vigor, as instalações com um consumo intensivo de energia têm a obrigatoriedade de:

- Procederem ao seu registo *online* no portal SGCI, no prazo de quatro meses após o final do ano em que a instalação entrou em funcionamento.
- Realizarem uma auditoria energética num período de quatro meses após o registo *online* no portal SGCI. A auditoria energética deve ser conduzida por técnicos ou entidades devidamente habilitados para a elaboração de auditorias energéticas e credenciados pela Direção Geral da Energia e Geologia (DGEG).
- Apresentarem à ADENE o PREn (realizado com base na auditoria energética) nos quatro meses seguintes após a realização da auditoria energética. Se a ADENE considerar que o PREn está devidamente instruído submete-o à aprovação da Direção Geral da Energia e Geologia (DGEG). Após a aprovação por parte da DGEG, o PREn passa a denominar-se “Acordo de Racionalização Consumos de Energia (ARCE)”.

A cada dois anos do período de vigência do ARCE, a instalação deverá apresentar à SGCI um Relatório de Execução e Progresso (REP), que permita demonstrar a implementação das medidas acordadas e analisar desvios obtidos relativamente às metas a atingir. Esse relatório deverá ser submetido no portal da SGCI.

No final do período do ARCE o último REP denominado de relatório final de execução é elaborado por um técnico ou entidade, escolhido pela ADENE que não tenha intervindo nos relatórios intercalares nem no PREn.

De forma a incentivar a eficiência energética, as instalações abrangidas por um ARCE aprovado pela DGEG estão isentas de imposto sobre os produtos petrolíferos (ISP) e têm previsto o ressarcimento de 50% dos custos da auditoria energética mediante determinadas condições.

O incumprimento das metas estabelecidas para os três indicadores de referência no final do período de vigência do ARCE ou não implementação das medidas estabelecidas, tem como consequência o pagamento de penalizações, que variam consoante o desvio em relação à meta.

A regulamentação técnica com vista a aplicação do Decreto-Lei n.º 73/2008 retificado pela Lei n.º 7/2013 de 22 janeiro e pelo Decreto-Lei n.º 68-A/2015 de 30 de abril é dada pela:

- Portaria n.º 519/2008, de 15 de abril - aprova os requisitos de habilitação e experiência profissional a observar para a credenciação de técnicos e identidades do SGCI.

- Despacho n.º 1713/2008, de 26 de junho - procede à publicação dos fatores de conversão das diferentes formas de energia para tonelada equivalente de petróleo (tep) e os fatores de conversão para o cálculo da intensidade carbónica.
- Despacho n.º 17449/2008, de 21 de junho - fornece informações e sugestões de forma a serem alcançados os objetivos da auditoria energética do PREN e dos respetivos REP.
- Portaria n.º 1530/2008, de 29 de dezembro - estabelece as taxas de imposto sobre os produtos petrolíferos liquefeitos (ISP) ao qual estão isentas instalações sujeitas a um ARCE ou ao abrigo do Plano Nacional de Atribuição das Licenças de Emissão (PNALE).

2.2 Medidas de Eficiência Energética Transversais à Indústria

A energia consumida no sector industrial inclui eletricidade, gás natural e derivados de petróleo. É utilizada para variados fins: como força motriz, na iluminação, para aquecimento e refrigeração, no processamento e montagem, no armazenamento, entre outros. A forma de utilização de energia e a eficiência no consumo energético nos diferentes setores da indústria são determinantes para se alcançar o novo paradigma energético [14].

O aumento da eficiência energética numa instalação industrial proporciona o mesmo nível de produção a um custo mais reduzido através da redução de consumos. A aplicação de medidas de eficiência energética permite o reforço da competitividade das empresas, a redução de custos da fatura energética, assim como a diminuição dos valores de intensidade energética, a diminuição da dependência energética e das emissões de poluentes [14,16].

Uma auditoria energética a qualquer instalação industrial, ainda que do mesmo sector, é sempre um novo desafio. No entanto existem medidas que são transversais à indústria, isto é, podem ser aplicadas à generalidade das indústrias. Enquanto algumas outras são medidas específicas, ou seja, só são aplicadas a um determinado tipo de indústria [14]. As medidas específicas de cada sector incidem, na generalidade dos casos, na diminuição do consumo marginal de energia. A figura 2.3 mostra um conjunto de medidas transversais à indústria, bem como os setores aonde já foram estudadas e aplicadas algumas medidas específicas.



Figura 2.3 - Tipologia de medidas aplicáveis à indústria transformadora [14]

Note-se que de entre as medidas específicas setoriais, a indústria farmacêutica, não está caracterizada.

Os sistemas de acionamento por motores elétricos envolvem medidas de substituição de equipamentos de tecnologias por vezes obsoletas por equipamentos mais eficientes do ponto de vista energético, instalação de variadores eletrónicos de velocidade que permitem uma economia de energia e ainda várias medidas de operação e manutenção de sistemas de ar comprimido.

No que se refere aos sistemas de iluminação, recorre-se muitas vezes a estudos luminotécnicos, substituição de luminárias e sistemas de monitorização.

As medidas de eficiência do processo industrial envolvem um estudo a diversas tecnologias do mercado de processos industriais, que possam ser aplicados às instalações nomeadamente a integração energética de processo. Envolvem ainda medidas de manutenção, substituição de equipamentos e isolamentos térmicos.

Relativamente à produção de calor e frio as medidas de eficiência energética aplicadas passam muitas vezes por uma manutenção adequada dos equipamentos e recuperação energética de calor rejeitado, nesta tipologia enquadra-se ainda a cogeração, que será abordada na secção 2.2.1.

2.2.1 Produção combinada de energia elétrica e térmica

Entende-se por cogeração o sistema de produção e utilização simultânea de calor e eletricidade, que permite o aproveitamento de mais de 70% (mais do dobro da originada no sistema convencional) da energia térmica proveniente dos combustíveis utilizados no processo

[21]. O aproveitamento da energia pode envolver a produção de vapor, ar quente, água quente, termofluído.

Quando a energia térmica se distribui por duas fileiras distintas, um fluxo quente e um outro frio, o sistema designa-se por trigerção. Neste sistema uma parte ou a totalidade do calor é convertida em frio, com recurso a um equipamento designado por *chiller*, do tipo de absorção ou de adsorção. Esta forma de geração de energia é uma alternativa à produção separada de calor e eletricidade, apresentando valores superiores de eficiência energética, a diminuição no consumo de combustível e a redução das emissões de gases poluentes, entre os quais os GEE [22-24].

De entre os principais impactos que a cogeração apresenta a nível industrial e nacional, citam-se os seguintes:

- Redução da fatura energética;
- Melhoria do rendimento energético nacional;
- Ganhos resultantes da venda de energia elétrica;
- Redução dos custos de produção;
- Redução das perdas na rede associadas à produção descentralizada de energia;
- Redução da dependência energética Nacional face ao exterior.

No entanto, a cogeração requer um esforço financeiro elevado, e uma análise financeira cuidada [21, 22].

As figuras 2.4 e 2.5 mostram um sistema de produção energia elétrica e térmica em separado e em simultâneo, respetivamente. Para a mesma energia consumida, na situação de produção combinada de energia verifica-se um consumo energético de 125 kWh, face aos 143 kWh consumidos na produção separada de energia. O que equivale a uma redução percentual no combustível de 12,6%.

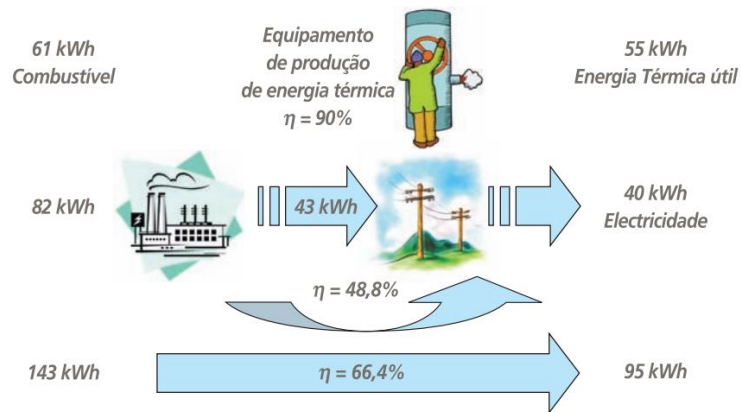


Figura 2.4 - Produção convencional de energia elétrica e térmica [24]

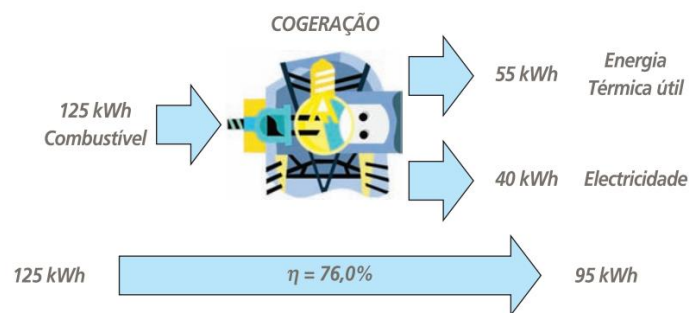


Figura 2.5 - Produção combinada de energia elétrica e térmica [24]

Os potenciais utilizadores de cogeração são instalações em que se verificam as seguintes características: necessidade simultânea e contínua de energia térmica e energia elétrica, disponibilidade no acesso a combustíveis, período de funcionamento de pelo menos 4 500 - 5 000 horas por ano, espaço suficiente e uma adequada localização para a implementação do novo equipamento [21].

2.2.1.1 Sistemas de cogeração

Os sistemas de cogeração ou tecnologias de cogeração são passíveis de se subdividirem em dois grupos, tecnologias convencionais e emergentes.

As tecnologias convencionais, nas quais se incluem as turbinas de gás, turbinas de vapor e motores de combustão interna são largamente utilizadas na indústria, as tecnologias emergentes incluem as microturbinas, ciclos orgânicos de Rankine, motores Stirling e pilhas de combustível. Nesta secção serão abordadas as tecnologias convencionais de cogeração.

Cogeração com turbina a vapor

Os ciclos de turbina de vapor são baseados no ciclo de Rankine, o vapor é produzido em caldeiras de vapor. Este tipo de ciclo é utilizado em instalações, com potências elétricas superiores a 15 MW e para rácios de calor/eletricidade a variar entre 3 e 9. O ciclo de turbina a vapor é para indústrias com elevadas necessidades térmicas.

Existem três tipos de turbinas de vapor, contrapressão, condensação e extração. Na turbina de vapor de contrapressão, o fluxo de vapor exausto da turbina é superior à pressão atmosférica e enviado diretamente para um permutador de processo, para produzir água quente ou vapor a pressão relativamente baixa. Na turbina de condensação o vapor é extraído a pressão inferior à atmosférica, sendo encaminhado para um condensador vácuo. Este tipo de turbina é pouco utilizado, uma vez que o seu rendimento é efetuado para otimizar o rendimento da conversão elétrica. Na turbina de extração o vapor é extraído a pressões pré-determinadas, com aproveitamento num permutador de processo, sendo o caudal de vapor expandido a uma pressão inferior á pressão atmosférica e condensado, num condensador. O ciclo com turbina de extração permite uma regulação do rácio de calor/eletricidade.

Na figura 2.6, encontra-se o ciclo de turbina de vapor de extração.

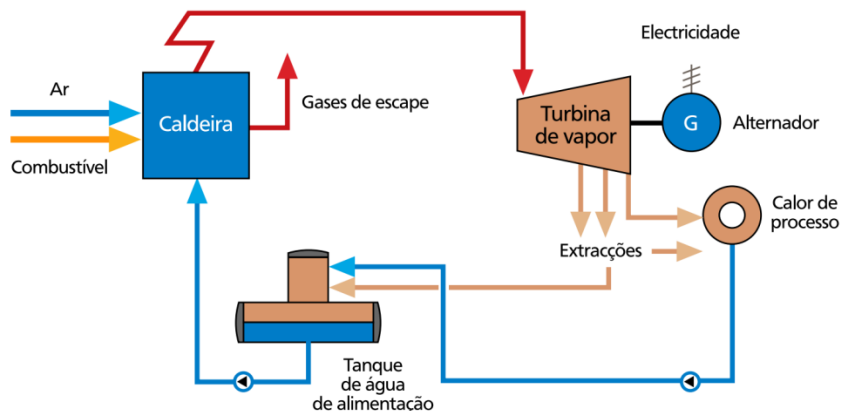


Figura 2.6 - Esquema de cogeração com ciclo de turbina a vapor de extração [25]

Apresentam-se em seguida algumas vantagens e desvantagens da utilização de turbinas de vapor:

Vantagens

- Tecnologia madura;
- Aplicável a vários tipos de combustível;
- Capacidade de fornecer vapor a várias pressões;
- Elevadas quantidades de calor produzido.

Desvantagens

- Investimento elevado;
- Baixo rendimento elétrico;
- Baixa eficiência a carga parcial;
- Arranque lento (1h).

Cogeração com turbina de gás

As tecnologias de cogeração com turbina a gás são utilizadas em instalações com potências elétricas que variam dos 40 MW a 250 MW, sendo adequadas para processos com rácios de calor/eletricidade superiores a 2.

Este sistema, que funciona segundo o ciclo Brayton, o ar é comprimido no compressor para posteriormente ser queimado na câmara de combustão como se verifica na figura 2.7. Os gases resultantes da combustão a elevada temperatura (900-1200°C) e pressão, são expandidos na turbina que através de um gerador acoplado à mesma, que produz a energia elétrica. Depois de expandidos os gases de combustão e à saída da turbina, estes encontram-se a temperaturas elevadas (450-550°C), sendo possível aproveitar a sua energia termina numa caldeira de recuperação ou recuperador de calor.

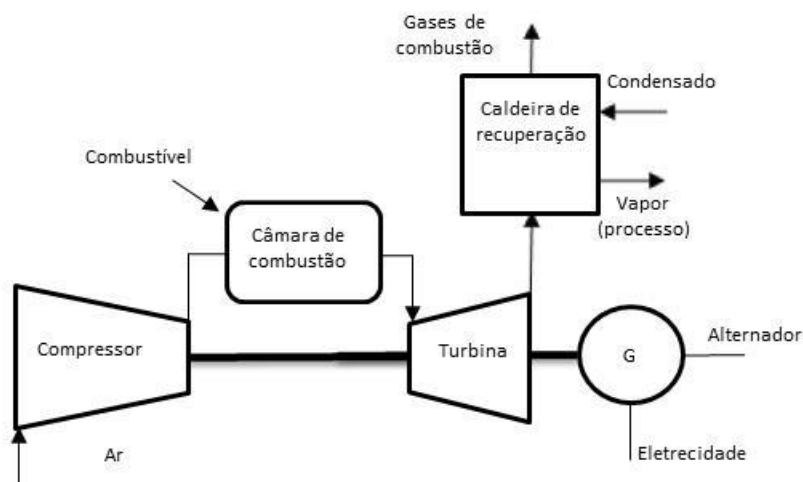


Figura 2.7 - Esquema de uma central de cogeração com turbina a gás (adaptado de [26])

Apresentam-se em seguidas algumas vantagens e desvantagens da utilização de turbinas a gás:

Vantagens

- Arranque rápido;
- Fácil manutenção;
- Disponibiliza calor a elevada temperatura;
- Elevada fiabilidade.

Desvantagens

- Baixa eficiência a regime de carga parcial;
- Requer longas horas de funcionamento;
- Limitação no tipo de combustível a utilizar;
- Tempo de vida curto.

Cogeração com ciclo combinado

A cogeração de ciclo combinado é um sistema que resulta da associação de uma turbina a gás e uma turbina de vapor no mesmo ciclo, é aplicado para instalações que requer grandes quantidades de energia elétrica superiores a 3,5 MW e que apresentem um rácio calor/electricidade inferiores a 0,2.

Neste sistema os gases à saída da turbina de gás, são aproveitados numa caldeira de recuperação, para produção vapor a alimentar a turbina de vapor, de forma a produzir energia elétrica adicional.

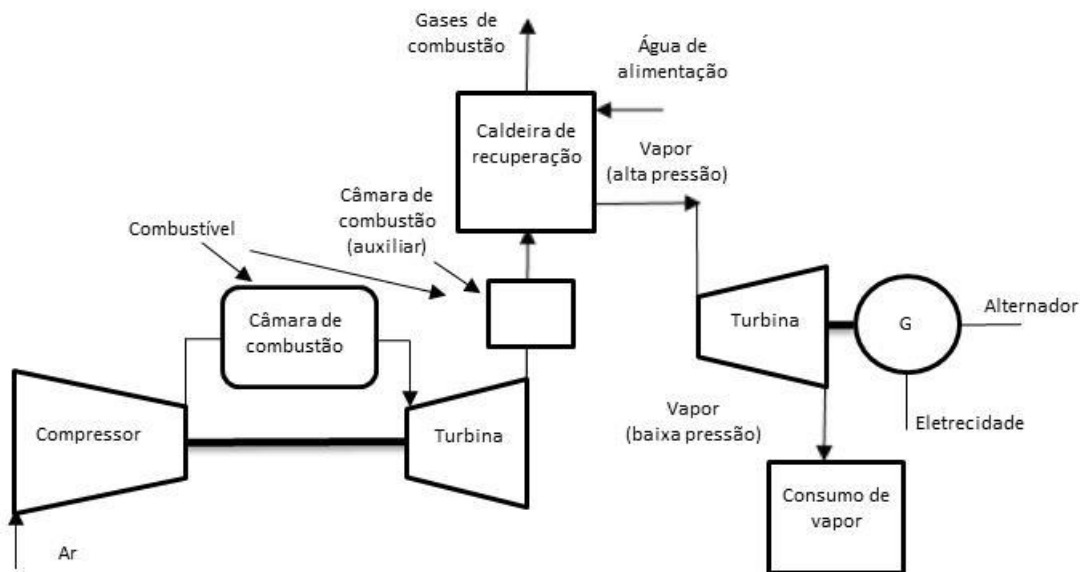


Figura 2.8 - Esquema de cogeração de ciclo combinado (adaptado de [27])

Apresentam-se em seguidas algumas vantagens e desvantagens da utilização do ciclo combinado:

Vantagens

- Rendimento global elevado;
- Elevada produção de energia elétrica.

Desvantagens

- Maior complexidade;
- Baixa eficiência a carga parcial.

Cogeração com motor alternativo de combustão interna

Centrais cogeração de menores dimensão são baseadas em motores alternativos de combustão interna (Figura 2.9), em que a eletricidade é produzida através de um gerador acoplado ao veio do motor e a energia térmica resulta do aproveitamento dos gases de combustão, do circuito de arrefecimento de alta temperatura (AT) e baixa temperatura (BT), permitindo produzir água quente a 95-90°C ou vapor a baixa pressão através de uma caldeira de recuperação. Este tipo de tecnologia apresenta rácios de calor/ eletricidade que variam entre 1 e 2.

Os motores de combustão interna, distinguem-se em de ciclo Diesel e Otto. Enquanto os motores de ciclo Diesel para o processo de combustão, consomem Diesel e fuelóleo os motores de ciclo Otto, utilizam geralmente no processo de combustão, gás propano, biogás e gás natural. Sendo este último, aquele que liberta a menor quantidade de dióxido de carbono (CO_2), de dióxido de azoto (NO_x) na sua combustão.

Em sistemas de trigeração o motor de combustão interna é a tecnologia vulgarmente utilizada. Uma das grandes vantagens, que este equipamento apresenta é o bom desempenho a carga parcial, acima dos 75% [27].

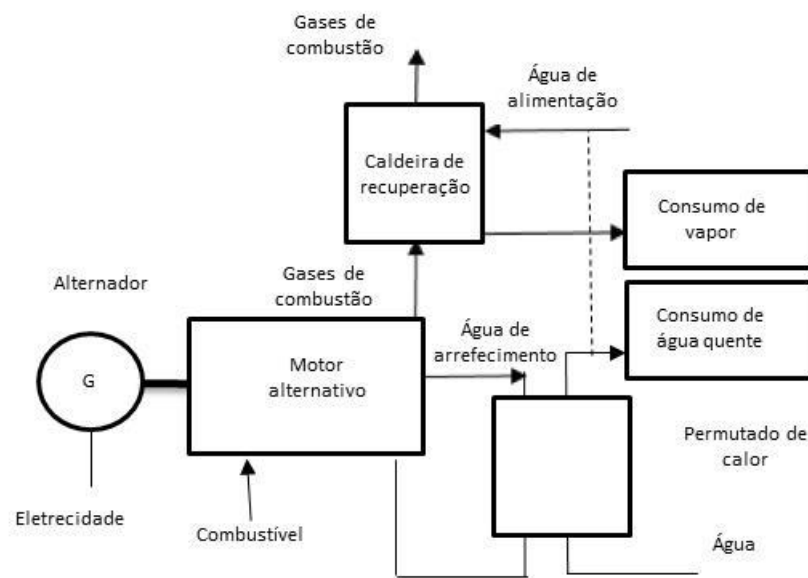


Figura 2.9 - Esquema de princípio do sistema de cogeração com motor de combustão interna (adaptado de [27])

Apresentam-se em seguidas algumas vantagens e desvantagens da utilização do motor alternativo de combustão interna:

Vantagens

- Arranque rápido;
- Boa adaptação a variações de carga;
- Baixo custo de investimento;
- Bom desempenho a carga parcial (>75%).

Desvantagens

- Elevadas paragens;
- Elevado ruído;
- Calor a baixa temperatura;
- Necessidade de refrigeração.

Trigeração

Os sistemas de trigeração produzem água refrigerada a partir de uma fonte de calor. Em que a água refrigerada é obtida através de um *chiller* de absorção ou de adsorção.

Os *chillers* de absorção permitem produzir água refrigerada a partir de uma fonte de calor (97 a 108°C) utilizando para tal uma solução de um sal (brometo de lítio) num processo termoquímico de absorção. Este equipamento é o mais utilizado na indústria, apresentam como vantagem um tempo de vida longo e um baixo custo de manutenção, no entanto apresentam índices de eficiência energética (EER) reduzidos (inferiores a 1,1).

Um *chiller* de adsorção, baseia-se num processo de adsorção, sendo este um fenómeno de adesão superficial. Este equipamento é composto por um gerador, um absorvedor e um condensador utilizando água como fluido refrigerante. Neste ciclo o vapor de água adere-se à superfície do adsorção, neste é aquecido pelo gerador (70 a 90°C), libertando-se do adsorção e deslocando-se para o condensador, onde muda de fase (estado líquido), para em seguida, no evaporador provocar o efeito refrigerante. Este equipamento apresenta como vantagem um baixo custo de manutenção, pode ser utilizado com temperaturas de cerca 55°C, sendo bastante atrativo em tecnologias de sistemas solares ou cogerações de baixa temperatura, no entanto têm como desvantagem um elevado custo, cerca 500 €/kWh.

3

APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O presente capítulo retrata o caso de estudo desta dissertação, inicialmente apresenta-se a unidade fabril auditada. Efetuando-se uma breve introdução do processo produtivo uma vez que, no decorrer do presente trabalho, não foi possível aceder às áreas de produção devido a restrições da instalação. Procede-se à descrição dos diversos serviços auxiliares, dos principais equipamentos da instalação assim como os procedimentos das medições efetuadas.

3.1 A Instalação Industrial

A instalação industrial estudada pertence ao setor farmacêutico e dedica-se, especificamente, à produção de medicamentos sólidos. Esta unidade industrial consome dois tipos de energia, nomeadamente, energia elétrica e gás natural.

No anexo A, encontra-se o *layout* da fábrica e um diagrama do fluxo de energia da instalação auditada.

Da unidade fabril fazem parte 5 edifícios, 3 dos quais ligados entre si, a saber:

- Dois edifícios administrativos;
- Um edifício destinado à produção, constituído por zonas técnicas, tais como: zona de produção, zonas de apoio à produção ou de serviços auxiliares;
- Dois edifícios destinados ao armazenamento, quer de matérias-primas, quer do produto acabado, assim como uma área de controlo de qualidade de produto

Entende-se como serviços auxiliares os serviços de energia, as utilidades e os equipamentos que corroborem para o processo produtivo. As valências destes serviços são abordadas mais pormenorizadamente na secção 3.3.

Durante o ano de referência (2014) a operou de segunda-feira a sexta-feira, nos seguintes períodos:

- Setor de Produção: – 1º turno: das 7h30 às 16h00 e 2º turno: das 15h30 às 23h30

- Setor Administrativo – das 9h00 às 18h00

Em 2014 ocorreram as seguintes paragens anuais: duas semanas no mês de agosto, uma semana no período de Natal e dois dias de paragem no Carnaval. Estes períodos foram aproveitados para manutenção.

3.2 Descrição do Processo Produtivo Industrial

A instalação industrial em estudo dedica-se à produção de produtos designados por medicamentos sólidos, onde se incluem as cápsulas e os comprimidos.

Como se pode observar na Figura 3.1 o processo produtivo inclui diferentes áreas e processos. A primeira etapa consiste na receção das matérias-primas que são recebidas e acondicionadas em armazém devidamente climatizado. Segue-se um processo de controlo de qualidade e pesagem em salas designadas para o efeito.

Concluída a etapa de receção inicia-se a etapa de produção, sendo que esta pode ser dividida em quatro fases: granulação, mistura, secagem e compressão.

Na fase de granulação os princípios ativos do medicamento em pó são misturados com os excipientes, sendo obtido como produto intermédio, o granulado. O processo de granulação permite uma melhoria das propriedades físicas dos pós e minimiza as variações de granulometria nos diferentes lotes de matérias-primas. Nesta fase é consumido ar quente devidamente tratado, proveniente de unidades de tratamento de ar a uma temperatura superior a 55 °C. Este ar é posteriormente expelido para a atmosfera através de um sistema de despoeiramento.

Após a secagem do granulado são adicionados outros excipientes para melhoria das suas propriedades físicas. O processo termina com a compressão para originar o produto final.

A produção é efetuada por lotes sendo recolhida uma parte de cada um destes para análise do controlo de qualidade. Entre a produção dos lotes é efetuada uma lavagem aos equipamentos no seu interior com água desmineralizada e quimicamente tratada.

O produto final é empacotado e armazenado até se proceder à sua expedição.

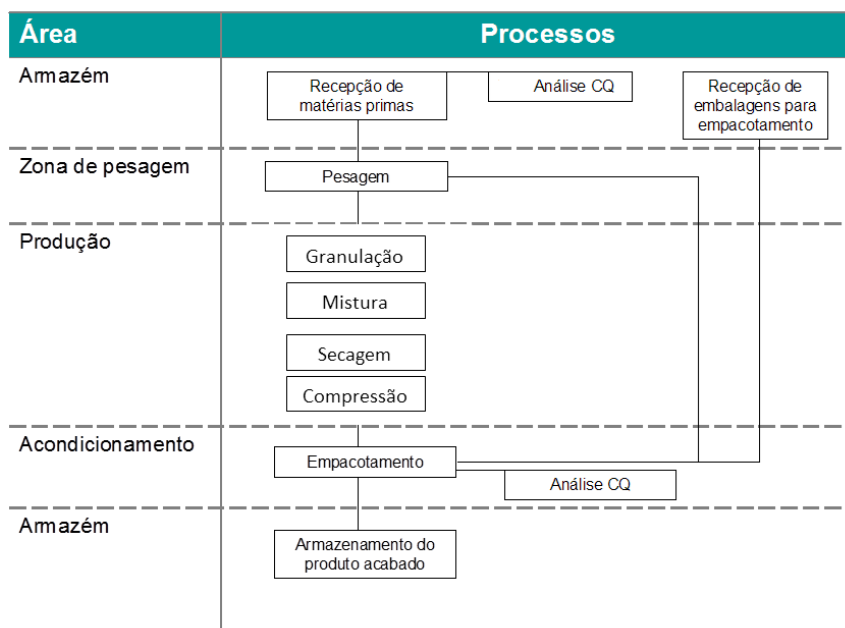


Figura 3.1 - Diagrama do processo fabril.
 Legenda: CQ-control de qualidade

3.3 Serviços Auxiliares e Equipamentos

Na primeira fase da auditoria efetuou-se um reconhecimento da instalação, nomeadamente aos serviços auxiliares e principais equipamentos, por forma a recolher o máximo de informação possível acerca das características dos equipamentos e do seu funcionamento.

3.3.1 Energia elétrica

A energia elétrica é adquirida à rede a uma tensão de 10 kV (média tensão) em sistema trifásico. A receção é efetuada no posto de transformação existente, que dispõe de um transformador de 1600 kVA. Esta segue através de cabos que se interligam ao Quadro Geral de Baixa Tensão Normal (QGBT-N) e ao Quadro Geral de Baixa Tensão de Emergência (QGBT-E). Através destes QGBT's seguem alimentações para os quadros parciais que alimentam diversas áreas e equipamentos da instalação.

A faturação de energia é feita em quatro períodos horários: pontas, cheias, vazio e super-vazio. Este tipo de faturação valoriza o consumo de energia nos períodos de vazio e super-vazio e penaliza o seu consumo nos períodos de pontas e cheias. A energia ativa é faturada e para a compensação desta, existem na instalação industrial baterias de condensadores.

Na Tabela 3.1 apresentam-se as características principais do transformador existente.

Tabela 3.1 - Principais características do transformador

Marca	Posto de transformação	Tensão (kV)	Potência (kVA)	Ano Fabrico	Impedância	Grupo Ligação
Efacec	PT1	10/0,4	1600	2006	6,30%	Dyn5

Foi possível o acesso às faturas de eletricidade do ano civil de 2014 o que permite efetuar uma análise ao perfil de consumos. As faturas de eletricidade utilizam como unidade de energia o kWh.

No Anexo B é apresentado o fator de conversão de energia elétrica em termos de energia primária, considerando o rendimento médio das centrais termoelétricas que utilizam combustíveis fósseis e o ciclo horário semanal em média tensão.

3.3.2 Gás natural

O abastecimento de gás natural à fábrica efetua-se através de um Posto de Regulação e Medida (PRM), localizado nas imediações da fábrica. Do PRM segue uma tubagem pelo subsolo até à central térmica.

O acesso às faturas de gás natural permite efetuar uma análise ao perfil de consumo. As faturas de gás natural são dispostas em termos de energia kWh com base no Poder Calorífico Superior (PCS) e em termos volúmicos, metro cúbico normal $m^3(n)$.

No Anexo B encontram-se os valores do PCS e do Poder Calorífico Inferior (PCI) do gás natural, no processo de auditorias energéticas a energia contabiliza-se, com base no PCI do combustível.

3.3.3 Central de tratamento de água

A presente instalação industrial possui uma central de tratamento de água da rede utilizada no processo de produção e na lavagem dos equipamentos. Esta possui um reservatório para acumulação da água tratada, funcionando no período laboral e durante o regime noturno.

3.3.4 Central de ar comprimido

A empresa dispõe de uma central de ar comprimido para toda a fábrica. Composta por dois compressores de parafuso, do tipo isento de óleo equipados com variador de velocidade e por dois secadores de ar do tipo de adsorção que funcionam alternadamente e um depósito de inércia (Figura 3.2).

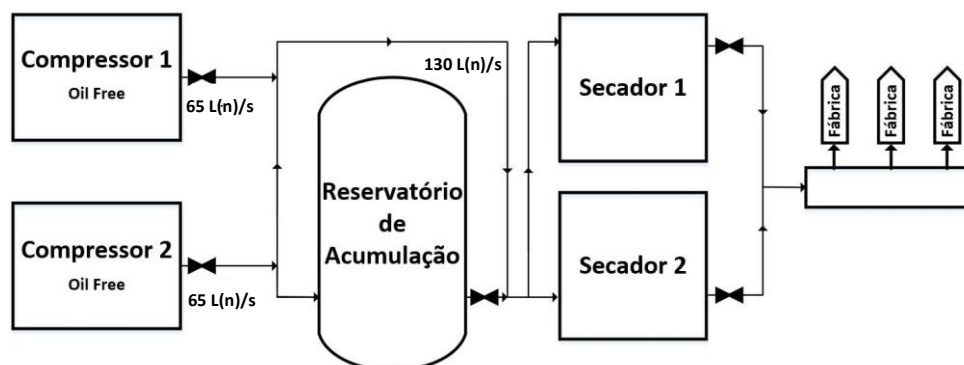


Figura 3.2 - Esquema da central de ar comprimido.

Nas Tabela 3.2 e Tabela 3.3 encontram-se as principais características dos compressores e secadores de ar, respetivamente.

Tabela 3.2 - Características principais dos compressores de ar comprimido

	Marca	Pressão Máxima bar (g)	Potência Nominal Motor (kW)	Caudal L(n)/s
Compressor 1 e 2	Atlas Copco	8,6	37	90

Tabela 3.3 - Características principais dos secadores de ar comprimido

	Marca	Modelo	Capacidade L(n)/s
Secador 1 e 2	Atlas Copco	CD 140	130

Os compressores operam num regime de alternância diária, contudo podem operar em simultâneo em situações de pico de consumo. Na secção 3.3.4 são avaliadas as condições de arranque do compressor em segunda prioridade.

O ar comprimido é utilizado para acionamento de sistemas de válvulas de alguns equipamentos.

A central de ar comprimido encontra-se em funcionamento todos os dias exceto aos fins de semana e períodos de férias, de forma a satisfazer as necessidades de ar comprimido. Durante o período noturno, altura em que a produção encerra a única zona da fábrica consumidora de ar comprimido, é a central de tratamento de água.

Durante a compressão do ar comprimido existe a libertação de energia calorífica. Por questões de fiabilidade e rendimento dos equipamentos o calor desenvolvido durante a compressão do ar deve ser eficientemente retirado da central compressora [29].

Tendo em atenção as temperaturas excessivas que podem ser desenvolvidas na central de ar comprimido, verificou-se que esta possui ventilação natural para entrada e saída do ar através de condutas, promovendo assim a remoção do calor desenvolvido nos compressores para o exterior.

Existem ainda dois aerotermos a água fria a funcionar permanentemente, com uma temperatura de *setpoint* de 22 ± 3 °C.

Compressores

Dadas as necessidades requeridas para a qualidade do ar comprimido, esta unidade fabril utiliza compressores de parafuso, do tipo isento de óleo. De acordo a norma ISO 8573-1 estão inseridos na classe 0, relativamente à quantidade máxima de óleo à saída do compressor.

De referir que as unidades compressoras existentes estão concebidas para no seu interior, refrigerarem o ar comprimido. Os condensados inerentes a este processo são removidos através de purgas automáticas.

Secador de adsorção de auto-regeneração

No seguimento da compressão e refrigeração do ar comprimido, verifica-se a presença de vapor de água no mesmo e, se este não for tratado poderá condensar e originar problemas de corrosão [29].

Dada a especificidade da indústria em causa, para remover a humidade presente no ar comprimido os secadores utilizados são de adsorção do tipo auto-regeneração (Figura 3.3).



Figura 3.3 - Secadores de adsorção.

Este tipo de equipamentos utiliza um dessecante, que adsorve o vapor de água presente na mistura de ar comprimido. A adsorção é um processo físico em que a humidade fica retida à superfície do dessecante. A utilização de secadores de adsorção permite obter pontos de orvalho por pressão negativos, sem alterar a temperatura do ar. Entende-se ponto de orvalho por pressão, a temperatura à qual o ar comprimido irá condensar à atual pressão de serviço.

Os secadores de adsorção presentes na instalação industrial são constituídos por duas torres que funcionam alternadamente. Enquanto uma torre estiver a operar (retirar o vapor de água presente no ar comprimido) a outra é regenerada por uma pequena parcela do caudal do ar comprimido proveniente da torre em operação. Esta parcela de ar comprimido utilizada para regeneração do dessecante constitui uma perda no processo, uma vez que se trata de ar comprimido tratado, que não é aproveitado para o processo, sendo eliminado para a atmosfera. A Figura 3.4 apresenta o diagrama pneumático de um secador de adsorção.

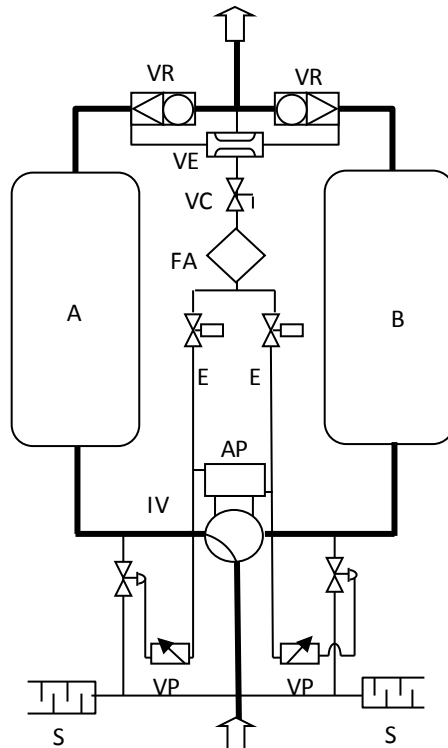


Figura 3.4 - Diagrama pneumático do secador de adsorção de autorregeneração (adaptado de [30])
 AP - atuador pneumático; B - Torre B; E - eletroválvula; IV - válvula de três vias; FA - filtro de ar; S - silenciador; VE – válvula de estrangulamento; VP - válvula pneumática; VR - válvula de retenção.

O ar comprimido proveniente do compressor entra no secador é conduzido para uma das torres através da válvula de três vias (IV), que é controlada por um atuador pneumático (AP). À medida que o ar flui através da torre, o dessecante retém o vapor de água e o ar comprimido é seco, os tempos de contacto entre o ar e o dessecante variam entre 0,1 e 0,5 segundos [18]. Atingido o cimo da torre, o ar comprimido seco segue para a fábrica, através da válvula de retenção (VR), que só deixa passar o caudal num único sentido. No entanto, no início de ciclo e durante um período de tempo calibrado pelo fabricante (145 segundos, para este equipamento) uma pequena parcela do ar seco é desviada pela válvula de estrangulamento, de forma a regenerar a outra torre. Esse desvio ocorre devido à diferença de pressões entre as duas torres durante a fase da regeneração, em que a válvula do silenciador (S) da torre em regeneração está aberta para atmosfera. Nas condições nominais de funcionamento durante a regeneração, a torre em serviço encontra-se a uma pressão de 7 bar e a torre a ser regenerada encontra-se a uma pressão de 0,7 bar e 18% do caudal nominal de admissão é disponibilizado para a atmosfera [30].

Após o término da regeneração a válvula do silenciador (S), a torre é pressurizada e todo o caudal de ar seco tratado é disponibilizado para a fábrica, até terminar o ciclo. O tempo de

regeneração é fixo e o fim de ciclo, pode ser controlado por tempo ou por sensor de ponto de orvalho por pressão, este último induz uma economia de energia. Uma vez que neste caso, o ciclo só termina quando sensor de ponto de orvalho por pressão, determinar um ponto de orvalho por pressão superior ao valor de *setpoint* definido, o ciclo termina.

O dessecante utilizado nestes secadores é alumina ativada e os equipamentos em causa permitem obter pontos de orvalho por pressão de -20 °C até -45 °C. No entanto a especificação de um ponto de orvalho por pressão mais baixo do que o necessário, adiciona custos energéticos adicionais e não é uma boa prática de engenharia [29]. Atualmente o ponto de orvalho por pressão nestes secadores é de -40 °C como será apresentado mais à frente na secção 3.3.4.

Reservatório de acumulação

Os reservatórios de acumulação têm uma função capacitiva, isto é, acumulam energia na forma de pressão possibilitando aos compressores um funcionamento equilibrado, sobretudo quando atuam em regime de carga-vazio. Em situações de consumo irregular de ar comprimido, estes permitem compensar as flutuações de pressão na rede de distribuição.

3.3.5 Central térmica

A central térmica é constituída por duas caldeiras de vapor de tubos de fumo, que funcionam alternadamente. Ambas apresentam queimador a gás natural modulante. Este tipo de queimador permite um ajuste às solicitações reais e conseqüentemente uma poupança energética comparativamente aos queimadores convencionais (“tudo ou nada” e “dois estágios”) quando as solicitados fora do regime de carga máximo.

A água de alimentação das caldeiras provém de um desgasificador abastecido pela água de rede e por um sistema de retorno dos condensados. O aproveitamento de condensados permite uma economia de energia relativa ao aquecimento da água de alimentação da caldeira.

O desgasificador destina-se ao aquecimento, tratamento e eliminação do oxigénio e do dióxido de carbono dissolvidos na água de alimentação.

Verificou-se que a rede de distribuição de vapor encontra-se na sua generalidade bem isolada e revestida.

Caldeiras

Uma caldeira entende-se como sendo um equipamento em que os gases de combustão, resultante da queima de um combustível, transferem calor para um fluido a aquecer [31].

Na instalação industrial em estudo, as caldeiras existentes têm uma potência de 622 kW e produzem vapor saturado a uma pressão de 4,2 bar, sendo classificadas como caldeiras de média pressão (caldeiras sujeitas a pressão entre os 0,5 e os 87 bar) [32].

O vapor produzido é utilizado para aquecimento do ar utilizado no processo, aquecimento de água utilizada no aquecimento, ventilação, ar condicionado (AVAC) e águas quentes sanitárias (AQS). A transferência de calor do vapor para aquecimento de água é feita com recurso a um permutador de calor vapor/água.

As saídas de vapor, de ambas as caldeiras, estão interligadas a um coletor comum a partir do qual são feitas as alimentações para os consumidores. Cada um das caldeiras possui chaminé independente para a exaustão dos gases de combustão.

Sistema de água de alimentação e retorno de condensados

O vapor saturado produzido condensa após transferência do seu calor latente no permutador, sendo posteriormente encaminhado através de uma rede de retorno de condensados para o desgasificador, de forma a alimentar a caldeira.

O desgasificador é responsável pelo pré-aquecimento da água de reposição das caldeiras e eliminação do seu oxigénio e dióxido de carbono. O aproveitamento dos condensados reduz a energia despendida para o aquecimento da água de reposição, uma vez que a energia contida nestes é cerca de 20 a 25% da energia despendida na produção de vapor [32].

Além deste benefício que tem repercussões ao nível do consumo de combustível, a utilização dos condensados minimiza o consumo de água da rede.

Sistema de purga das caldeiras

Após a formação do vapor, impurezas sólidas dissolvidas na água acumulam-se no interior da caldeira. O total de sólidos dissolvidos (TSD) deve ser rigorosamente controlado, uma vez que um elevado teor TSD origina o arrastamento destes com o vapor formado, gerando problemas ao nível da instalação e produção [33].

De forma a remover os sólidos dissolvidos é efetuada uma purga, no entanto não deverá ser efetuada mais vezes do que as necessárias, pois constitui um desperdício energético. Elevando

os custos de combustível, água da rede e utilização de produtos químicos para o seu tratamento.

O sistema atual de purgas da unidade fabril em estudo é efetuado de forma contínua sem recuperação do calor do líquido rejeitado. Este tipo de purga, comparativamente à purga periódica permite manter níveis de salinidade mais apertados de sólidos dissolvidos no interior da caldeira e no caso de a frequência de purga ser regular a purga contínua permite ter uma viabilidade superior na recuperação do calor [34].

3.3.6 Iluminação

Foi feito um levantamento de toda a iluminação da unidade fabril, tendo-se verificado que a iluminação das diversas secções fabris é efetuada principalmente, com recurso a lâmpadas de tecnologia fluorescente, de diversos tipos e potências. Em menor número existem luminárias com tecnologia de vapor de mercúrio e de sódio e apenas duas luminárias LED.

A unidade fabril possui um sistema de iluminação de toda a fábrica, em que o controlo é feito através da portaria garantido assim que a iluminação não permanece em funcionamento durante os períodos de paragem nas zonas não ocupadas.

3.3.7 Unidades de tratamento de ar, desumidificadores e equipamentos de ar condicionado

Nesta secção efetua-se uma abordagem ao sistema de climatização central e descentralizado, composto por unidades de tratamento de ar e equipamento de ar condicionado respetivamente. Na unidade fabril distinguem-se dois tipos de unidades de tratamento de ar, de climatização e de processo. Estas últimas são responsáveis não pela climatização dos diversos espaços, mas sim para aquecimento do ar utilizado nos equipamentos de processo. Em algumas salas específicas, onde existem parâmetros de qualidade mais exigentes, existem desumidificadores nas condutas de insuflação de forma a garantir os requisitos desses espaços.

Unidades de tratamento de ar de climatização

Nas zonas de produção, embalagem, controlo de qualidade, vestiários e pesquisa e desenvolvimento a climatização é assegurada por um sistema de climatização central, recorrendo a unidades de tratamento de ar.

As unidades de tratamento de ar de climatização são responsáveis pelo tratamento, aquecimento, arrefecimento e desumidificação do ar, sendo constituídas por uma bateria de água quente e uma de água fria, ambas controladas através de uma válvula de controlo automática de acordo com a informação de temperatura recolhida. As zonas climatizadas encontram-se a uma condição de *setpoint* de 21 ± 3 °C e humidade relativa inferior a 60%.

Algumas das unidades de tratamento de ar, possuem módulo de recuperação, o que permite um aproveitamento da energia térmica do caudal de extração das salas a ser transferido por trocar calor, com o novo ar de insuflação, que de outra forma se desperdiçaria.

Dada a necessidade de manter algumas zonas limpas e evitar a sua contaminação, estas são mantidas em sobrepessão relativamente aos espaços adjacentes.

Equipamentos de ar condicionado

A unidade fabril dispõe de diversos equipamentos de ar condicionado de expansão direta (*split's*) espalhados pelos edifícios administrativos e em algumas zonas específicas da fábrica para aquecimento e arrefecimento dos espaços.

Unidades de tratamento de ar de processo

Existem três unidades de tratamento de ar de processo, que se distingue das unidades de tratamento de ar de climatização por possuírem uma bateria de vapor ao invés de uma bateria de água quente. Estas unidades de tratamento de ar têm como função fornecer ar aquecido aos equipamentos de processo a uma temperatura superior a 55 °C na sua generalidade.

Desumidificadores

As salas com requisitos de qualidade mais rigorosos possuem desumidificadores nas condutas de insuflação, que fornecerem um tratamento adicional ao ar de insuflação.

Estes desumidificadores são do tipo de adsorção e baseiam-se num processo físico em que a água contida no ar à entrada do equipamento é retida pelo adsorvedor. A regeneração deste adsorvedor é feita de forma contínua, pela injeção num circuito paralelo um fluxo de ar novo – designado de “ar de regeneração” – que é aquecido para aumentar a capacidade de evaporar a água do adsorvente e desta forma regenerá-lo. Este ar de regeneração é posteriormente rejeitado para o exterior. Quanto ao modo de aquecimento do ar de regeneração, em alguns casos este é feito através de vapor.

3.3.8 Ventiladores

A unidade fabril em estudo possui diversos ventiladores para insuflação e extração do ar e em sistemas de despoeiramento das unidades de produção.

3.3.9 Central de água fria

A água fria é obtida em unidades de produção de água refrigerada, mais comumente designadas por “*chillers*”. Atualmente existem duas unidades destas do tipo de compressão, na Tabela 3.4 é possível verificar as suas características técnicas.

A água refrigerada produzida é utilizada nas unidades de tratamento de ar. Estes equipamentos, funcionam em regime de alternância diária, no entanto em situações de pico os dois podem operar em simultâneo.

Tabela 3.4 - Características técnicas dos *chillers*

	Ano de fabrico	Potência elétrica kW	Potência frigorífica kW	EER	Fluido frigogéneo
Chiller antigo	1997	249	664	2,7	R122
Chiller mais recente	2005	370	1077	2,9	R134A

Os componentes destes equipamentos e o esquema de distribuição da central de água fria encontram-se representados na Figura 3.5.

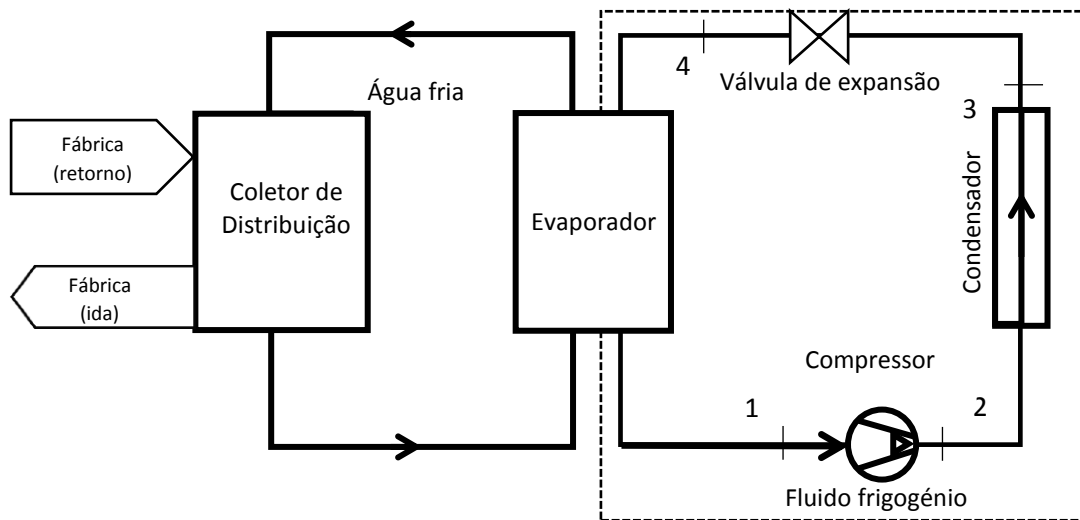


Figura 3.5 - Esquema simplificado da central de água fria e equipamentos do *chiller*

Os *chillers* operam segundo o ciclo frigorífico, o compressor comprime o fluido frigogénio, desde o ponto 1 até ao ponto 2 em que este aparece como vapor sobreaquecido. Durante a compressão é necessário fornecer trabalho, sendo o compressor elétrico. De 2 para 3 é efetuado o arrefecimento do fluido no condensador, este arrefecimento é feito com ar atmosférico. À entrada da válvula de expansão o fluido encontra-se no estado líquido saturado e dá-se a sua expansão de modo a que decaia até à pressão de evaporação (este efeito é acompanhada por uma redução de temperatura). No evaporador efetua-se a troca térmica com a água que se pretende arrefecer.

A Figura 3.6 encontra-se o diagrama T-s (Temperatura vs Entropia) para o *chiller* de compressão.

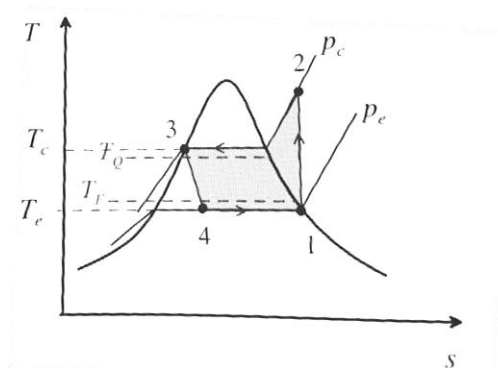


Figura 3.6 - Diagrama T-s do ciclo frigorífico [35]

O parâmetro de desempenho do *chiller* de acordo com a Figura 3.6 será obtido segundo a equação:

$$EER = \frac{h_4 - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{P_a}{W_c} \quad (3.1)$$

Em que W_c , P_a e h representam o trabalho do compressor, a potência de arrefecimento e a entalpia do gás, respetivamente.

3.4 Procedimentos de Medida

De forma a caracterizar o consumo energético dos diversos setores e a eficiência dos equipamentos, torna-se importante proceder a um conjunto de medições. Nesta secção serão referidos as medições efetuadas e o protocolo utilizado.

Os equipamentos de iluminação, ar condicionado e ventiladores, dadas as suas potências reduzidas, não foram alvo de qualquer tipo de medição, tendo sido efetuado um levantamento das suas potências nominais e estimativa do número de horas de funcionamento.

Relativamente à central de ar comprimido, foram efetuadas medições por uma empresa externa, em que foi medido o consumo elétrico dos compressores, caudal de ar comprimido, temperatura e ponto de orvalho por pressão à saída dos secadores.

3.4.1 Consumos de energia elétrica

Para análise do consumo de energia elétrica efetuaram-se medições à potência elétrica absorvida pela central de tratamento de água, central térmica, central de água fria, unidades de tratamento de ar climatização, edifício da produção e edifícios administrativos nos respetivos quadros de alimentação.

O equipamento utilizado foi o analisador de energia elétrica, *Metrel*, modelo *MI-2892 Master Power* (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Analisador de energia elétrica *MI-2892 Master Power* [36]

Procedimento:

- Verificar se o dia e a hora estão bem definidos e se existe memória disponível no equipamento;
- Definir parâmetros nomeadamente: frequência do sistema e o tipo de ligação do primário ao secundário.

Nas medições efetuadas a configuração da ligação do analisador de energia elétrica aos quadros elétricos encontra-se na Figura 3.8.

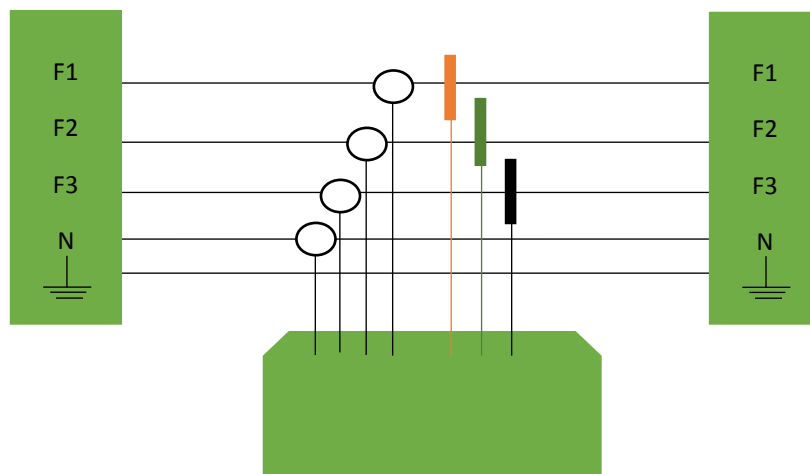


Figura 3.8 – Configuração da ligação do analisador de energia elétrica aos quadros elétricos

Em alguns equipamentos de potências reduzidas foi utilizada a pinça amperimétrica *UNI-T UT231* (Figura 3.9) para aferir a sua potência.



Figura 3.9 - Pinça amperimétrica *UNIT-T UT231* [37]

3.4.2 Composição dos gases de combustão

Na central térmica foram efetuadas medições ao teor dos gases de combustão das caldeiras, nomeadamente ao oxigénio e dióxido de carbono e à sua temperatura, de forma a aferir sobre o seu rendimento.

O equipamento utilizado foi o TESTO 340, que se encontra representado na Figura 3.10.



Figura 3.10 - Analisador de gases de combustão TESTO 340

A medição inicia-se com a introdução da vareta do equipamento no interior da chaminé (Figura 3.11). Deve-se ter em atenção que a ponta final da vareta esteja no centro do escoamento dos gases de combustão.

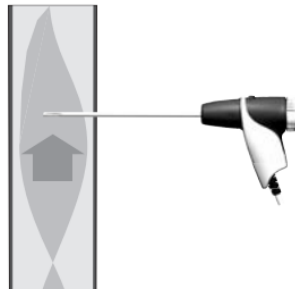


Figura 3.11 - Procedimento de medição dos gases de combustão [38]

Para determinar a eficiência dos geradores de calor é utilizado o método das perdas, este é bastante utilizado para o cálculo do rendimento térmico de geradores de calor em auditorias energéticas uma vez que pode ser aplicado a todos os tipos de caldeiras e combustíveis e recorre apenas de um único tipo de medição, a composição dos gases de combustão. Sendo esta medição fácil de efetuar-se, podendo ser bastante precisa. Este método baseia-se na lei da conservação da energia, uma parte da energia disponível é utilizada para aquecimento do fluido de aquecimento e a restante é perdida.

Alternativamente a este método pode aplicar-se o método direto que se baseia no quociente entre a energia útil produzida pelo gerador de calor e a energia fornecida pelo combustível. Para a aplicação deste método é necessário recorrer a várias medições, tais como, caudal, pressão e temperatura de vapor do fluido de aquecimento e caudal do combustível. Estas medições podem ser bastantes imprecisas e nem sempre são possíveis de se efetuar no processo de auditoria energética.

Em seguida serão descritas as equações para a calcular a eficiência térmica de geradores de calor, através do método das perdas. Algumas das constantes necessárias para aplicação das equações subjacente a este método encontram-se no Anexo D.

Método de cálculo:

1. Perdas de calor associadas às cinzas volantes (P_{cv}), aplicável apenas a combustíveis sólidos – Equação 3.2.

$$P_{cv} = A \cdot F_{cv} \cdot C_{cc} \cdot 33820 \cdot \frac{100}{(1 - C_{cc}) \cdot PCI} \quad (3.2)$$

2. Perdas de calor associadas às cinzas de fundo (P_{cf}), aplicável apenas a combustíveis sólidos – Equação 3.3.

$$P_{cf} = A \cdot F_{cf} \cdot C_{cc} \cdot 33820 \cdot \frac{100}{(1 - C_{cc}) \cdot PCI} \quad (3.3)$$

Em que A , F_{cv} , F_{cf} , C_{cc} e PCI representam a fração em peso de inertes no combustível, a fração em peso das cinzas volantes em relação ao total de inertes do combustível, fração em peso das cinzas de fundo em relação ao total de inertes do combustível, a fração em peso do combustível nas cinzas volantes e o Poder Calorífico Inferior do combustível, respetivamente.

3. Perdas associadas ao calor sensível nos gases de combustão (P_{gc}) – Equação 3.4.

$$P_{gc} = \frac{K \cdot (T_g - T_a) \cdot (1 - (P_{cv} + P_{cf})/100)}{CO_2} \quad (3.4)$$

4. Perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão (P_{H_2O}) – Equação 3.5.

$$P_{H_2O} = (m_{H_2O} + 9H) \cdot \frac{210 - 4,2 \cdot T_a + 2,1 \cdot T_g}{PCI} \quad (3.5)$$

5. Perdas associadas à combustão química incompleta (P_{CO}) – Equação 3.6.

$$P_{CO} = K_1 \cdot CO \cdot \frac{1 - 0,01 \cdot (P_{cv} + P_{cf})}{CO + CO_2} \quad (3.6)$$

Sendo que T_g , T_a , CO_2 , K , m_{H_2O} , H e CO representam a temperatura dos gases de combustão à saída da caldeira (°C), a temperatura do ar de combustão à entrada da caldeira (°C), a fração volúmica do teor de dióxido de carbono presente nos gases de combustão, a constante dependente do combustível (Anexo D), a fração mássica de humidade no combustível, fração mássica de hidrogénio no combustível e a fração volúmica de monóxido de carbono nos gases de combustão, respetivamente.

6. Perdas por radiação, convecção e outras perdas não-contabilizáveis nas caldeiras (P_r).

As perdas a seguir apresentadas para os vários tipos de geradores de calor são especificadas para o funcionamento das caldeiras na sua capacidade máxima e encontram-se no Anexo D.

7. Perdas associadas às purgas (P_p), apenas aplicáveis a caldeiras de vapor – Equação 3.7.

$$P_p = T_p - T_{H_2O} \cdot p \cdot \frac{100 - \sum(\text{todas as outras perdas})}{T_p - T_{H_2O} \cdot p + (100 - p \cdot (660 - T_{H_2O}))} \quad (3.7)$$

Em que T_p , T_{H_2O} e p representam a temperatura das purgas (medida após qualquer recuperação de calor) (°C), a temperatura da água de alimentação à caldeira (ou à entrada do economizador, no caso de existir) (°C) e a percentagem das purgas em relação ao total de água de alimentação da caldeira (incluindo qualquer produção de vapor *flash*).

A percentagem da purga p é calculada utilizando a Equação 3.8.

$$p = \frac{TDS_{AL}}{TDS_p} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

Sendo que TSD_{AL} e TSD_p representam o total de sólidos dissolvidos na água de alimentação e o total de sólidos dissolvidos na purga, respetivamente. A quantidade de sólidos dissolvidos na água relaciona-se com a sua condutividade elétrica. Quanto maior a condutividade elétrica, maior a quantidade de sólidos dissolvidos. Vulgarmente as caldeiras de vapor encontram-se equipadas com sensores de monitorização do TSD ($\mu\text{S/cm}$).

8. Eficiência térmica (E) com base no PCI é calculada pela Equação 3.9.

$$E = 100 - \sum (\text{perdas}) \quad (3.9)$$

Para o cálculo do excesso do ar é utilizada a seguinte equação, válida para o gás natural e para os casos em que a combustão é completa e não se considera o aparecimento de CO nos gases de combustão [31]:

$$\%excesso\ ar = \frac{O_2}{0,21 - O_2} \cdot 100\% \quad (3.10)$$

3.4.3 Eficiência energética dos *chillers*

A eficiência energética dos *chillers* de compressão foi avaliada por medições ao seu consumo elétrico e térmico.

O EER dos *chillers*, como visto na secção 3.3.9, é dada pela Equação 3.1. Para uma situação real de medição, o trabalho do compressor (W_c) pode ser determinado com base numa medição de energia elétrica ao compressor e a potência de arrefecimento (P_a) pode ser determinada através da equação:

$$P_a = \dot{m}_{H_2O} c_{p_{H_2O}} \cdot \Delta T \quad (3.11)$$

Em que \dot{m}_{H_2O} , $c_{p_{H_2O}}$ e ΔT representam o caudal de água que passa no evaporador, o calor específico da água a pressão constante e a diferença de temperaturas da água à entrada e saída do evaporador, respetivamente.

Procedimento:

- Medição do consumo elétrico do *chiller*, com o analisador de energia elétrica.
- Simultaneamente à medição do consumo elétrico, para o cálculo da potência térmica (Equação 3.11) é necessário:
 - Registrar os valores da temperatura de ida e retorna do circuito primário de arrefecimento, isto é da temperatura de entrada e saída do *chiller* que se encontram dispostos no equipamento.
 - Registrar o valor da pressão a montante e a jusante da bomba do circuito primário do *chiller* mais recente, através do seu manómetro (Figura 3.12).

- Medir a potência absorvida durante o período de medição com o auxílio de uma pinça amperimétrica, dado o mau estado do manómetro de pressão da bomba do circuito primário do *chiller* mais antigo (Figura 3.13).



Figura 3.12 - Manómetro da bomba do circuito primário do *chiller* novo e pressão a jusante e a montante da mesma



Figura 3.13 - Manómetro de pressão da bomba do circuito primário do *chiller* mais antigo

O registo da diferença de pressão a montante e a jusante da bomba do *chiller* mais recente e a potência absorvida da bomba do *chiller* mais antigo teve como objetivo utilizar os gráficos das curvas das bombas que se encontram no Anexo E. Para determinar o caudal de água do circuito primário aplica-se a Equação 3.11.

3.4.4 Temperatura, humidade relativa e velocidade de escoamento

Nas unidades de tratamento de ar e desumidificadores efetuaram-se medições à velocidade de insuflação e extração do ar, temperatura e humidade relativa. Para estas medições o equipamento utilizado foi o *KIMO AMI-310*. Trata-se de um aparelho multifunções que permite acoplar diversos equipamentos de instrumentação tais como: manómetro, caudalímetro,

psicómetro, termómetro, anemómetro e higrómetro (Figura 3.14). Neste caso em específico recorreu-se aos últimos três.



Figura 3.14 - Equipamento de medição multifunções portátil [39]

Com as medições efetuadas de velocidade de escoamento, temperatura e humidade relativa às Unidades de Tratamento de Ar (UTA's) e desumidificadores que consomem água fria, água quente ou vapor, foi possível determinar as suas potências de aquecimento e arrefecimento através de balanços de massa e de energia.

Os balanços de energia efetuados às UTA's de climatização tiveram por base as condições climatéricas médias mensais da região em que esta inserida a instalação industrial e as condições de *setpoint* de temperatura e humidade relativa no interior das zonas a climatizar.

Na Figura 3.15 é possível observar uma situação em que dado o requisito do controlo de qualidade das condições de *setpoint* é necessário arrefecer primeiro o ar, de forma a remover condensados, para posteriormente o ar ser aquecido.

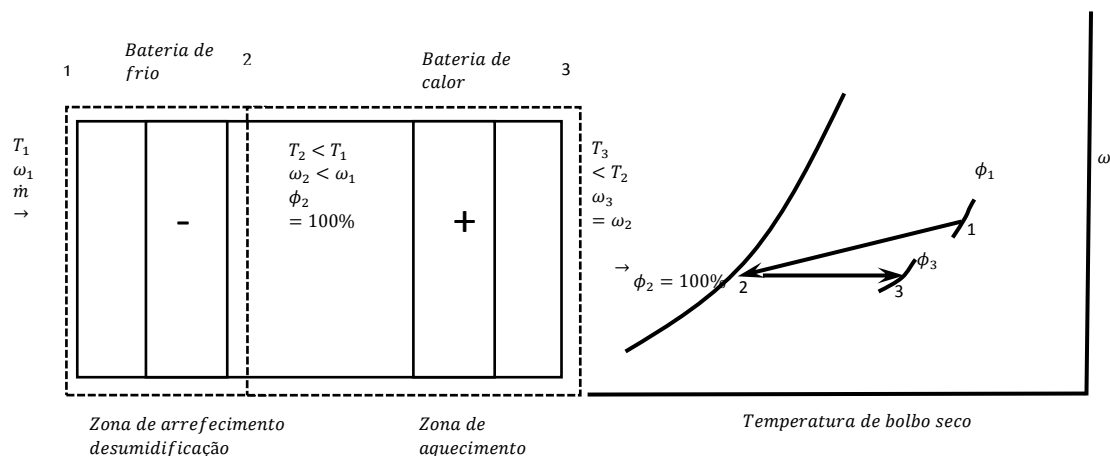


Figura 3.15 - Processo de arrefecimento e aquecimento numa unidade de tratamento de ar e representação esquemática do processo no diagrama psicrométrico

Os balanços de energia tiveram por base as seguintes equações:

$$Q = V \cdot A \quad (3.12)$$

$$\dot{m}_a = \rho_a \cdot Q \quad (3.13)$$

$$P_a = \dot{m}_a \cdot \left((h_1 - h_2) - (\omega_1 - \omega_2) h_{f2} \right) \quad (3.14)$$

$$P_c = \dot{m}_a \cdot (h_1 - h_2) \quad (3.15)$$

Em que $Q, V, A, \dot{m}_a, \rho_a, P_a$ e P_c representam o caudal volúmico, velocidade, caudal mássico de ar seco, massa volúmica de ar seco e a potência de arrefecimento e aquecimento respetivamente.

3.5 Ferramentas Revelantes para a Avaliação de Medidas de Eficiência Energética

Nesta secção serão descritos os métodos relevantes para avaliação das medidas de eficiência energética avaliadas na secção 4.3.

3.5.1 *Adsorptive Gas Dryer*

O *Adsorptive Gas-Air Dryer*, é um programa de simulação de secadores de adsorção. Este funciona em código fechado e permite prever o funcionamento dos diversos tipos de secadores de adsorção, resolvendo as equações de conservação de massa, energia e momento subjacentes à geometria do secador, condições de operação e propriedades do dessecante. É possível estudar diversos tipos de gases a serem tratados no interior dos secadores: ar, árgon, dióxido de carbono, hélio, hidrogénio, metano, nitrogénio, oxigénio e uma mistura de no máximo quatro destes gases. Na base de dados do programa temos as propriedades e as isotermas de adsorção da alumina ativada e da sílica gel, que são os dessecantes mais utilizados, no entanto é possível inserir propriedades de outros dessecantes.

Com a utilização deste programa é possível:

- Prever o funcionamento de unidades já existentes fora das suas condições nominais;
- Assistir no desenvolvimento de um sistema de gestão energética;
- Otimizar os secadores;
- Realizar uma análise de sensibilidade ao impacto dos diversos parâmetros, ar de purga, ponto de orvalho por pressão, condições de admissão do ar comprimido, tempo de regeneração e temperatura do ar comprimido.

A utilização do programa restringe o estudo a uma situação de caudal de ar comprimido, temperatura do ar comprimido e temperatura de admissão do ar constantes, o que não sucede numa situação real de utilização destes equipamentos.

Para a simulação do funcionamento dos secadores de adsorção de auto-regeneração presentes na unidade fabril através do *Adsorptive Gas-Air Dryer* é necessário definir: as propriedades do dessecante, tempo de ciclo, tempo de regeneração, caudal de ar comprimido, caudal de regeneração, temperatura do ar comprimido, ponto de orvalho por pressão, pressão do ar comprimido, pressão de regeneração, dimensões da torre e suas propriedades (coeficiente de resistência térmica, calor específico a pressão constante e massa volúmica).

Relativamente ao dessecante no interior das torres que para este caso é alumina ativada, o programa contém as suas propriedades.

O caudal de regeneração deste tipo de equipamentos, varia com a pressão de admissão do ar comprimido e com a pressão de regeneração, para o funcionamento nas condições nominais dos equipamentos existentes este é em média 18% do valor de caudal nominal de admissão.

Avaliação da variação do caudal de regeneração em função da diferença de pressões

De seguida apresenta-se a dedução, para avaliar a variação do caudal de regeneração em função da pressão de admissão do ar comprimido e da pressão de regeneração e da temperatura de admissão. Para esse efeito é necessário determinar coeficiente de perda de carga induzido pela válvula de estrangulamento.

Hipóteses simplificativas:

- Não são considerados os períodos transientes de pressurização e despressurização da torre;
- Nas condições nominais o caudal de regeneração é 18% do caudal de admissão;
- A perda de carga no interior das condutas é desprezada;
- Assume-se o ar comprimido como sendo um gás ideal.

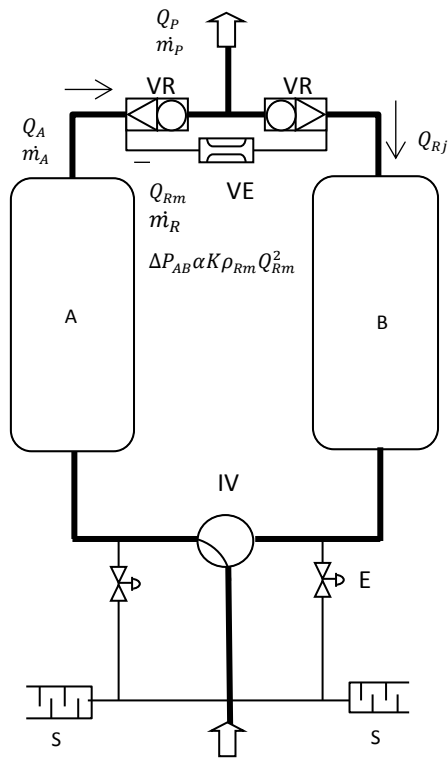


Figura 3.16 - Esquema de análise para balanços mássicos e volúmcos dos secadores de adsorção (adaptado de [30])

A – torre A; B - torre B; E – atuador pneumático; IV - válvula de três vias; S - silenciador; VE – válvula de estrangulamento; VR - válvula de retenção.

Conservação do caudal mássico:

$$\dot{m}_A = \dot{m}_R + \dot{m}_P \quad (3.16)$$

Em que os índices *A*, *R* e *P* se referem ao caudal mássico nominal, regeneração e de processo, respetivamente.

Desprezando as perdas de carga distribuídas e considerando o caudal volúmcico a montante da válvula de estrangulamento, temos:

$$Q_A = Q_{Rm} + Q_P \quad (3.17)$$

Em que o índice *Rm* se refere ao caudal volúmcico a montante da válvula de estrangulamento.

Caso específico:

Assumindo as condições nominais, pressão de admissão do ar comprimido de 7 bar, pressão de regeneração de 0,7 bar e temperatura do ar seco à saída da torre de 35 °C e caudal de

regeneração 18% do caudal nominal, determinamos o coeficiente de perda de carga, através das equações (3.18) e (3.19):

$$Q_{RM} = 0,18 \times Q_A \quad (3.18)$$

$$P_A - P_B = K \cdot \rho_{Rm} \cdot Q_{Rm}^2 (=) \Delta P_{AB} = K \cdot \frac{P_A + P_{atm}}{R_g \cdot T} \cdot Q_{Rm}^2 \quad (3.19)$$

Em que ρ, P, R_g, T, K representam a massa volúmica, a pressão, a constante universal dos gases, temperatura e coeficiente de perda de carga, respetivamente. O coeficiente de perda de carga obtido tem o valor de $1,077 \cdot 10^8 Pa \cdot s^2 / kg \cdot m^3$.

Caso geral:

Será agora constituído um caso geral, para verificar as variações relativas ao caudal de regeneração.

$$Q'_A = \alpha \cdot Q_n \quad (3.20)$$

$$Q_{Rm} = \beta \cdot Q'_A \quad (3.21)$$

$$0 < \beta \leq 1 \quad (3.22)$$

$$0 < \alpha \leq 1 \quad (3.23)$$

Em que α, β e Q'_A representam um parâmetro que relaciona o caudal nominal com um caudal genérico, parâmetro que relaciona o caudal de regeneração com o caudal nominal e um caudal de admissão de ar comprimido genérico, respetivamente. Sendo que $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$.

Para uma qualquer variação de pressão temos:

$$\Delta P_{AB} = K \cdot \rho_{Rm} \cdot Q_{Rm}^2 \quad (3.24)$$

Dividindo a equação 3.24 por $Q'_A{}^2$, obtém-se:

$$\frac{\Delta P_{AB}}{\alpha^2 \cdot Q_1^2} = K \cdot \rho_{Rm} \cdot \beta^2 \quad (3.25)$$

$$\beta \cdot \alpha = \sqrt{\frac{\Delta P_{AB}}{K \cdot \rho_{Rm} \cdot Q_1^2}} \quad (3.26)$$

$$\frac{\Delta P_{AB}}{\rho_{Rm}} = \frac{(P_A + P_{atm} - P_b + P_{atm})}{P_A + P_{atm}} \cdot R_g \cdot T = (1 - r_p) \cdot R_g \cdot T \quad (3.27)$$

Substituindo a Equação 3.27 na 3.26 obtemos:

$$\beta \cdot \alpha = \sqrt{\frac{(1 - r_p) \cdot R_g \cdot T}{Q_1}} \quad (3.28)$$

3.5.2 Avaliação de um sistema de trigeriação

No presente trabalho, avaliou-se a viabilidade de implementaçã de uma central de trigeriação na instalaçã industrial. Este estudo baseado num motor de combustã interna. Nesse seguimento foi construída uma folha de cãculo em *Microsoft Excel*[®] com base na atual legislaçã que regula a atividade de cogeraçã. Para a utilizaçã desta ferramenta é necessãrio introduzir as necessidades tãrmicas, os dados da mãquina tãrmica, o EER do *chiller* de absorçã definir o regime de carga pretendido, o nũmero de horas funcionamento mensal.

Nesta secçã serã abordado o enquadramento legal da atividade de cogeraçã e os balanços energãticos e econãmicos que serã tidos em conta para avaliaçã da rentabilidade de um sistema de trigeriação.

3.5.2.1 Enquadramento legal da atividade de cogeraçã/trigeriação

O enquadramento da atividade de produçã em cogeraçã, e respetivo regime jurĩdico e remuneratãrio, é o disposto pelo Decreto de Lei n.º 68-A/2015, de 30 de abril, que resulta de alteraçães dos Decreto-Lei n.º 23/2010, de 25 de março (alterado pela lei n.º 19/2010 de 23 de agosto). Estão previstas duas modalidades de regime remuneratãrio para a produçã em cogeraçã: a modalidade geral e a modalidade especial.

A modalidade geral é dividida em duas submodalidades:

- Submodalidade A: integra as cogeraçães com potẽncia de injeçã à rede igual ou inferior a 20 MW que operem em modo de autoconsumo total ou parcial (excedente elãtrico garantidamente entregue ao comercializador de ũltimo recurso);
- Submodalidade B: integra as cogeraçães que operem em regime de venda de eletricidade produzida em mercados organizados ou mediante contratos bilaterais.

Em qualquer uma das submodalidades a central pagarã uma compensaçã à rede dependente da quantidade total de centrais de cogeraçã do mesmo tipo existentes em todo o paĩs. Esta compensaçã serã aplicada quando a potẽncia total destas centrais exceder 5% da potẽncia total de produçã elãtrica instalada no paĩs.

A modalidade especial é aplicada a cogerações com uma potência elétrica instalada inferior a 20 MW e que se destinem à venda de energia elétrica ao “comercializador de último recurso” (CUR) a uma tarifa de referência. Esta modalidade prevê prêmios de elevada eficiência e de energia renovável. Porém, até ao momento, não foi publicada qualquer portaria para regulamentação da tarifa de referência desta modalidade, inviabilizando o acesso a esse regime.

De entre as principais alterações introduzidas pelo Decreto de Lei n.º 68-A/2015 destacam-se as seguintes:

- A divisão da modalidade geral em duas submodalidades; anteriormente a modalidade geral era acessível a todas as cogerações sem restrição de potência;
- Extinção da remuneração suplementar denominada “prémio de participação no mercado” regime de modalidade geral;
- A modalidade especial, que anteriormente era acessível a cogerações com uma potência elétrica instalada igual ou inferior a 100 MW, agora é apenas acessível a cogerações com potência instalada inferior a 20 MW;
- Limitação nos prêmios de eficiência e energia renovável atribuídas a cogerações enquadradas no regime da modalidade especial.

Diminuição do prazo da remuneração da modalidade especial de 20 anos para 15 anos.

Uma vez que, no decorrer da presente dissertação, o tarifário de acesso à modalidade especial ainda não foi definido em portaria, a ferramenta aplicada incidu sob a modalidade geral (autoconsumo).

3.5.2.2 Balanço económico

Indicadores

Para aferição da viabilidade económica do projeto são considerados três indicadores fulcrais no estudo de viabilidade técnico-económico de uma central de cogeração: *payback* (retorno do investimento), Valor Atual Líquido (VAL) e Taxa Interna de Rentabilidade (TIR).

O *payback* simples é dos indicadores económicos mais utilizados em análise de investimentos. Corresponde ao período de tempo de retorno de um investimento no qual o lucro acumulado é igual ao investimento efetuado. Considera-se viável um projeto através do seu *payback* quando o este for inferior ao prazo desejado para recuperar o investimento.

O valor atual líquido (VAL) é a soma de todas as entradas e saídas de dinheiro durante o tempo de vida de um projeto, atualizadas para o valor presente. Projetos que apresentem valores negativos de VAL são desaconselháveis, uma vez que não têm capacidade de gerar dinheiro.

A taxa interna de rentabilidade (TIR) é a taxa de atualização de um projeto ao qual o valor atual líquida se anula. Pode dizer-se que a TIR é a taxa mais elevada à qual um investidor pode contrair um empréstimo para financiar um investimento sem perder dinheiro.

Poupança na fatura energética

A poupança na fatura energética, que resulta da implementação da central de trigeriação, é a diferença entre o custo da energia consumida na central de trigeriação a ser obtida com recurso aos atuais serviços energéticos e o custo de operação da central de trigeriação.

Custo de funcionamento da central de trigeriação:

$$C_{\text{Trigeriação}} = P_C \cdot C_C + P_O \cdot C_O + 7,5 \cdot M \quad (3.29)$$

Em que P_C , C_C e M representam o preço do combustível utilizado na máquina térmica (€/kWh), combustível consumido na máquina térmica (kWh) e custos de manutenção (€), respetivamente.

Como receitas da central de trigeriação temos (Equação 3.30 a 3.32) a energia elétrica que deixa de ser consumida nos *chillers* de compressão (P_{CC}) e que é obtida através de *chillers* de absorção, a energia elétrica e energia térmica consumida na central de trigeriação que seria consumida à rede e nas atuais caldeiras, respetivamente.

Para determinar a poupança em energia elétrica por não utilização do *chiller* de compressão, utilizou-se a Equação 3.30, em que o índice i representa a energia consumida em pontas, cheias, vazio e super-vazio. As variáveis $E_{T_{ai}}$, C_{Ei} , \overline{EER}_{CC} e EER_{CA} indicam a energia térmica de arrefecimento em água quente consumida pelo *chiller* de absorção no período i (kWh_t), o custo de energia elétrico no período i (€/kWh_e), o índice de eficiência energética médio dos *chillers* de compressão atuais e o índice de eficiência energética do *chiller* de absorção da central de trigeriação.

$$P_{CC} = \sum_{i=1}^4 E_{T_{ai}} \cdot C_{Ei} \cdot \frac{\overline{EER}_{CC}}{EER_{CA}} \quad (3.30)$$

Poupança na fatura elétrica através da energia elétrica consumida na central de trigeração que deixa de ser obtida através dos atuais serviços elétricos:

$$P_{FE} = \sum_{i=1}^4 EE_i \cdot C_{Ei} \quad (3.31)$$

Poupança em combustível, da energia térmica consumida na central de trigeração que seria consumida nas atuais caldeiras.

$$PF_{GN} = E_{Tc} \cdot P_C \quad (3.32)$$

Em que E_{Tc} representa a energia térmica de aquecimento aquecida na central de trigeração (kWh_t).

Uma vez que houve alterações na legislação que vigora a atividade da cogeração no decorrer da presente dissertação, na ferramenta desenvolvida é possível adicionar o prémio de participação no mercado, de forma a verificar o efeito das alterações desta. O prémio de participação no mercado segundo a portaria nº140/2012, de 14 de maio, é calculada da seguinte forma:

$$PP_1 = T_{ref1} \cdot 1,1 \cdot 0,5 \quad (3.33)$$

$$PP_2 = T_{ref1} \cdot 0,87 \cdot 0,5 \quad (3.34)$$

Em que PP_1, T_{ref1}, PP_2 , representa o prémio de participação do mercado da energia consumida em pontas e cheias, tarifa de referência que depende da potência instalada e do combustível e o prémio de participação do mercado da energia consumida em vazio e super-vazio.

No caso de potências instaladas inferiores a 10MW_e que utilizem como combustível o gás natural o valor da tarifa de referência é de 89,89 €/MWh_e.

Balanço energético

Os indicadores energéticos considerados para este sistema são o rendimento elétrico, rendimento térmico, rendimento global da instalação e a poupança de energia primária (PEP) referente à atividade de cogeração.

No balanço energético considera-se unicamente a energia térmica que é efetivamente consumida.

A eficiência térmica (η_E) e elétrica (η_T) do processo de cogeração determinam-se utilizando as Equações 3.33 e 3.34, respetivamente.

$$\eta_E = \frac{W}{P} \quad (3.35)$$

$$\eta_T = \frac{Q}{P} \quad (3.36)$$

Sabendo que W , P e Q representam a energia elétrica produzida, a energia fornecida como combustível e o calor útil aproveitado, respetivamente.

Poupança de energia primária

A poupança de energia primária (PEP) relativa à produção separada de calor e eletricidade obtém-se através da Equação 3.35.

$$PEP = \left[1 - \frac{1}{\frac{\eta_T}{Ref_{\eta_T}} + \frac{\eta_E}{Ref_{\eta_E}}} \right] \cdot 100 \quad (3.37)$$

Sabendo que Ref_{η_T} e Ref_{η_E} referem-se ao valor de referência de eficiência para a produção separada de calor e eletricidade, respetivamente.

4

RESULTADOS E DISCUSSÃO DA AUDITORIA

A avaliação energética realizada à unidade fabril em estudo foi subdividida em três formas.

A primeira avaliação tem características de uma macro-auditoria, uma vez que tem em conta apenas as faturas de produção e do consumo energético faturado no ano civil de 2014. Esta permite efetuar uma avaliação energética global à unidade industrial e proceder ao enquadramento legislativo desta face à legislação nacional específica (sobre consumos energéticos) em vigor.

Após a execução da macro-auditoria efetua-se uma micro-auditoria, que consiste numa energética mais detalhada à instalação industrial, cumprindo um dos principais objetivos de uma auditoria energética: a desagregação dos consumos de energia por setor e por avaliação equipamentos. A micro-auditoria envolve a realização de medições associadas ao consumo energético, à elaboração dos balanços de massa e de energia e estimativa do número de horas de funcionamento dos equipamentos de baixa potência.

Assente nos resultados obtidos da macro auditoria e micro auditoria avaliam-se medidas de eficiência energética a serem aplicadas nesta instalação industrial.

4.1 Macro -Auditoria

Para avaliação do consumo energético global da empresa foram quantificados os diversos tipos de energia consumidas e as suas proporções e ainda identificados os indicadores de intensidade energética, carbónica e consumo específico.

4.1.1 Consumo elétrico

As faturas de eletricidade dispõem de dois termos de energia: energia ativa e energia reativa. Para a análise ao consumo elétrico só são considerados os consumos de energia ativa, uma vez que esta forma de energia é a que realiza trabalho.

A modulação tarifária da unidade fabril estudada é tetra horária, com consumos referentes aos períodos: ativa cheia, ativa vazia normal, ativa super-vazio e ativa ponta. A Figura 4.1 apresenta o consumo elétrico mensal por modulação tetra horária, no ano civil de 2014.

Na avaliação à figura verifica-se que o consumo elétrico no horário ativa cheia oscilou em torno dos 100 a 120 MWh e foi mais elevado que nos restantes horários (com exceção do mês de dezembro devido a uma pausa na produção em período laboral). O consumo elétrico no período ativa super-vazio apresenta menos oscilações que os restantes uma vez que corresponde ao consumo elétrico no período noturno.

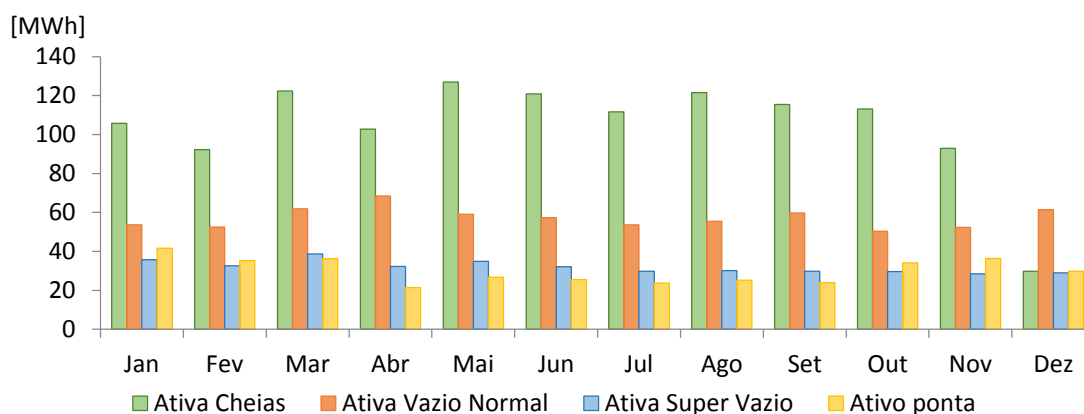


Figura 4.1 - Distribuição mensal da energia elétrica consumida por período horário

A Figura 4.2 apresenta a distribuição percentual do consumo elétrico na unidade fabril auditada, por período horário faturado. Constata-se que o consumo elétrico em período de ativa cheias correspondeu a mais de 45% do valor total pois os períodos de laboração incidem maioritariamente neste período de faturação.

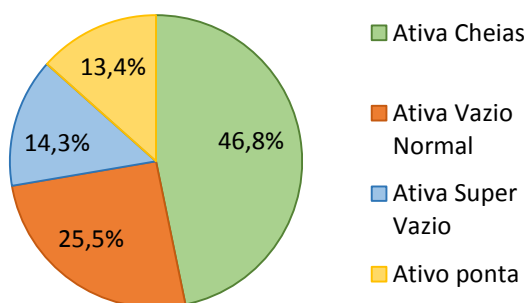


Figura 4.2 - Percentagem anual do consumo elétrico por período horário

Na Figura 4.3 apresenta-se agora o consumo elétrico mensal.

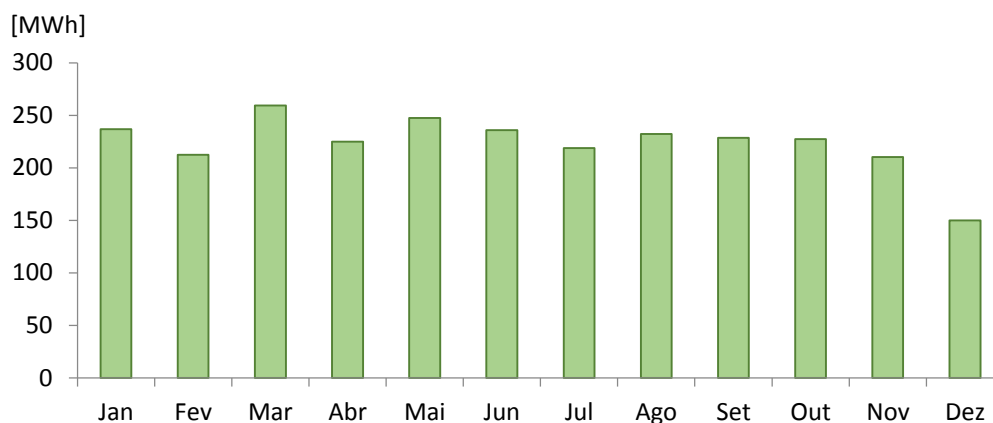


Figura 4.3 - Consumo elétrico mensal

Seria expectável que o consumo elétrico do mês de agosto a par com o mês de dezembro fossem os meses de menor consumo devido aos períodos de pausa para férias. No entanto, essa situação não se verifica, uma vez que o período de faturação considerado para o mês de agosto é de 12/08/2014 a 12/09/2014, nos restantes meses o período de faturação também contabiliza uma parcela do mês seguinte. Note-se ainda que apesar do decréscimo no consumo, evidenciado no mês de dezembro, é possível verificar que o consumo elétrico apresenta oscilações pouco significativas ao longo do ano.

O consumo anual de energia elétrica no ano civil de 2014 foi de 2684,2 MWh a um custo médio 105,0 €/MWh (sem IVA).

4.1.2 Consumo de gás natural

A avaliação ao consumo de gás natural é feita com base nas faturas de gás natural consumido na central térmica. O gás natural consumido vem expresso em kWh, com base no Poder Calorífico Inferior (PCS), e em metros cúbicos normais $m^3(n)$.

A Figura 4.4 mostra o consumo de gás natural faturado em MWh, com base no PCS.

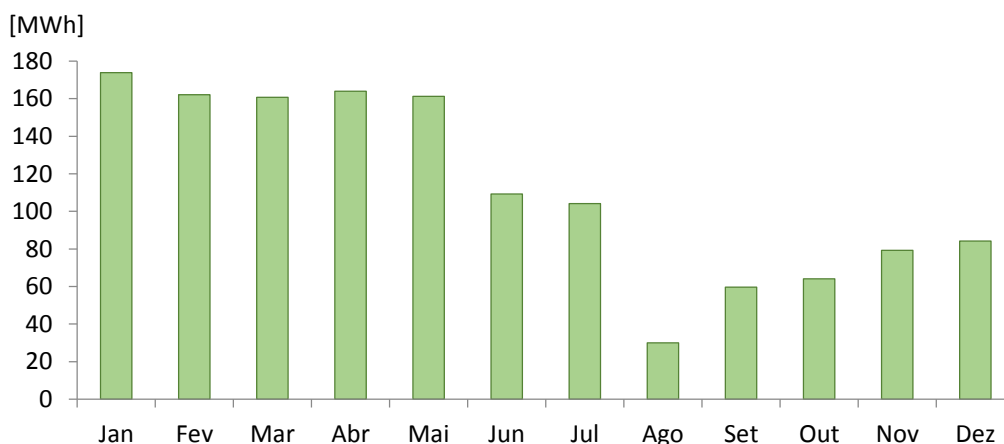


Figura 4.4 - Consumo mensal de gás natural no ano civil de gás natural

Observando a Figura 4.4 constata-se que o consumo de gás natural ao longo do ano civil de 2014 foi irregular: teve pouca oscilação entre fevereiro e maio, uma diminuição acentuada de maio a junho e de julho a agosto, assim como uma subida gradual de setembro a dezembro. As oscilações no consumo de gás natural estão associadas às necessidades de aquecimento de climatização. Nos meses de verão, como se pode verificar o consumo de gás natural é inferior aos restantes, uma vez que nestes meses o gás natural é utilizado maioritariamente para a produção de vapor necessário ao processo produtivo.

Os valores mínimos e máximo de consumo de gás natural foram atingidos nos meses de agosto e de janeiro, respetivamente. O baixo consumo no mês de agosto está associado às baixas necessidades de aquecimento para climatização e um período de paragem na produção.

No ano civil de 2014, o consumo de gás natural foi de 1352,2 MWh, equivalente a 105 tep, a um custo médio de 51,8 €/MWh (preços sem IVA), com base no PCS.

4.1.3 Distribuição do consumo global de energia

As duas formas de energia consumida na unidade fabril foram quantificadas em termos de energia primária, considerando o rendimento elétrico nacional nas centrais termoelétricas em Portugal, em que os fatores de conversão se encontram no Anexo B.

Na tabela 4.1 é possível verificar a contribuição destas duas formas de energia, em termos de energia primária.

Tabela 4.1 - Energia consumida no ano civil de 2014

Forma de Energia	Energia consumida	
	(tep)	(%)
Energia elétrica	577	85
Gás Natural	105	15
Total	682	100

Verifica-se portanto que em termos de energia primária a energia elétrica representa 85% da energia consumida e o gás natural 15%.

4.1.4 Indicadores de referência

4.1.4.1 Consumo Específico

Na Figura 4.5 é possível acompanhar a evolução mensal do consumo específico (relação entre o consumo total de energia e o volume de produção). Verifica-se que o valor máximo de consumo específico ocorre no mês de agosto. Que se justifica, pelo período de cerca duas semanas de pausa para férias, em que houve uma significativa redução da produção. Contudo a redução do consumo energético, não acompanhou a redução da produção. Através Figura 4.3 é possível verificar que o consumo elétrico não sofreu grandes oscilações face aos outros meses.

No ano civil de 2014 a instalação industrial, em termos médios, consumiu 41 kgep (quilograma equivalente de petróleo) para produzir 1000 unidades de medicamentos sólidos.

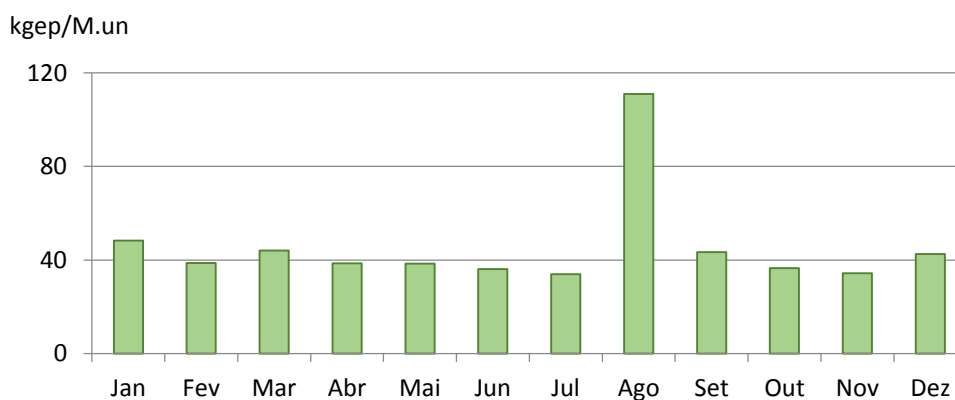


Figura 4.5 - Evolução mensal do consumo específico

4.1.4.2 Intensidade energética

Na Figura 4.6 é possível avaliar a evolução da intensidade energética (relação entre o consumo de energia e o valor acrescentado bruto). Verifica-se um acréscimo notório da intensidade energética no mês de agosto, associado à redução da produção nesse mês, como referido anteriormente.

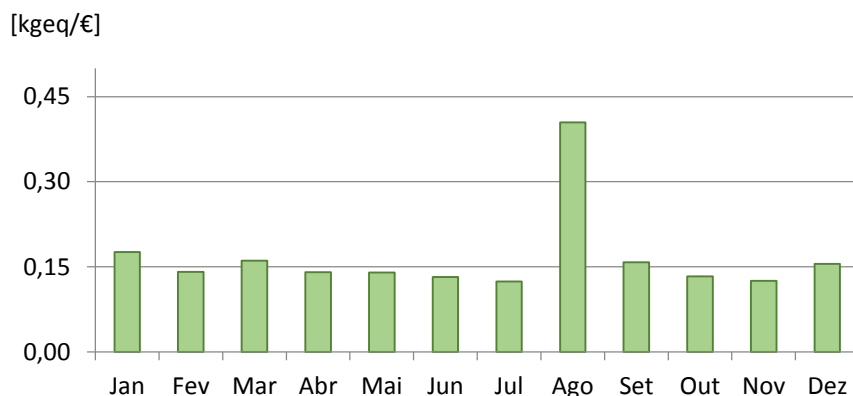


Figura 4.6 - Evolução mensal da intensidade energética e do VAB

4.1.4.3 Intensidade carbónica

Na avaliação à Figura 4.7 é possível acompanhar a evolução da intensidade carbónica (relação entre o valor das emissões dos gases de efeito estufa e o consumo total de energia) ao longo do ano civil de 2014. Para determinar as emissões de gases com efeito estufa utilizaram-se os fatores de conversão dispostos no Anexo B.

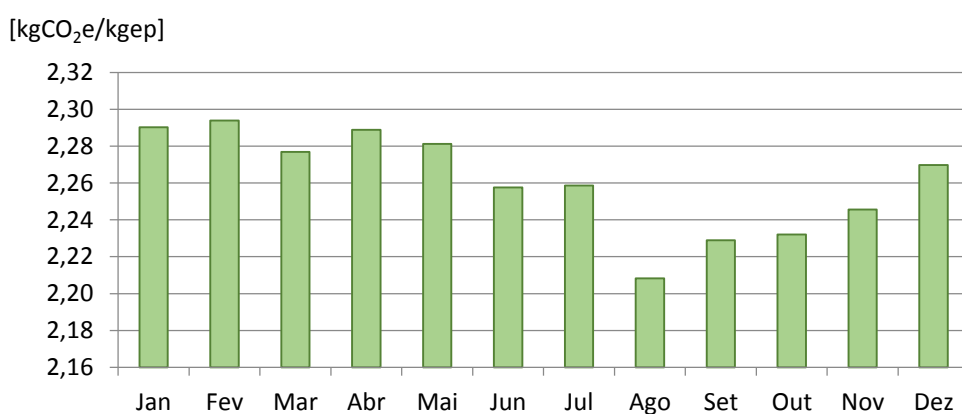


Figura 4.7 - Evolução mensal da intensidade carbónica

Através da Tabela 4.2 é possível observar os valores dos gases com efeito de estufa emitidos por cada forma de energia e a repartição do mesmo.

Tabela 4.2 - Gases de efeito estufa produzidos no ano civil de 2014

Forma de energia	Gases de efeito estufa	
	tCO ₂ e	%
Energia elétrica	1261,6	81,8
Gás natural	281,5	18,2
Total	1543,1	100

4.1.5 Enquadramento legislativo

Com a distribuição global dos consumos, efetuada em 4.1.3 foi calculado o consumo energético da instalação industrial em termos de energia primária, no ano civil de 2014. O valor aferido foi de 682 tep.

Ao abrigo Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de abril retificado pela Lei n.º 7/2013 de 22 Janeiro e pelo Decreto-Lei n.º 68-A/2015 de 30 de abril, a instalação industrial em análise é considerada um consumidor intensivo de energia. Pois, ao ter registado um consumo de energia superior a 500 a tep. Esta instalação tem a obrigatoriedade de realizar uma auditoria energética e prever a implementação de um plano de racionalização de energia. No caso das medidas identificadas apresentarem um período de retorno do investimento igual ou inferior a cinco anos têm de ser implementadas nos primeiros três anos.

4.2 Micro-Auditoria

Nesta secção é realizado um estudo individualizado a alguns setores e ainda uma distribuição dos consumos de energia elétrica e gás natural.

Na central de ar comprimido, térmica, de água fria, unidades de tratamento de ar e desumidificadora foi possível pormenorizar mais estas áreas/equipamentos devido às medições efetuadas.

Para os restantes setores, edifícios e equipamentos, a avaliação efetuada fundamentou-se na distribuição dos consumos de energia elétrica obtidos através das medições de energia elétrica efetuadas e no levantamento das potências nominais de alguns equipamentos (ar-condicionado, luminárias e ventiladores).

A distribuição do consumo de gás natural pelos diversos consumidores é estabelecida através de balanços de energia efetuados.

4.2.1 Central de ar comprimido

No ano de 2015 efetuaram-se medições à central de ar comprimido durante um conjunto de dias, que contemplou períodos de laboração em pleno (semana) e períodos de paragem (fim de semana). Os dados das medições foram disponibilizados pela unidade fabril, tendo sido possível fazer uma avaliação aos seguintes parâmetros:

- Consumo de energia elétrica;
- Pressão de serviço atual;
- Caudal instantâneo de ar comprimido para o processo;
- Ponto de orvalho por pressão;
- Sistema de controlo dos secadores;
- Sistema de controlo dos compressores.

Para estimativa do consumo elétrico da central de ar comprimido utilizaram-se as medições efetuadas aos compressores (Anexo F).

O consumo elétrico por parte dos compressores é dividido em dois períodos. Período de laboração, que corresponde ao período laboração das 07:00-00:00 de laboração, durante os dias de semana e o período de paragens, que inclui os dias de semana das 00:00-07:00 e fins de semana. A distribuição do consumo elétrico dos compressores, será feito na secção 4.2.5.

Compressores

A central de ar comprimido encontra-se atualmente a operar a uma pressão de serviço de 8 bar.

Na Figura 4.8 encontra-se um período de três dias de medição do caudal de ar comprimido, em que se representa o consumo instantâneo e o consumo médio. O consumo instantâneo representa os valores monitorizados pelo equipamento de medição, com um período de integração de 4 segundos. Enquanto o consumo médio corresponde a uma média corrida dos valores de consumo instantâneo de forma a avaliar o perfil de consumo de ar comprimido.

Com base no registo na Figura 4.8 verifica-se que apesar das oscilações no consumo, este é tendencialmente superior no período diurno face ao período noturno sendo o consumo máximo verificado de 120 L(n)/s (litros normais por segundo).

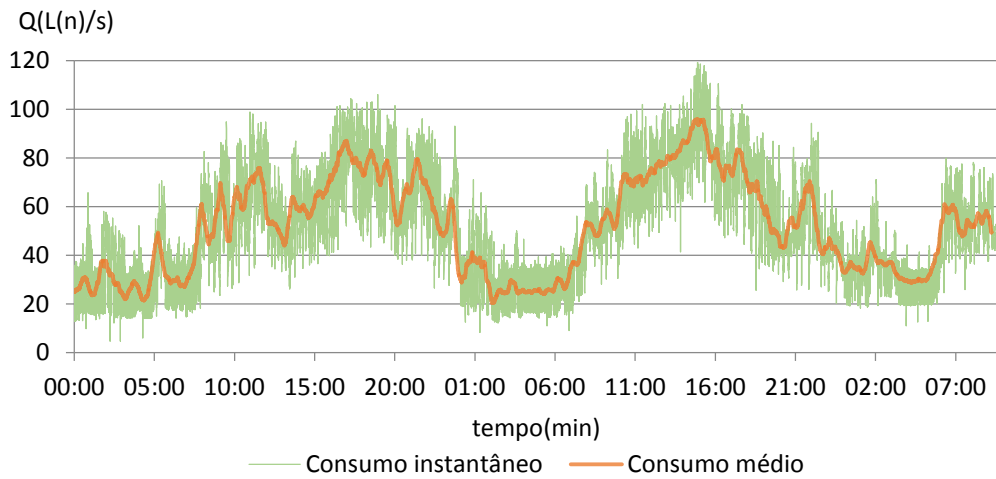


Figura 4.8 - Consumo de ar comprimido

Com as medições efetuadas à potência elétrica absorvida pelos compressores, foi possível avaliar os parâmetros de arranque do sistema de controlo do compressor a funcionar em segunda prioridade.

Para o efeito foi definido um intervalo de tempo que permita visualizar uma situação de funcionamento em simultâneo dos compressores e de apenas um deles. Na Figura 4.9 observam-se as situações de arranque e paragem do compressor 2 que estaria a funcionar como segunda prioridade na altura da medição. O arranque deste ocorreu para uma potência elétrica absorvida de 36 kW. Um valor muito próximo da potência máxima de compressão para as condições nominais, no entanto salienta-se que este equipamento não está a operar nas condições nominais.

É possível ainda verificar que as situações de arranque para o segundo compressor estão associadas a picos de potência absorvida. Estes picos são devidos às regenerações dos secadores de adsorção, que serão analisados ainda nesta secção.

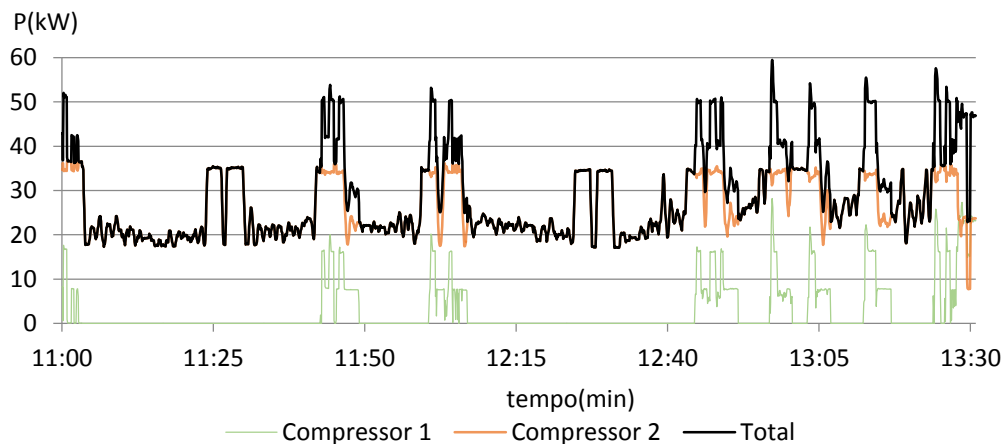


Figura 4.9 - Potência absorvida pelos compressores

Secadores de adsorção

Na avaliação à Figura 4.10, que corresponde a um período de medição de dois dias observa-se a variação do ponto de orvalho por pressão e da temperatura do ar comprimido à saída do secador. Verifica-se que o *setpoint* do ponto de orvalho por pressão à saída destes secadores está configurado para um valor de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

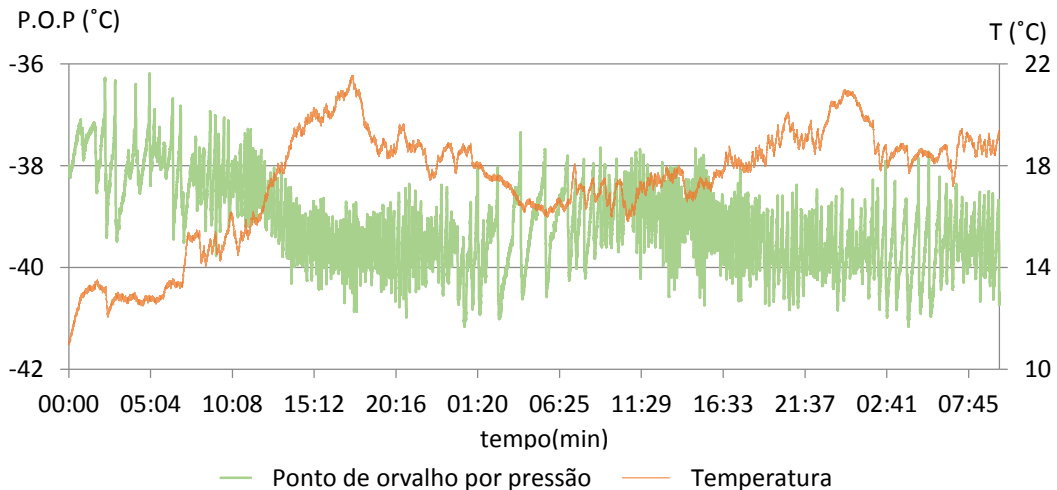


Figura 4.10 - Ponto de orvalho por pressão e temperatura do ar comprimido à saída dos secadores durante 2 dias de medição

Para uma avaliação mais detalhada ao ponto de orvalho por pressão à saída dos secadores, foi definido um período mais curto e avaliados outros dois parâmetros em simultâneo, nomeadamente a potência absorvida pelos compressores e o consumo de ar comprimido (Figuras 4.11 a 4.13). Para essa avaliação efetuou-se uma suavização dos dados, dada a sua natureza oscilatória, por forma a anular oscilações que perturbem a avaliação.

Observa-se com as Figuras 4.11 a 4.13, o ciclo de funcionamento dos secadores, nomeadamente as regenerações, picos de consumo nos compressores (devido às regenerações) e a influência do caudal de ar comprimido.

Através da Figura 4.11 avalia-se a variação da do ponto de orvalho por pressão à saída dos secadores de adsorção e da potência absorvida pelos compressores. Verifica-se um aumento do ponto de orvalho por pressão até um valor de $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ e em seguida um decréscimo abrupto deste. A este decréscimo está associado à comutação das torres do secador, que corresponde ao fim do seu ciclo de funcionamento. Após a comutação das torres é efetuada a regeneração

da torre que estava em funcionamento. Pode-se ainda aferir que associado a cada fim de um ciclo existe um pico de potência absorvida nos compressores (em média de 15 kW).

O pico de potência absorvida pelos compressores corresponde a um aumento do caudal de ar comprimido produzido. Sabendo que a regeneração é feita com recurso a ar comprimido tratado, proveniente da torre em funcionamento e para que as necessidades de consumo da fábrica continuem a ser satisfeitas durante a regeneração é necessário um acréscimo de ar comprimido produzido. Este acréscimo permite compensar a parcela de ar comprimido tratado que é disponibilizado para a regeneração da torre.

A Figura 4.12 que foi obtida a partir da Figura 4.11, através de um método especialmente desenvolvido no contexto da presente dissertação, permite verificar os instantes em que ocorrem as regenerações nos secadores. Verifica-se que dado o espaçamento temporal a que estas ocorrem, o controlo para o fim de ciclo é efetuado através do ponto de orvalho por pressão.

Observando conjuntamente as Figura 4.12 e Figura 4.13 é possível constatar que no período noturno (das 00:59 às 06:59), o espaçamento temporal entre regenerações é superior comparativamente ao espaçamento temporal apresentado no período laboral (das 07:59 às 09:59) e que essa diferença está associada às reduzidas necessidades de ar comprimido no período noturno face às necessidades do período laboral.

Verifica-se portanto que a utilização deste tipo de equipamentos, com controlo de ciclo por ponto de orvalho por pressão, reduz custos energéticos, uma vez que a cada regeneração temos um pico de potência absorvido pelos compressor e ainda um desperdício de ar comprimido seco, que varia consoante a relação de pressões e a temperatura.

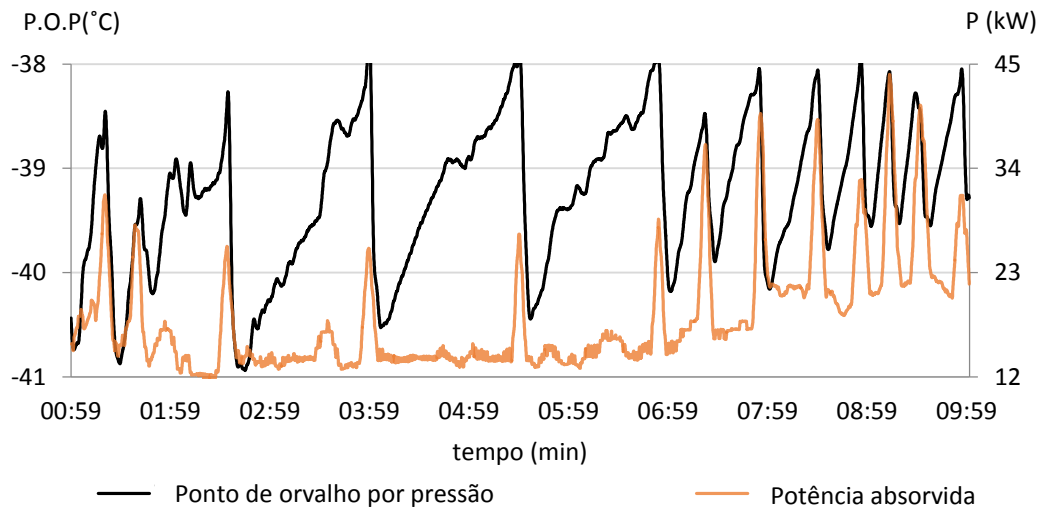


Figura 4.11 - Ponto de orvalho por pressão à saída dos secadores e potência absorvida pelos compressores da 00:59 - 09:59

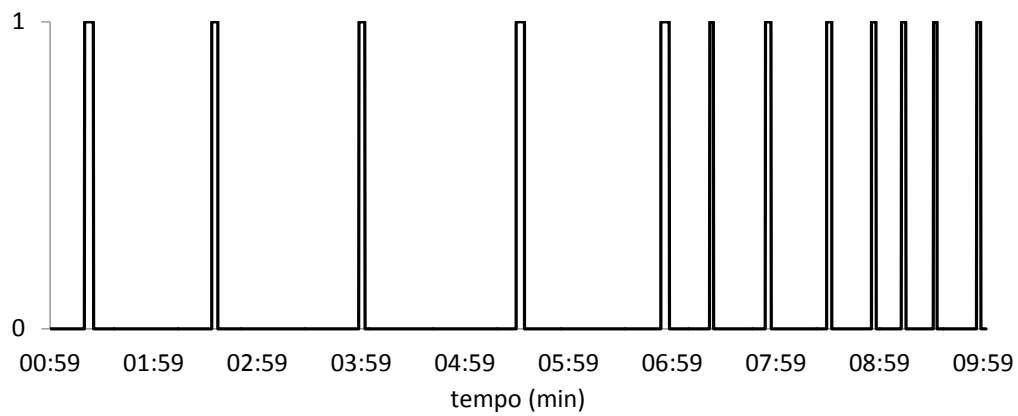


Figura 4.12 – Instantes em que se iniciam as regenerações da 00:59 - 09:59

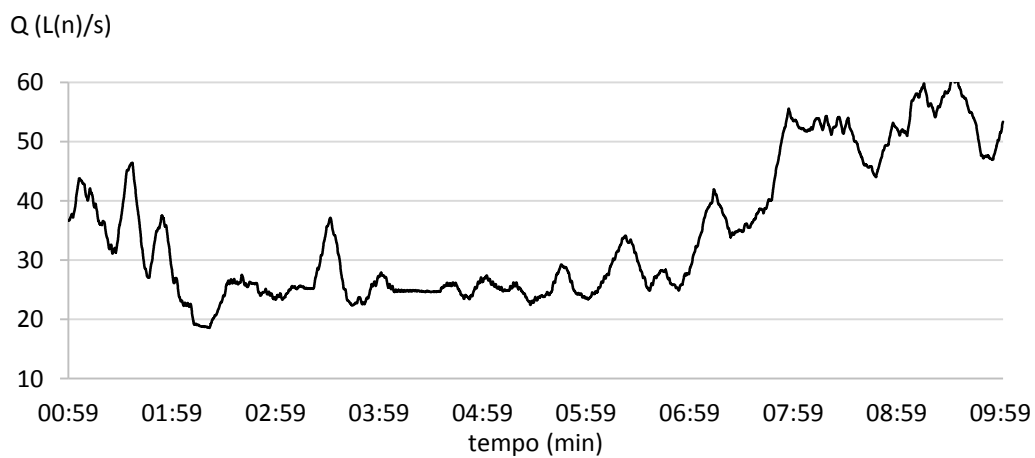


Figura 4.13 - Consumo de ar comprimido 00:59 - 09:59

4.2.2 Central térmica

Na central térmica com as medições efetuadas aos gases de combustão determinou-se rendimento das caldeiras de vapor presentes na instalação. Para esse efeito, recorreu-se ao método das perdas, conforme descrito na secção 3.3. Na Figura 4.14, encontra-se o esquema energético de gerador de calor.

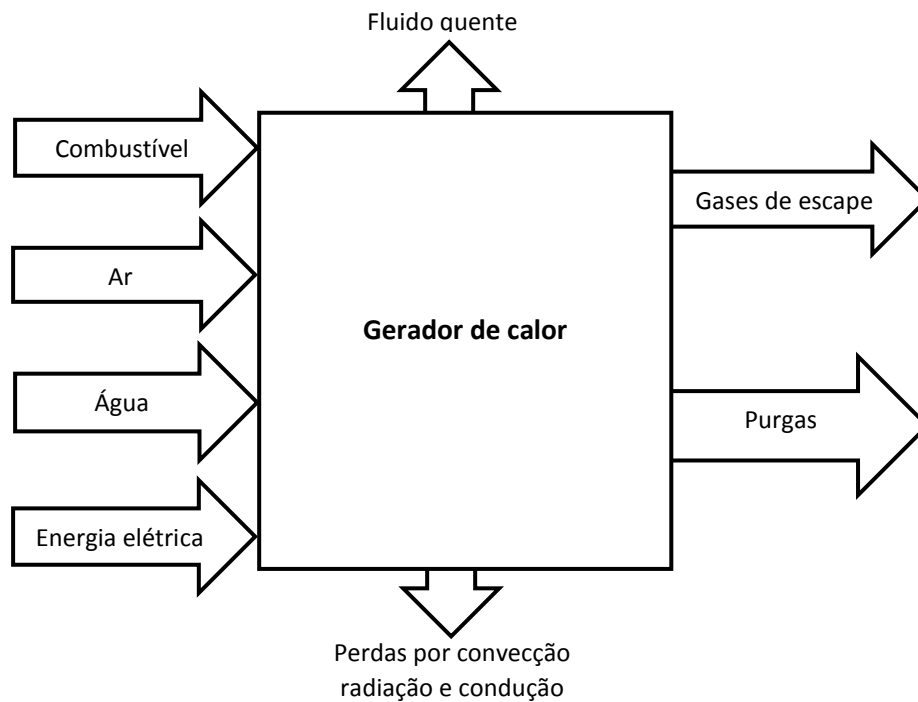


Figura 4.14 – Entradas e saídas de matérias e energia num gerador de calor

Na Tabela 4.3 encontram-se os resultados obtidos de eficiência térmica das caldeiras em análise. Como se pode observar, estas apresentam rendimentos distintos resultantes da má regulação do excesso de ar, numa das caldeiras.

Tabela 4.3 - Eficiência das caldeiras e parâmetros associados

	Caldeira 1	Caldeira 2
Combustível	Gás Natural	Gás Natural
Temperatura do ar de combustão (°C)	25,7	25,7
Temperatura dos gases de combustão (°C)	183,0	186,0
Temperatura água alimentação (°C)	85,0	85,0
Temperatura das purgas (°C)	153	153
Total de sólidos dissolvidos na água de alimentação ($\mu\text{S/cm}$)	3480	3480
Total de sólidos dissolvidos na purga ($\mu\text{S/cm}$)	158	158
Gases de combustão (base seca)-O₂ (%v/v)	1,8	8,3
Gases de combustão (base seca)-CO₂ (%v/v)	10,9	7,2
Excesso de ar na caldeira (%)	9,4	65,4
% Perdas em relação à energia disponível		
Perdas por calor sensível nos gases (%)	5,7	8,8
Perdas por vapor de água nos gases (%)	2,1	2,1
Perdas por convecção e radiação (%)	2	2
Perdas nas purgas (%)	0,48	0,47
Eficiência energética (%)	89,7	86,6

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros recomendados para uma boa eficiência neste tipo de caldeiras, nomeadamente em termos de teor de oxigénio e dióxido de carbono que devem estar presentes nos gases de combustão e a percentagem de excesso de ar a que deve ser efetuada a combustão.

Ao comparar os valores apresentados pela caldeira 1 na Tabela 4.3 face aos valores recomendados na Tabela 4.4, verifica-se que estes se encontram dentro dos valores padrão recomendados. O mesmo já não se pode dizer em relação à caldeira 2, pois não existe enquadramento destes valores na caldeira 2 o que desta forma corrobora a eficiência energética inferior que esta caldeira apresenta face à caldeira 1, que se deve essencialmente ao elevado excesso de ar que a que está a operar.

A presença de excesso de ar combustão é benéfico para que combustão do combustível seja completa, no entanto como se pode verificar pelos resultados apresentados pela caldeira 2 um elevado teor de ar é indesejável pois reduz a eficiência térmica destes equipamentos, devido ao aumento das perdas associadas ao calor sensível nos gases de combustão. O excesso de ar

deve corresponder a um equilíbrio em que a queima do combustível seja completa e que as perdas de calor por arrefecimento da câmara de combustão devido ao ar em excesso sejam minimizadas.

Relativamente à temperatura dos gases de combustão, verifica-se que em ambas as caldeiras a temperatura destes é superior ao valor mínimo recomendado (150°C), de forma a evitar condensações ácidas à saída da chaminé e da instalação. No entanto, a temperatura dos gases de combustão libertados para a atmosfera em ambas as caldeiras é superior a 180°C, valores superior ao mínimo recomendado. Estes devem-se essencialmente ao não aproveitamento dos gases de combustão através de um economizador ou ainda pela possível presença de depósitos calcários e fuligem no permutador tubular. Uma redução na temperatura dos gases de combustão permitiria reduzir as perdas por calor sensível nos gases de combustão e as perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão.

No que concerne à temperatura da água de alimentação à caldeira proveniente do desgasificador, o valor apresentado é de 85 °C no entanto o desgasificador existente permite obter uma temperatura na água de alimentação de 105 °C, o que implicaria um aumento da eficiência energética do gerador por redução da energia térmica necessária a fornecer, para o aquecimento do fluido.

Em suma à avaliação efetuada à eficiência térmica das caldeiras conclui-se que apesar do não aproveitamento os gases de combustão e do valor da temperatura da água de reposição, a eficiência térmica apresentada pela caldeira 1 encontra-se dentro dos valores médios apresentados por este tipo de caldeira, num estudo efetuado pela ADENE [33]. No que concerne à caldeira 2 verifica-se que a má regulação do excesso de ar é o fator associado ao rendimento inferior desta em comparação à caldeira 1.

Tabela 4.4 - Valores padrão do teor dos gases de combustão para uma boa eficiência dos geradores de calor a gás natural, adaptado [31]

Combustível	Gás Natural	
	Mínimo	Máximo
Excesso de ar de combustão (%)	5	10
Gases de combustão (base seca) - CO ₂ (%v/v)	11,4	10,9
Gases de combustão (base seca) - O ₂ (%v/v)	1,1	2,1

4.2.3 Central de água fria

Relativamente à central de água fria, efetuaram-se medições aos *chillers*, descritas na secção 3.4.3, que permitiram aferir a sua eficiência energética (EER) e as condições de utilização destes equipamentos. Verificou-se que ambos *chillers* face às necessidades de energia térmica de arrefecimento no período de inverno se encontram sobredimensionados (período em que foram efetuadas as medições). Por outro lado verifica-se que o *chiller* mais recente apresenta um índice de eficiência energética superior (EER) superior ao *chiller* mais antigo.

A Figura 4.15 mostra o perfil característico da potência elétrica absorvida pelo *chiller* mais recente durante o período de medição (8 fevereiro das 12:28-14:12). Verifica-se que no início da medição temos um pico de potência elétrica absorvida e em seguida um funcionamento intermitente, isto é, opera durante um período de tempo e fica sem operar um novo período de tempo. A situação inicial de pico de potência corresponde a uma situação de arranque do *chiller* após longo período de paragem. Relativamente às situações de intermitência concluiu-se estarem associados ao sobredimensionamento deste equipamento face às reduzidas necessidades de energia térmica frigorífica no período de inverno.

Na Figura 4.16 apresentam-se os resultados obtidos ao ensaio de rendimento efetuado ao *chiller* mais recente que teve uma duração inferior ao período de medição da potência elétrica absorvida por este equipamento (Figura 4.15). Com o ensaio de rendimento efetuado ao *chiller* mais recente verifica-se que este equipamento está a operar num regime de carga reduzido, contudo operar nestas condições apura-se não ser prejudicial em termos de eficiência energética, antes pelo contrário, com o decréscimo do regime de carga, a eficiência energética do equipamento é superior. Verifica-se ainda que um pouco depois do 12:40, existe uma subida a pico do EER, associada a um decréscimo acentuado do consumo elétrico do *chiller*. O que corresponde à situação em que o consumo elétrico estabilizou, após uma situação de arranque.

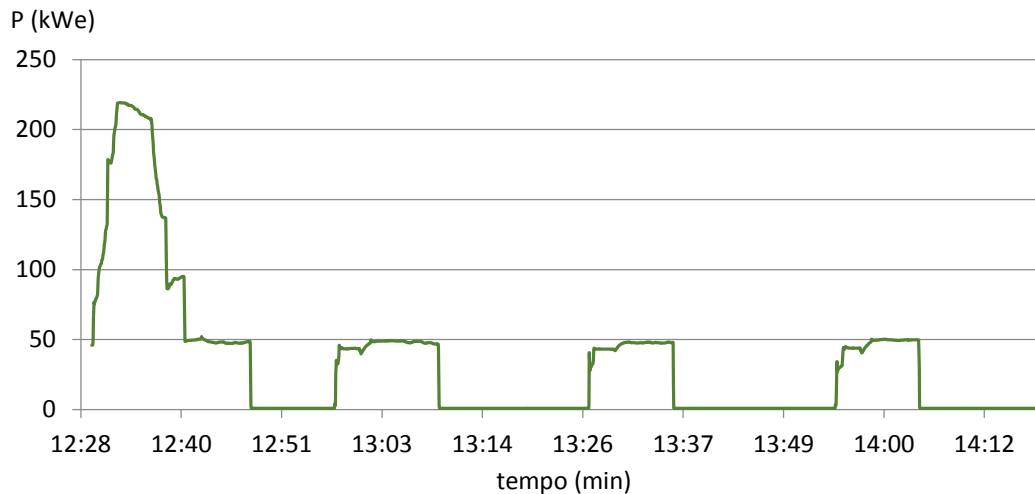


Figura 4.15 - Potência absorvida pelo *chiller* mais recente do 12:28 - 14:12

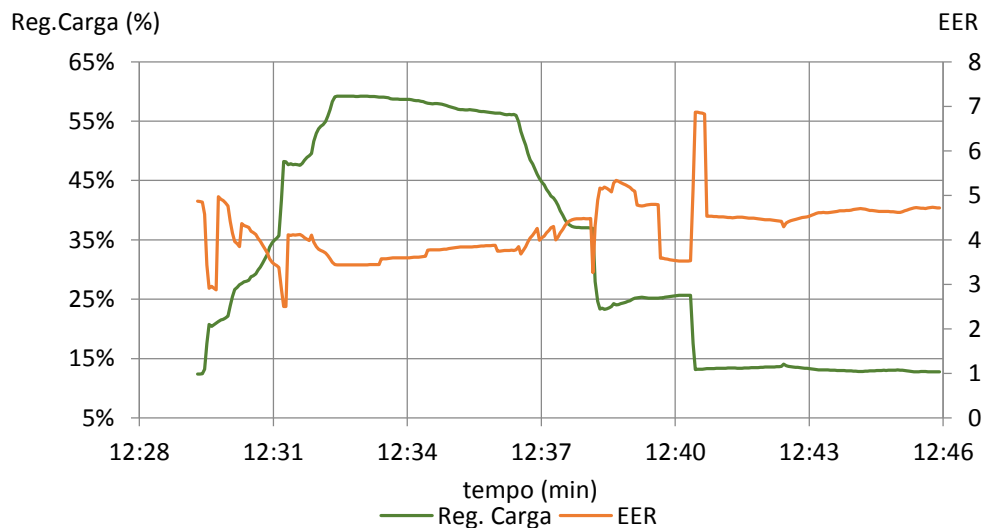


Figura 4.16 - Variação do EER e do regime de carga do *chiller* mais recente do 12:28 - 12:46

Na Figura 4.17 encontra-se a potência elétrica absorvida pelo *chiller* mais antigo, característica do período em que se efetuou a medição (8 de Fevereiro das 10:54 - 00:14). Note-se que o período de medição correspondente a este *chiller* é superior ao efetuado ao *chiller* mais recente, uma vez que no dia de medição o *chiller* mais antigo tinha prioridade de funcionamento. Verifica-se mais uma vez o sobredimensionado do equipamento pelo regime intermitente que este apresenta e pela potência elétrica absorvida comparativamente à potência nominal deste equipamento, que se encontra na Tabela 4.5.

Através da Figura 4.18 verifica-se também para o *chiller* mais antigo, um acréscimo no índice de eficiência energética com a redução do regime de carga.

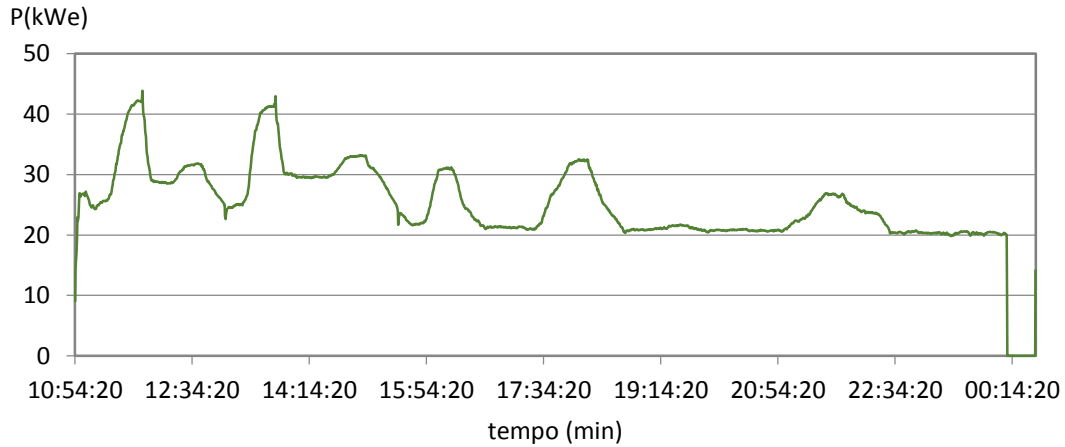


Figura 4.17 - Potência absorvida pelo *chiller* mais antigo das 10:54 - 01:14

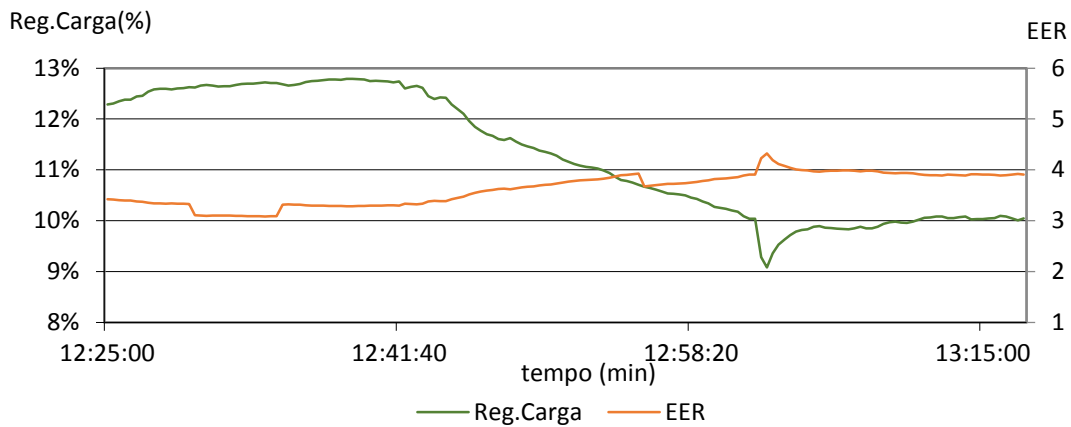


Figura 4.18 – Variação do EER e do Regime de carga do *chiller* mais antigo do 12:25 - 13:18

Na Tabela 4.5 encontram-se resultados obtidos de eficiência energética dos *chillers*, note-se que os resultados de eficiência energética obtidos apresentam um valor superior ao valor de eficiência energética fornecido pelo fabricante.

Tabela 4.5 - Análise de eficiência energética aos *chillers* de compressão

	Chiller mais recente	Chiller Mais antigo
Potência nominal (kWe)	370	249
EER Nominal	2,9	2,7
Regime de carga médio (%)	30%	11%
EER	4,3	3,6

A diferença de valores obtidos face aos valores fornecidos pelo fabricante reside no facto de o valor fornecido pelo fabricante ser a um regime de carga de 100% e de o ensaio ser realizado em bancos de ensaio sob condições *standard* segundo as normas da EUROVENT.

As medições efetuadas corresponderam a uma situação real de consumo durante o período de Inverno, em que as necessidades de energia térmica de arrefecimento são reduzidas com a consequente utilização destes equipamentos num regime de carga reduzido. O que não se verifica prejudicial em termos de eficiência energética, como aludido anteriormente.

De forma a poder evidenciar a validade dos resultados obtidos, estes deverão ser confrontados, com valores de EER apresentado pelo fabricante em ensaios efetuados a diferentes regimes de carga. Para o *chiller* mais recente foi possível obter os valores a diferentes regimes de carga junto do fabricante (Tabela 4.6), para o *chiller* mais antigo não foi possível obter essa informação dada a antiguidade do equipamento.

Tabela 4.6 - Valores de EER do *chiller* mais recente em função do regime de carga fornecidos pelo fabricante

Regime Carga (%)	EER
100	2,91
75	3,44
50	4,05
25	4,61

Para o EER de 4,3 a um regime de carga de 30% obtido para o *chiller* mais recente, é possível concluir comparando os valores dispostos na Tabela 4.6 que o valor obtido se enquadram entre os regimes de carga de 25% e 50% o que permite validar o resultado obtido

Com as medições efetuadas á potência elétrica aos *chillers*, não é possível extrapolar o seu consumo ao longo do ano, uma vez que a utilização destes equipamentos é sazonal. O consumo elétrico desta central é estimado com base em balanços de massa e energia efetuados às unidades de tratamento de ar que será visto na secção 4.2.4.

Inerente ao método utilizado para a determinação do EER, explicado na secção 3.4.3, existe um erro associado, que no caso de os manómetros de pressão estarem danificados ou mal calibrados, introduzem um erro na leitura do caudal nas curvas das bombas e que no caso em que as curvas das bombas são pouco acentuadas, pequenas diferenças de pressão vão corresponder a grandes variações de caudal. Alternativamente à utilização deste método, uma

outra forma de determinar o caudal mássico de água seria através de um caudalímetro portátil por ultra-sons.

4.2.4 Unidades de tratamento de ar e desumidificadores

Com base nas medições efetuadas às unidades de tratamento de ar e desumidificadores, nomeadamente temperatura, humidade relativa e caudal, efetuaram-se balanços de massa e energia, para determinar as suas potências térmicas e assim poder estimar o consumo de gás natural para produção de água quente para AVAC, vapor para o processo e para reativação dos desumidificadores. Os valores obtidos nesta secção serão discutidos na secção 4.2.6, referentes à repartição dos consumos de gás natural.

Unidades de tratamento de ar de climatização

Para estimar a potência de aquecimento e arrefecimento das unidades de tratamento de ar e uma vez que estas funcionam ininterruptamente ao longo do ano. Para as condições de entrada do ar, foram utilizados os dados climáticos da temperatura média e humidade relativa mensal da zona onde esta inserida a instalação industrial, que foram obtidos através do *SolTerm*. Como condições de saída, foram utilizadas as condições de *setpoint* do ar no interior das zonas a climatizar, temperatura de 21 ± 3 °C e humidade relativa inferior a 60%.

Os dados climáticos encontram-se na Tabela 4.7, acrescenta-se ainda que algumas das unidades de tratamento de ar de climatização possuem módulo de recuperação, isto é fazem aproveitamento do caudal de extração das salas de forma a reduzir a potência de aquecimento.

Tabela 4.7 - Dados climáticos da temperatura média mensal e humidade relativa na zona da instalação industrial retirados do *SolTerm*

	Temperatura média (°C)	Humidade Relativa (%)
janeiro	11,0	81
fevereiro	11,9	78
março	13,2	76
abril	15,0	72
maio	17,3	71
junho	20,0	70
julho	22,2	66
agosto	22,4	65
setembro	21,2	70
outubro	18,1	74
novembro	14,0	81
dezembro	11,5	80

Na Tabela 4.8 encontram-se os caudais volúmicos de ar e as condições de entrada e saídas medidas.

Tabela 4.8 - Condições de entrada e saída do caudal de extração das unidades de tratamento de ar de climatização e potência de recuperação

	Condições de entrada			Condições de saída		Potência de recuperação (kWt)
	Caudal (m ³ /h)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	
UTA P1	7602	21	59	18	52	23
UTA V	7303	22	65	19	78	9
UTAE2	7200	22	65	19	78	9
UTA CQ	7401	21	59	18	52	23
UTA G	8753	22	65	19	78	11

A Tabela 4.9 mostra o caudal volúmic do ar de insuflação das UTA's as potência de aquecimento e arrefecimento média anual obtidas, nestas já se encontram contabilizados os valores da potência de recuperação.

Tabela 4.9 - Caudal de insuflação e potências térmicas das unidades de tratamento de climatização

	Caudal (m ³ /h)	Potência de aquecimento (kWt)	Potência de arrefecimento (kWt)
UTA P1	14996	30,1	54,6
UTA P2	5119	18,2	18,6
UTA V	3995	14,2	14,6
UTA E1	6822	24,2	24,9
UTA E2	6491	14,4	23,7
UTA CQ	9630	11,7	35,1
UTA I+D	9100	21,8	33,2

Unidades de Tratamento de ar de Processo

Para as UTA's de processo, por informações obtidas, verificou-se que o seu número de horas de funcionamento é reduzido, para os balanços e energia foi portanto considerado os valores das condições de entrada e saídas medidos (caudal, temperatura e humidade relativa).

Na tabela 4.10 encontram-se os resultados das medições às unidades de tratamento de ar, as condições de set-point e as respetivas potências de aquecimento.

Tabela 4.10 - Resultados das medições às unidades de tratamento de processo e respetivas potências aquecimento

	Condições de entrada			Condições de <i>setpoint</i> saída		Potência de aquecimento (kWt)	Potência de arrefecimento (kWt)
	Caudal (m ³ /h)	Temp. (°C)	Humidade Relativa (%)	Temp. (°C)	Humidade Relativa (%)		
UTA P1-F1	899	17,8	76,5	55,0	7,7	11,2	4,2
UTA P1-F2	403	17,8	76,5	85,1	4,7	9,3	1,9
UTA P2	1713	17,8	76,5	55,0	7,7	26,2	8,0
UTA P3	1209	17,8	76,5	55,0	7,5	21,9	5,7

Desumidificadores

Na Figura 4.19 representa-se o balanço energético, efetuado aos secadores de adsorção.

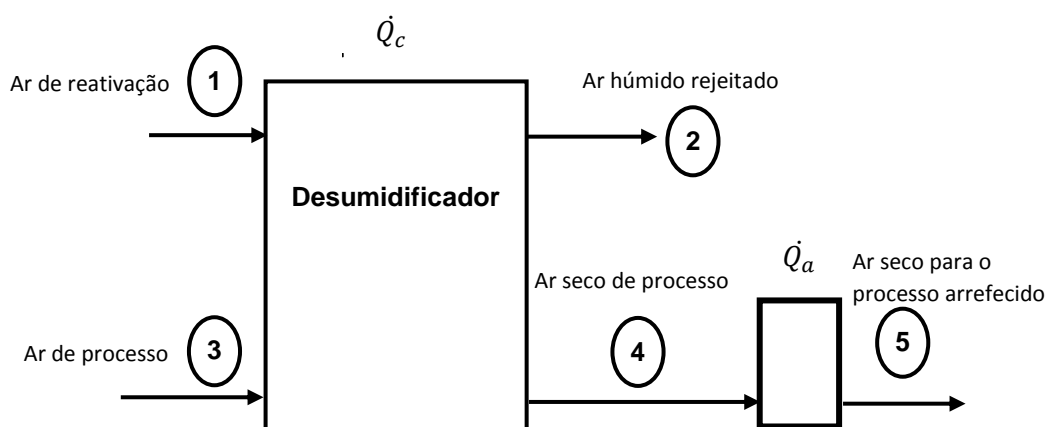


Figura 4.19 - Esquema de princípio dos desumidificadores de adsorção

Na Tabela 4.11 e Tabela 4.12, encontram-se os valores das medições efetuadas aos desumidificadores e os valores das potências térmicas obtidas, respetivamente.

Tabela 4.11 - Valores de temperatura, humidade relativa e caudal nos desumidificadores em vários pontos dos desumidificadores

Desumidificador 1	1	2	3	4	5
Temperatura (°C)	24,0	25,8	19,6	24,4	20,9
Humidade relativa (%)	34,5	36,9	40,0	27,7	32,9
Caudal de ar (m ³ /h)	958,0		3700,0		
Desumidificador 2	1	2	3	4	5
Temperatura (°C)	24,0	25,8	19,6	24,4	20,9
Humidade relativa (%)	34,5	36,9	40,0	27,7	32,9
Caudal de ar (m ³ /h)	1522,2		2100,0		
Desumidificador 3	1	2	3	4	5
Temperatura (°C)	24,0	25,8	19,6	24,4	20,9
Humidade relativa (%)	34,5	36,9	40,0	27,7	32,9
Caudal de ar (m ³ /h)	2380,5		3700,0		

Tabela 4.12 - Potências térmicas dos desumidificadores

	Potência de aquecimento (kWt)	Potência de arrefecimento (kWt)
Desumidificador 1	1,6	5,0
Desumidificador 2	1,2	8,1
Desumidificador 3	14,8	5,1

4.2.5 Distribuição dos consumos de energia elétrica

A distribuição dos consumos de energia elétrica pelos diversos setores e equipamentos para o ano de referência suportou-se nas medições de energia elétrica efetuadas, no levantamento das potências nominais de equipamentos a que não se procedeu a medições, balanços de energia e a estimativa do número de horas de funcionamento de cada setor e equipamento. Este último foi efetuado conjuntamente com os membros da instalação industrial.

As medições de energia elétrica, efetuadas aos edifícios de produção, administrativos, à central de tratamento de água, central de ar comprimido, central térmica, encontram-se no Anexo F.

Para a central de água fria apesar de terem sido efetuadas medições ao seu consumo elétrico, dos *chillers* não seria credível extrapolar os resultados dessas medições para o ano inteiro, dada a sazonalidade do sistema de climatização. Dessa forma a estimativa ao consumo elétrico, é efetuado com base nos balanços de massa e energia efetuados às unidades de

tratamento de ar, que permitiram aferir a potência elétrica consumida por cada um destes equipamentos.

Os equipamentos, que não foram efetuados nenhum tipo de medição, são na sua generalidade de potências reduzida, tais como ventiladores, luminárias e equipamentos de ar condicionado.

Na Tabela 4.13 é possível identificar o consumo elétrico dos diversos constituintes da instalação industrial.

Tabela 4.13 - Consumo elétrico anual da instalação industrial das diversas centrais constituintes da instalação industrial

	kW _e	h/ano	MWh/ano	tep/ano
Central de ar comprimido				
Compressores (Período Diurno)	28,5	6120	174	37,5
Compressores (Período Noturno)	17,8	2520	45	9,7
Central térmica				
Caldeiras	0,6	4000	2	0,5
Bombas alimentação caldeiras	0,8	4000	3	0,6
Bombas AVAC	4,0	4000	16	3,4
Central de tratamento de água				
Central de água fria				
UTA P1	23,1	3504	81	17,4
UTA P2	7,9	3504	28	5,9
UTA V	6,1	3504	22	4,6
UTA E1	10,5	3504	37	7,9
UTA E2*	10,0	3504	35	7,5
UTA CQ	14,8	3504	52	11,2
UTA I+D	14,0	3504	49	10,5
UTA P1	2,7	1217	3	0,7
UTA-P2	3,5	1532	5	1,2
UTA-P3	2,5	300	1	0,2
Desumificador 1	2,1	2,1	0	0,1
Desumificador 2	3,5	3,5	1	0,1
Desumificador 3	2,2	2,2	0	0,1

Tabela 4.14 - Consumo elétrico anual da instalação industrial nod diversos edifícios, luminárias, ventiladores, equipamentos de ar condicionados e UTA's

	kW_e	h/ano	MWh/ano	tep/ano
Edifícios administrativos				
Edifício 1 (Quadro de Emergência)	8	5856	49	10,5
Edifício 1	10	5856	12,8	13
Edifício 2	6	5856	33	7,2
Edifício 2 (Quadro de Emergência)	2	5856	12	2,6
Edifício da produção				
Fabrico	11	5856	62	13,3
Fabrico (Quadro de Emergência)	38	5856	224	48,2
Laboratório de Controlo da Qualidade	9,2	5856	54	11,6
Iluminação*	108,5		586	126,0
Ventiladores*	14,5		119	25,6
Ar condicionado			170	36,5
UTA's				
UTA P1	19,7	8424	166	35,6
UTA P2	12,2	8424	103	22,1
UTA V	6,8	8424	57	12,4
UTA E1	3,4	8424	29	6,1
UTA E2*	11,0	8424	93	19,9
UTA CQ	5,8	8424	48	10,4
UTA I+D	3,1	8424	26	5,6
UTA G1*	2,8	1217	3	0,7
UTA G2*	2,8	1532	4	0,9
UTA G3*	2,8	300	1	0,2
Desumidificadores				
Desumidificador 1	3,7	3,7	1	0
Desumidificador 2	26,2	26,2	77	16
Desumidificador 3	3,7	3,7	1	0
Rooftop	3,0	8208	25	5,3

*Equipamentos em que se considerou as potências nominais.

Após a obtenção do consumo elétrico de todos os integrantes da instalação industrial (Tabela 4.13 e 4.14), irá avaliar-se o elétrico nos diversos serviços auxiliares (Tabela 4.15) em termos de energia primária e em seguida o consumo elétrico de todos os constituintes da instalação auditada.

Tabela 4.15 - Consumo elétrico nos serviços auxiliares em energia primária e a sua contribuição relativa

	tep/ano	%
Central de ar comprimido	47,2	10,5%
Central térmica	4,6	1,0%
Central de tratamento de água	16,5	3,7%
Central de água fria	67,3	15,1%
Iluminação	126,0	28,1%
Ventiladores	25,6	5,7%
Ar condicionado	36,5	8,1%
UTA's	136,2	27,8%
Total	456,1	100,0%

Através da Figura 4.20 verifica-se que dos serviços auxiliares, a iluminação e as UTA's são os que apresentam maior preponderância em termos de consumo elétrico, seguidos da central de água fria e da central de ar comprimido. Sendo que se agruparmos o consumo elétrico das UTA's, da central de água fria e equipamentos de ar condicionado, verificamos que os sistemas de climatização representam 51% do consumo elétrico dos serviços auxiliares.

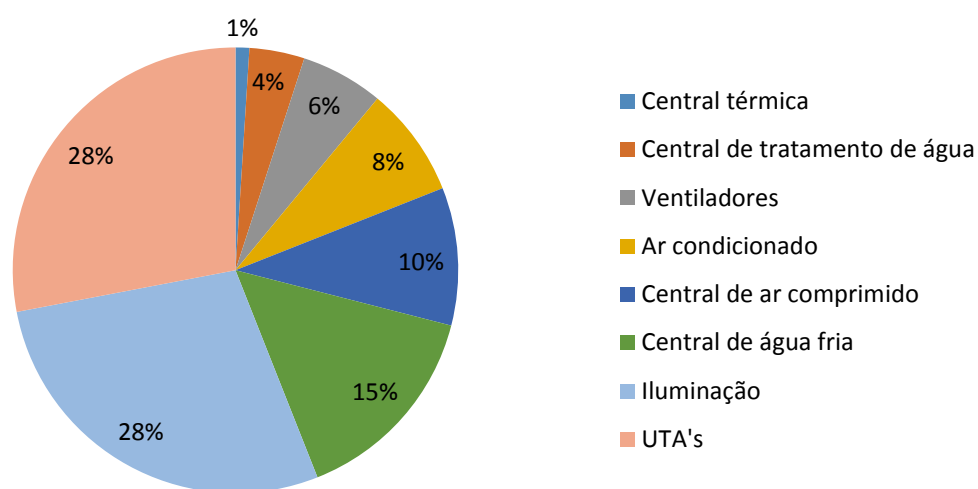


Figura 4.20 - Distribuição dos consumos de energia elétrica nos serviços auxiliares

Avalia-se agora o consumo de energia elétrica em termos de energia primária pelos diversos setores e equipamentos e a sua contribuição relativa.

Tabela 4.16 - Distribuição dos consumos de energia elétrica nos diversos setores e equipamentos e a sua contribuição relativa

	tep/ano	(%)
Central de ar comprimido	47,2	8,5
Central térmica	4,6	0,8
Central de tratamento de água	16,5	3,0
Central de água fria	67,3	12,1
Edifícios administrativos*	27,5	5,0
Edifício da produção*	67,6	12,2
Iluminação	126,0	22,7
Ventiladores	25,6	4,6
Ar condicionado	36,5	6,6
UTA's	136,2	24,5
Total	551,2	100,0

*Deduzidos os respetivos valores da iluminação.

Com base na repartição dos consumos de energia elétrica pelos diversos setores e equipamentos, estima-se um consumo de energia elétrica, em termos de energia primária de 551 tep, corresponde a um erro de repartição de 4%.

Através da Figura 4.21 é possível constatar mais uma vez o peso que a iluminação, a central de água fria e as unidades de tratamento de ar representam no consumo elétrico desta instalação industrial.

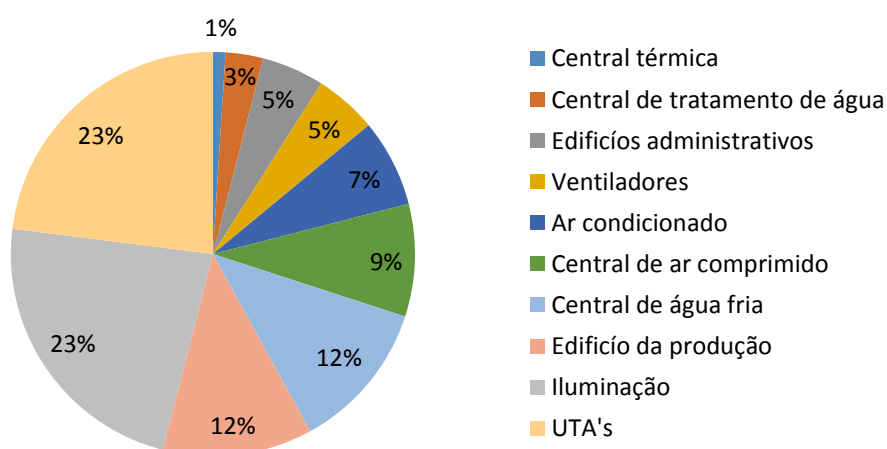


Figura 4.21 - Repartição do consumo de energia elétrica nos diversos setores e equipamentos

Na Tabela 4.17 evidencia-se a preponderância que a energia elétrica representa no consumo elétrico dos serviços auxiliares da instalação auditada.

Tabela 4.17 - Distribuição dos consumos de energia elétrica por serviços auxiliares, produção e edifícios administrativos em termos de energia primária e a sua contribuição relativa

	tep/ano	(%)
Produção	67,6	12,2
Edifícios administrativos	27,5	5,0
Serviços auxiliares	456,1	82,9
Total	551,2	100,0

Por avaliação à Figura 4.22 verifica-se mais uma vez a importância que os serviços auxiliares representam nesta unidade industrial.

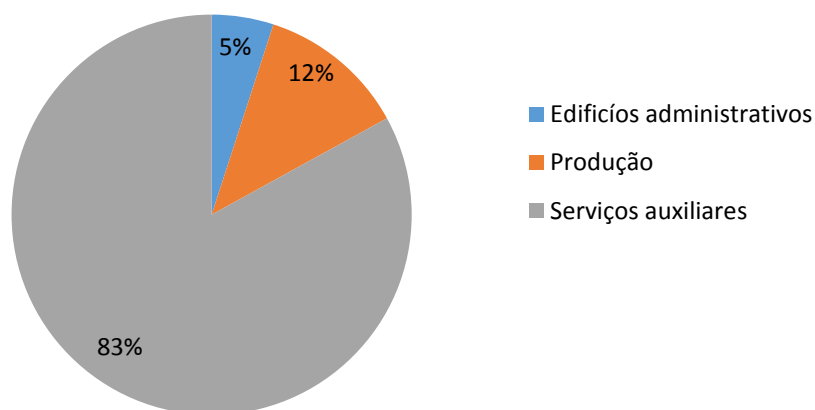


Figura 4.22 - Distribuição dos consumos de energia elétrica por serviços auxiliares, produção e edifícios administrativos

Verifica-se que dada a especificidade desta indústria, esta caracteriza-se por um elevado consumo elétrico nos sistemas de climatização que ascendem a 32 % do consumo total de energia elétrica, esta preponderância resulta do tempo de utilização deste tipo de equipamentos ser consideravelmente superior aos períodos de produção. Uma vez que dado os requisitos de qualidade que a indústria farmacêutica requer no interior dos espaços afetos à produção e ao armazenamento dos medicamentos, os sistemas de climatização encontram-se permanentemente em funcionamento.

4.2.6 Distribuição dos consumos de gás natural

A distribuição dos consumos de gás natural às unidades de tratamento de ar e desumidificadores efetuou-se com base em balanços de massa e energia, através das medições efetuadas, nomeadamente temperatura, humidade relativa e caudal.

Relativamente ao consumo de gás natural para aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS), a instalação industrial possui um depósito de acumulação para esta, que possui um contador de água à entrada. Tendo sido fornecido pela instalação industrial o consumo mensal de AQS, referente ao ano civil de 2014.

Nas Tabela 4.18 a 4.21 encontram-se os valores estimados para o consumo de gás natural nas UTA's de climatização, de processo e aquecimento de águas quentes sanitárias respetivamente. Os valores obtidos têm consideração o PCI do gás natural e o rendimento das caldeiras. Verifica-se aqui a importância das UTA's de climatização, neste sector industrial, pelo número de horas de funcionamento destas em comparação com as outras UTA's e desumidificadores.

Tabela 4.18 - Distribuição do consumo de gás natural nas UTA's de climatização

	Potência kWt	Horas /ano	Consumo Gás Natural m ³ (n)/ano	tep/ano
UTA P1	30,1	8424	28146,4	25,5
UTA P2	18,2	8424	16993,3	15,4
UTA V	14,2	8424	13262,3	12,0
UTA E1	24,2	8424	22647,1	20,5
UTA E2	14,4	8424	13467,3	12,2
UTA CQ	11,7	8424	10905,5	9,9
UTA I+D	21,8	8424	20383,8	18,4

Tabela 4.19 - Distribuição do consumo de gás natural nas UTA's de processo

	Potência kWt	Horas /ano	Consumo Gás Natural m ³ (n)/ano	tep/ano
UTA P1-F1	11,5	517	640,7	0,6
UTA P1-F2	9,3	700	723,5	0,7
UTA P2	27,0	1532	4457,8	4,0
UTA P3	19,3	300	624,1	0,6

Tabela 4.20 - Distribuição do consumo de gás natural nos desumidificadores

	Potência kWt	Horas de funcionamento	Consumo Gás Natural m ³ (n)	tep/ano
Desumidificador 1	1,6	517	31,7	2,9×10 ⁻²
Desumidificador 2	1,2	700	376,0	3,4×10 ⁻¹
Desumidificador 3	14,8	1532	601,8	0,5

Tabela 4.21 - Consumo de gás natural para aquecimento de AQS

	Potência (kWt)	Horas de funcionamento	Consumo de Gás Natural (Nm ³)	(tep)
Consumo AQS	3,6	4182	1652,7	1,5

De forma a avaliar melhor os resultados obtidos, na Tabela 4.21 encontra-se o consumo de gás natural em termos de energia primária em água quente para AVAC, vapor e AQS. O consumo estimado de gás natural em termos de energia primária foi de 113 tep, o que representa um erro de repartição de 13% comparativamente ao consumo de gás natural faturado no ano de referência.

Salienta-se ainda resultado obtido para o consumo de gás natural para climatização, que corresponde a 94% do valor obtido. Este demonstra a importância que os sistemas de climatização representam neste tipo de indústria. O que vai de acordo com o resultado obtido na secção 4.3 para o consumo de energia elétrica nos sistemas de climatização.

Tabela 4.22 - Distribuição do consumo de gás natural em vapor, água quente para AVAC e águas quentes sanitárias em energia primária e a sua contribuição relativa

	tep/ano	%
Água quente para AVAC	114	93
Vapor	7	5
AQS	2	1
Total	121	100

A este erro de repartição, estão associadas as considerações efetuadas, nomeadamente, o caudal de insuflação de ar seco permanecer constante ao longo do ano, considera-se apenas a variação de temperatura é mensal obtidos no *SolTerm*, que podem não representar a temperatura média mensal da região onde está inserida a instalação industrial no ano civil de referência.

Efetuiu-se uma variação ao caudal de insuflação das unidades de tratamentos de ar, tendo-se concluído que uma variação do caudal de insuflação de 15% corresponderia a um erro de repartição de 0%.

4.3 Proposta e Avaliação de Medidas de Eficiência Energética

Nesta secção, são estudadas oportunidades de racionalização de energia, assentes nos resultados obtidos da micro-auditoria. As medidas estudadas serão as que envolvem mais conhecimentos da Engenharia Mecânica e as que se considerem mais pertinentes e possíveis de avaliar no tempo disponível para realização desta dissertação em que serão avaliados os seus benefícios energéticos e económicos, com vista a sua implementação.

De entre medidas, foi estudada a possibilidade de instalação de uma central de trigeriação na central industrial, a alteração do ponto de orvalho por pressão dos secadores de adsorção, a alteração do regime de funcionamento dos *chillers* de compressão existentes e regulação do excesso de ar nas caldeiras de vapor.

4.3.1 Implementação de uma central de trigeriação

Situação atual

Com base nos resultados obtidos na secção 4.2.5 e 4.2.6 verificou-se peso que os sistemas de climatização representam um grande peso no consumo final desta instalação. Sendo estes satisfeitos atualmente, com recurso a caldeiras de vapor e *chillers* de compressão.

Atualmente a central térmica é responsável pela produção de água quente para AVAC, produção de águas quentes sanitárias e produção de vapor para o processo. Com os resultados obtidos na secção 4.2.6, foi possível verificar que apesar de esta central ser constituída por duas caldeiras de vapor a funcionar alternadamente, o consumo de vapor é considerado residual, quando comparado com o consumo de água quente para o sistema de AVAC (93%).

Relativamente à central de água fria, dada as necessidades de controlo de parâmetros de temperatura e humidade relativa nas áreas afetas à produção, armazenamento e controlo de qualidade, verifica-se um consumo elétrico permanente por parte dos *chillers* de compressão, para produção de água fria. O consumo elétrico por parte destes é tendencialmente superior nos meses de verão devido ao aumento das necessidades de arrefecimento, enquanto nos

meses de verão verifica-se uma redução nos consumos de gás natural. Este facto está relacionado, com a natureza sazonal dos sistemas de climatização.

Solução proposta

Com o intuito de reduzir a dependência energética e a elevada fatura energética e porque se verifica um consumo térmico com alguma para satisfazer as necessidades de climatização. Avalia-se a possibilidade de implementação de um sistema de trigeração, produção combinada de energia elétrica, de calor e frio. A implementação desta solução técnica tem o intuito de fornecer energia elétrica e satisfazer as necessidades de climatização de água quente e água fria de AVAC e de águas quentes sanitárias.

O estudo de viabilidade para implementação da central de trigeração efetuou-se com base no enquadramento legal em Portugal, aplicável à produção combinada de calor e eletricidade.

Para o estudo foi considerado um sistema baseado num motor alternativo de combustão interna, com aproveitamento dos gases de escape resultantes da combustão de gás natural, para a geração de água quente, através de uma caldeira recuperativa em que esta seria utilizada, para cobrir as necessidades do circuito de água quente do sistema de AVAC e do circuito de água fria, através da instalação de um *chiller* de absorção. Uma vez que o consumo de vapor é bastante reduzido conforme o verificado na secção 4.2.6 e dado o rendimento médio medido (88%) das atuais caldeiras conforme verificado na secção 4.2.2, no caso da implementação deste sistema o vapor passaria a ser produzido por uma caldeira de vaporização rápida (dimensionada às necessidades atuais), para substituição de uma das caldeiras de vapor atuais.

Como referido na secção 3.5.2 o acesso ao regime especial de momento é inacessível por falta de publicação de portaria regulamentar, o estudo de viabilidade para a implementação da central de trigeração é assim baseado no regime da modalidade geral, submodalidade A.

Foi definido que a central de trigeração deverá operar durante 17 horas diárias, correspondentes aos períodos de laboração nas horas de pontas e cheias (durante os dias de semana) durante os dias úteis de laboração. Uma vez ter-se concluído que os maiores benefícios económicos seriam alcançados nestes dois períodos horários, devido ao preço praticado pelo fornecedor de energia elétrica, face aos outros dois períodos, como pode ser observado na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 - Custo variável da energia elétrica nos diferentes períodos horários

	Custos variáveis €/MWh
Pontas	93,5
Cheias	103,9
Vazio	71,0
Super-Vazio	60,4

Salienta-se que os valores apresentados nesta tabela consideram apenas os custos variáveis da parcela de energia e tiveram como base as faturas de energia apresentadas pela instalação industrial. Só se considera a parcela dos custos variáveis, uma vez que neste sistema o contrato celebrado com o fornecedor de energia elétrica será mantido, como sistema de recurso.

O dimensionamento da central de trigeriação efetua-se com base nos consumos de energia faturados uma vez que estes correspondem às atuais necessidades. No entanto, serão utilizadas as repartições de energia elétrica apresentadas na secção 4.2.5, de forma a estimar a potência térmica de arrefecimento deste sistema de trigeriação, uma vez que as necessidades de arrefecimento atualmente são obtidas com recurso a *chillers* de compressão.

A potência elétrica e térmica média anual, para o período de funcionamento da central de trigeriação considerando as faturas de energia e as repartições efetuadas na secção 4.2.5 e 4.2.6 é de 340 kW_e e de 392 kW_t.

O período de vida útil considerado para o projeto foi de 10 anos, uma vez que no final deste período de tempo é necessário realizar uma revisão geral à central de cogeração, sendo o custo dessa revisão difícil de estimar.

Para a escolha do motor foi procurado junto dos fabricante um motor que pudesse satisfazer as necessidades da instalação consumidora de energia, ao maior regime de carga possível. Uma vez que a diminuição do regime de carga para valores inferiores a 75% apresenta grandes impactos no rendimento do motor, como pode ser observado nos dados de especificação técnica do motor escolhido, no Anexo G.

Através da Figura 4.23 mostra a variação da potência térmica requerida pela instalação ao longo do ano, a potência máxima disponível pelo grupo motor e a potência fornecida para um regime de carga de 75%, verifica-se que a máquina térmica escolhida nos primeiros meses do ano (janeiro, fevereiro, março e abril) poderia trabalhar ao regime de carga máximo. No entanto o regime de carga definido para a máquina térmica foi de 75%, uma vez que a central

de trigeriação além de ter que satisfazer as necessidades térmicas, como as elétricas, não podendo exceder estas últimas. Uma vez que este estudo efetuou-se para uma situação de autoconsumo em que energia elétrica não será injetada à rede. Posto isto, teve de se efetuar um ajuste ao regime de carga do motor para 75%.

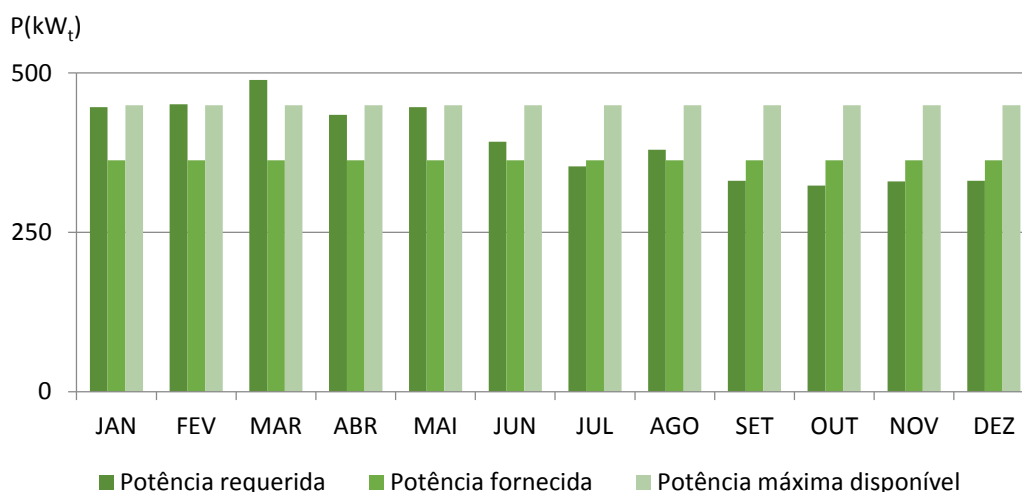


Figura 4.23 – Potência térmica requerida pela instalação ao longo do ano e prestações do motor

Para este caso de estudo não foi necessário avaliar soluções alternativas à energia elétrica produzida na central de trigeriação, uma vez que já existe acesso à energia elétrica de rede. Nas situações em que a central não tenha capacidade para suprir as necessidades elétricas e durante os períodos de paragem, esta é garantida através da rede elétrica.

Relativamente às necessidades térmicas de aquecimento, manter-se-á em funcionamento uma das caldeiras de vapor, a funcionar em modo de apoio durante as horas de funcionamento da central de trigeriação, e para o caso desta não suprir as necessidades térmicas de aquecimento durante os períodos de paragem.

A necessidade de arrefecimento que no sistema de trigeriação, é garantida com recurso a um *chiller* de absorção, funcionam como segunda prioridade neste projeto, isto é no caso de o sistema de trigeriação não conseguir suprir as necessidades térmicas aquecimento e arrefecimento simultaneamente a prioridade é suprir as necessidades térmicas aquecimento. Uma vez que o EER apresentado pelo *chiller* de absorção é um valor baixo (0,9). Neste cenário especificado e fora do período de funcionamento da central as necessidades térmicas arrefecimento, são asseguradas por um dos *chillers* de compressão existentes, nomeadamente o *chiller* mais recente por apresentar um EER superior, conforme visto no secção 4.2.3.

De forma a salvaguardar o bom funcionamento de equipamentos, tais como o motor e o *chiller* de absorção, é necessário incluir no circuito de refrigeração de alta temperatura do motor (AT) um aerotermo para que a temperatura da água de retorno do circuito, esteja à temperatura especificada pelo fabricante. Esta salvaguarda está relacionada com a possibilidade da energia térmica do circuito de refrigeração do motor, não ter sido consumida. Para o *chiller* de absorção é necessário dimensionar ainda uma torre de arrefecimento para o seu circuito de arrefecimento, para a condensação do fluido refrigerante. Esta torre de arrefecimento seria ainda responsável pelo arrefecimento do circuito de baixa temperatura (BT) do motor. No anexo G encontra-se o esquema de princípio desta central de trigeriação.

Avaliação energética e económica

Na Tabela 4.24 encontram-se os resultados da análise energética e económica efetuada à central de trigeriação em que se considerou para o cálculo da Poupança da Energia Primária os valores de referência harmonizados de eficiência para a produção separada de calor e eletricidade, de 90% e 52,5%, respetivamente segundo a diretiva 2004/8/CE e o fator de correção relativo às perdas de rede em uma situação de autoconsumo, que para o caso do motor produzir uma tensão de 400 V é 0,925. Nos valores obtidos não foram consideradas taxas de atualização dos preços dos combustíveis.

Tabela 4.24 - Resultados da análise energética anual

Período de funcionamento (h/ano)	4046
Energia térmica dos gases (MWh _t /ano)	846
Energia térmica do circuito HT (MWh _t /ano)	623
Energia térmica total (MWh _t /ano)	1469
Energia elétrica (MWh _e /ano)	1067
Necessidades térmicas (MWh _t /ano)	1 596
Energia térmica consumida (MWh _t /ano)	1 422
Energia Térmica Rejeitada (MWh _t /ano)	47
Consumo de combustível (MWh _t /ano)	2 966
Rendimento elétrico médio anual (%)	36,0%
Rendimento térmico médio anual (%)	47,9%
Rendimento Global médio anual (%)	85,5%
PEP (%)	19,4%

Com a implementação da central de trigeriação, verifica-se uma poupança em termos de energia, quando comparado com a produção separada calor e eletricidade.

No entanto verifica-se que a implementação deste sistema de trigeriação inserido na modalidade geral (Tabela 4.25), não é viável uma vez que os custos de funcionamento são superiores aos proveitos económicos.

Tabela 4.25 – Resultados da análise económica

Custo de funcionamento da central de trigeriação	
Combustível (€/ano)	170 148
Manutenção (€/ano)	8 011
Outros Consumíveis (€/ano)	5 000
Total (Custos) (€/ano)	183 159
Receitas	
Eletricidade (€/ano)	102 336
Energia térmica (circuito AQ) (7h-00) (€/ano)	28 880
Consumo AF <i>chiller</i> compressão (7h-00h) (€/ano))	19 939
Total (Receitas) (€/ano)	150 555
Investimento (€)	
	372 120
Cash flow (€) (Período de 10 anos)	
	-404 724
Payback (anos)	
	-
TIR (%)	
	-
VAL	
	-730 769

Verifica-se que a implementação deste sistema de trigeriação proposto, para este exemplo, não é viável não pelo elevado investimento, como se pode verificar, mas sim pelos custos de produção da central de trigeriação que suplantam o total de receitas. Dessa forma não se considerou para esta análise os indicadores energéticos de TIR e *Payback*.

Uma vez que no decorrer da presente dissertação, ocorreram mudanças na legislação que regula o regime jurídico e remuneratório da atividade de cogeração, será aqui efetuada uma comparação entre a modalidade geral na legislação atual e a retificada, que prevê um prémio de participação no mercado.

Tabela 4.26- Resultados económicos da trigeriação para a modalidade geral do Decreto-Lei n.º 23/2010, 25 de março

Custo de funcionamento anual da central de trigeriação	
Consumo anual de combustível (€/ano)	170 148
Manutenção (€/ano)	8 011
Outros (€/ano)	5 000
Total (Custos) (€/ano)	183 159
Receitas	
Eletricidade (€/ano)	102 336
Energia térmica (circuito AQ) (7h-00) (€/ano)	28 880
Consumo AF <i>chiller</i> compressão (7h-00h) (€/ano)	19 339
Prémio de participação no mercado (€/ano)	52 771
Poupança na fatura energética (€/ano)*	201 166
Investimento (€)	372 120
<i>Cash flow</i> (€) (Período de 10 anos)	-353 357
<i>Payback</i> (anos)	19
TIR (%)	-
VAL	-154 728

*Na poupança da fatura energética contabilizou-se o prémio de participação no mercado

Pelos resultados obtidos na Tabela 4.26, verifica-se que com a introdução do prémio de participação no mercado, a implementação desta central continuaria a ser inviável. Contudo neste cenário o prémio de participação no mercado permite que as receitas provenientes da central de trigeriação suplantem os custos da mesma. No entanto o elevado investimento inviabiliza a sua implementação.

Atendendo a nova legislação conjugado com as necessidades térmicas deste exemplo verifica-se não estarem reunidas as condições para a viabilidade desta solução técnica, apesar de ser a forma mais rentável de produzir energia elétrica e térmica em simultâneo.

4.3.2 Ajuste do Queimador da Caldeira de Vapor 2

Situação atual

Como verificado na secção 4.2.3 a caldeira de vapor 2, encontra-se a operar para valores de excesso de ar, que não coadunam com um bom rendimento, neste tipo de equipamentos.

Solução proposta

Os valores recomendados de excesso de ar para este equipamento, variam entre os 5 e os 10%.

A regulação do excesso de ar, para os valores recomendados, possibilitaria, um incremento no rendimento para valores na ordem de 89,7%, que acarretaria na diminuição dos combustos em combustível.

Os resultados da análise obtida à Solução proposta, encontram-se na Tabela 4.27, em que se efetuou uma repartição de consumo de 50% para cada caldeira, uma vez que ambas trabalham alternadamente.

Tabela 4.27 - Resultados da ajuste do Queimador da Caldeira de Vapor 2

Situação atual	
Consumo anual de Gás Natural na caldeira (MWh/ano)	676,3
Preço do Gás Natural (€/MWh)	51,76
Excesso de ar calculado (%)	65,4
Rendimento médio da caldeira (%)	86,6
Fatura energética anual (€/ano)	35 005
Situação futura	
Regulação do excesso de ar (%)	10
Rendimento médio da caldeira	88,9
Consumo anual de gás natural (MWh/ano)	653
Fatura energética anual (€/ano)	33 796
Economia alcançada	
Investimento (€)	700
Fatura energética anual (€/ano)	1 210
Energia (MWh/ano)	23
tep/ano	1,6
Payback (anos)	0,8

4.3.3 Alteração da prioridade de utilização dos *chillers*

Situação atual

Atualmente a central de água fria é responsável pelas necessidades de climatização de arrefecimento, composta por dois *chiller* de compressão a funcionar em regime de alternância diária, sendo que em casos de picos de necessidade, podem os dois operar em simultâneo. Esta é responsável por cerca de 12% da fatura energética. Com base no ensaio de rendimento efetuado na secção 4.2.3, verificou-se que o EER do *chiller* mais recente é superior ao EER do *chiller* mais antigo.

Solução proposta

Tendo como fundamento, os resultados obtidos do EER, propõe-se a utilização do *chiller* mais recente como primeira prioridade e a utilização do *chiller* velho apenas para suprir eventuais picos de necessidades. Na Tabela 4.28 apresentam-se os resultados desta medida proposta, em que se considerou que numa situação de regime de alternância diária ambas as UTA's funcionam durante o mesmo período de tempo.

Tabela 4.28 - Resultados da alteração da prioridade de utilização dos *chillers*

Situação atual	
Potência de arrefecimento (UTA's) (kW _t /ano)	242
EER (<i>chiller</i> mais antigo)	3,6
Período de utilização anual (h)	1752
Consumo Elétrico anual (MWh _e /ano)	118,0
Custo anual (€)	12 387
Situação Futura -	
Potência de arrefecimento (UTA's) (kW _t /ano)	242
EER (<i>chiller</i> mais recente)	4,3
Período de utilização anual (h)	1752
Consumo Elétrico anual (MWh _e /ano)	99
Custo anual (€)	10 370
Economia alcançada	
Fatura energética anual (€)	2 016
Energia (MWh _e /ano)	19,2
tep/ano	4,1

4.3.4 Alteração do ponto de orvalho por pressão

Situação atual

Através da avaliação efetuada à secção 4.2.1, foi verificado que o *setpoint* do ponto de orvalho por pressão atualmente é de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e que o controlo do ciclo é efetuado através de sensor de ponto de orvalho por pressão. Foi ainda apurado que entre cada ciclo, está associado um aumento de consumo do compressor (15 kW) devido à regeneração das torres. Se no período noturno se verificou um espaçamento entre regenerações significativo, dadas as reduzidas necessidades de ar comprimido durante o período diurno de laboração da fábrica o mesmo não se sucede.

Para se estimar um intervalo médio entre regenerações no período diurno, procurou-se um período de tempo durante o período diurno de funcionamento da fábrica em que o consumo de ar comprimido fosse o mais constante possível. Uma vez que este tem bastante relevância no intervalo de tempo entre as regenerações. Através das Figuras 4.24 e 4.25, verifica-se que para um consumo médio de cerca 80 L(n)/s o intervalo médio entre regenerações é de 7,5 minutos (Figura 4.25).

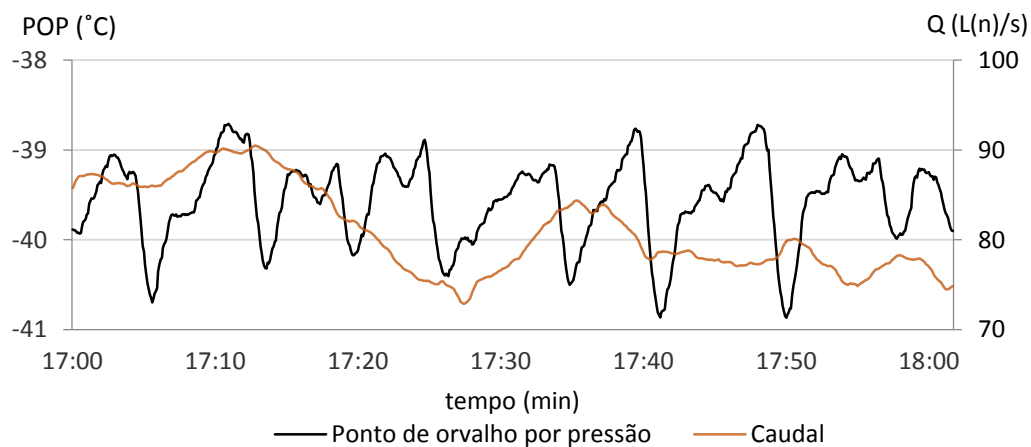


Figura 4.24 - Variação do ponto de orvalho por pressão e do caudal de ar comprimido

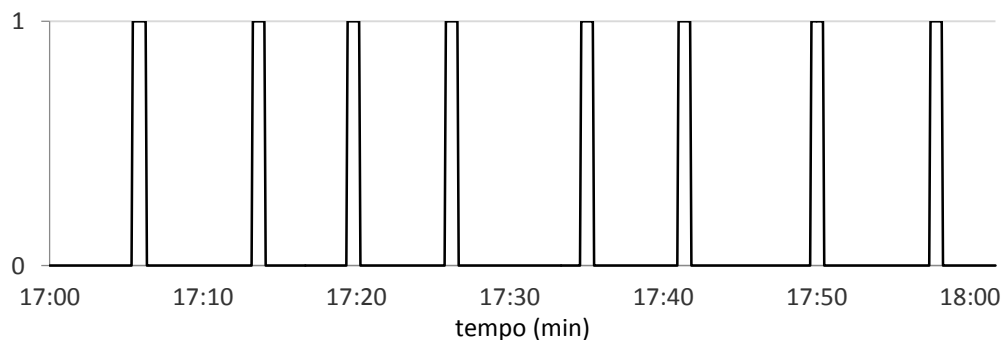


Figura 4.25 - Espaçamento temporal entre as regenerações

Solução proposta

Conforme a norma ISSO 8573-1, a presente instalação industrial tem como requisito de qualidade para a quantidade de água presente no ar comprimido, um ponto de orvalho por pressão de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. A especificação de um ponto de orvalho por pressão em secadores de adsorção de auto-regeneração para valores mais rigorosos que os requeridos resultam em gastos energéticos desnecessários. Com o intuito de se verificar se seria possível aumentar o intervalo de tempo entre regenerações, com a alteração do ponto de orvalho por pressão de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, recorreu-se a um programa de simulação de secadores de adsorção, o *Adsorptive Gas Air Dryer*, descrito em 3.5.1.

Efetuaram-se várias simulações com o programa, para os vários *inputs*. Foram definidos os parâmetros, para as atuais condições do equipamento, nomeadamente, ponto de orvalho por pressão, temperatura do ar comprimido e ambiente, pressão do ar comprimido, pressão de regeneração, tempo de ciclo, tempo de regeneração e caudal de regeneração. Sendo o tempo de regeneração um parâmetro fixo do sistema (145 segundos) e o caudal de regeneração como visto em 3.5.1 varia em função da diferença de pressões nas duas torres e da temperatura do ar comprimido. O tempo de ciclo varia em função do consumo do ar comprimido, foram definidos vários períodos de avaliação entre eles o representado na Figura 4.25. Em que foram definidos para as condições iniciais de simulação:

- Tempo de ciclo 7.5 minutos; um ponto de orvalho por pressão de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; tempo de regeneração de 145 segundos; temperatura do ar comprimido de $16\text{ }^{\circ}\text{C}$; temperatura ambiente de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; pressão do ar comprimido 8.0 bar; pressão de regeneração de 0.4; caudal de ar comprimido de 80 L(n)/s.

Sendo que o caudal de ar comprimido numa situação real de consumo é variável no entanto no programa foi necessário definir um valor médio em cada período de avaliação efetuado.

Nas diversas simulações efetuadas variaram-se parâmetros numéricos, ao passo de tempo e tamanho de malha. Nas variações efetuadas ao passo de tempo verificou-se que este parâmetro teve pouca influência nas simulações efetuadas, no entanto verificaram-se alterações quando se variou o tamanho de malha, sendo que os resultados obtidos apresentaram uma melhoria, à diminuição do mesmo.

Contudo nunca se conseguiu obter uma boa concordância entre os resultados do programa e os valores medidos no equipamento. Não foi possível aprofundar mais este problema no tempo disponível para esta dissertação. De qualquer forma, pareceu útil para estudos futuros apresentar aqui (Anexo H) alguns resultados das simulações.

5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste último capítulo expõem-se as conclusões, que foram sendo reveladas ao longo do estudo e referem-se as contribuições do trabalho apresentado. São, também, apresentadas as perspectivas de desenvolvimento futuro neste domínio.

Com o presente trabalho em que foi efetuada uma auditoria energética, para a identificação de oportunidades de racionalização do consumo de energia foi necessário requerer a uma aquisição contínua de conhecimentos dada a variedade das situações encontradas e a sua especificidade em que os conhecimentos adquiridos durante o curso, nomeadamente da disciplina de termodinâmica se mostraram de grande importância no decorrer deste.

Através dos resultados obtidas da auditoria energética foi possível caracterizar uma instalação industrial do sector farmacêutico, que se encontra ao abrigo do Decreto-Lei n.º 68-A/2015 de 30 de abril por apresentar um consumo global anual de energia de cerca de 682 tep. Com a auditoria energética efetuada verificou-se que a instalação auditada apresenta um elevado consumo energético nos serviços auxiliares que corroboram com o processo produtivo, estes representam cerca de 70% do consumo total de energia elétrica. Apurou-se ainda que dada a especificidade desta indústria, em termos de requisitos de controlo das condições de temperatura e humidade relativa no interior dos espaços produtivos e armazéns, os sistemas de climatização encontram-se em permanente funcionamento, acarretando um elevado peso no consumo energético em que o maior consumo de energia térmica corresponde ao aquecimento de água quente para o sistema de AVAC (93% do consumo de gás natural).

Devido à especificidade desta indústria, verificou-se redundância dos equipamentos existentes (caldeiras, compressores, secadores, *chillers*), para salvaguardar não só a produção mas também requisitos de qualidade.

No que concerne à central de ar comprimido, nomeadamente aos secadores de adsorção existentes, foi possível concluir que além do custo energético associado à rejeição de ar comprimido para a regeneração, estes têm ainda associados custos energéticos, referente aos picos de potência absorvidos pelo compressor durante a regeneração das torres.

Após os resultados obtidos na micro-auditoria, estudaram-se medidas de eficiência energética que pudessem vir a ser implementadas. Nomeadamente, implementação de um central de trigeriação, afinação do queimador da caldeira de vapor, alteração da prioridade de utilização dos *chillers* e alteração do ponto de orvalho por pressão dos secadores de adsorção.

Se para a primeira medida, que visou a implementação de uma central de trigeriação inserida na modalidade geral segundo o Decreto-Lei n.º 68-A/2015, de 30 de abril, verificou-se que o elevado investimento e os custos de funcionamento da central de trigeriação, essencialmente de combustível, inviabilizam a aplicação desta medida. No entanto e uma vez a que legislação em vigor se iniciou no decorrer desta dissertação, é possível verificar o desincentivo face à implementação desta forma de produção descentraliza de energia na modalidade geral, em que foi retirado o prémio de participação no mercado. Apesar de esta ser tecnicamente a melhor solução de produção de energia elétrica e térmica do ponto de vista de uma avaliação macro-económica.

Relativamente á alternância de prioridade do *chiller* mais antigo e afinação do queimador da caldeira de vapor recomenda-se à aplicação das mesmas, em que se prevê uma poupança anual na fatura energética de cerca 2 700 euros e uma poupança em termos de energia primária anual de cerca de 6 tep.

Para a medida, alteração do ponto de orvalho por pressão nos secadores existentes, não foi possível retirar conclusões acerca desta alteração, pelo que é deixada para trabalho futuro.

Trabalho Futuro

Verificou-se que em relação à iluminação existente, existe a possibilidade de melhorias, recorrendo a LEDs e lâmpadas especiais pelo que deverá ser alvo de medida no futuro.

Relativamente à central térmica, é proposta a regulação do excesso de ar na caldeira 2, no entanto aconselha-se um estudo de implementação de uma caldeira de condensação, para produção de água quente, evitando as perdas de transformação do vapor para a água.

Visto que no tempo disponível, não foi possível estudar o efeito da alteração do ponto de orvalho por pressão utilizando o *Adsorptive Gas Air Dryer*, sugere-se que esta medida continue a ser estudada com recurso ao mesmo ou alternativamente pela via experimental.

Bibliografia

1. Afonso, C. Auditorias energéticas. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal
2. Andrews, J. e Jelley, N. (2007). *Energy Science: Principles, Technologies, and Impacts*. First Edition. Oxford University Press, Inc, N.Y.
3. Custódio, M. (2011). Eficiência Energética em Edifícios Escolares. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.
4. EIA Energy Information Administration. Acedido em setembro/2015, disponível em http://www.eia.gov/survey/form/eia_1605/greenhouse_gases.html
5. Climate & Energy Package. European Commission Climate Action. Acedido em setembro/2015, disponível em http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm
6. Nunes, C. (2014). “Política Energética e Competitividade Económica em Portugal: Uma Análise Estratégica”. Ciclo de Conferências: Competitividade e Energia, Tema II: Economia e energia (11/2/2014. Ordem dos Engenheiros de Portugal. Acedido em setembro/2015, disponível em http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/clementepedronunes_173081546352f_ca13c3cb8a.pdf
7. Energia em Portugal: 2013. Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). Maio de 2015. Acedido em setembro/2015, disponível em http://www.apren.pt/fotos/newsletter/conteudos/energiapt_2013_dgeg_1433429705.pdf
8. Costa, S. (2014). Auditoria Energética à Indústria Têxtil *Tempo de Tendências*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
9. IEA Energy Statistics- Portugal (2014). Acedido em fevereiro/2015, disponível em <http://www.iea.org/stats/WebGraphs/PORTUGAL5.pdf>,
10. Pordata. Base de dados Portugal contemporânea. Consumo de energia primária total e por tipo. Acedido em setembro/2015, disponível em <http://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+prim%C3%A1ria+total+e+por+tipo+de+fonte+de+energia-1130>
11. Adene. Política energética. Acedido a 10/setembro/2015, disponível em <http://www.adene.pt/politica-energetica>
12. Afonso, C.; Moutinho, T.; Guimarães, C. e Moutinho, T. Cogeração e Benefícios em que condições?
13. Adene: consumo energético na Indústria. Acedido a 10/setembro/2015, disponível em <http://www.adene.pt/consumo-energetico-na-industria>
14. Magueijo, V.; Fernandes, M.C.; Matos, H.; Nunes, C. e Calau, J. (2010). Medidas de eficiência energética aplicáveis à indústria portuguesa: um enquadramento tecnológico sucinto. Edição: Adene – Agência para a Energia. Portugal.
15. Tanaka, K. (2011). Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector. *Energy Policy*, 39 (10): 6532-6550.
16. Adene: Auditorias energéticas. Acedido em fevereiro/2015, disponível em <http://www.adene.pt/textofaqs/auditoria-energetica>

17. Pinho, C. (2011). Gestão da Energia Térmica. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
18. Agencia Andaluza de la Energia (2011). Metodologia para la elaboración de auditorías energéticas en la industria.
19. Gaspar, C. (2004). Eficiência energética na Indústria. Cursos de utilização racional da Energia. Adene. Portugal.
20. Adene. Enquadramento do SGCIE. Acedido em junho/2015 em <http://www2.adene.pt/pt-pt/SubPortais/SGCIE/SGCIE/Enquadramento/Paginas/welcome.aspx>
21. Cogen Portugal. Acedido em maio/2015, disponível em http://www.cogenportugal.com/general_content/showInformation.aspx?mt=1&ml=34&type=2
22. Bicho, H.; Mendes, V e Catalão, J. Estudo das Tecnologias de Cogeração e Trigeração para Aplicação na Indústria de Serração de Madeira e Mobiliário.
23. Almeida, A.; Patrão, C.; Fonseca, P.; Moura, P. (2005). Manual de boas práticas de eficiência energética. Acedido em 12/maio/2015 em <http://www.bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2014/02/Manual-Efici%C3%Aancia-Energ%C3%A9tica.pdf>
24. Cogeração em Portugal, Cogen. Acedido em 10/maio/2015, disponível em <http://www.cogenportugal.com/ficheirosupload/Brochura%20Cogera%C3%A7%C3%A3o.pdf>
25. Manual de apoio ao cogrador, Cogen. Acedido em 10/maio/2015, disponível em http://www.cogenportugal.com/ficheirosUpload/Manual_de_Apoio_ao_Cogrador.pdf
26. Wu, D.W. e Wang, R.Z. (2006). Combined cooling, heating and power: A review. Progress in Energy and Combustion Science, 32: 459-965.
27. Commission of the European Communities (1997). *A review of cogeneration equipment and selected installations in Europe*, Directorate-General XVII for Energy, OPET.
28. Alcântara, A. (2012). Avaliação Económica e Energética do Dimensionamento de Centrais de Cogeração e Trigeração. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. Acedido em maio/2015, disponível em <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395144977849/dissertacao.pdf>
29. Novais, J. (1995). Ar comprimido. Produção, tratamento e distribuição. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa
30. Atlas CopCo (2004): CD140 Operator Manual. Instruction manual and parts list for heatless desiccant air dryers with Elektronikon and purge control.
31. Juanico, F. (1992). Geradores de calor. 1.ª Edição. SECEMEI
32. Adene (2010). *Relatório Final de Acção de Promoção de Eficiência Energética em Geradores de Calor*. Programa PNAEE Portugal 2015.
33. Spirax Sacro, Soluções para Vapor. Acedido em abril/2015, disponível em <http://www.spiraxsarco.com/global/pt/Products/Pages/tds-blowdown-controls.aspx>
34. Adene (2010). *Relatório Final de Acção de Promoção de Eficiência Energética em Caldeiras a vapor e Termofluido*. Programa PNAEE Portugal 2015.
35. Oliveira, P. (2012). Fundamentos de termodinâmica Aplicada. Análise energética e exergetica. 1.ª Edição, Lidel- Edições Técnicas. Porto, Portugal.
36. Metrel, Analisador de energia elétrica MI 2892 Power Master. Acedido em março/2015, disponível em <http://www.metrel.si/products/power-quality-analysis/mi-2892-power-master-new.html>
37. Digital Power clamp meter: UT 231/ UNIT-T Operating Manual. Robert Mauser. Acedido em março/2015, disponível em [http://www.mauser.pt/catalog/userfiles/096-1649\(1\).pdf](http://www.mauser.pt/catalog/userfiles/096-1649(1).pdf).

38. Testo 340: Analisador de gases de combustão. Manual de instruções. Acedido em março/2015, disponível em <http://www.instrucamp.com.br/dropbox/0732e125aa1106066e891645f8e6f6e5.pdf>.
39. Appareil multifonctions AMI 310: Fiche de données techniques. Kimo Instruments. Acedido em março/2015, disponível em http://www.kimo.fr/produits/1393/ami_310.html.
40. ERSE. Ciclo semanal opcional para os consumidores em MAT, AT e MT em Portugal Continental. Acedido em abril/2015, disponível em <http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/periodoshorarios/Paginas/CiclopacionalosconsumidoresMATATMT.aspx>.
41. Grundfos.Product Center. Acedido em Abril/2015, disponível em https://product-selection.grundfos.com/product-detail.html?application=&area=&family=TPFAM&from_suid=1442948412155024809870403259993&installation=&pumpssystemid=46660895&scenario=Catalogue&step=4&subtype=TPD%2B150-200%2F4&type=TPD00&qcid=46662491.
42. Grundfos.Product Center. Acedido em Abril/2015, disponível em https://product-selection.grundfos.com/product-detail.html?application=&area=&family=TPFAM&from_suid=14429481120910760815899586305&installation=&pumpssystemid=46661976&qcid=46662042&scenario=Catalogue&step=4&subtype=TPD%2B125-130%2F4&type=TPD00.

Anexos

Anexo A – Layout da fábrica e fluxos de energia

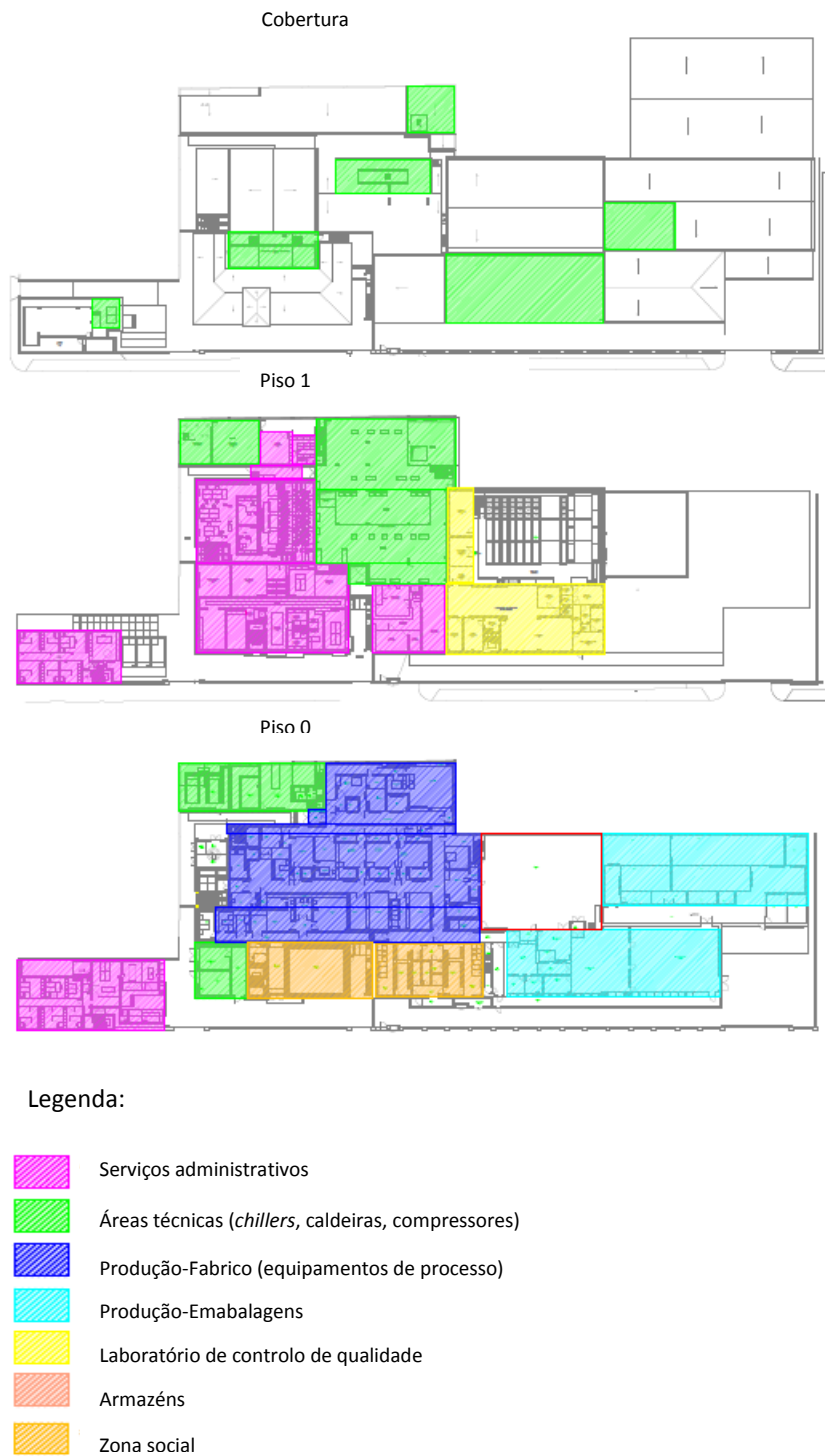


Figura A.1 – Layout da instalação industrial auditada

Nota: *Layout* gentilmente cedido pela fábrica auditada

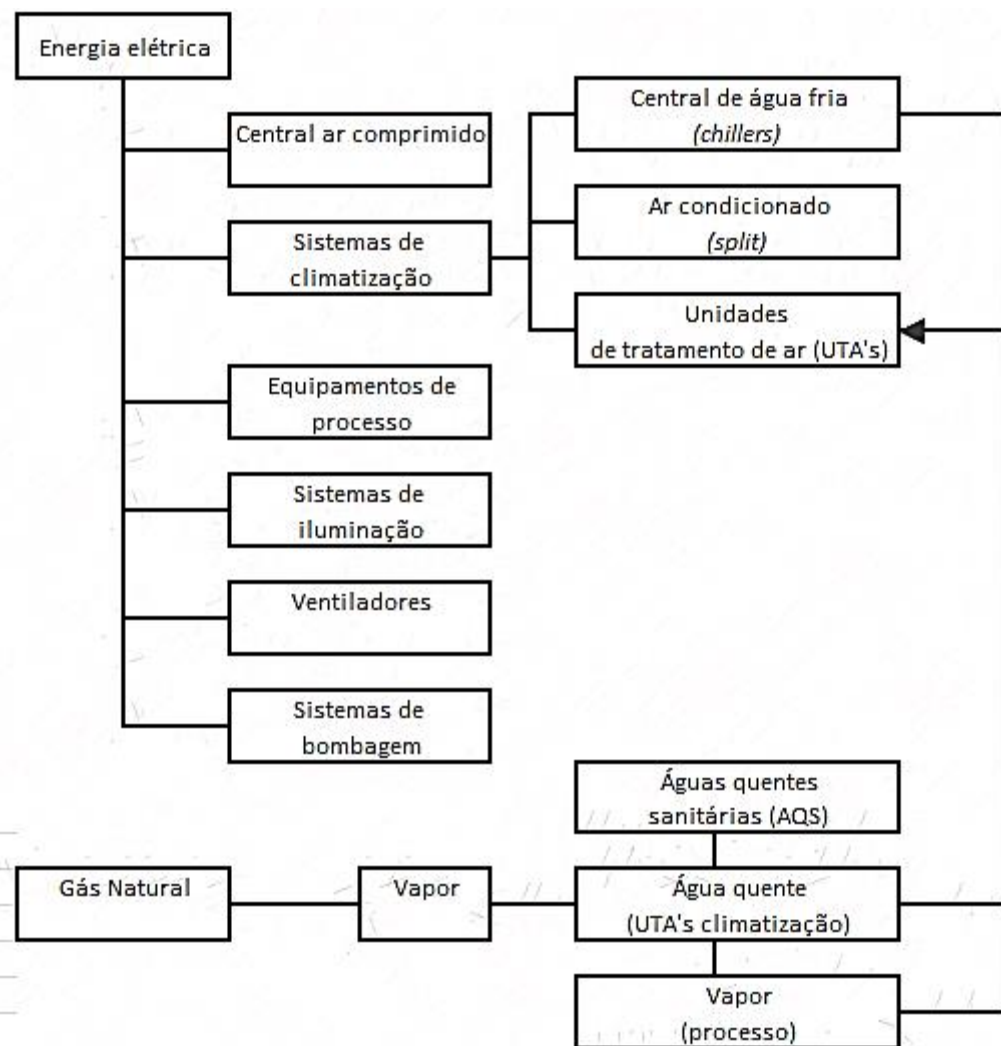


Figura A.2 – Diagrama de fluxo de energia da instalação auditada

Anexo B – Fatores de conversão e período de faturação de energia elétrica

Na tabela A.1 apresentados os valores de conversão de energia elétrica tonelada equivalente de petróleo (tep), considerando o rendimento elétrico nacional igual a 0,4 segundo o despacho n.º 17313/2008.

Tabela B.1 - Fator de conversão de energia elétrica em termos de energia primária

Forma de energia	kWh	tep	kgCO_{2e}/kWh
Energia elétrica	1	2,15×10 ⁻⁶	0,47

Tabela B.2 - Poder calorífico inferior do gás natural

Combustível	PCI (MJ/kg)	PCI (tep/t)	kgCO_{2e}/tep	kWh/m³(n)
Gás Natural (PC)	45,1	1,077	2683,7	10,53
Gás Natural (PCS)	50,0	1,194	2974,2	11,67

Tabela B.3 - Ciclo semana para média alta tensão, alta tensão e média tensão em Portugal continental [40]

Ciclo semanal opcional para MAT, AT e MT em Portugal Continental			
Período de hora legal de inverno		Período de hora legal de verão	
De segunda-feira a sexta-feira		De segunda-feira a sexta-feira	
Ponta:	17.00/22.00 h	Ponta:	14.00/17.00 h
	00.00/00.30 h		00.00/00.30 h
Cheias	07.30/17.00 h	Cheias	07.30/14.00 h
	22.00/24.00 h		22.00/24.00 h
Vazio normal	00.30/02.00h	Vazio normal	00.30/02.00h
	06.00/07.30 h		06.00/07.30 h
Super Vazio	02.00/06.00 h	Super Vazio	02.00/06.00 h
Sábado		Sábado	
Cheias	10.30/12.30 h	Cheias	10.00/13.30 h
	17.30/22.30 h		19.30/23.00 h
	00.00/03.00 h		00.00/03.00 h
Vazio normal:	07.00/10.30 h	Vazio normal:	07.30/10.00 h
	12.30/17.30 h		13.30/19.30 h
	22.30/24.00 h		23.00/24.00 h
Super Vazio	03.00/07.00h	Super Vazio	03.00/07.30h
Domingo		Domingo	
Vazio normal	00.00/04.00 h	Vazio normal	00.00/04.00 h
	08.00/24.00 h		08.00/24.00 h
Super vazio	04.00/08.00 h	Super vazio	04.00/08.00 h

Anexo C – Dados de especificação dos secadores de adsorção

APLICÁVEL APENAS A UNIDADES DE 11 BAR	CD65	CD80	CD100	CD140	CD170	CD230	CD280	
<i>Condições nominais</i>								
Pressão de admissão de ar comprimido (e)	7 bar	7 bar	7 bar	7 bar	7 bar	7 bar	7 bar	
<i>Valores limite</i>								
Pressão máxima na admissão de ar comprimido (e)	11 bar	11 bar	11 bar	11 bar	11 bar	11 bar	11 bar	
Pressão mínima na admissão de ar comprimido (e)	4 bar	4 bar	4 bar	4 bar	4 bar	4 bar	4 bar	
<i>Dados específicos</i>								
Capacidade nominal da admissão no secador	65 l/s	80 l/s	100 l/s	140 l/s	170 l/s	230 l/s	280 l/s	
Consumo de ar de purga (média durante 1/2 ciclo)	18 %	18 %	18 %	18 %	18 %	18 %	18 %	
Duração de meio ciclo	180 s	180 s	180 s	180 s	180 s	180 s	180 s	
Duração da purga	145 s	145 s	145 s	145 s	145 s	145 s	145 s	
<i>Factores de correcção do fluxo de admissão</i>								
Pressão de admissão (bar)	4	5	6	7	8	9	10	11
Factor de correcção Kp	0,47	0,68	0,84	1	1,1	1,2	1,3	1,38
Temperatura de admissão (°C)	20	25	30	35	40	45		
Factor de correcção Kt	1	1	1	1	0,84	0,71		

Figura C.1 - Dados técnicos dos secadores de adsorção da classe CD [30]

Anexo D – Constantes para o cálculo do método das perdas

Tabela D.1- Constante K para perdas associadas ao calor sensível nos gases de combustão

Combustível	Valor de K
Carvão betuminoso	0,66
Gasóleo	0,51
Gás Natural	0,395

Tabela D.2- Teores de hidrogénio e humidade para perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão

Combustível	% em peso de hidrogénio	% em peso de humidade
Carvão betuminoso	4,0	7,0
Gasóleo	13,0	-
Gás Natural	21,6	-

Tabela D.3 - Constante K_1 para perdas associadas a inqueimados nos gases de combustão

Combustível	% em peso de hidrogénio
Carvão betuminoso	63
Gasóleo	53
Gás Natural	35

Tabela D.4 - Perdas por radiação, convecção e outras perdas não contabilizáveis nas caldeiras

Tipo de caldeira	Perdas
Caldeiras de tubos de água e tubos de fumo com capacidade igual ou acima de 5 MW	1,4
Caldeiras de tubos de água e tubos de fumo com capacidade entre 2 e 5 MW	1,6
Caldeiras de tubos de água e tubos de fumo com capacidade entre 2 e 5 MW	2,0
Caldeiras de refratário, caldeiras de tubos de fumo com topo seco e caldeiras com soleira de refratário	3,0
Caldeiras de água quente em ferro fundido	4,5

Anexo E – Bombas dos chillers

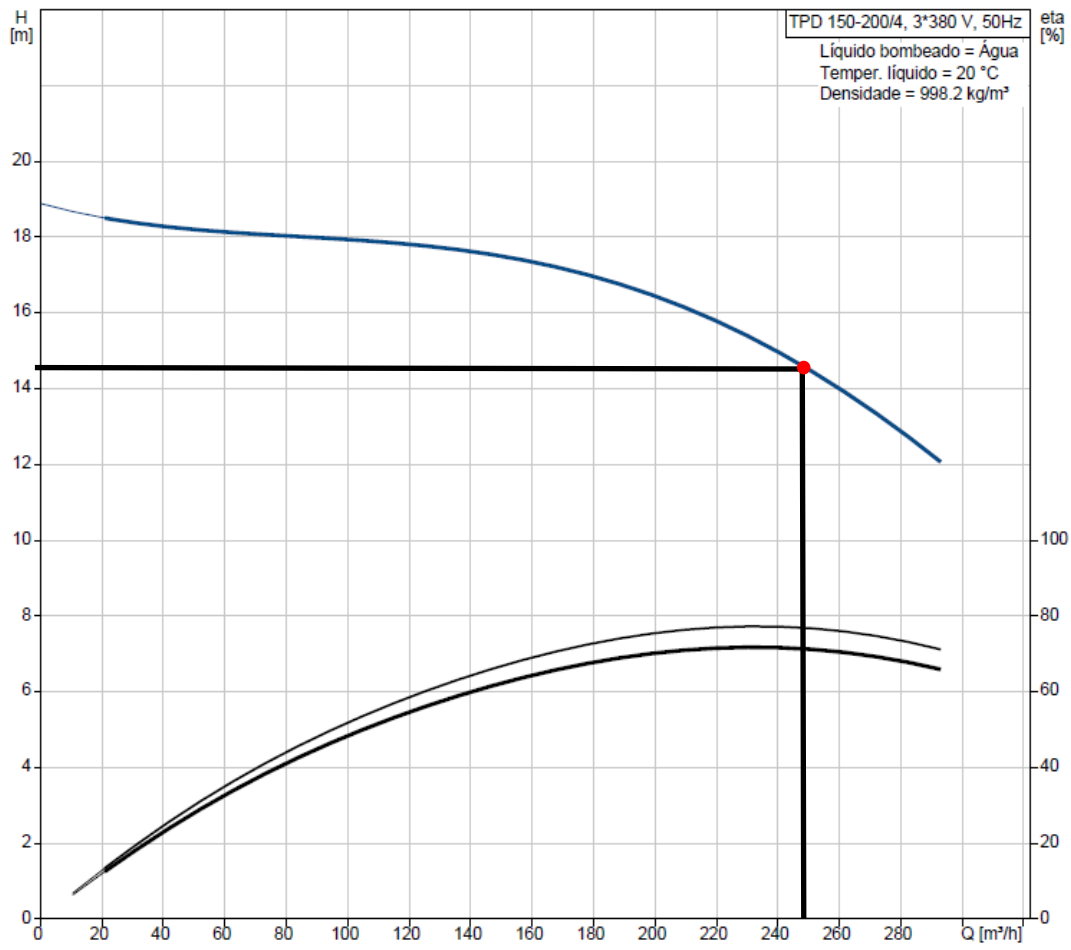
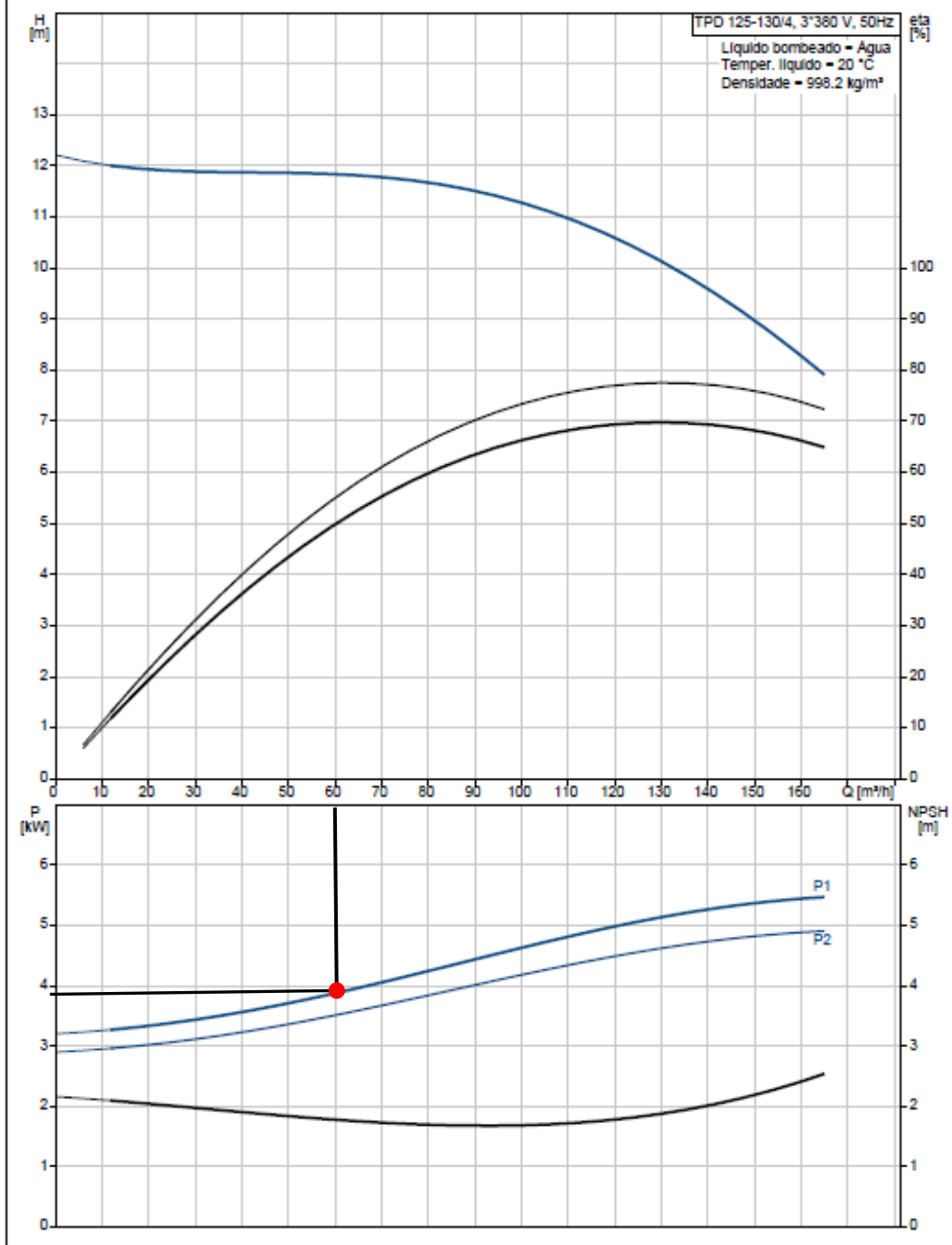


Figura E.1 - Curva de funcionamento do *chiller* novo e ponto de funcionamento.[41]

96109468 TPD 125-130/4 50 Hz



Impresso do CAPS Grundfos [2014.08.045]

3/3

Figura E.2 - Curva de funcionamento da bomba do *chiller* mais antigo e ponto de funcionamento.[42]

Anexo F – Gráficos das potências absorvidas

Neste anexo encontram-se todos os gráficos afetos às medições elétricas efetuadas.

Na Figura F.1 , encontra-se a potência absorvida pelo compressor no período laboral

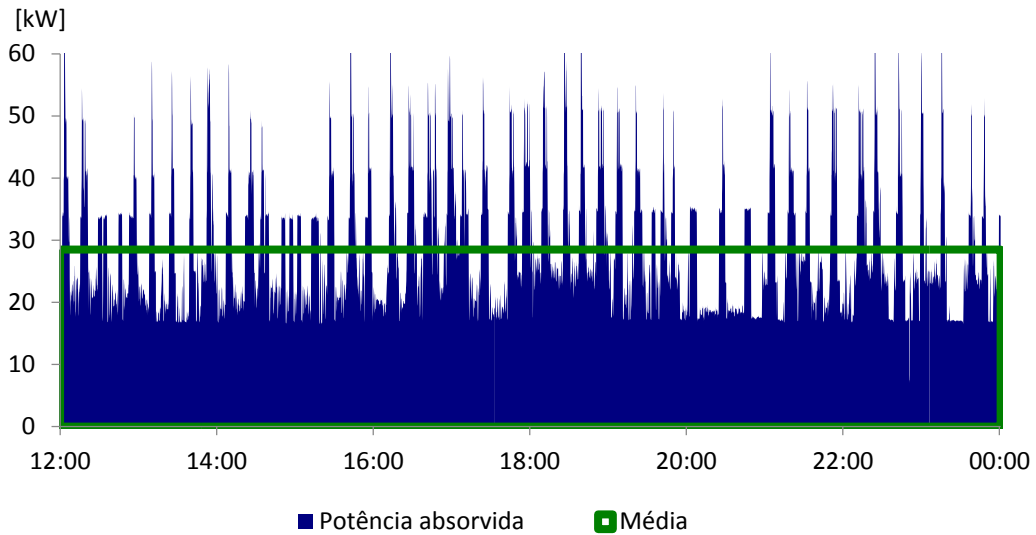


Figura F.1 - Potência absorvida pelos compressores.

Na Figura F.2 encontra-se a potência absorvida pelo compressor no período laboral.

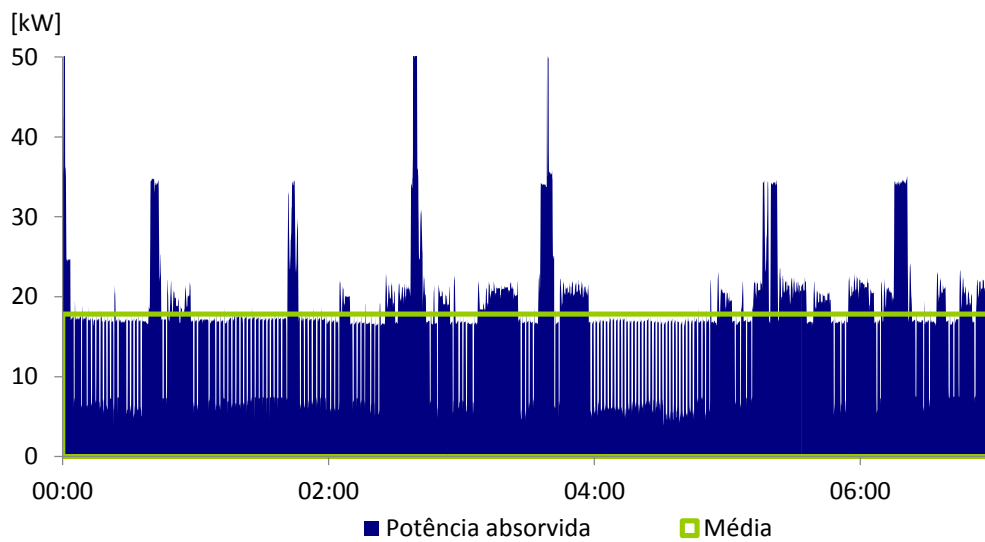


Figura F.2 - Potência absorvida pelos compressores no período diurno.

Na Figura F.3 encontra-se a potência absorvida no laboratório de controlo de qualidade.

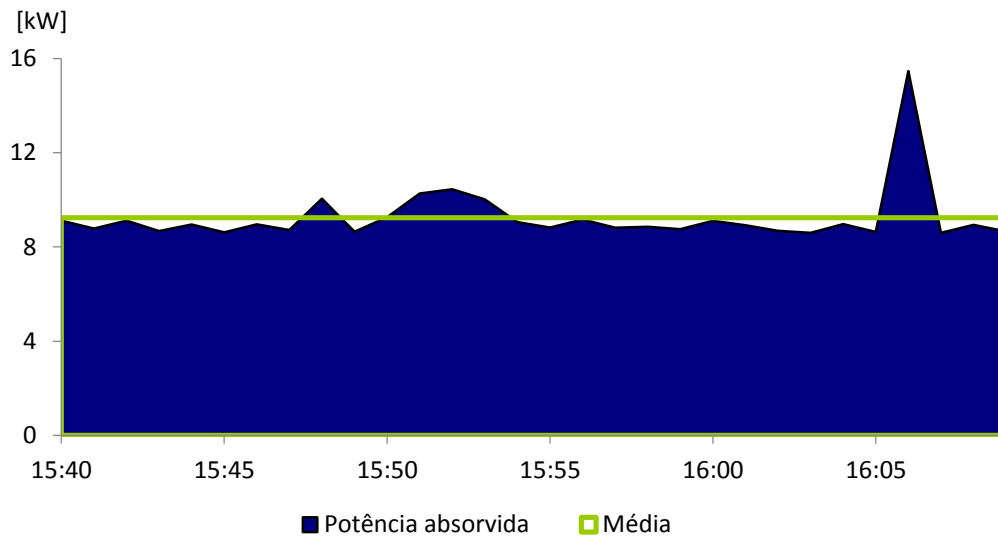


Figura F.3 - Potência absorvida no laboratório de controlo de qualidade.

Na Figura F.4 encontra-se a potência absorvida no grupo de emergência da zona de fabrico

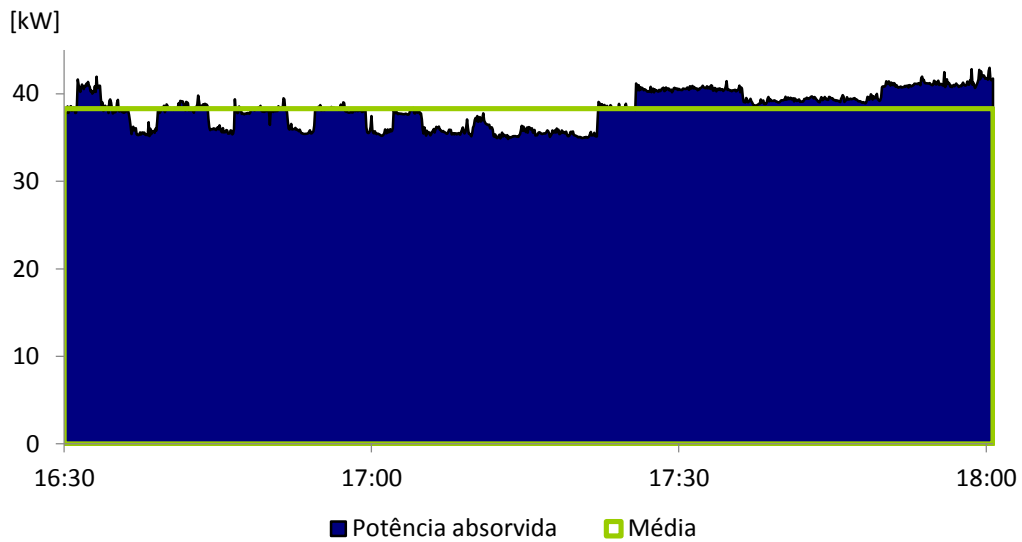


Figura F.4 - Potência absorvida no grupo de emergência da zona do fabrico.

Na Figura F.5 encontra-se a potência absorvida no edifício fabríco.

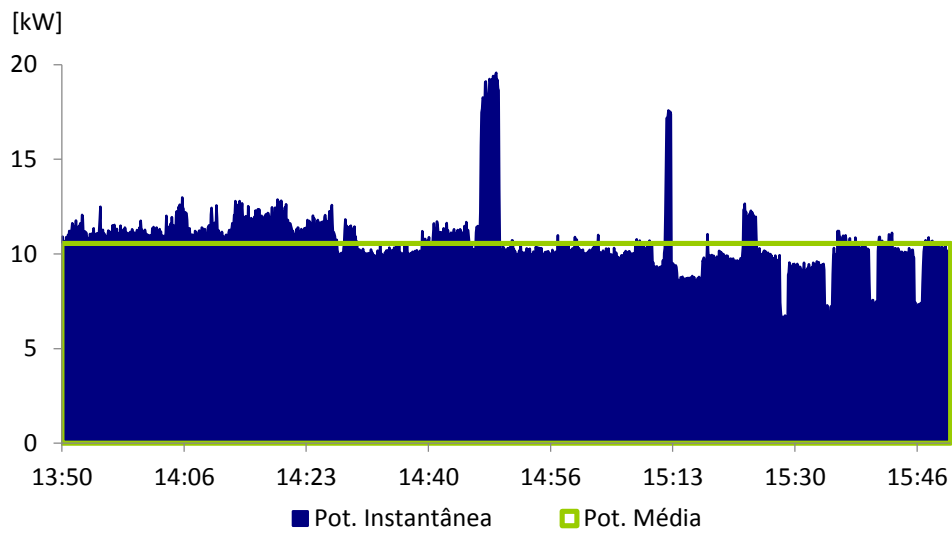


Figura F.5 - Potência absorvida no fabríco.

Na Figura F.6 encontra-se a potência absorvida no edifício branco.

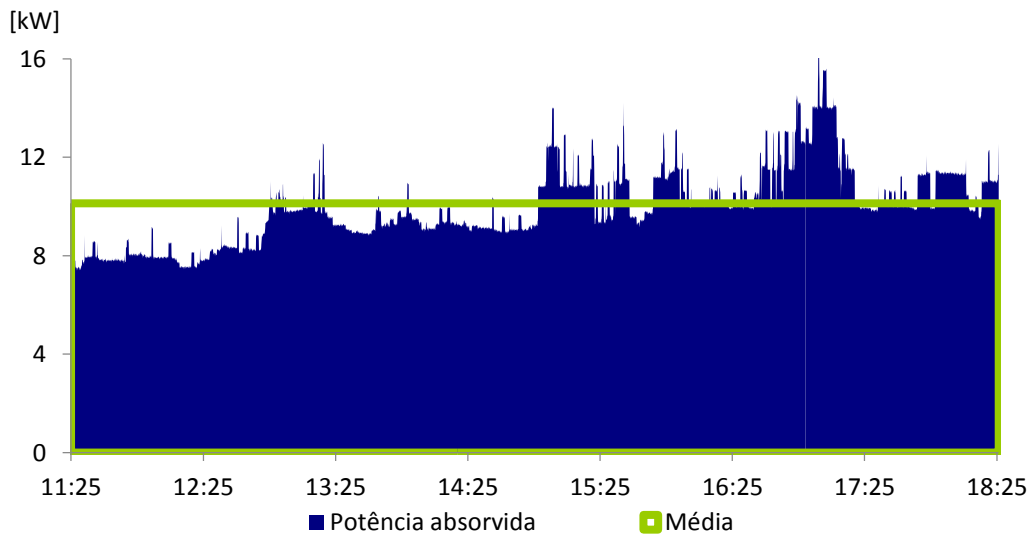


Figura F.6 - Potência absorvida no edifício branco.

Na Figura F.7 encontra-se a potência absorvida no grupo de emergência do edifício branco.

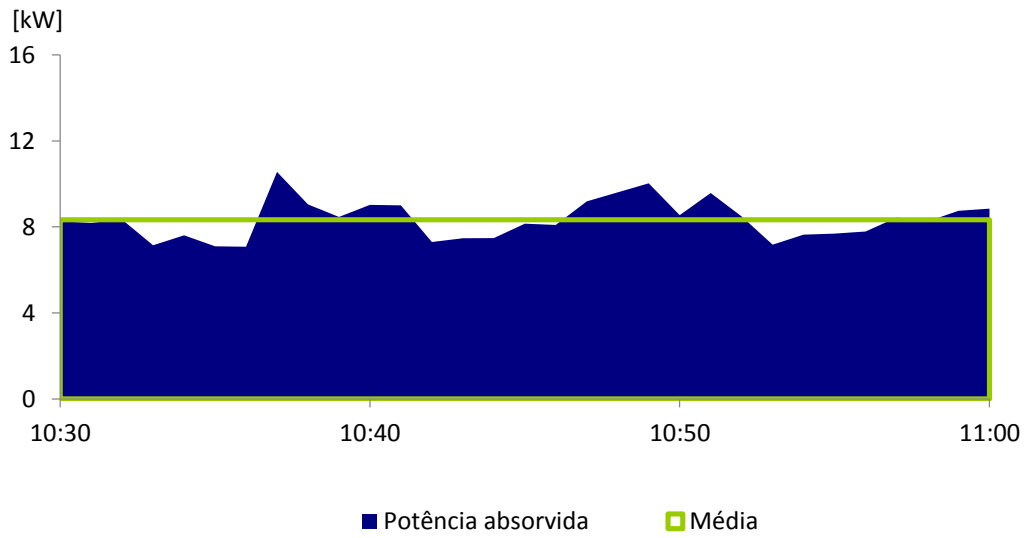


Figura F.7 - Potência absorvida no quadro de emergência do edifício branco.

Na Figura F.8 encontra-se a potência absorvida no edifício azul.

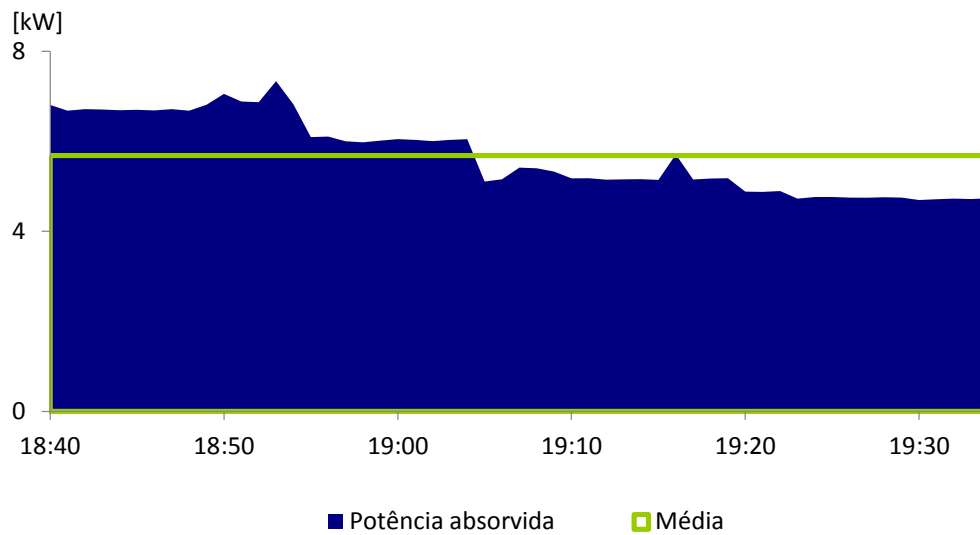


Figura F.8 - Potência absorvida no Edifício Azul.

Na Figura F.9 encontra-se a potência absorvida no grupo de emergência do edifício azul.

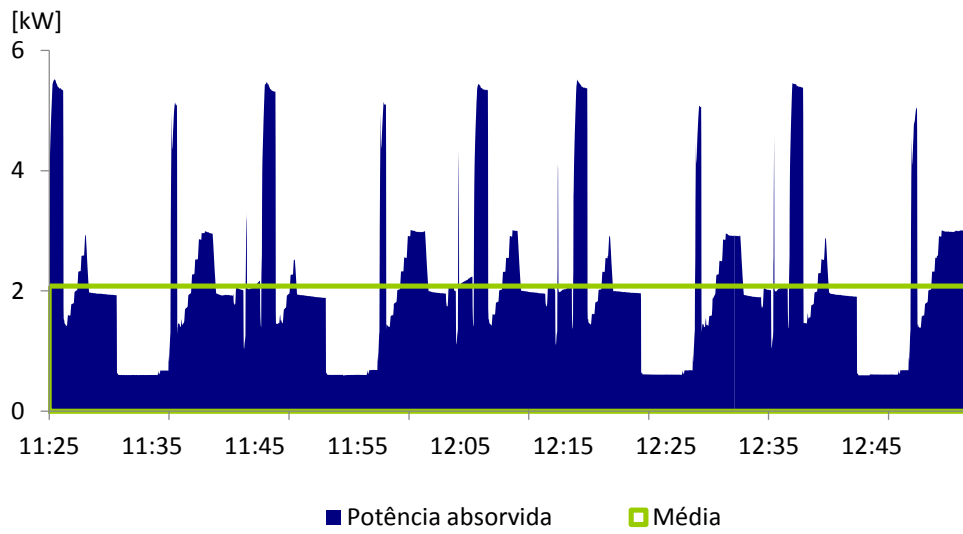


Figura F.9 - Potência absorvida no grupo de emergência do Edifício Azul.

Na Figura F.10 encontra-se a potência absorvida pelas caldeiras

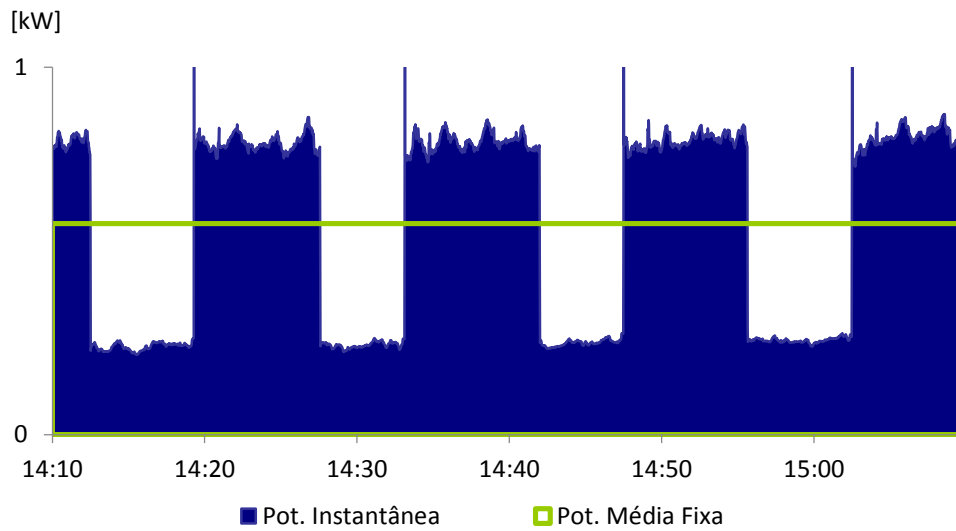


Figura F.10 - Potência absorvida pelas caldeiras.

Na Figura F.11 encontra-se a potência absorvida pela UTA P1.

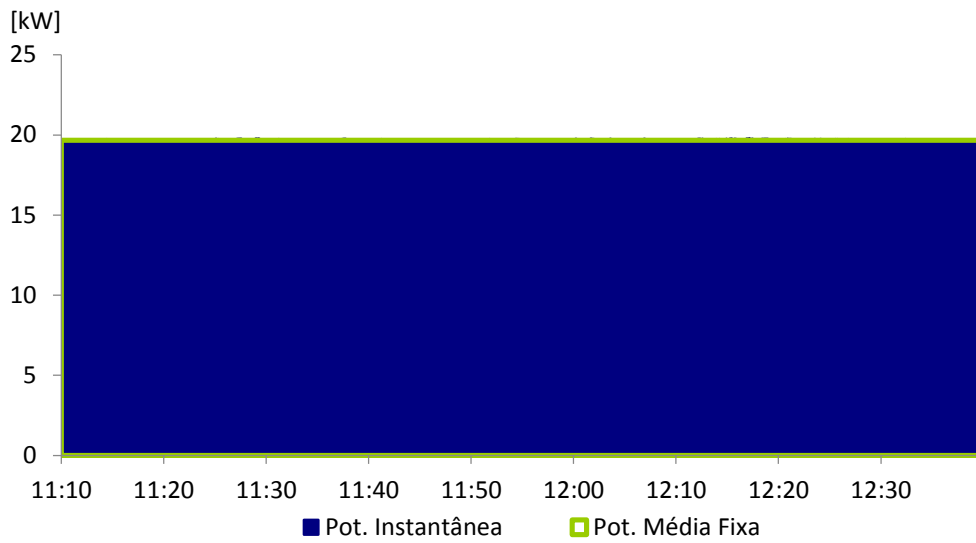


Figura F.11 - Potência absorvida UTA P1.

Na Figura F.12 encontra-se a potência absorvida pela UTA CQ.

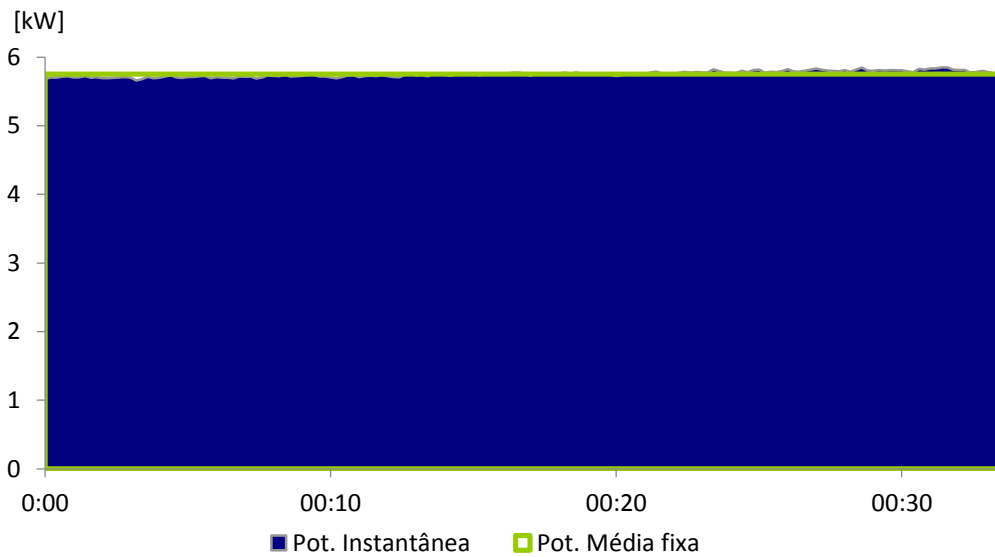


Figura F.12 - Potência absorvida UTA CQ.

Na Figura F.13 encontra-se a potência absorvida pela UTA E02.

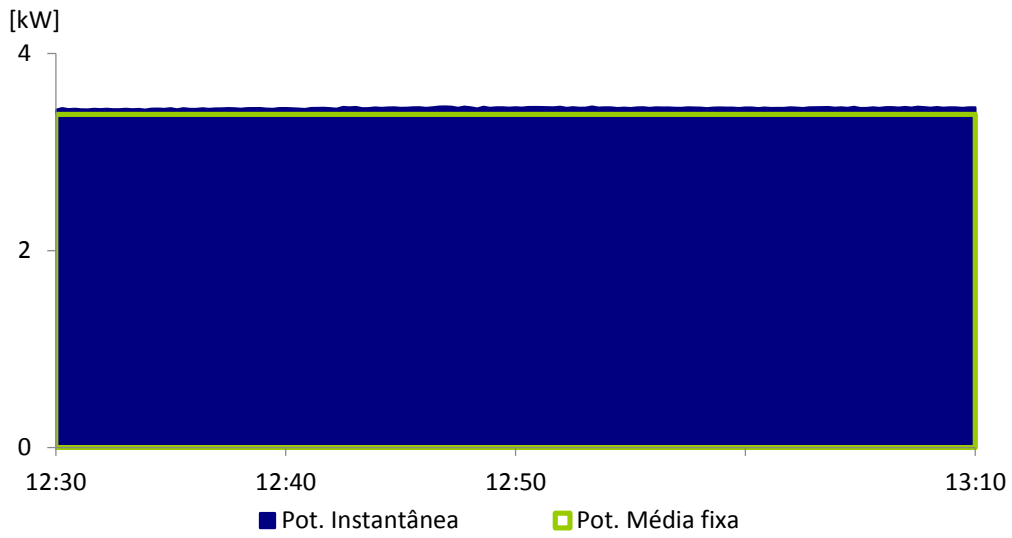


Figura F.13 - Potência absorvida UTA E02.

Na Figura F.14 encontra-se a potência absorvida pela UTA I+D.

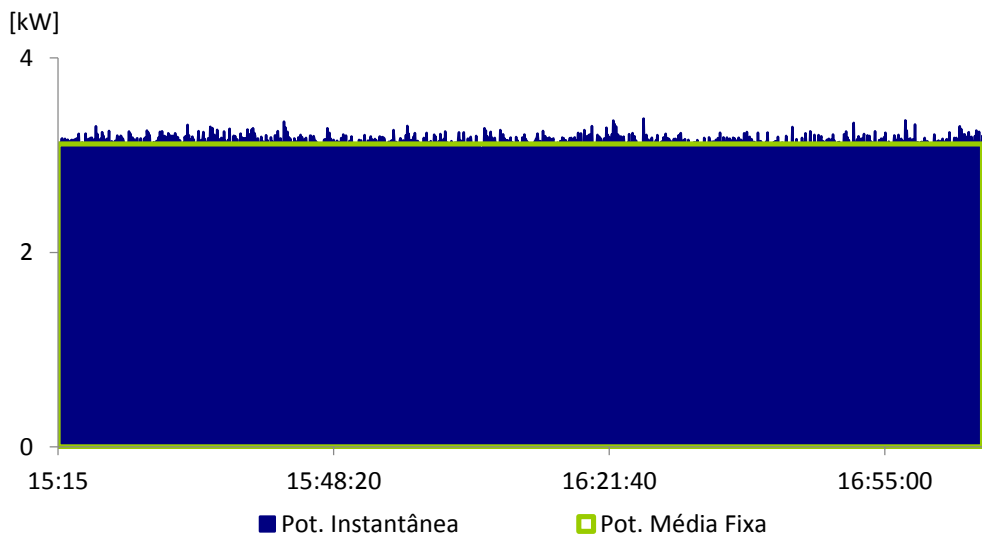


Figura F.14 - Potência absorvida pela UTA I+D.

Na Figura F.15 encontra-se a potência absorvida pela UTA P2.

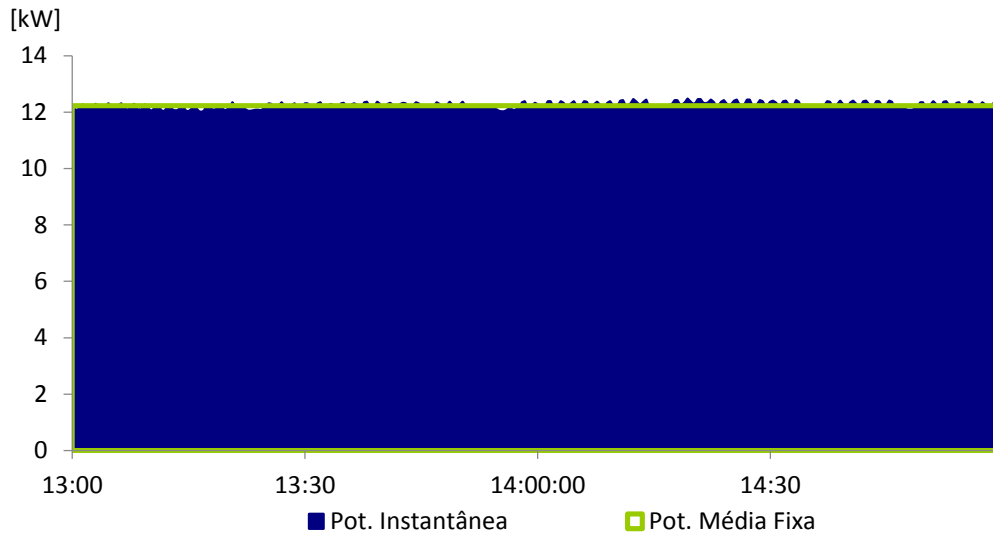


Figura F.15 - UTA P2.

Na Figura F.16 encontra-se a potência absorvida pela UTA V.

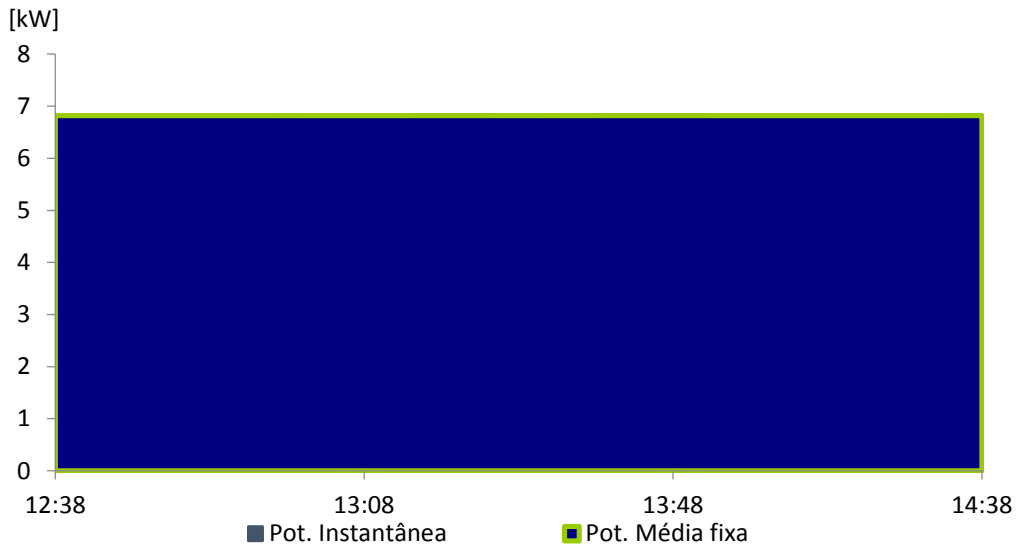


Figura F.16 Potência absorvida pela UTA V.

Anexo G – Dados de especificação dos equipamentos definidos para a central de trigeriação e esquema de principio

Tabela G.1- Dados de especificação do motor de combustão interna

Balanco energético			
Regime de carga	100%	75%	50%
Potência elétrica (kWe)	352	264	176
Potência térmica total (kWt)	449	363	275
Potência térmica do circuito HT (kWt)	182	154	127
Gases de combustão (kWt)	267	209	148
Potência térmica do circuito LT (kWt)	49	25	8
Eficiência elétrica (%)	36,9	36,0	33,7
Eficiência global (%)	0,78	0,73	0,64
Circuito arrefecimento do motor			
Temperatura de entrada/saída (°C)	92/98		
Caldeira de recuperação			
Temperatura de entrada/saída (°C)	98/104		
Tensão (V)		400	

Tabela G.2 - Dados de especificação do *chiller de absorção*

Capacidade de arrefecimento		1 000kW
Água refrigerada	Temperatura de entrada (°C)	15
	Temperatura de saída (°C)	10
Torre de arrefecimento	Temperatura de entrada (°C)	29
	Temperatura de saída (°C)	35
Água quente	Temperatura de entrada (°C)	97
	Temperatura de saída (°C)	80
EER		0,73

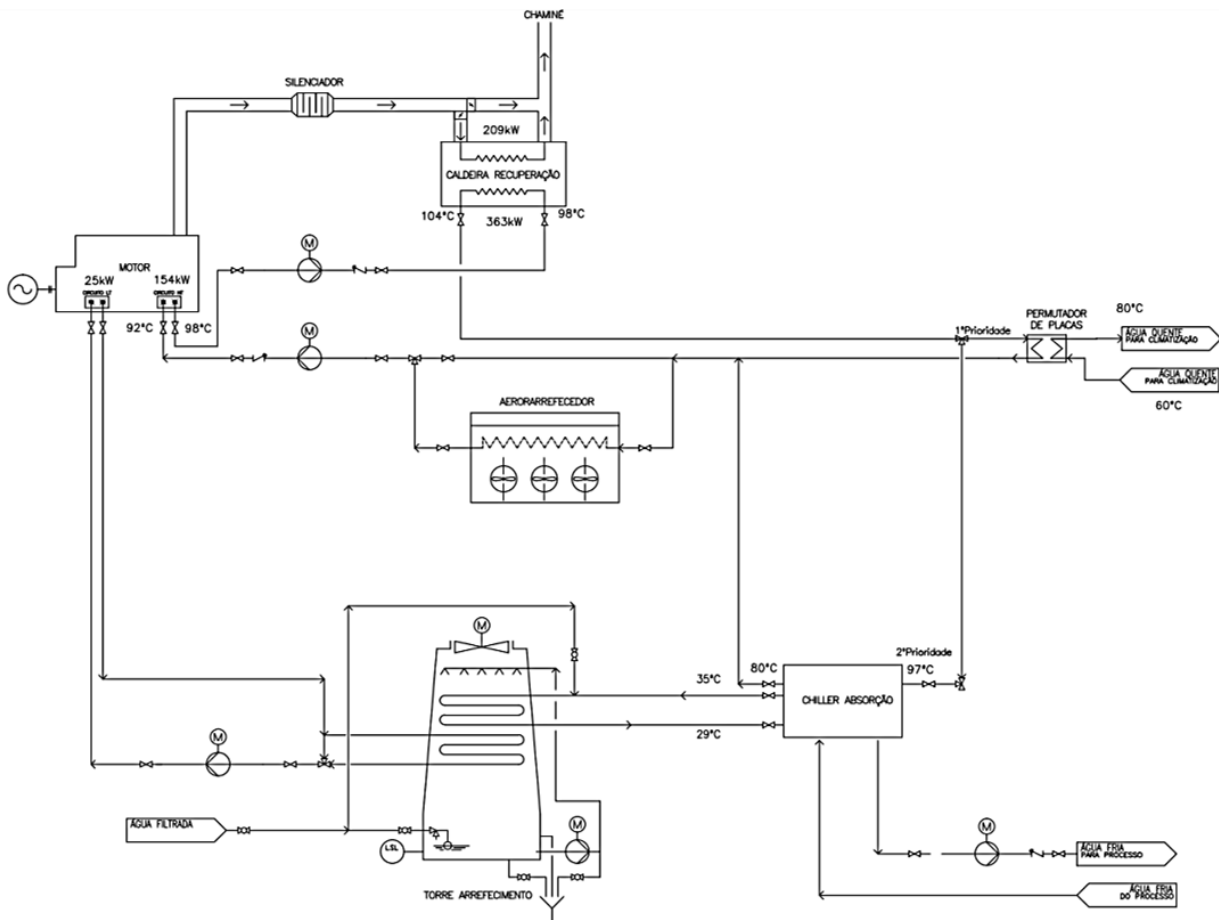


Figura G.1-Esquema de princípio da central de trigeração estudada.

Anexo H – Simulações no *Adsorptive Gas air Dryer*

Neste anexo, encontram-se alguns dos resultados obtidos com o *Adsorptive Gas air Dryer*, referidos na secção 4.3.4.

Na Figura G.1 e G.2 encontram-se os resultados obtidos para um passo de tempo de 0,06 minutos e um passo de tempo de 1,5 minutos, em que se verifica pouca sensibilidade à variação do passo de tempo.

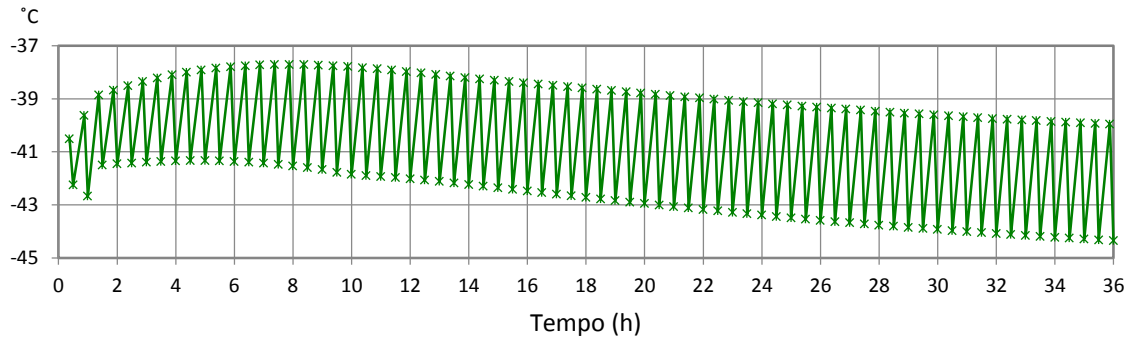


Figura H.1- Resultados obtidos para o passo de tempo de 0,06 minutos

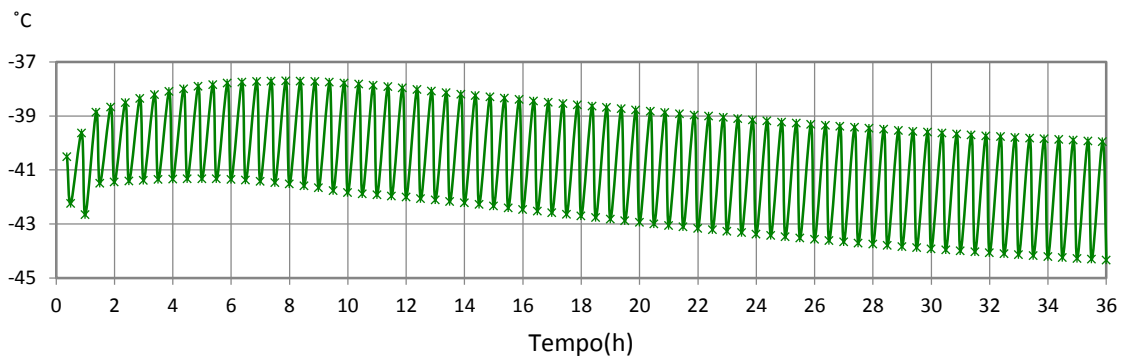


Figure H.2 - resultados obtidos para o passo de tempo de 1,5 minutos

Nas seguintes simulações, uma vez identificada a pouca sensibilidade do programa à variação do passo de tempo, mostram-se as alterações verificadas à alteração do tamanho de malha através da Figura G.3 e G.4. Em que é possível verificar que para um tamanho de malha menor, verifica-se que o intervalo do ponto de orvalho por pressão a cada ciclo é menor, aproximando-se mais dos resultados das medições. Contudo volta-se a verificar a falta de concordância com os resultados das medições.

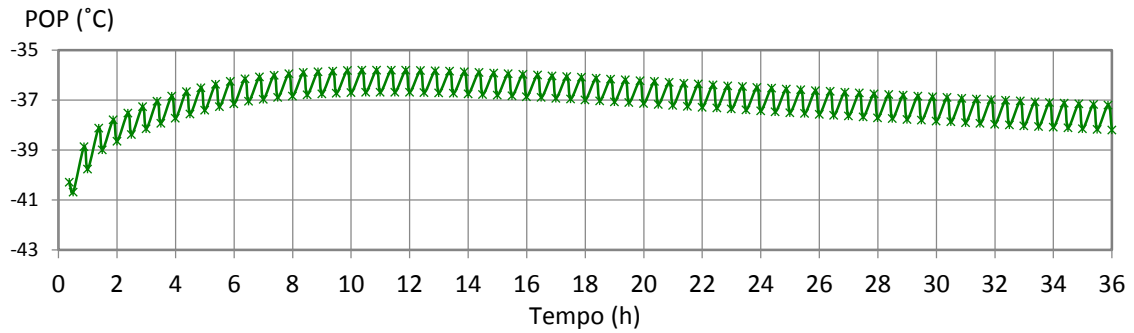


Figura H.3 – Resultados obtidos para um tamanho de malha de 15

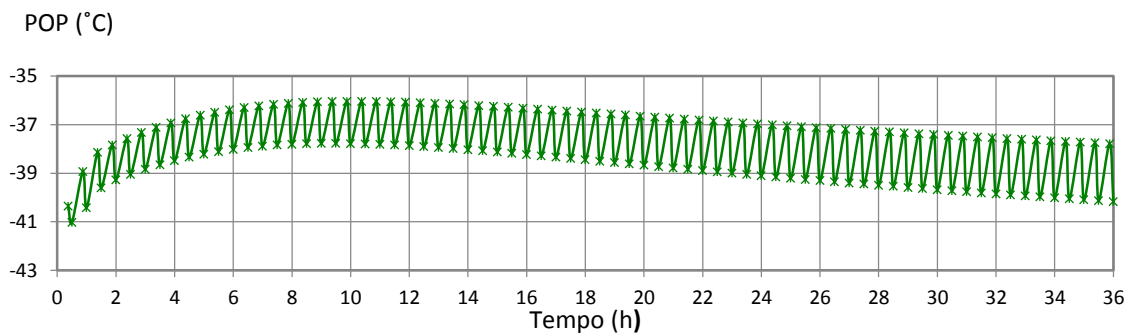


Figura H.4 – Resultados obtidos para um tamanho de malha de 30

