



**TECNOLOGIA
SETÚBAL**

ESCOLA SUPERIOR
POLITÉCNICO SETÚBAL

**BRUNO MIGUEL
RASQUINHO
MATOS**

AUDITORIA ENERGÉTICA – SISTEMA AR COMPRIMIDO

Relatório de Projeto do Mestrado em Engenharia
e Gestão de Energia na Indústria e Edifícios

ORIENTADOR

Professor Doutor Paulo Fontes

dezembro de 2024

BRUNO
MIGUEL
RASQUINHO
MATOS

AUDITORIA ENERGÉTICA – SISTEMA AR COMPRIMIDO

JÚRI

Presidente: Prof. Doutor, João Francisco dos Santos
Fernandes

Orientador: Prof. Doutor, Paulo Miguel Marques
Fontes

Arguente: Prof. Doutor, Amândio Jorge Barroso
Rebola

dezembro 2024

I. Dedicatória

Dedico este projeto à minha esposa e ao nosso filho por serem os meus principais motivadores e a razão de todos os meus esforços para conseguir uma vida melhor!

"As lições mais valiosas que podemos aprender vêm de casa. A família é o alicerce que sustenta todas as nossas conquistas."

Pai Rico, Pai Pobre

Robert Kiyosaki

Agradecimentos

Finalizada esta etapa particularmente importante da minha vida, não poderia deixar de expressar o mais profundo agradecimento a todos aqueles que me apoiaram nesta longa caminhada e contribuíram para a realização deste trabalho:

Ao Professor Doutor Paulo Fontes, o meu maior agradecimento por toda a disponibilidade e orientação prestada, pelo apoio incondicional e compreensão que sempre manifestou.

À minha esposa e filho, que estiveram sempre presentes em todas as ocasiões e circunstâncias, sendo a minha base de suporte.

Gostaria de deixar também uma palavra de apreço à empresa “Unilever” pelo apoio prestado na minha progressão e desenvolvimento estudantil disponibilizando todas as informações necessárias para a realização deste projeto.

Agradeço a todas as pessoas e entidades relevantes no contexto do trabalho realizado.

II. Resumo

Este projeto tem por base uma auditoria energética ao sistema de ar comprimido de uma indústria alimentar. Foram sinalizadas melhorias inerentes à eficiência energética visando amenizar o custo e impacto económico que o consumo elétrico de produção e tratamento de ar comprimido acarretam para a empresa. Foram identificadas fugas na rede de distribuição de ar comprimido, uma gestão da rede ineficiente (setpoint da pressão do ar desajustado) e uma gestão de recursos pouco eficaz e desadequada ao período laboral. Para as melhorias sinalizadas foram propostas as seguintes medidas, respetivamente: reparação das fugas, reajuste do setpoint e restrição do funcionamento da central de ar comprimido aos períodos laborais.

Palavras-Chave: Auditoria Energética; Sistema de Ar Comprimido.

III. Abstract

This project is based on an energy audit of the compressed air system within a food industry sector improvements in energy efficiency have been identified to reduce the company's cost and economic impact associated with the electricity consumption of air compression production and treatment. Identified issues include leaks within the compressed air distribution network, inefficient network management (misaligned setpoint), and suboptimal resource management not aligned with working hours. The proposed measurements for these identified improvements are, respectively: repair of the leaks, adjustment of the setpoint and restricting the operation of the compressed air plant to working hours.

Keywords: Energy Audit; Compressed Air System.

IV. Índice

I. Dedicatória	iii
II. Resumo.....	v
III. Abstract.....	vi
IV. Índice	vii
V. Lista de Figuras	viii
VI. Lista de Tabelas	ix
VII. Lista de Siglas e Acrónimos.....	x
VIII. Lista de Símbolos.....	xi
1 Introdução	1
1.1 As Auditorias Energéticas.....	2
1.2 O Ar Comprimido.....	3
2 A Empresa	4
3 Central de Ar Comprimido	6
3.1 Composição da Central de Ar Comprimido	6
3.2 Central de Gestão Centralizada “SIGMA 4.0”	11
3.3 Distribuição de Ar Comprimido	12
4 Análise do Consumo Energético	15
4.1 Recolha de dados.....	15
4.2 Dados da produção	16
4.3 Consumo Energético do Ar Comprimido em Relação ao Consumo Total da Unidade Fabril.....	16
4.4 Produção de Ar Comprimido Durante o Período de Laboração:	18
5 Medidas a Implementar	22
5.1 Medida 1 - Substituição dos Atuadores das Válvulas de Processo.....	22
5.2 Medida 2 - Reparação das Fugas da Rede de Ar Comprimido	22
5.2.1 Estado Atual da Rede.....	22
5.2.2 Sugestão de Medidas para uma Central de Ar Comprimido Eficiente... ..	25
5.3 Medida 3 - Regulação do Setpoint da Central de Ar Comprimido ...	26
5.4 Melhoria Implementada.....	30
6 Conclusão.....	32
IX. Bibliografia.....	33

V. Lista de Figuras

Figura 1 – Planta da central de Ar comprimido	6
Figura 2 – Central de gestão centralizada “SIGMA 4.0”.(visualizado 10 outubro de 2024)	11
Figura 3 – Diagrama da Central de Ar Comprimido e Rede de Distribuição.	13
Figura 4 – Gráfico do Consumo em kWh Unidade Fabril / Central Ar Comprimido	17
Figura 5 – Custo em € Unidade Fabril / Central Ar Comprimido	17
Figura 6 – Consumo em kWh semanal no período de laboração.....	19
Figura 7 – Custo em € semanal no período de laboração.....	19
Figura 8 – Consumo em kWh durante o período de não laboração.	20
Figura 9 – Custo em € durante o período de não laboração	21
Figura 10 – Custo em € durante o mês de setembro de 2023	23
Figura 11 – Custo teórico em € durante o mês de setembro 2023.....	24
Figura 12 – Custo em € num cenário realista no período de setembro de 2023	25
Figura 13 – Potência requerida para comprimir ar (THE ENGINEERING TOOLBOX, 2024).....	29

VI. Lista de Tabelas

Tabela 1 – <i>Kaeser CSD 125 características.</i>	7
Tabela 2 – <i>Kaeser CSDX 140 SFC características.</i>	7
Tabela 3 – <i>Kaeser CSDX 140 SFC características.</i>	8
Tabela 4 – <i>Kaeser DTH 251/372 características.</i>	9
Tabela 5 – <i>Kaeser DC 266 características.</i>	9
Tabela 6 – <i>Tanque de armazenamento 1 características.</i>	10
Tabela 7 – <i>Tanque de armazenamento 2 características.</i>	10
Tabela 8 – <i>Volume de Produção Mensal em Toneladas</i>	16
Tabela 9 – <i>Ciclo de Laboração Semanal (h)</i>	18
Tabela 10 – <i>Laboração / Não Laboração.</i>	18
Tabela 11 – <i>Lista do parque de máquinas e setpoint(bar) de trabalho....</i>	26
Tabela 12 – <i>Valores estipulados para uma fuga de acordo com o seu diâmetro e pressão. (ADENE,2014)</i>	28
Tabela 13 - <i>Dados de produção (ton), consumo (kWh) e custo (€) referentes a setembro de 2023 e cenário hipotético</i>	29
Tabela 14 – <i>Dados de produção (ton), consumo (kWh) e custo (€) referentes a setembro de 2023 e julho de 2024</i>	30

VII. Lista de Siglas e Acrónimos

RDIS Rede Digital com Integração de Serviços

WiFi *Wireless Fidelity*

VIII. Lista de Símbolos

e_r Erro relativo

f_i Fase da componente i

A_c Área da célula

B_c Banda de Coerência

1 Introdução

O presente Projeto, realizado no âmbito da unidade curricular de Estágio/Projeto, do Mestrado em Engenharia Gestão de Energia na Indústria e Edifícios da Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, tem como principal objetivo realizar um estudo sobre a utilização do ar comprimido numa indústria alimentar. Apesar das diversas motivações que levaram à escolha deste tema para projeto final de Mestrado, a principal prende-se pelo gosto pessoal pela área da indústria transformadora.

O ar comprimido é essencial na indústria alimentar pela diversidade de funções que desempenha nos processos da mesma. É usado em várias operações, como o funcionamento de máquinas de produção e embalagem, bem como em sistemas de transporte, na operação de equipamentos pneumáticos nas instalações de produção e, ainda, em processos de secagem. A sua importância é de tal relevância que em certos produtos, como gelados e algumas sobremesas lácteas, o ar comprimido é utilizado como um componente adicional, conferindo-lhes textura, volume e cremosidade (Proquimia, 2024).

Estima-se que 80% do custo de produção de ar comprimido advém do seu consumo de energia elétrica (METRON, 2024). Este é um valor que tem um impacto bastante significativo no custo total de produção de bens de consumo, uma vez que nos últimos anos o custo da energia elétrica para consumo industrial tem vindo a aumentar e, como tal, também o custo de produção acaba por aumentar, representando agora, de acordo com a Confederação Empresarial de Portugal (CIP, 2024), a principal preocupação de cerca de 86% das empresas portuguesas.

Não é novidade que na indústria existe uma necessidade constante de otimização de recursos e redução de desperdícios e, perante estes dados, naturalmente o mesmo sucede especificamente quando o tema implica consumo de energia elétrica. Assim, ao investigar e identificar ineficiências no sistema de ar comprimido, bem como ao oferecer e implementar soluções para as mesmas, espera-se não apenas reduzir custos, mas também contribuir para a sustentabilidade e competitividade da empresa no mercado.

1.1 As Auditorias Energéticas

A realização de uma auditoria energética é fundamental para identificar ineficiências e oportunidades de melhoria no uso da energia dentro de uma empresa. No contexto da produção de caldos alimentares, onde o ar comprimido desempenha um papel crucial em diversos processos fabris, uma auditoria energética permite avaliar o desempenho do sistema de ar comprimido, identificar fugas e sobrecargas, e propor medidas corretivas que podem resultar em significativas economias de energia e custos. Além disso, a Direção-Geral de Energia e Geologia (2024) reforça que a auditoria energética contribui para a sustentabilidade da empresa, reduzindo o impacto ambiental e melhorando a eficiência operacional. Portanto, a implementação de uma auditoria energética é indispensável para garantir a competitividade e a viabilidade econômica da indústria alimentar.

De acordo com Reis (2023), uma auditoria energética envolve a preparação e planeamento, levantamento de dados detalhados sobre o consumo energético, análise da informação recolhida para identificar ineficiências e a elaboração de um relatório com propostas de medidas corretivas. Acrescenta, ainda, que essas medidas são avaliadas quanto à sua rentabilidade para garantir a eficiência energética e a redução de custos, que são os principais objetivos de uma auditoria energética.

No caso da auditoria desenvolvida, o foco é o ar comprimido, visto que se está a analisar uma indústria transformadora do ramo alimentar e que o ar comprimido é uma fonte de energia essencial para todos os seus processos de funcionamento, sendo, assim, aquela que tem mais impacto no custo energético total da empresa. Como tal, os objetivos principais desta auditoria energética são precisamente a redução de custos com a produção e utilização do ar comprimido e garantir a eficiência energética da rede de ar comprimido na unidade fabril.

1.2 O Ar Comprimido

A utilização do ar comprimido tem origens que remontam à Grécia Antiga, no entanto, ganhou especial importância no século XIX. Durante esta época, as máquinas a vapor começaram a ser utilizadas em larga escala para operar dispositivos pneumáticos, surgindo a necessidade de alimentar estas máquinas com ar comprimido (Atlas Copco, 2019). A partir desta necessidade, desenvolveram-se os primeiros sistemas de ar comprimido industrial.

Um marco importante na história do ar comprimido industrial foi a invenção do compressor de ar por George Medhurst em 1799. Inicialmente, este compressor era usado para alimentar folios de órgãos musicais, mas rapidamente foi adaptado para aplicações industriais, como mineração e perfuração. Durante a Revolução Industrial, o ar comprimido tornou-se uma fonte de energia amplamente utilizada em fábricas e minas, substituindo o vapor em muitas aplicações (Davis, 2018).

No final do século XIX, a introdução de sistemas de ar comprimido de alta pressão permitiu o uso desse recurso numa variedade de novas aplicações, como transporte pneumático e operacionalização de ferramentas de alta precisão (Smith, 2020). Ao longo do século XX, os avanços tecnológicos levaram a melhorias significativas na eficiência e confiabilidade dos sistemas de ar comprimido. Compressores de parafuso e de pistão tornaram-se os tipos mais comuns de compressores utilizados na indústria, proporcionando maior capacidade e controle sobre a pressão e o fluxo de ar (Johnson, 2017).

A automação industrial na segunda metade do século XX impulsionou ainda mais a disseminação dos sistemas de ar comprimido, uma vez que se tornaram essenciais para o funcionamento de máquinas e equipamentos automatizados (Baker, 2015). Hoje, o ar comprimido é amplamente utilizado nos mais variados setores industriais, incluindo a indústria automotiva, química, alimentar e de bebidas, embalagens, e tantas outras. Este é usado para alimentar máquinas, ferramentas pneumáticas, sistemas de controle e até mesmo para limpeza e pintura nos mais diversos equipamentos e sistemas industriais (Thompson, 2021).

Em resumo, a história do ar comprimido industrial é uma história de inovação e progresso desde os primeiros dias da Revolução Industrial até aos sistemas modernos e sofisticados utilizados atualmente, com particular ênfase na indústria alimentar.

2 A Empresa

O objeto de estudo deste projeto foi uma empresa do ramo de transformação de produtos alimentares, neste caso de produção de caldos, de onde foram recolhidos os dados que serão desenvolvidos e trabalhados ao longo do mesmo. Dado que o autor é colaborador desta empresa, com a qual se encontra bastante familiarizado, considerou que seria pertinente para a presente auditoria um foco na produção de ar comprimido, uma vez que a rede distribuidora desta energia apresenta frequentemente fugas.

A empresa em questão instalou-se inicialmente na zona do Ribatejo (Carregado), passando a sediar-se no parque industrial de Santa Iria de Azoia (Concelho de Loures) em meados dos anos 2000, após ser adquirida por um grande grupo económico que forçou a sua realocização. O período que se seguiu coincidiu com uma década de pouco investimento e futuro incerto, pelo que entre 2018 e 2019 definiu-se que esta unidade industrial receberia toda a produção disseminada pela Europa, tornando-se responsável por fornecer todo o mercado europeu.

Com este futuro traçado e a necessidade de aumentar a capacidade de produção num curto espaço de tempo, esta unidade industrial viu o seu portefólio de sete linhas produtivas aumentado para vinte e quatro linhas e, ainda, um forte investimento na parte do processo: o seu edifício foi acrescentado e foi criada uma secção de processo.

Todo este incremento do parque de máquinas foi executado com a instalação fabril em funcionamento de modo a satisfazer as necessidades do mercado, pelo que não foi possível adaptar certos sistemas da forma mais correta, como por exemplo a distribuição elétrica, linhas de água, esgotos e ar comprimido.

Focando no sistema de ar comprimido, encontram-se instalações fabris que carecem de manutenção ou substituição das tubagens originais e, ainda, um cenário de sobrecarga das mesmas. Uma distribuição de ar comprimido que já sofria de algumas situações menos boas foi levada ao limite da sua capacidade, forçando o aumento da pressão na central de ar comprimido para suprimir as falhas de abastecimento no final das linhas de embalagem. Sucede que a rede de distribuição não teria sido projetada para este nível de consumo, nem a tubagem utilizada teria sido adaptada para o seu consumo. Estas circunstâncias revertem-se em perdas significativas de pressão, representando uma inflexibilidade na alteração do setpoint de pressão que, por conseguinte, leva a uma gestão ineficiente da central. Como tal, esta é uma questão

que será analisada ao longo deste trabalho e para a qual serão desenvolvidas medidas interventivas.

A empresa em questão depende da central de ar comprimido quer para o processo de transformação do produto, quer para o seu embalamento, já que o ar comprimido é responsável pelo movimento dos cilindros pneumáticos de ambos os processos. Também no processo de embalamento é o ar comprimido o responsável pela criação de vácuo através do processo venturi que é principalmente utilizado na recolha de embalagens e na sua paletização, entre outros. Já no processo de transformação, o ar comprimido auxilia o transporte da matéria-prima e a sua operacionalização de forma a obter o produto final.

Sem o ar comprimido, a produção e distribuição de caldos seriam inviáveis, pois ele é essencial para todos os processos fabris. Portanto, é crucial que o ar comprimido seja utilizado de forma eficiente para minimizar custos e garantir o funcionamento contínuo desta indústria alimentar. Assim, pretende-se, com esta auditoria, identificar ineficiências do sistema de produção e distribuição de ar comprimido e sugerir medidas resolutivas que permitam a redução do seu custo energético.

3 Central de Ar Comprimido

Devido ao crescimento das linhas de produção, foi instalada uma nova central de ar comprimido da Kaeser, que é composta por uma unidade central de gestão, produção e tratamento de ar comprimido, conforme a planta apresentada na figura 1.

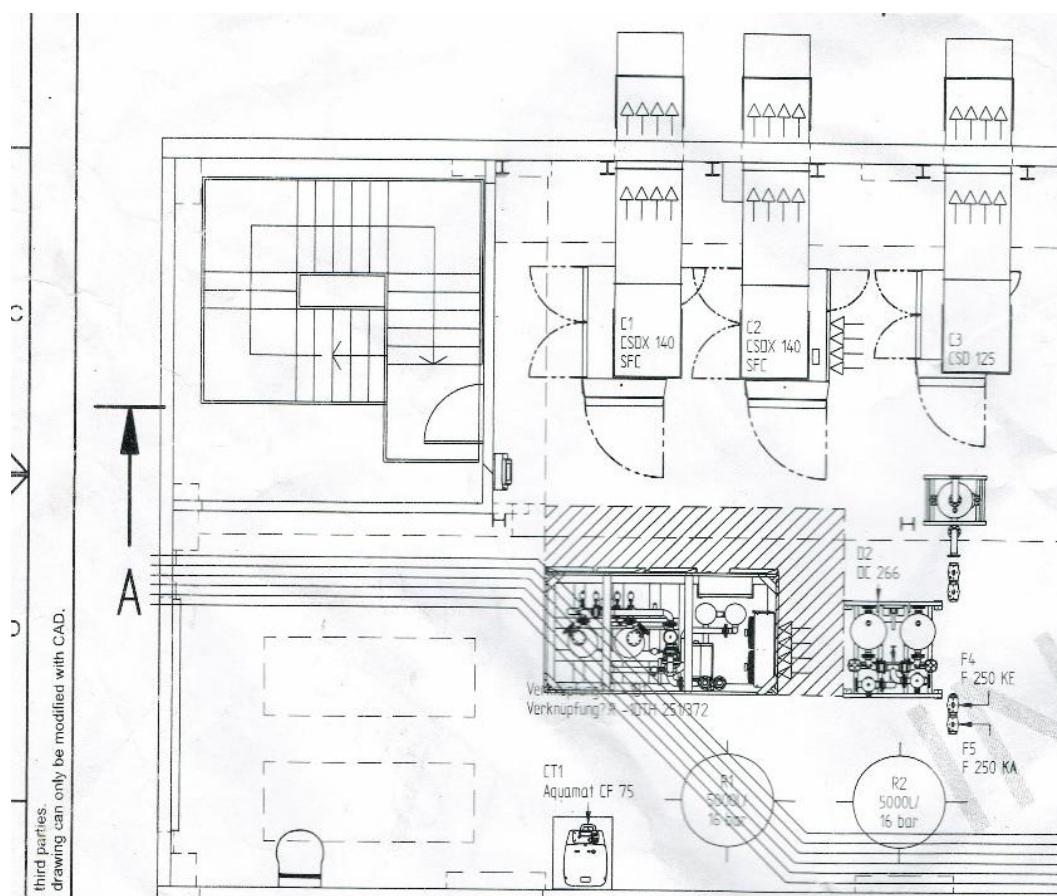


Figura 1 – Planta da central de Ar comprimido

3.1 Composição da Central de Ar Comprimido

Foram instalados três compressores de parafuso de 75kW, um dos quais de velocidade fixa e os restantes de velocidade variável, cujas características se encontram descritas nas tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1 – Kaeser CSD 125 características.

Equipamento	Características	
Compressor de velocidade fixa Kaeser CSD 125 	Tipo de compressor	Parafuso
	Temperatura Ambiente	3 a 45
	Potência Nominal	75 kW
	Pressão máxima de serviço	12,00 bar
	Velocidade nominal do motor	2982 rpm
	Alimentação:	3 fases 50Hz
	Tensão	400 V
	Corrente em plena carga	130 A
	Ano de construção	11 / 2019

Tabela 2 – Kaeser CSDX 140 SFC características.

Equipamento	Características	
Compressor de velocidade Variável Kaeser CSDX 140 SFC 	Tipo de compressor	Parafuso
	Temperatura Ambiente	3 a 45
	Potência Nominal	75 kW
	Pressão máxima de serviço	12,00 bar
	Velocidade nominal do motor	3660 rpm
	Alimentação:	3 fases 50Hz
	Tensão	400 V
	Corrente em plena carga	154 A
	Ano de construção	11 / 2019

Tabela 3 – *Kaeser CSDX 140 SFC características.*

Equipamento	Características	
Compressor de velocidade Variável Kaeser CSDX 140 SFC 	Tipo de compressor	Parafuso
	Temperatura Ambiente	3 a 45
	Potência Nominal	75 kW
	Pressão máxima de serviço	12,00 bar
	Velocidade nominal do motor	3660 rpm
	Alimentação:	3 fases 50Hz
	Tensão	400 V
	Corrente em plena carga	154 A
	Ano de construção	11 / 2019

Instalaram-se, também, dois secadores, um ativo que recorre ao ciclo frigorífico e outro passivo de secagem por adsorção. Os secadores apresentam as características descritas nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4– Kaeser DTH 251/372 características.

Equipamento	Características	
Secador Kaeser DTH 251/372 	Tipo de secador	Ativo
	Temperatura Ambiente	3 a 45
	Temperatura de entrada do ar comprimido	3 a 50
	Alimentação	400V / 50Hz /3+PE
	Pressão de trabalho	5 a 10 bar
	Corrente máxima	27,4 A / 14kW
	Proteção	3*40 AT / IP44
	Absorvente	Oxido de alumínio activo 2*185kg
	Fluido frigorífico	R513 A / 12kg
	Circuito Frigorífico	Ts= -10 a +125
	Ano de construção	12 / 2019

Tabela 5 – Kaeser DC 266 características.

Equipamento	Características	
Secador Kaeser DC 266 	Tipo de secador	Passivo
	Temperatura mínima	3
	Temperatura máxima	66
	Volume	2 * 34 l
	Pressão de trabalho	2 a 16 bar
	Ano de construção	12 / 2019

Além disso, foram instalados dois tanques de armazenamento com uma capacidade de 5000l cada e que exibem as características detalhadas nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Tanque de armazenamento 1 características.

Equipamento	Características	
Tanque de armazenamento 1 	Pressão de trabalho	ATM / 8,5 bar
	Pressão de ensaio	14,3 bar
	Data do teste	16/04/2020
	Válvula de segurança	8,5 bar
	Temperatura de trabalho	50
	Volume	5000 l
	categoria	IV
	Fluido	Ar comprimido
	Peso em Vazio	1205 kg

Tabela 7 – Tanque de armazenamento 2 características.

Equipamento	Características	
Tanque de armazenamento 2 	Pressão de trabalho	ATM / 8,5 bar
	Pressão de ensaio	14,3 bar
	Data do teste	16/04/2020
	Válvula de segurança	8,5 bar
	Temperatura de trabalho	50
	Volume	5000 l
	categoria	IV
	Fluido	Ar comprimido
	Peso em Vazio	1205 kg

3.2 Central de Gestão Centralizada “SIGMA 4.0”

A central de ar comprimido é composta por vários equipamentos interligados entre si e geridos por um sistema de gestão centralizada SIGMA 4.0 da marca Kaeser, tal como ilustra a figura 2. Esta rede fechada, baseada na tecnologia Ethernet, integra todos os componentes da central de ar comprimido que, por sua vez, comunicam entre si, permitindo a monitorização e o controlo coordenado dos sistemas de ar comprimido de modo a oferecer uma otimização e gestão de energia e, ainda, reduzindo os tempos de inatividade.

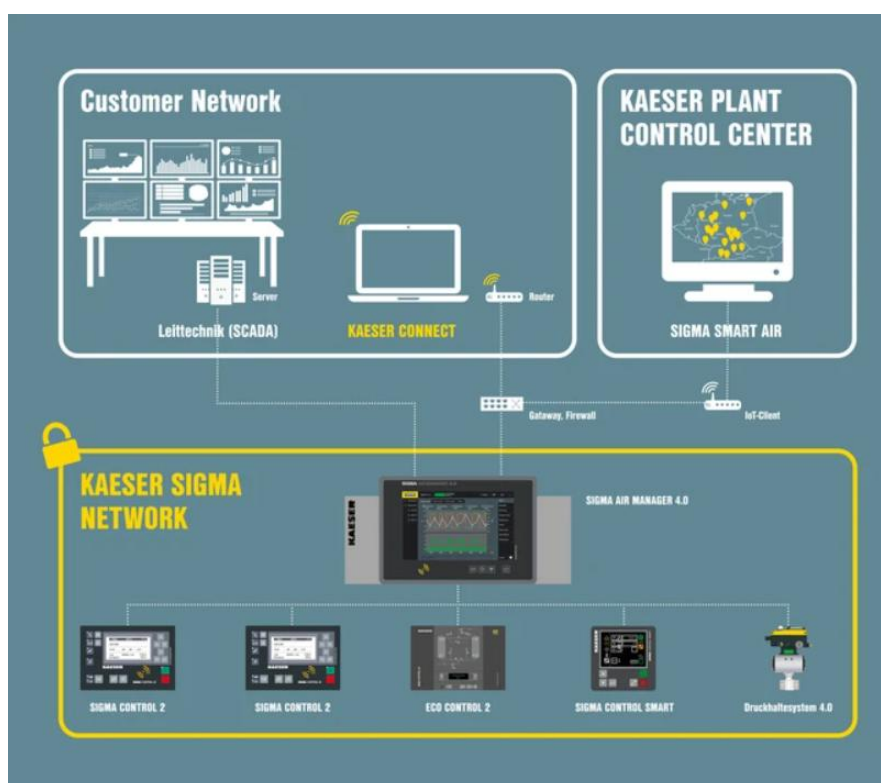


Figura 2 – Central de gestão centralizada “SIGMA 4.0”.(visualizado 10 outubro de 2024)

3.3 Distribuição de Ar Comprimido

A produção e distribuição do ar comprimido na zona de processo é constituída da seguinte forma, como exemplificado na Figura 3;

Compressores → Secadores → Reservatórios → Mistura Nova → Mistura Antiga → Distribuição de Ar Comprimido pelas Linhas de Embalamento.

No início do diagrama encontram-se dispostos paralelamente os três compressores descritos anteriormente, cuja função é comprimir o ar atmosférico. Por sua vez, ligam-se aos secadores de ar, também em paralelo, que funcionam alternadamente. Os secadores removem a humidade do ar previamente comprimido, eliminando a água da sua composição e, posteriormente, redirecionando-o para os tanques através dos quais serão distribuídos pela rede de distribuição.

O ar comprimido percorre as colunas centrais verticais para chegar à mistura nova e à mistura antiga, cada uma com a sua respetiva ligação à rede de distribuição. Em cada mistura, o ar comprimido distribui-se pelos seus pisos através de um coletor de distribuição por cada piso, sendo que a mistura nova é composta por quatro pisos e a mistura antiga por três pisos de altura.

A rede de distribuição prossegue da zona de processo até à zona final, o embalamento, onde o ar comprimido é distribuído em forma de anel. Este aparato situa-se no piso técnico, localizado entre o telhado e a sala de embalamento.

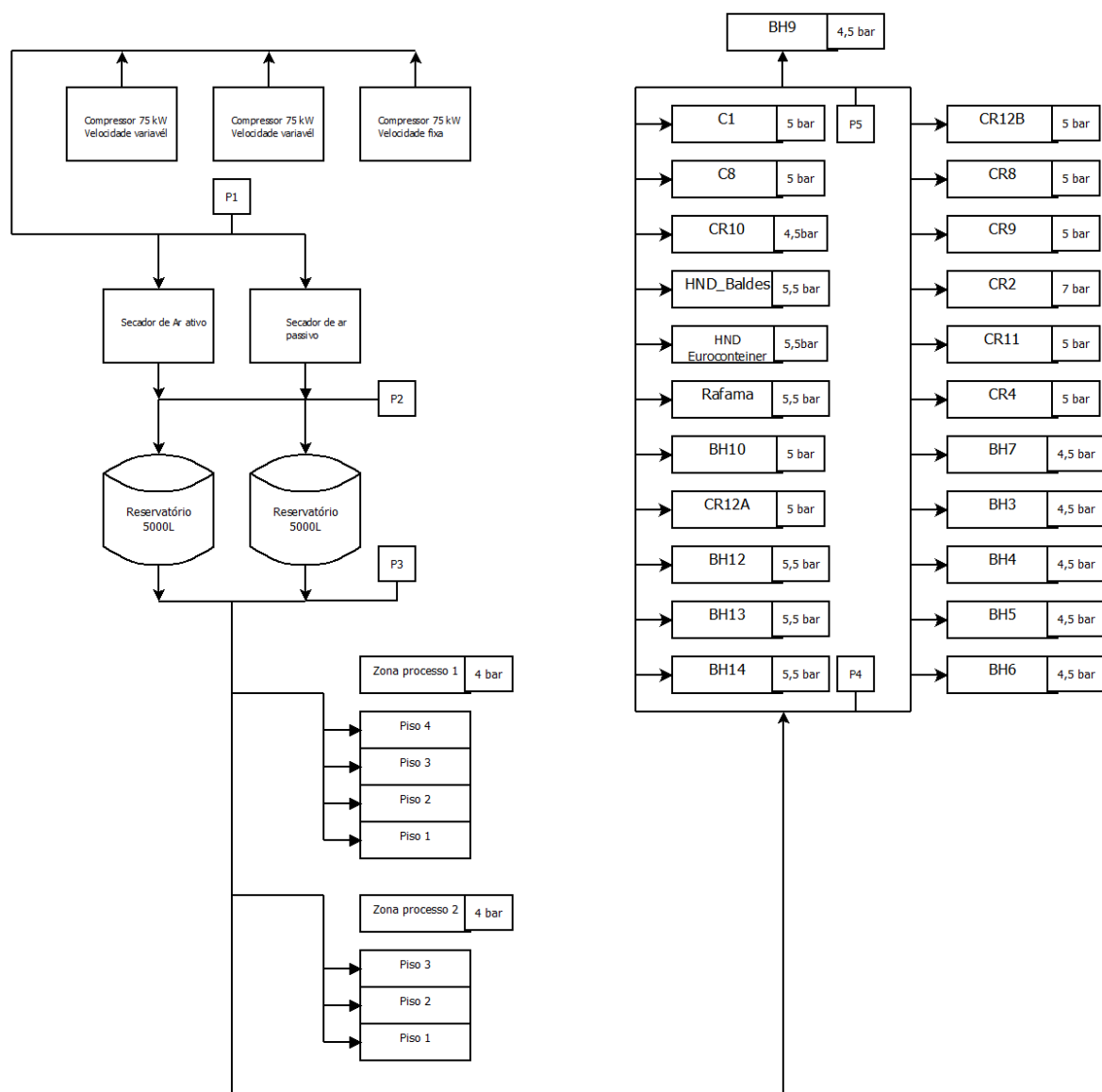


Figura 3 – Diagrama da Central de Ar Comprimido e Rede de Distribuição.

Chegado à rede de distribuição, o ar comprimido distribui-se primeiramente pela zona de processo 1 e de seguida pela zona de processo 2, compostas por 4 e 3 pisos respetivamente. O ar comprimido, em ambas as misturas, é responsável pelo transporte e encaminhamento da matéria-prima para o piso correspondente, que será libertado, de acordo com a necessidade, para a devida misturadora. Após este processo, e uma vez o produto final concluído, este é enviado manualmente para a zona de embalagem.

A zona de embalagem é constituída por um anel de circulação de ar comprimido ao qual as linhas estão conectadas, possuindo cada uma destas um ponto de conexão de onde recebem o ar comprimido, sendo depois distribuído pelas máquinas que constituem essas mesmas linhas. Cada linha identificada na figura 3 possui o mesmo conjunto de máquinas: Enchedora,

Encartonadora 1, Encartonadora 2 e Paletizador (Cobot). A alimentação pneumática deste conjunto de máquinas é feita em série, isto é, o ar comprimido é recolhido pela enchedora através do ponto de conexão formado entre a linha de embalagem e o anel de distribuição de ar comprimido, de seguida é direcionado para a Encartonadora 1, subsequentemente é encaminhado para a Encartonadora 2 e, por fim, é transmitido para o Paletizador, onde o processo da linha de embalagem é finalizado.

A rede de distribuição e a central de ar comprimido, detêm, ainda, transmissores de pressão. Os transmissores de pressão P1, P2, P3, P4 e P5 estão estrategicamente localizados ao longo da central de ar comprimido e rede de distribuição, de modo a controlar a produção de ar comprimido. Para o fazer, estes transmissores estão conectados à central de gestão centralizada da central de ar comprimido (SIGMA 4.0), para onde enviam a informação recolhida.

O SIGMA 4.0 é um sistema muito completo e versátil, capaz de recolher e tratar uma grande variedade de informação relevante sobre o funcionamento da central de ar comprimido. Contudo, a empresa, aquando da aquisição do sistema, optou por um pacote mais económico que consiste apenas em funções básicas, não contemplando softwares de medição e visualização de diversos dados, como é o caso do caudal e consumo elétrico, entre outros. Por este motivo os dados relativos ao consumo elétrico da central de ar comprimido foram recolhidos através do sistema STRADA.

4 Análise do Consumo Energético

4.1 Recolha de dados

Os dados para o trabalho foram recolhidos através do STRADA, software que permite recolher dados, registando-os em forma de tabela e por ordem cronológica. Este é o sistema que se compara ao sistema de faturação do fornecedor de energia e apresenta um erro inferior a 0,3%. Os dados recolhidos através deste software foram:

- O consumo em kWh geral da fábrica;
- O consumo em kWh da central de ar comprimido;
- O custo da eletricidade em € geral da fábrica;
- O custo em € da central de ar comprimido.

O STRADA recolhe a informação dos contadores de energia que estão colocados estrategicamente ao longo da distribuição da rede elétrica do site. Assim conseguimos ter leituras independentes de cada área, como por exemplo as leituras de energia elétrica total e as leituras de energia elétrica utilizada para a produção de ar comprimido. Estes dados serão úteis no apuramento dos gastos com o consumo de energia elétrica necessária para o funcionamento da central de ar comprimido e, de igual modo, dos gastos com o consumo de energia elétrica geral da fábrica, o que permitirá uma análise relativa de ambos.

Para a realização desta auditoria foi ainda necessário reunir dados da produção mensal em toneladas durante o período entre os meses de setembro de 2023 e de novembro de 2024. Estes dados foram disponibilizados pelo departamento da produção.

4.2 Dados da produção

Na tabela 8 encontram-se os dados disponibilizados pelo departamento de produção relativamente à produção mensal durante o período de setembro de 2023 a novembro de 2024:

Tabela 8 – *Volume de Produção Mensal em Toneladas*

Ano	Mês	Produção em Toneladas
2023	Setembro	4183,20
	Outubro	3890,38
	Novembro	4768,85
	Dezembro	4810,68
2024	Janeiro	3764,88
	Fevereiro	3932,21
	Março	3848,54
	Abril	3974,04
	Maio	4936,18
	Junho	3472,06
	Julho	4225,03
	Agosto	3764,88
	Setembro	4978,01
	Outubro	4978,01
	Novembro	3723,05

4.3 Consumo Energético do Ar Comprimido em Relação ao Consumo Total da Unidade Fabril

Para analisar o consumo elétrico do ar comprimido relativamente ao consumo elétrico total da unidade fabril, foram criados dois gráficos com os dados recolhidos que correspondem ao consumo em kWh da unidade fabril relativamente ao consumo em kWh da central de ar comprimido e ao custo em € da unidade fabril relativamente ao consumo em € da central de ar comprimido relativas ao mês de setembro de 2023, respetivamente figuras 4 e 5.

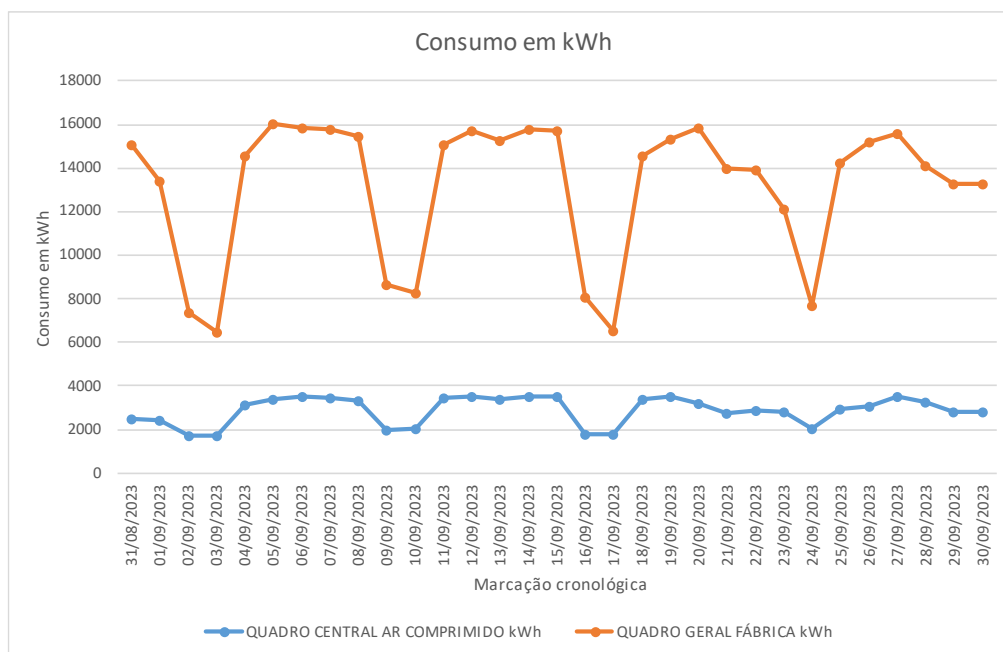


Figura 4 – Gráfico do Consumo em kWh Unidade Fabril / Central Ar Comprimido

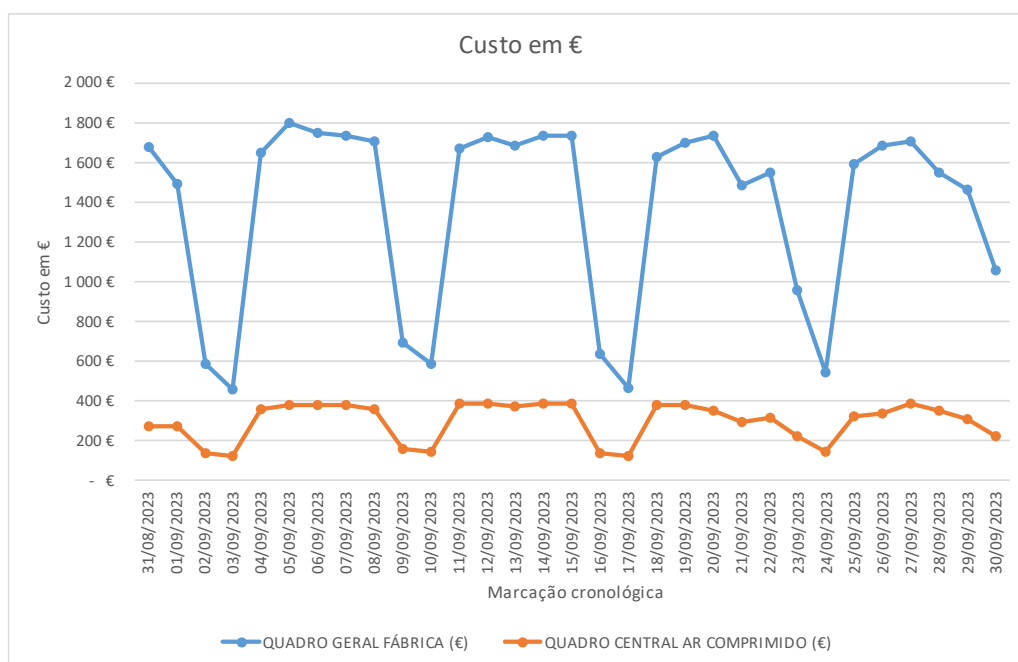


Figura 5 – Custo em € Unidade Fabril / Central Ar Comprimido

O impacto que a produção de ar comprimido tem em relação ao consumo de energia geral da fábrica é de 21% em período laboral e de 24% em período não laboral. Isto representa um custo médio em dias de laboração de 354,72€/dia e um custo médio em dias de não laboração de 157,46€/dia.

4.4 Produção de Ar Comprimido Durante o Período de Laboração:

A tabela 9 apresenta a distribuição dos períodos laborais e não laborais ao longo da semana de forma a estabelecer, posteriormente, os consumos que correspondem aos diferentes períodos:

Tabela 9 – Ciclo de Laboração Semanal (h)

Ciclo de Laboração Semanal (h)							
Turno	Domingo	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado
Noturno		00:00 às 07:00	23:00 às 07:00	23:00 às 07:00	23:00 às 07:00	23:00 às 07:00	
Manhã		07:00 às 15:00	07:00 às 15:00	07:00 às 15:00	07:00 às 15:00	07:00 às 15:00	
Tarde		15:00 às 23:00	15:00 às 23:00	15:00 às 23:00	15:00 às 23:00	15:00 às 23:00	

Podemos observar que temos dois cenários de laboração durante a semana que são apresentados na tabela 10:

Tabela 10 – Laboração / Não Laboração.

Período	Início	Fim
Laboração	Segunda-feira às 00:00	Sexta-feira às 23:00
Não Laboração	Sexta-feira às 23:00	Domingo às 00:00

Perante estes cenários foram construídos diversos gráficos representativos de cada um deles relativamente ao seu consumo energético em kWh e ao custo que este consumo representa. As Figuras 6 e 7 correspondem aos dados obtidos durante a semana de 03 a 09 de setembro de 2023, sendo que os dias 04 a 08 de setembro de 2023 representam o período de laboração e os dias 03 e 09 de setembro de 2023 o período de não laboração. As Figuras 8 e 9 correspondem aos dados obtidos durante os fins-de-semana do mês de setembro de 2023, ou

seja, dias que correspondem ao período de não laboração:

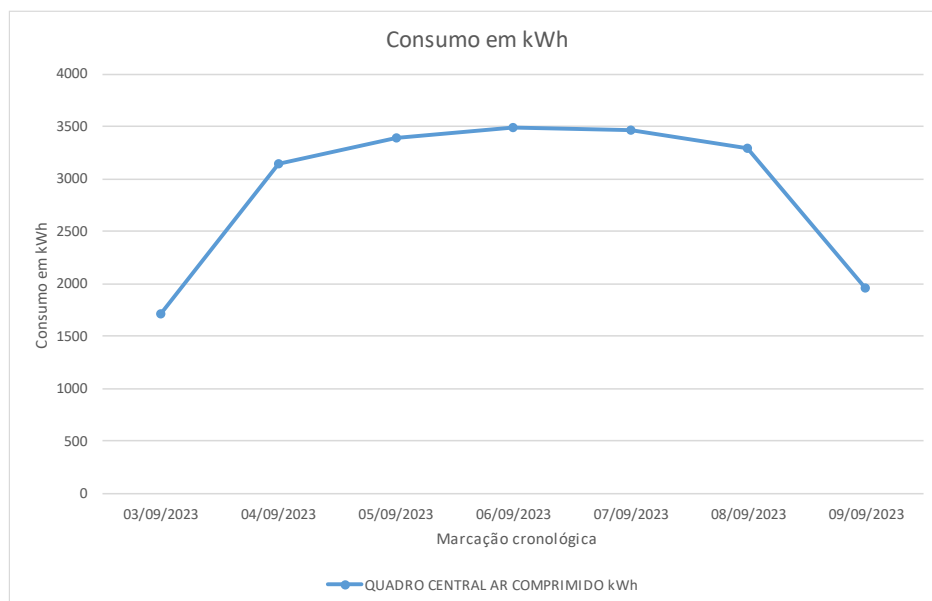


Figura 6 – Consumo em kWh semanal no período de laboração.

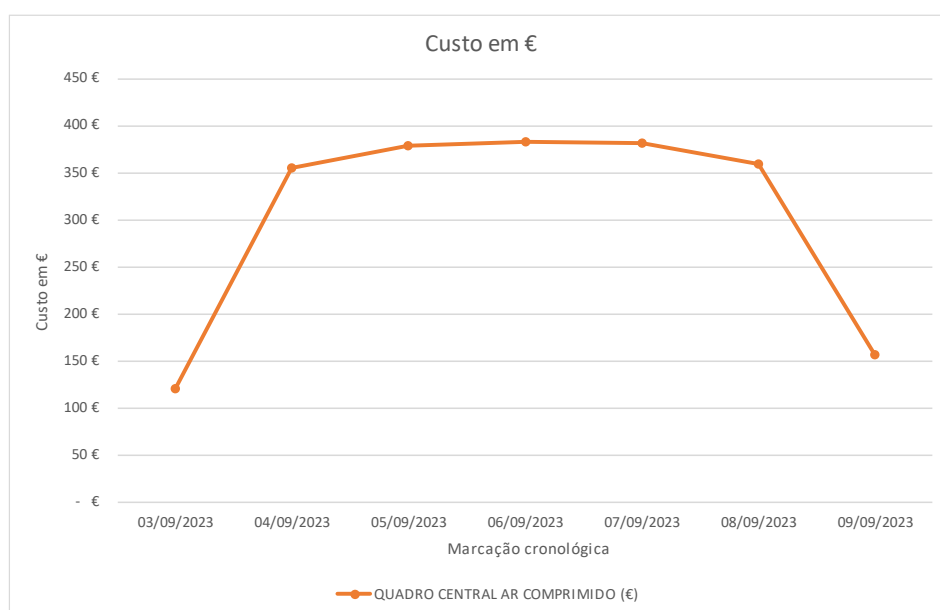


Figura 7 – Custo em € semanal no período de laboração.

A figura 6 estabelece um comportamento variável quanto ao consumo elétrico ao longo de uma semana: verifica-se que nos dias 03 e 09 de setembro 2023, isto é, períodos de não laboração, temos, à partida, um consumo superior a 1500kWh; este consumo aumenta drasticamente no primeiro dia do período de laboração (04 de setembro de 2023) para mais de 3000kWh, dado que é o arranque da fábrica, e progride até um máximo de quase 3500kWh ao terceiro dia do período de laboração (06 de setembro de 2023); neste momento o consumo elétrico declina gradualmente até atingir, no último dia do período de laboração (08 de setembro de 2023) um consumo idêntico ao registado no primeiro dia de laboração, já que as máquinas são desligadas. A figura 7 reflete este comportamento no custo monetário inerente durante o mesmo período, estabelecendo que um dia de período não laboral pode representar um custo de mais de 150€ e um dia de período laboral pode representar um custo aproximado dos 400€.

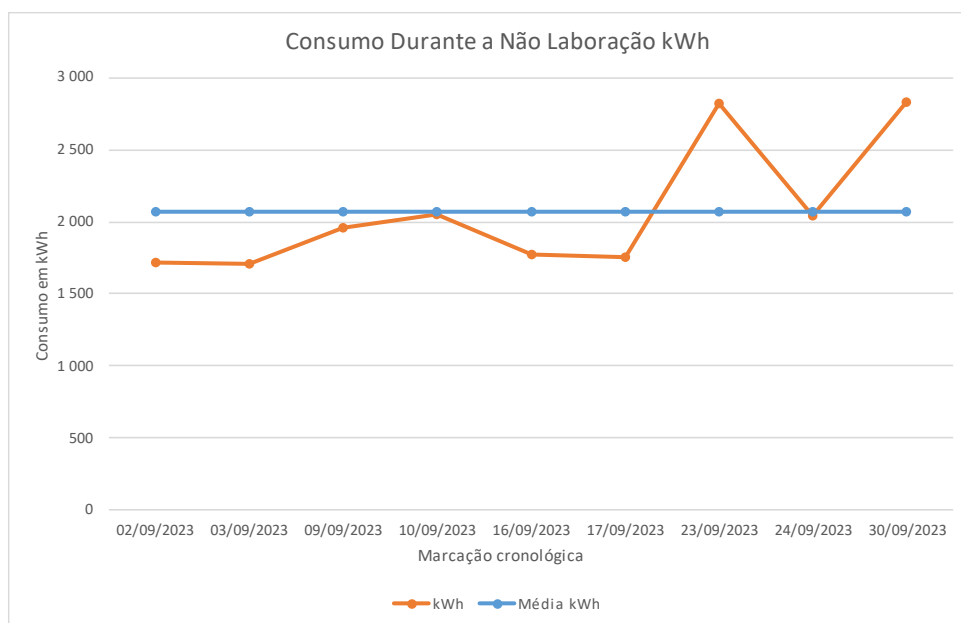


Figura 8 – Consumo em kWh durante o período de não laboração.

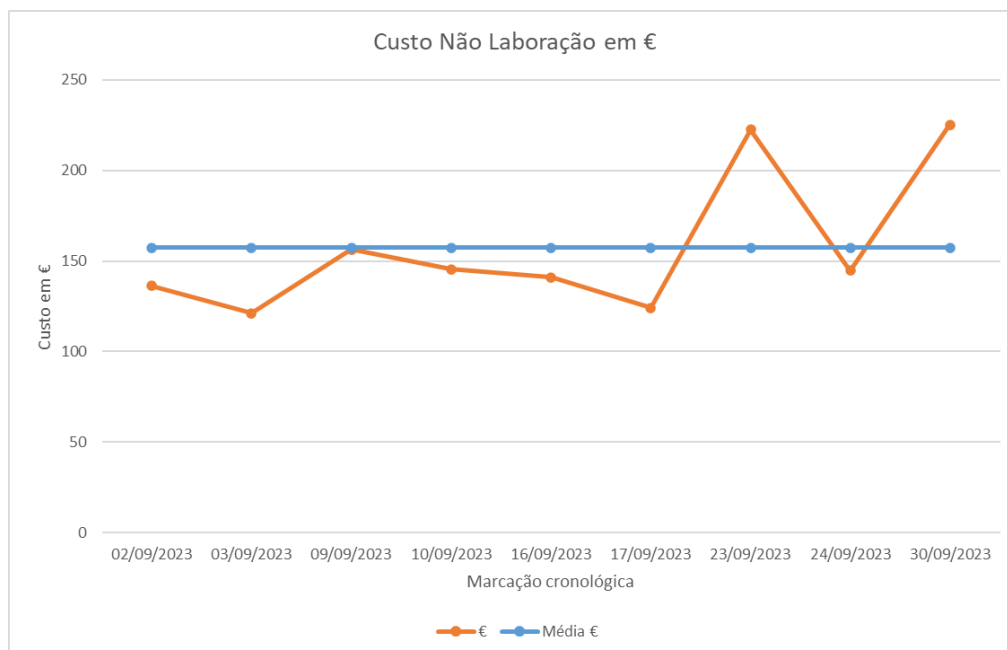


Figura 9 – Custo em € durante o período de não laboração

Na figura 8 foi possível estabelecer a média de consumo elétrico durante os períodos de não laboração de setembro de 2023, que corresponde a 2072 kWh. Na figura 9 verifica-se que este consumo elétrico médio representa um custo médio de 157,46€ por cada dia de não laboração.

Existe a necessidade de manter a central de ar comprimido a trabalhar durante o período não laboral (fim-de-semana), uma vez que é necessário ar comprimido para manter o funcionamento dos atuadores pneumáticos das válvulas controladoras da temperatura dos tanques de gordura. Contudo, o consumo resultante da operação destes equipamentos é desprezível, pelo que o valor de consumo elétrico demonstrado na Figura 8 deve ser atribuído à existência de fugas na rede de distribuição da unidade fabril.

Com esta análise, e desprezando o consumo dos equipamentos ligados durante o período de não laboração, identifica-se que o impacto das fugas na rede de ar comprimido equivale ao consumo elétrico durante o período de não laboração. Dado que as fugas se caracterizam por serem constantes ao longo do tempo e que se pode estabelecer terem um custo diário médio de 157,46€, conclui-se, portanto, que representam um custo médio mensal de 4881,26€.

5 Medidas a Implementar

5.1 Medida 1 - Substituição dos Atuadores das Válvulas de Processo

Como referido anteriormente, a central de ar comprimido encontra-se ligada durante o período não laboral para garantir o funcionamento dos atuadores pneumáticos de 2 válvulas na mistura nova e 3 na mistura antiga. Por sua vez, estas válvulas controlam a recirculação de água quente para a regulação e respetiva manutenção de temperatura em tanques de gordura, uma operação crucial para a produção do produto.

Com o apoio do departamento de engenharia, identificou-se a possibilidade de trocar os atuadores pneumáticos por atuadores elétricos, podendo, assim, a central de ar comprimido desligar-se durante o período não laboral. Esta alteração foi orçamentada pelo departamento de engenharia num valor de aproximadamente 2250€ por válvula (incluindo material, instalação e programação), isto é, um custo total de cerca 11250€ para a substituição das 5 válvulas supracitadas.

Esta medida não interfere com a laboração e ainda permite obter um payback simples e rápido, visto que atualmente, manter o funcionamento da central de ar comprimido custa, em média, 157,46€/ dia de não laboração e com um investimento de 11250€, não só se eliminam esses 157,46€/ dia de não laboração, como se recupera o valor investido ao fim de 71,5 dias de não laboração, isto é, aproximadamente 9 meses.

Atendendo a que os períodos não laborais correspondem aos fins-de-semana e que, em média, existem 4 fins-de-semana mensais, o que representa 8 dias de não laboração mensais, podemos calcular que são necessários 9 meses para amortizar o investimento.

Assim, esta é uma medida altamente viável devido à sua rentabilidade e ao seu rápido retorno económico (payback em apenas 3 trimestres).

5.2 Medida 2 - Reparação das Fugas da Rede de Ar Comprimido

5.2.1 Estado Atual da Rede

Como estabelecido anteriormente na “Análise do Consumo Energético”, a rede de ar comprimido encontra-se afetada por fugas consideráveis. Para quantificar melhor as fugas, vai analisar-se em detalhe o mês de setembro de 2023. Na figura 10 vê-se um gráfico que demonstra

o que estas fugas representam no custo energético da produção e utilização de ar comprimido através do seu custo em € durante o mês de setembro de 2023:

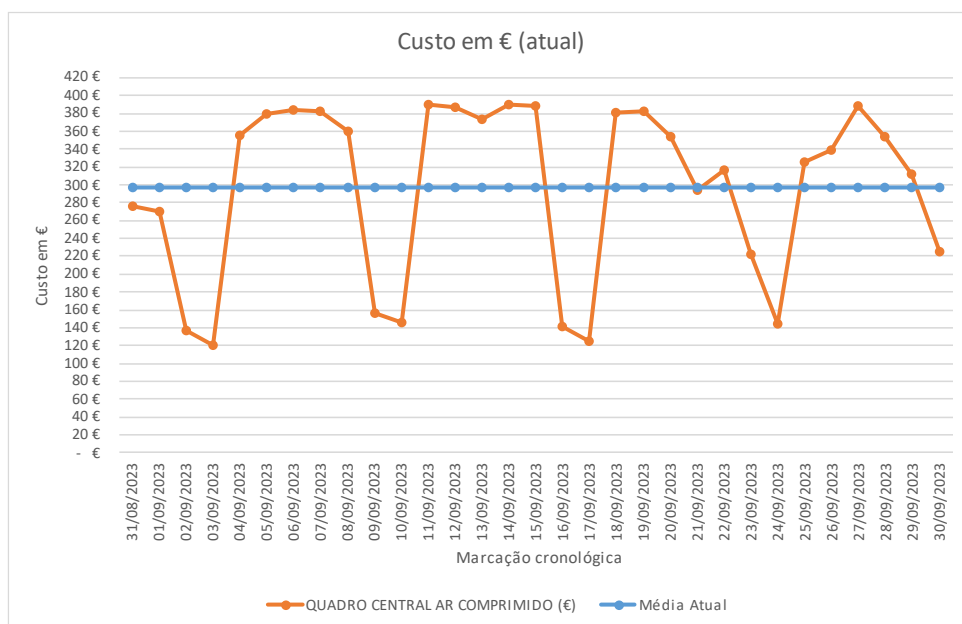


Figura 10 – Custo em € durante o mês de setembro de 2023

Com o estado atual da rede de distribuição de ar comprimido, fazendo uma análise simples, percebe-se que nos dias de não laboração, em que se pressupõe não existir consumo de ar comprimido, tem-se um consumo energético de cerca de 120€, o que se considera ser proveniente de fugas. Por isso, pretende-se demonstrar um cenário teórico de qual teria sido o custo de ar comprimido em € para o mesmo mês de setembro de 2023 caso todas as fugas existentes na rede de ar comprimido fossem eliminadas, pelo que, para o fazer, construímos o gráfico da figura 11:

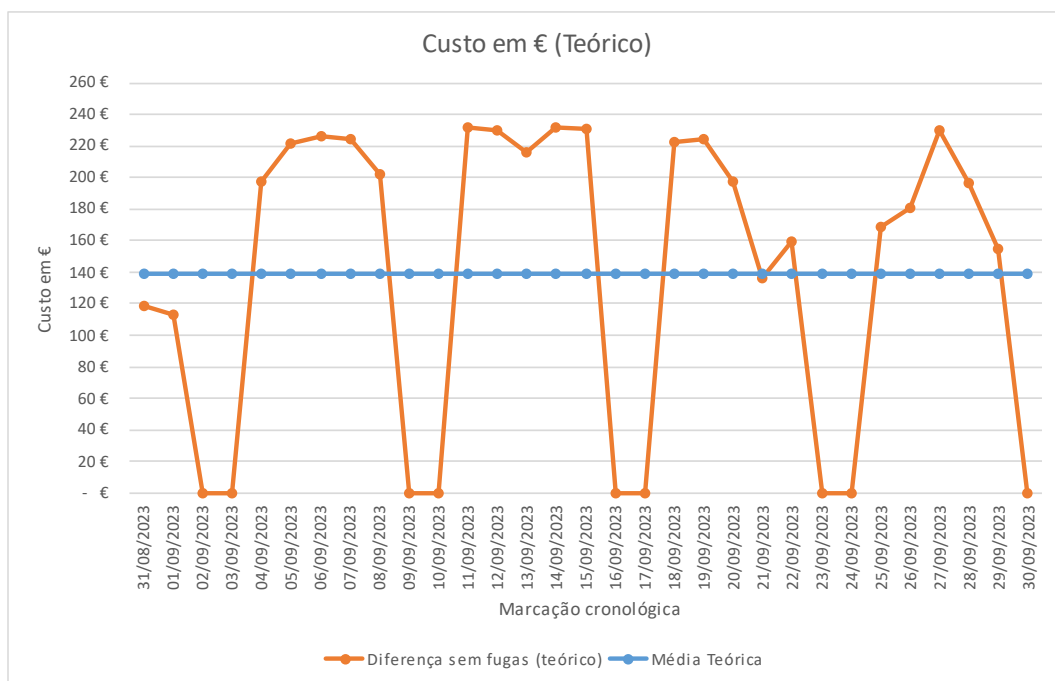


Figura 11 – Custo teórico em € durante o mês de setembro 2023

Assumindo que é possível eliminar todas as fugas, consegue-se uma redução significativa de 53,06% no custo médio por dia que equivale a menos 157,46€ por dia, ou seja, uma redução de 4723,70€ mês ou 57471,68€ ano.

Contudo, não é realista assumir que todas as fugas são completamente eliminadas e que se mantêm extintas. Por esta razão, procedeu-se à construção de um modelo de consumo realista que assume que apenas 25% das fugas existentes na rede de distribuição de ar comprimido poderiam ser eliminadas e que se manteria uma perda energética por fugas de cerca de 25%, conforme podemos ver no gráfico da figura 12:

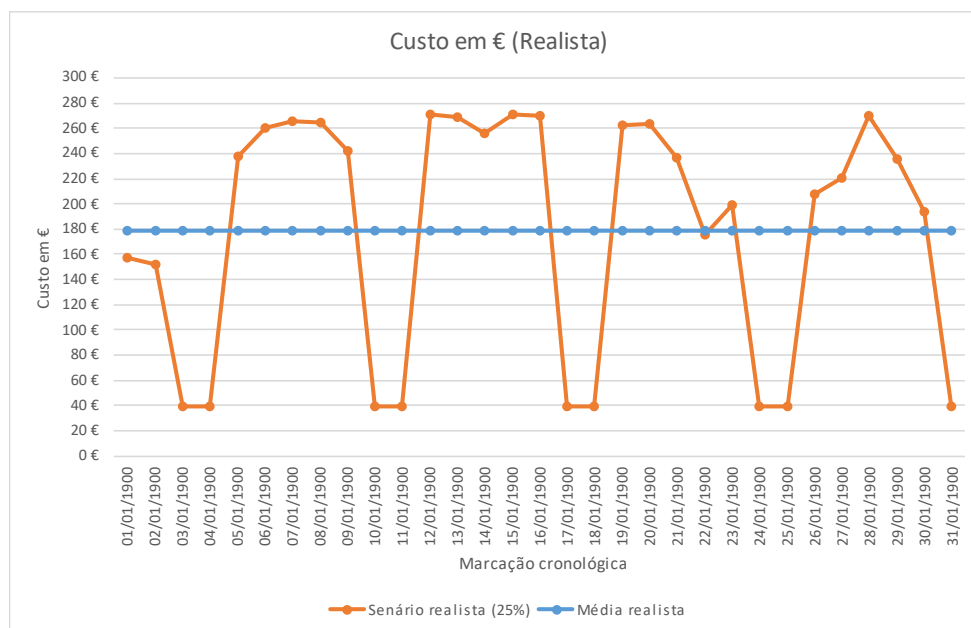


Figura 12 – Custo em € num cenário realista no período de setembro de 2023

Considerando que apenas é possível reduzir as fugas em 25%, isto representa uma redução de custos no consumo energético de 11,12% em relação ao custo atual, equivalendo a menos 39,36€ por dia, ou seja, uma redução de custos em 1220,16€ por mês ou 14641,92€ anuais.

5.2.2 Sugestão de Medidas para uma Central de Ar Comprimido Eficiente

Atendendo a que a Central de Ar Comprimido é naturalmente propensa a fugas, dado estar sujeita de forma constante a elevados níveis de pressão, movimentos e vibrações de máquinas, justifica-se que esta seja alvo de frequentes ações de manutenção. Após uma vistoria externa e cuidada onde são identificadas fugas na Rede de Distribuição do Ar Comprimido, pressupõe-se que sejam realizadas as devidas intervenções. Contudo, apenas é possível assegurar a eficiência energética da Central de Ar Comprimido a longo prazo aplicando medidas de carácter preventivo. Sugere-se, portanto, que a empresa considere criar uma rotina anual de verificação e correção das fugas detetadas.

Propõe-se como protocolo de verificação e correção de fugas de ar a contratação de um serviço externo de deteção de fugas através de um sistema de ultrassons, como por exemplo, aquele que é oferecido pela empresa VisualNoise e, ainda, a subcontratação de uma empresa responsável pela reparação de fugas de ar que atue durante os fins-de-semana (períodos de não laboração). As medidas deste protocolo, além de assegurarem a eficiência energética da Central de Ar Comprimido a longo prazo, revertem-se numa redução significativa para a empresa de

custos associados à produção de Ar Comprimido e, ainda, podem ser aplicadas sem interferir com a produção fabril.

5.3 Medida 3 - Regulação do Setpoint da Central de Ar Comprimido

Habitualmente, a central de ar comprimido encontra-se a operar a uma pressão 7,5 bar. De modo a perceber se esta medida de pressão é a mais adequada ou poderia sofrer alguma alteração/ ajuste, recolheu-se o setpoint de trabalho de cada linha para posterior análise, que se apresenta na tabela 11:

Tabela 11 – *Lista do parque de máquinas e setpoint(bar) de trabalho*

Linha	Setpoint de trabalho (bar)
C1	5
C8	5
CR10	4,5
Handtman Baldes	5,5
Handtman Eurocontainer	5,5
Rafama	5,5
BH10	5
CR12A	5
BH12	5,5
BH13	5,5
BH14	5,5
CR12B	5
CR8	5
CR9	5
CR2	7
CR11	5
CR4	5
BH7	4,5
BH3	4,5
BH4	4,5
BH5	4,5

BH6	4,5
BH9	4,5
Zona processo 1	4
Zona processo 2	4

Com os dados dos setpoints recolhidos, foi possível verificar que a rede está a operar acima da necessidade do parque de máquinas, uma vez que a linha que requer uma maior pressão de ar comprimido de modo a estar operacional é a linha CR2 que apenas necessita de 7 bar, enquanto o setpoint está regulado a 7,5 bar.

Por isso, foi recomendado ajustar a central de ar comprimido para 7 bar, que equivale a uma redução de 6,67% na pressão da rede de ar comprimido.

Esta medida não pressupõe investimento, uma vez que se pode regular o setpoint da central de ar comprimido recorrendo aos colaboradores da empresa e durante o período laboral.

Fazendo uma análise mais profunda e utilizando os dados recolhidos das linhas de produção, verifica-se ainda, que entre a linha que necessita de maior pressão para assegurar o seu funcionamento e aquelas que a sucedem imediatamente, existe uma diferença considerável de 1,5 bar:

$$7bar - 5,5bar = 1,5bar$$

Posto isto, considerou-se a hipótese de poder reduzir a pressão libertada para a linha CR2 também para o valor de 5,5 bar e sem comprometer o seu funcionamento, como acontece com tantas outras na unidade fabril. Esta hipótese foi corroborada pelo Departamento de Engenharia após ter feito uma análise à linha CR2, sendo, portanto, possível implementar algumas alterações nesta linha de modo que esta apenas necessite de uma pressão de 5,5 bar de ar comprimido para operar. Contudo, o Departamento de Engenharia encontra-se num processo de orçamentação para conseguir viabilizar e implementar estas alterações.

A Agência para a Energia (ADENE, 2014) divulga uma tabela que determinou o caudal das fugas com base na pressão do ar comprimido e no diâmetro do orifício da fuga (tabela 12). Com esta informação podemos analisar um cenário que nos permite calcular os ganhos em consumo elétrico e custo associado apenas reduzindo a pressão da distribuição de ar comprimido, isto é, excluindo qualquer tipo de intervenção e eliminação de fugas.

Tabela 12 – Valores estipulados para uma fuga de acordo com o seu diâmetro e pressão.
(ADENE,2014)

Pressão Absoluta (bar)													
D (mm)	2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar	7 bar	8 bar	9 bar	10 bar	12 bar	15 bar	20 bar	30 bar
0,1	0,00027	0,00036	0,00045	0,00054	0,00054	0,00072	0,00081	0,0009	0,00099	0,00117	0,00144	0,00188	0,00279
0,2	0,00109	0,00145	0,00181	0,00217	0,00252	0,00288	0,00324	0,0036	0,00396	0,00468	0,00575	0,00755	0,0111
0,3	0,00245	0,00326	0,00406	0,00487	0,00568	0,00649	0,0073	0,008105	0,00891	0,0105	0,013	0,017	0,0251
0,5	0,00681	0,00905	0,0113	0,0135	0,0158	0,018	0,0203	0,02255	0,0248	0,0292	0,036	0,0472	0,0696
1	0,0272	0,0362	0,0452	0,0541	0,0631	0,0721	0,0811	0,09005	0,099	0,117	0,144	0,188	0,279
1,5	0,0613	0,0815	0,102	0,122	0,142	0,162	0,183	0,203	0,223	0,263	0,323	0,425	0,627
2	0,109	0,145	0,181	0,217	0,252	0,288	0,324	0,36	0,396	0,468	0,575	0,755	1,11
3	0,245	0,326	0,406	0,487	0,568	0,649	0,73	0,8105	0,891	1,05	1,3	1,7	2,51
4	0,436	0,579	0,723	0,865	1,01	1,15	1,3	1,4425	1,585	1,87	2,3	3,02	4,45
5	0,681	0,905	1,13	1,35	1,58	1,8	2,03	2,255	2,48	2,93	3,6	4,72	6,96
6	0,981	1,304	1,63	1,95	2,27	2,6	2,92	3,245	3,57	4,22	5,18	6,8	10
8	1,75	2,32	2,89	3,46	4,04	4,62	5,19	5,765	6,34	7,5	9,2	12,1	17,8
10	2,72	3,62	4,52	5,41	6,31	7,21	8,11	9,005	9,9	11,7	14,4	18,8	27,9
12	3,92	5,22	6,5	7,78	9,09	10,4	11,68	12,99	14,3	16,9	20,7	27,2	40,1
15	6,13	8,15	10,2	12,2	14,2	16,2	18,25	20,275	22,3	26,3	32,3	42,5	62,7
20	10,9	14,5	18,1	21,7	25,2	28,8	32,4	36	39,6	46,8	57,5	75,5	111
25	17	22,6	28,2	33,8	39,5	45	50,7	56,3	61,9	73,1	90	118	
30	24,5	32,6	40,6	48,7	56,8	64,9	73	81,05	89,1	105	130		
35	33,4	44,4	55,3	66,3	77,3	88,3	99,3	110,15	121	144			
40	43,6	57,9	72,3	86,5	101	115	130	144,5	159				
45	55,2	73,3	91,3	110	128	146							
50	68,1	90,5	113	135									
55	82,4	109,5	136										
60	98,1	130,4											

Assumindo um cenário em que as fugas do sistema de distribuição de ar comprimido apresentam um diâmetro correspondente a 1mm, e recorrendo à figura 13, admitimos que as fugas têm um caudal de 0.0721 m³/min, uma vez que a rede opera a 7 bar. Considerando uma redução de 1,5 bar, ou seja, colocando a rede de distribuição de ar comprimido a operar a 5,5 bar, as fugas passam a apresentar um caudal médio de 0,0586 m³/min. Assim, inferimos uma redução do caudal das fugas existentes em 19%, o que representa uma redução hipotética no custo elétrico de 0,42€ por tonelada produzida, conforme se pode verificar na tabela 12.

Tabela 13 - Dados de produção (ton), consumo (kWh) e custo (€) referentes a setembro de 2023 e cenário hipotético

Mês	Toneladas produzidas	Consumo em kWh	Custo em €	Custo por €/ton
Setembro de 2023	4183,20	89095,43	9198,84	2,20
Hipotético (-18%)	4183,20	72167,30	7451,06	1,78

Esta análise permite que, junto do Departamento de Engenharia, e uma vez detendo os orçamentos para a alteração da linha CR2, se possa apurar o payback da implementação da medida em questão e, consequentemente, a sua viabilidade.

A regulação do setpoint da central de ar comprimido também revela impacto no consumo elétrico necessário para que os compressores possam produzir ar comprimido. Na figura 13 podemos ver este impacto ao analisar a linha vermelha (Two Stage), que corresponde aos compressores da unidade fabril, sendo que estes são de estágio 2.

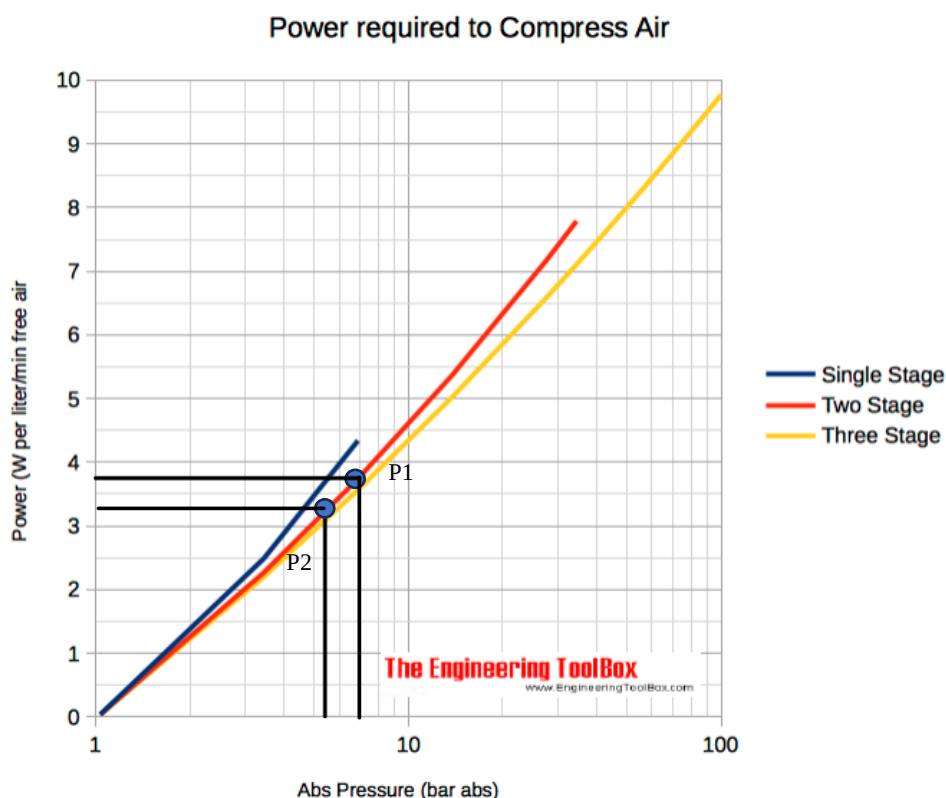


Figura 13 – Potência requerida para comprimir ar (THE ENGINEERING TOOLBOX, 2024)

Observando a linha vermelha (Two Stage) percebemos que quanto maior é a pressão do setpoint, maior é a potência requerida para comprimir ar. Assim, com o setpoint a trabalhar a 7 bar, há um consumo de 3,8 watts/l/min, contudo, se esta pressão for reduzida para 5,5 bar, também o consumo elétrico reduz, neste caso, para 3,3 watts/l/min. Esta redução corresponde a 13% do consumo de energia elétrica por litro/min, isto é, um valor de 77513,02kWh para o mês de setembro de 2023, o que equivale a um custo mensal de 8002,99€. Assim, a aplicação desta medida refletir-se-ia numa poupança de 1195,85€ para o mês em estudo.

5.4 Melhoria Implementada

No decorrer do desenvolvimento desta auditoria, e uma vez as melhorias propostas identificadas, foi possível implementar, em maio de 2024, a redução de pressão do setpoint, o que corresponde à Medida 3 supracitada. Esta medida não acarretou quaisquer custos extra à empresa e consistiu no reajuste do setpoint da central de ar comprimido de 7,5 bar para 7 bar, uma redução de 0,5 bar. Assim, o custo/benefício desta estratégia foi altamente rentável, já que não representou esforço económico para a empresa.

Para apurar os ganhos desta implementação foi necessário realizar uma análise comparativa dos dados de produção de um mês laboral antes da implementação desta medida em relação aos dados de produção de um mês laboral após a implementação desta medida. Evidentemente os meses escolhidos para esta análise assemelham-se do ponto de vista de quantidade de produção e são estes, respetivamente, o mês de setembro de 2023 e o mês de julho de 2024, conforme se pode verificar na tabela 13.

Tabela 14 – *Dados de produção (ton), consumo (kWh) e custo (€) referentes a setembro de 2023 e julho de 2024*

Mês	Toneladas produzidas	Consumo em kWh	Custo em €	Custo por €/ton
Setembro de 2023	4183,20	89095,43	9198,84	2,20
Julho de 2024	4225,03	87826,71	87826,71	2,15

A implementação desta medida resultou numa diferença positiva de 0,05€ em consumo energético por tonelada produzida, o que representa uma redução de 2,4% da fatura elétrica do

consumo de ar comprimido da empresa por cada tonelada produzida.

Em suma, esta medida demonstrou-se altamente viável para a unidade fabril por ser uma medida simples, fácil e rápida de implementar, que não acarretou custos adicionais para a empresa ou interferiu com a sua produção e, ainda, permitiu uma redução de custos significativa e de forma quase imediata.

6 Conclusão

A auditoria energética ao sistema de ar comprimido revelou-se uma ferramenta indispensável para a empresa, proporcionando uma visão clara das ineficiências e das oportunidades de melhoria no consumo energético da unidade fabril. Através da identificação de fugas e sobrecargas no sistema de ar comprimido, foi possível propor medidas corretivas que resultaram em significativas economias de energia e custos, além de contribuírem para a sustentabilidade da empresa, reduzindo o impacto ambiental e melhorando a eficiência operacional e ainda, auxiliando a empresa a ser mais competitiva no seu mercado de atuação.

A execução deste trabalho envolveu a comunicação com vários departamentos e mobilizou uma quantidade significativa de recursos humanos, fatores que limitaram em diversas ocasiões a obtenção dos dados necessários, considerando que os colaboradores da empresa carecem de disponibilidade e se encontram sobrecarregados. Ainda assim, a empresa demonstrou abertura para a realização desta auditoria, uma vez que compreendeu ser um pequeno esforço do qual pôde beneficiar consideravelmente. De facto, apesar das medidas propostas parecerem simples e de execução pouco complexa, o seu impacto revelou-se bastante significativo.

Além disso, a auditoria energética destacou a importância de uma gestão eficiente dos recursos energéticos para garantir a competitividade e a viabilidade económica da empresa a longo prazo. A implementação das medidas propostas, não só melhorou a eficiência operacional, mas também reforçou o compromisso da empresa com a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental. Portanto, a auditoria energética é uma ferramenta valiosa e essencial para o sucesso contínuo da empresa.

Por fim, todo o processo de formação académica, desde o curso à realização da presente auditoria, foi repleto de aprendizagens cruciais ao meu desenvolvimento profissional e pessoal: tive oportunidade de aguçar o meu sentido crítico e, ainda, aperfeiçoar a minha capacidade de resolução de problemas, qualidades que contribuíram para um sentimento de autorrealização.

IX. Bibliografia

ADENE (2014). *Medidas de eficiência energética: Sistemas de ar comprimido*. ERSE. https://www.erse.pt/media/wqvjvee2/mee_sistemasarcomprimido_adene_ppec2013-2014.pdf (Tabela 12)

Atlas Copco Airpower NV. (2019). *Compressed air manual* (9ª ed.). [Atlas Copco Airpower NV](#)

Baker, M. (2015). Automation and Compressed Air Systems. *Journal of Industrial Automation*, 18(1), 22-34.

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2014). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education.

Confederação Empresarial de Portugal (CIP) (2024). **O custo da energia elétrica para o consumo industrial em Portugal**. Retirado de <https://www.cip.org/energia-eletrica-empresas>

Davis, J. (2018). The Evolution of Industrial Air Compressors. *Industrial Machinery Journal*, 12(3), 45-58.

Deutsches Institut für Normung. (2008). DIN ISO 1217: Compressors - Main Dimensions and Functional Parameters. Beuth Verlag.

Direção-Geral de Energia e Geologia (2024). *Manual de Auditorias Energéticas na Indústria*. <https://sgcie.pt/manual-de-auditorias-energeticas>

Johnson, L. (2017). Advances in Screw and Piston Compressors. *Technology Review*, 29(2), 65-77.

Kaeser, 2024, Sigma Air Manager 4.0
[https://pt.kaeser.com/Media/Sigma Air Manager 4.0 DarkModus 1400x1240pix%20%281%29 35-117098-660x584.webp](https://pt.kaeser.com/Media/Sigma_Air_Manager_4.0_DarkModus_1400x1240pix%20%281%29_35-117098-660x584.webp)

METRON (2024). **Ar comprimido na indústria: quais são as otimizações energéticas?** Retirado de <https://www.metron.energy/pt/blog/ar-comprimido-industria/>

Proquimia (2024). **O ar comprimido na indústria alimentar**. Retirado de https://owl.purdue.edu/owl/research_and_citation/apa_style/apa_formatting_and_style_guide/index.html

Reis, P. (2023). A importância e as fases de uma auditoria energética. Portal Energia. <https://www.portal-energia.com/a-importancia-e-fases-de-uma-auditoria-energetica/>

Savaş Özdemir, C. (2015). Energy Efficiency in the Compressed Air Systems. *Procedia Engineering*, 123, 437–444. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.066>

Seider, W. D., & Seader, J. D. (2010). *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis, and Evaluation* (Vol. 3). Wiley.

Smith, R. (2020). High-Pressure Air Systems in Industry. *Engineering Today*, 23(4), 89-102.

The Engineering Toolbox (2024). *Potência requerida para comprimir ar*. Retirado de https://www.engineeringtoolbox.com/horsepower-compressed-air-d_1363.html

Thompson, P. (2021). Applications of Compressed Air in Modern Industry. *Industrial Applications Journal*, 34(5), 123-136.

Wesseling, E. C. A. (2001). *Pneumatic Conveying of Solids: A theoretical and practical approach*. Springer.