



# Implementação de Estratégias de Gestão e Eficiência Energética em Processos Industriais

JÓNATAS JOSÉ DE OLIVEIRA JESUS

Setembro de 2025

**Implementação de Estratégias de Gestão e  
Eficiência Energética em Processos Industriais**

**Jónatas José de Oliveira Jesus**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em  
Gestão Industrial**

**Orientador: Eduardo Gil Da Costa**

**Júri:**

Presidente:

[Nome do Presidente, Categoria, Escola]

Vogais:

[Nome do Vogal1, Categoria, Escola]

[Nome do Vogal2, Categoria, Escola] (até 4 vogais)

Porto, setembro 2025



# Agradecimentos

Começo por agradecer à minha família. Aos meus pais, pelo apoio incondicional e por nunca terem medido esforços para me dar as melhores condições e oportunidades. Aos meus avós, pelo carinho, pela motivação constante e pelo exemplo que sempre representaram, espero que esta conquista seja motivo de orgulho não apenas pela conclusão desta etapa, mas também pela pessoa que me tornei.

Agradeço todos os professores do ISEP pelo conhecimento transmitido e pela dedicação demonstrada ao longo destes anos, com uma referência especial ao meu orientador, Professor Eduardo Gil da Costa, pelo acompanhamento, disponibilidade e orientação prestados ao longo desta dissertação.

Ao Eng.º João Ribeiro, o meu sincero agradecimento pela oportunidade de assumir este projeto, bem como pelo acompanhamento e confiança que sempre demonstrou.

Ao Eng.º Celso Teixeira, deixo um agradecimento muito especial pelo contributo fundamental, pela paciência nas explicações, pela disponibilidade constante e pelo tempo que investiu no meu percurso até à conclusão deste trabalho, assegurando o sucesso do mesmo.

Aos Eng.ºs Leandro Martins e Bruno Mendes, quero deixar um agradecimento especial pela compreensão e pela forma como sempre estiveram disponíveis para me apoiar durante este projeto.

Quero agradecer a toda a equipa técnica da Manutenção Industrial Transversal pela disponibilidade e companheirismo demonstrado em todas as fases do projeto. Equipas assim são poucas, e foi uma sorte poder contar convosco neste projeto.

Por fim, quero agradecer aos meus colegas e grandes amigos de curso, João Barros, Jorge Faria, Bruno Vilela e Miguel Novais, pela amizade e companheirismo desde o início desta caminhada. Juntos vivemos muitos bons momentos e criámos memórias que ficarão para sempre como uma das maiores conquistas desta fase da minha vida.



# Resumo

A presente dissertação tem como objetivo analisar e otimizar o desempenho energético de equipamentos e processos industriais na EFACEC, contribuindo para a redução de consumos e custos operacionais, bem como para o alinhamento da empresa com as metas de sustentabilidade. Para este efeito, foram monitorizados em detalhe consumos de eletricidade e gás natural, recorrendo a uma plataforma de recolha de dados que permitiu caracterizar o funcionamento dos sistemas e identificar oportunidades de melhoria. A metodologia aplicada incluiu a análise comparativa de períodos antes e após intervenções específicas, a avaliação do funcionamento real dos equipamentos e a validação das poupanças energéticas e económicas associadas.

As intervenções realizadas incidiram sobre diferentes equipamento e instalações de suporte à produção, envolvendo modernização tecnológica, otimização de processos e correção de ineficiências. Estas medidas permitiram alcançar reduções expressivas no consumo de eletricidade e de gás natural, traduzindo-se também numa diminuição das emissões de dióxido de carbono. Os resultados obtidos confirmam que a eficiência energética constitui uma oportunidade estratégica para a indústria, ao combinar benefícios ambientais com ganhos económicos e ao reforçar a competitividade através de uma gestão mais sustentável dos recursos.

**Palavras-chave:** Eficiência energética, Sustentabilidade, Monitorização energética, Processos industriais, Otimização, Descarbonização



# Abstract

The present dissertation aims to analyze and optimize the energy performance of industrial equipment and processes at EFACEC, contributing to the reduction of consumption and operating costs, as well as to the company's alignment with sustainability goals. For this purpose, electricity and natural gas consumption were monitored in detail through a data collection platform that enabled the characterization of system operation and the identification of improvement opportunities. The methodology applied included the comparative analysis of periods before and after specific interventions, the evaluation of actual equipment performance and the validation of associated energy and economic savings.

The interventions carried out focused on different support systems for production, involving technological modernization, process optimization and the correction of inefficiencies. These measures enabled significant reductions in electricity and natural gas consumption, while also contributing to a decrease in carbon dioxide emissions. The results confirm that energy efficiency represents a strategic opportunity for industry, as it combines environmental and economic benefits with increased competitiveness through more sustainable resource management.

**KEYWORDS:** Energy efficiency, Sustainability, Energy monitoring, Industrial processes, Optimisation, Decarbonisation



# Índice

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Abstract.....	vii
Índice.....	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Acrónimos e Símbolos.....	xxiii
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização .....	1
1.2. Objetivos .....	1
1.3. Metodologia .....	2
1.4. Empresa de acolhimento .....	3
1.5. Estrutura do Relatório .....	4
2. Revisão Bibliográfica .....	5
2.1. Legislação energética .....	5
2.1.1. Políticas de eficiência energética na EU.....	5
2.1.2. Políticas de eficiência energética em Portugal .....	8
2.1.3. Norma NP EN ISO 50001:2018 – Sistemas de gestão de energia .....	9
2.2. Consumo Energético .....	10
2.2.1. Consumo energético em Portugal .....	11
2.2.2. Consumo energético na indústria.....	13
2.3. Eficiência energética .....	15
2.3.1. Eficiência energética na indústria .....	15
2.3.2. Casos de Estudo – Iniciativas e aplicações no âmbito da eficiência energética ..	20
3. Desenvolvimento .....	23
3.1. Análise inicial e enquadramento técnico-energético .....	23
3.1.1. Levantamento de necessidades e equipamentos selecionados.....	23
3.1.2. Parceiro Tecnológico - <i>Sensorfact</i> .....	26
3.1.3. Descrição dos processos analisados e identificação das oportunidades de melhoria .....	33
3.1.3.1. Sistema de ar comprimido - Arroiteia .....	34
3.1.3.2. Sistema de ar comprimido – Maia.....	40
3.1.3.3. Unidade de Despoeiramento – Core .....	43
3.1.3.4. Unidade de Despoeiramento – Shell.....	48
3.1.3.5. Cabine de Pintura PT .....	51

3.1.3.6.	Linha de Pintura Aérea .....	54
3.1.3.7.	Chiller do Core e Chiller do Laboratório PT .....	58
3.2.	Intervenções realizadas nos equipamentos.....	61
3.2.1.	Sistema de ar comprimido – Arroteia.....	62
3.2.2.	Sistema de ar comprimido – Maia .....	63
3.2.3.	Unidade de Despoeiramento – Core .....	66
3.2.4.	Unidade de Despoeiramento – Shell .....	67
3.2.5.	Cabine de Pintura PT.....	68
3.2.6.	Linha de Pintura Aérea.....	70
3.2.7.	Chiller do Core e Chiller do Laboratório PT.....	73
3.3.	Avaliação de resultados .....	76
3.3.1.	Sistema de ar comprimido – Arroteia.....	77
3.3.2.	Sistema de ar comprimido – Maia .....	85
3.3.3.	Unidade de Despoeiramento – Core .....	89
3.3.4.	Unidade de Despoeiramento – Shell .....	92
3.3.5.	Cabine de Pintura PT.....	95
3.3.6.	Linha de Pintura Aérea.....	102
3.3.7.	Chiller Core & Chiller Laboratório PT .....	107
3.4.	Análise crítica .....	114
4.	Conclusão.....	119
4.1.	Conclusões finais.....	119
4.2.	Limitações e trabalhos futuros.....	120
	Referências.....	121
	Declaração de Integridade .....	125
	Apêndice A – Objetivos, Metas e Medidas PNEC 2030.....	127
	Apêndice B – Lista de Equipamentos Monitorizados e Respetivas Características .....	133
	Apêndice C – Análise Inicial de Consumos SAC Arroteia .....	135
	Apêndice D – Custo “Off-Hours” SAC Maia.....	137
	Apêndice E – Análise Inicial de Consumos SAC Maia.....	138
	Apêndice F – Poupanças Estimadas Despoeiramento Core.....	140
	Apêndice G – Análise Inicial de Consumos Despoeiramento Core .....	142
	Apêndice H – Poupanças Estimadas Despoeiramento Shell .....	144
	Apêndice I – Análise Inicial de Consumos Despoeiramento Shell .....	145
	Apêndice J – Análise Inicial de Consumos Cabine PT.....	147
	Apêndice K – Layout Linha de Pintura Aérea .....	151

Apêndice L – Poupanças Estimadas Linha de Pintura Aérea .....	153
Apêndice M – Análise Inicial de Consumos Linha de Pintura Aérea .....	155
Apêndice N – Poupanças Estimadas Chiller Core & Chillers Lab. PT.....	158
Apêndice O – Análise Inicial de Consumos Chiller Core & Chillers Lab. PT.....	160
Anexo A – Especificação Técnica - HSD Mechatronics, Modelo ES929 4P.....	164
Anexo B – Layout da Área – Despoeiramento Core .....	166
Anexo C – Cálculo de Perda de Carga - Despoeiramento Core.....	167
Anexo D – Layout da Área – Despoeiramento Shell .....	169
Anexo E – Cálculo de Perda de Carga – Despoeiramento Shell .....	170
Anexo F – Evolução Térmica Mensal no Porto (novembro 2024 – março 2025) .....	172



# Lista de Figuras

Figura 1 - Modelo de AR, adaptado de (Wohlin & Runeson, 2021).....	3
Figura 2 - Logo da empresa Efacec Power Solutions, S.A. ....	4
Figura 3 - Armazenamento de gás natural na EU (Comissão Europeia, 2024c).....	7
Figura 4 - Ciclo PDCA, adaptado de (International Organization for Standardization, 2018)...	10
Figura 5 - Evolução dos consumos de energia primária e final (ktep), adaptado de (DGEG, 2024a) .....	11
Figura 6 - Consumo de Energia Primária e Final em 2023, adaptado de (DGEG, 2024a) .....	11
Figura 7 - Origem da energia elétrica fornecida ao setor empresarial em Portugal no 2.º trimestre de 2025 pela EDP, adaptado de (EDP, 2025) .....	12
Figura 8 - Consumo de energia final em 2023, adaptado de (DGEG, 2024a) .....	13
Figura 9 - Consumo de eletricidade por utilização final na indústria norte americana em 2018, adaptado de (Patterson et al., 2022) .....	14
Figura 10 - Variação da Potência vs Pressão, adaptado de (Copco, 2015) .....	18
Figura 11 - Compressor de velocidade fixa vs velocidade variável, adaptado de (ADENE, 2016) .....	19
Figura 12 - Power analyzer composto por módulo transmissor e garras amperimétricas (clamps) utilizado no projeto.....	27
Figura 13 - Sensor de pulso utilizado no projeto .....	27
Figura 14 - Router de comunicação utilizado no projeto.....	28
Figura 15 - Interface da plataforma Sensorfact .....	29
Figura 16 - Contador de gás analógico antigo (esquerda) e novo contador digital com saída de impulsos (direita) .....	30
Figura 17 - Exemplo de instalação concluída com power analyser e bridge de comunicação da Sensorfact .....	31
Figura 18 - Evolução do custo médio mensal de eletricidade entre janeiro de 2024 e maio de 2025 .....	32
Figura 19 - Evolução do custo médio mensal de gás natural entre janeiro 2024 e maio de 2025 .....	33
Figura 20 - Perfil de consumo energético dos compressores GA160 e GA200 da Arroiteia .....	35
Figura 21 - Spindles pneumáticos dos centros de maquinação CNC Bermaq e Alfawood .....	39
Figura 22 - Perfil diário de consumo do compressor da Maia (27 de novembro de 2024) .....	41
Figura 23 - Perfil semanal de consumo do compressor da Maia (25 de novembro a 1 de dezembro de 2024).....	41
Figura 24 - Exemplo de uma válvula guilhotina pneumática instalada num ramal de extração	44
Figura 25 - Curva característica do ventilador do Core.....	45
Figura 26 - Esquema da rede do sistema de Despoeiramento Shell.....	49
Figura 27 - Curva característica do ventilador do Shell .....	49
Figura 28 - Válvula de corte e quadro de controlo do sistema do SAC da Maia.....	64
Figura 29 - Unidade autónoma de ar comprimido para as impressoras, composta por compressor e secador integrado .....	65

Figura 30 - Instalação de novas válvulas guilhotina em ramais de aspiração no Despoeiramento do Core.....	66
Figura 31 - Instalação de novas válvulas guilhotina em ramais de aspiração no Despoeiramento do Shell.....	68
Figura 32 - Substituição da iluminação fluorescente por tecnologia LED na Cabine do PT.....	69
Figura 33 - Câmara de combustão da Cabine do PT após adaptação para queima direta .....	69
Figura 34 - Modificação da Cabine do PT após remoção da chaminé e adaptação do queimador .....	70
Figura 35 - Queimador antigo (esquerda) e novo queimador modulante instalado (direita) ...	71
Figura 36 - Câmara de combustão antiga (esquerda) e novo tubo de distribuição de gases (direita) .....	71
Figura 37 - Sensor de fim de curso no percurso aéreo (esquerda) e batente do carro transportador (direita).....	73
Figura 38 - Içamento dos chillers no edifício Core (esquerda) e no Laboratório PT (direita) ....	75
Figura 39 - Perfil de consumo do chiller do Core após a instalação do sistema de passagem de sinal.....	76
Figura 40 - Comparação do custo médio diário do SAC da Arroteia antes e após as intervenções .....	84
Figura 41 - Perfil semanal de consumo do compressor da Maia após a instalação da válvula de corte (semana 17 de 2025) .....	85
Figura 42 - Perfil semanal de consumo do compressor da Maia após reparação da fuga interna (semana 22 de 2025). .....	86
Figura 43 - Comparação do custo médio diário do SAC da Maia antes e após a intervenção... ..	87
Figura 44 - Comparação do custo médio diário do Despoeiramento do Core antes e após a intervenção .....	90
Figura 45 - Comparação do custo médio diário do Despoeiramento do Shell antes e após a intervenção .....	93
Figura 46 - Comparação do custo médio diário da Cabine de Pintura PT antes e após a alteração do método de queima .....	97
Figura 47 - Comparação do custo médio diário da Cabine de Pintura PT antes e após a instalação de iluminação LED.....	100
Figura 48 - Comparação do custo médio diário da Linha de Pintura Aérea antes e após a alteração do método de queima .....	103
Figura 49 - Comparação do custo médio diário da Linha de Pintura Aérea antes e após a alteração do método de queima .....	106
Figura 50 - Comparação do custo médio diário do Chiller do Core antes e após a sua substituição .....	109
Figura 51 - Comparação do custo médio diário do Chiller do Laboratório PT antes e após a sua substituição.....	112
Figura 52 - Lista de equipamentos com monitorização elétrica e respetivas características..	134
Figura 53 - Lista de equipamentos com monitorização de gás natural e respetivas características .....	134
Figura 54 - Perfil de consumo semanal na unidade de Despoeiramento do Core .....	142

Figura 55 - Perfil de consumo semanal na unidade de Despoeiramento do Shell .....	145
Figura 56 - Perfil de consumo elétrico semanal na Cabine de Pintura PT .....	147
Figura 57 - Perfil de consumo de gás natural semanal na Cabine de Pintura PT.....	148
Figura 58 - Layout da Linha de Pintura Aérea .....	152
Figura 59 - Perfil de consumo do chiller do Core em dias sem atividade produtiva .....	159



# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Caudal de fuga (m <sup>3</sup> /min) com base na pressão do ar e diâmetro da fuga, adaptado de (ADENE, 2016).....	17
Tabela 2 - Casos de estudo - Iniciativas e aplicações para melhoramento da Eficiência Energética .....	20
Tabela 3 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do sistema de ar comprimido da Arroiteia. ....	36
Tabela 4 - Pressões de operação recomendadas e medidas nos equipamentos críticos.....	38
Tabela 5 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do sistema de ar comprimido da Maia .....	43
Tabela 6 – Indicadores económicos iniciais da intervenção no sistema de Despoeiramento Core .....	46
Tabela 7 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do sistema de Despoeiramento Core.....	47
Tabela 8 - Indicadores económicos revistos da intervenção no sistema de Despoeiramento Core .....	48
Tabela 9 - Indicadores económicos iniciais da intervenção no sistema de Despoeiramento Shell .....	50
Tabela 10 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do sistema de Despoeiramento Shell.....	51
Tabela 11 - Indicadores económicos revistos da intervenção no sistema de Despoeiramento Shell.....	51
Tabela 12 - Indicadores económicos da iluminação LED na Cabine de Pintura PT.....	53
Tabela 13 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Cabine de Pintura (Eletricidade).....	53
Tabela 14 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Cabine de Pintura (Gás Natural) .....	54
Tabela 15 - Indicadores económicos da alteração do método de queima na Cabine de Pintura PT .....	54
Tabela 16 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Linha de Pintura (Gás Natural) .....	56
Tabela 17 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Linha de Pintura (Eletricidade).....	57
Tabela 18 - Indicadores económicos da alteração do método de queima na Linha de Pintura Aérea.....	57
Tabela 19 - Indicadores económicos do sistema de deteção de cubas na Linha de Pintura Aérea .....	57
Tabela 20 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do Chiller do Core .....	59
Tabela 21 - Indicadores económicos da substituição do Chiller do Core .....	60
Tabela 22 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do Chiller do Laboratório PT .....	60

Tabela 23 - Indicadores económicos da substituição dos Chillers do Laboratório PT .....	61
Tabela 24 - Lista cronológica das intervenções efetuadas.....	61
Tabela 25 - Consumo médio diário do sistema de ar comprimido da Arroteia (semanas 2 a 6 de 2025) .....	78
Tabela 26 - Poupança média diária estimada após a redução da pressão para 7,3 bar.....	78
Tabela 27 - Consumo semanal do SAC da Arroteia (semanas 2 a 6 de 2025).....	78
Tabela 28 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do SAC da Arroteia após redução para 7,3 bar.....	79
Tabela 29 - Poupança estimada com a redução da pressão para 7,3 bar no SAC da Arroteia ..	79
Tabela 30 - Consumo médio diário do sistema de ar comprimido da Arroteia (semanas 8 a 13 de 2025) .....	80
Tabela 31 - Poupança média diária estimada após resolução da 1ª fase de fugas .....	80
Tabela 32 - Consumo semanal do SAC da Arroteia (semanas 8 a 13 de 2025).....	81
Tabela 33 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do SAC da Arroteia após resolução 1ª fase de fugas .....	81
Tabela 34 - Poupança estimada com a resolução da 1ª fase de fugas no SAC da Arroteia.....	81
Tabela 35 - Consumo médio diário do sistema de ar comprimido da Arroteia (semanas 16 a 21 de 2025) .....	82
Tabela 36 - Poupança média diária estimada após resolução da 2ª fase de fugas .....	82
Tabela 37 - Consumo semanal do SAC da Arroteia (semanas 16 a 21 de 2025).....	83
Tabela 38 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do SAC da Arroteia após resolução 2ª fase de fugas .....	83
Tabela 39 - Poupança estimada com a resolução da 2ª fase de fugas no SAC da Arroteia.....	83
Tabela 40 - Poupança anual das intervenções no SAC da Arroteia .....	85
Tabela 41 - Consumo médio diário do sistema de ar comprimido da Maia (semanas 22 a 28 de 2025) .....	86
Tabela 42 - Poupança média diária estimada após instalação da válvula de corte.....	87
Tabela 43 - Consumo semanal do SAC da Maia (semanas 22 a 28 de 2025).....	88
Tabela 44 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do SAC da Maia após instalação da válvula de corte.....	88
Tabela 45 - Poupança estimada com a instalação da válvula de corte no SAC da Maia .....	88
Tabela 46 - Consumo médio diário na unidade de Despoeiramento do Core (semanas 2 a 25 de 2025) .....	89
Tabela 47 - Poupança média diária estimada após instalação do sistema de controlo no Despoeiramento Core.....	90
Tabela 48 - Consumo semanal da unidade de Despoeiramento do Core (semanas 2 a 25 de 2025) .....	90
Tabela 49 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do Despoeiramento Core após instalação do sistema de controlo .....	91
Tabela 50 - Poupança estimada com a instalação do sistema de controlo na unidade de Despoeiramento do Core.....	92
Tabela 51 - Consumo médio diário na unidade de Despoeiramento do Shell (semanas 12 a 27 de 2025) .....	92

Tabela 52 - Poupança média diária estimada após instalação do sistema de controlo no Despoeiramento Shell.....	93
Tabela 53 - Consumo semanal da unidade de Despoeiramento do Shell (semanas 22 a 27 de 2025) .....	94
Tabela 54 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do Despoeiramento Shell após instalação do sistema de controlo .....	94
Tabela 55 - Poupança estimada com a instalação do sistema de controlo na unidade de Despoeiramento do Shell.....	95
Tabela 56 - Consumo médio diário de gás natural na Cabine de Pintura PT (semanas 3 a 13 de 2025) .....	96
Tabela 57 - Poupança média diária estimada após alteração do método de queima na Cabine de Pintura PT.....	97
Tabela 58 - Consumo semanal de gás natural da Cabine de Pintura PT (semanas 3 a 13 de 2025) .....	97
Tabela 59 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Cabine PT após alteração do método de queima .....	98
Tabela 60 - Poupança estimada com alteração do método de queima na Cabine de Pintura PT .....	98
Tabela 61 - Consumo médio diário de eletricidade na Cabine de Pintura PT (semanas 3 a 26 de 2025) .....	99
Tabela 62 - Poupança média diária estimada após instalação de iluminação LED na Cabine de Pintura PT.....	100
Tabela 63 - Consumo semanal de eletricidade da Cabine de Pintura PT (semanas 3 a 26 de 2025) .....	100
Tabela 64 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Cabine PT após instalação de iluminação LED.....	101
Tabela 65 - Poupança estimada instalação de iluminação LED na Cabine de Pintura PT.....	102
Tabela 66 - Consumo médio diário de gás natural na Linha de Pintura Aérea (semanas 27 a 31 de 2025) .....	103
Tabela 67 - Poupança média diária estimada após alteração do método de queima na Linha de Pintura Aérea .....	104
Tabela 68 - Consumo semanal de gás natural da Linha de Pintura Aérea (semanas 27 a 31 de 2025) .....	104
Tabela 69 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Linha de Pintura após alteração do método de queima .....	104
Tabela 70 - Poupança estimada alteração do método de queima na Linha de Pintura Aérea	105
Tabela 71 - Consumo médio diário de eletricidade na Linha de Pintura Aérea (semanas 27 a 31 de 2025) .....	105
Tabela 72 - Poupança média diária estimada após sistema de deteção de cubas na Linha de Pintura Aérea .....	106
Tabela 73 - Consumo semanal de eletricidade da Linha de Pintura Aérea (semanas 27 a 31 de 2025) .....	106

Tabela 74 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Linha de Pintura após sistema de detecção de cubas.....	107
Tabela 75 - Poupança estimada sistema de detecção de cubas na Linha de Pintura Aérea.....	107
Tabela 76 - Consumo médio diário Chiller do Core (semanas 7 a 23 de 2025).....	108
Tabela 77 - Poupança média diária estimada após a substituição do Chiller do Core.....	109
Tabela 78 - Consumo semanal do Chiller do Core (semanas 7 a 23 de 2025).....	110
Tabela 79 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do Chiller do Core após a sua substituição.....	110
Tabela 80 - Poupança estimada substituição do Chiller do Core.....	111
Tabela 81 - Consumo médio diário Chiller do Laboratório PT (semanas 7 a 23 de 2025).....	111
Tabela 82 - Poupança média diária estimada após a substituição do Chiller do Core.....	112
Tabela 83 - Consumo semanal do Chiller do Laboratório PT (semanas 7 a 23 de 2025).....	113
Tabela 84 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do Chiller do Laboratório PT após a sua substituição.....	113
Tabela 85 - Poupança estimada substituição do Chiller do Laboratório PT.....	114
Tabela 86 - Resumo consolidado das intervenções e respetivos resultados.....	114
Tabela 87 - Objetivos, Metas e Medidas PNEC 2030 (Ministério do Ambiente e da Ação Climática, 2024).....	127
Tabela 88 - Consumo médio diário do compressor GA160 da Arroteia (semanas 43 a 50 de 2024).....	135
Tabela 89 - Consumo médio diário do compressor GA200 da Arroteia (semanas 43 a 50 de 2024).....	135
Tabela 90 - Consumo médio diário do SAC da Arroteia (semanas 43 a 50 de 2024).....	136
Tabela 91 - Consumo semanal do SAC da Arroteia (semanas 43 a 50 de 2024).....	136
Tabela 92 – Estimativa do custo off-hours do SAC da Maia.....	137
Tabela 93 - Consumo médio diário do SAC da Maia (semanas 46 a 51 de 2024).....	138
Tabela 94 - Consumo semanal do SAC da Maia (semanas 46 a 51 de 2024).....	139
Tabela 95 - Funcionamento motor do ventilador do Despoeiramento Core.....	140
Tabela 96 - Estimativa de poupança instalação de variador de frequência no Despoeiramento Core.....	140
Tabela 97 - Estimativa de poupança instalação transdutor diferencial de pressão no Despoeiramento Core.....	141
Tabela 98 - Consumo médio diário na unidade de Despoeiramento do Core (semanas 42 a 49 de 2024).....	143
Tabela 99 - Consumo semanal da unidade de Despoeiramento do Core (semanas 42 a 49 de 2024).....	143
Tabela 100 - Funcionamento motor do ventilador do Despoeiramento Shell.....	144
Tabela 101 - Estimativa de poupança instalação transdutor diferencial de pressão no Despoeiramento Shell.....	144
Tabela 102 - Consumo médio diário na unidade de Despoeiramento do Shell (semanas 42 a 50 de 2024).....	146
Tabela 103 - Consumo semanal da unidade de Despoeiramento do Shell (semanas 42 a 50 de 2024).....	146

Tabela 104 - Consumo médio diário de gás natural da Cabine de Pintura PT (semanas 45 a 51 de 2024) .....	148
Tabela 105 - Consumo semanal de gás natural da Cabine de Pintura PT (semanas 45 a 51 de 2024) .....	149
Tabela 106 - Consumo médio diário de eletricidade da Cabine de Pintura PT (semanas 44 a 51 de 2024) .....	149
Tabela 107 - Consumo semanal de eletricidade da Cabine de Pintura PT (semanas 44 a 51 de 2024) .....	150
Tabela 108 - Consumo médio diário de gás natural da Linha de Pintura Aérea (semanas 43 a 2 de 2024/2025).....	155
Tabela 109 - Consumo semanal de gás natural da Linha de Pintura Aérea (semanas 43 a 2 de 2024/2025).....	155
Tabela 110 - Consumo médio diário de eletricidade da Linha de Pintura Aérea (semanas 43 a 2 de 2024/2025).....	156
Tabela 111 - Consumo semanal de eletricidade da Linha de Pintura Aérea (semanas 43 a 2 de 2024/2025).....	157
Tabela 112 - Consumo médio diário do Chiller do Core (semanas 43 a 4 de 2024/2025) .....	160
Tabela 113 - Consumo semanal do Chiller do Core (semanas 43 a 4 de 2024/2025) .....	161
Tabela 114 - Consumo médio diário do Chiller nº 1 do Laboratório PT (semanas 43 a 4 de 2024/2025).....	161
Tabela 115 - Consumo médio diário do Chiller nº 2 do Laboratório PT (semanas 43 a 4 de 2024/2025).....	162
Tabela 116 - Consumo médio diário dos Chillers do Laboratório PT (semanas 43 a 4 de 2024/2025).....	162
Tabela 117 - Consumo semanal dos Chillers do Laboratório PT (semanas 43 a 4 de 2024/2025) .....	163



# Acrónimos e Símbolos

## Lista de Acrónimos

AC	Ar Comprimido
ADENE	Agência para a Energia
AR	<i>Action Research</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilization, and Storage</i>
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos da América
DPS	Departamento de Património e Serviços
ELPRE	Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios
EN	Norma Europeia
EUA	Estados Unidos da América
FEE	Fundo de Eficiência Energética
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNL	Gás Natural Liquefeito
IE	<i>International Efficiency</i>
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LED	Diodo Emissor de Luz
MIT	Manutenção Industrial Transversal
NP	Norma Portuguesa
PAB	Plano de Ação do Biometano
PCS	Poder Calorífico Superior
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>
PIB	Produto interno bruto
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAER	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima

PREn	Planos de Racionalização dos Consumos de Energia
REP	Relatórios de Execução e Progresso
RNC	Roteiro para a Neutralidade Carbónica
SAC	Sistema de Ar Comprimido
SGCIE	Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia
SGE	Sistemas de Gestão de Energia
UE	União Europeia
USD	<i>United States Dollar</i>
VFD	<i>Variable Frequency Drive</i>
VSD	<i>Variable Speed Drive</i>

## Lista de Símbolos

<i>%</i>	<i>percentagem</i>
<i>€</i>	<i>euros</i>
<i>A</i>	<i>ampere</i>
<i>bar</i>	<i>unidade de pressão</i>
<i>CO<sub>2</sub>e</i>	<i>dióxido de carbono equivalente</i>
<i>cos φ</i>	<i>fator de potência</i>
<i>h</i>	<i>hora</i>
<i>ktep</i>	<i>toneladas equivalentes de petróleo</i>
<i>kW</i>	<i>quilowatt</i>
<i>l</i>	<i>litro</i>
<i>m<sup>3</sup>/min</i>	<i>metro cubico por minuto</i>
<i>MJ</i>	<i>mega joule</i>
<i>mmH<sub>2</sub>O</i>	<i>milímetros de coluna de água</i>
<i>ktep</i>	<i>toneladas equivalentes de petróleo</i>
<i>°C</i>	<i>grau celsius</i>
<i>s</i>	<i>segundo</i>
<i>t CO<sub>2</sub>e</i>	<i>tonelada de dióxido de carbono equivalente</i>
<i>V</i>	<i>volt</i>
<i>W</i>	<i>watt</i>

# 1. Introdução

Neste capítulo é apresentada a contextualização do tema, destacando a importância da eficiência energética no setor industrial. São definidos os objetivos do projeto, a metodologia adotada para alcançar os resultados propostos e ainda uma breve apresentação da empresa de acolhimento.

## 1.1. Contextualização

A energia é um recurso essencial para o funcionamento da sociedade moderna, sustentando atividades econômicas, industriais e quotidianas. Contudo, o seu consumo tem vindo a aumentar de forma contínua, impulsionado pelo crescimento populacional, pela urbanização e pela expansão industrial. Este aumento, aliado à dependência global de combustíveis fósseis, tem gerado impactos significativos, como a intensificação das alterações climáticas e a pressão sobre os recursos naturais (Agency, 2021).

A eficiência energética é um dos pilares fundamentais para alcançar a sustentabilidade nos sistemas de energia. Esta consiste na utilização racional dos recursos energéticos, reduzindo o desperdício sem comprometer o desempenho das atividades e processos. De acordo com Comissão Europeia (2023), medidas de eficiência energética são fundamentais para alcançar os objetivos de redução do consumo de energia primária em 40,5% e 38% da energia final até 2030, alinhando-se com as metas de neutralidade carbónica (Comissão Europeia, 2023, p. 6). Estas intervenções não só contribuem para a mitigação das alterações climáticas, mas também geram benefícios económicos, aumentando a competitividade dos setores mais intensivos em consumo energético.

Neste contexto, a presente tese será desenvolvida com o objetivo de analisar os consumos energéticos em equipamentos e processos na Efacec, identificando os de maior impacto no consumo total. Com base nessa análise, serão propostas medidas de melhoria direcionadas à otimização da eficiência energética, contribuindo para a redução de custos operacionais e para o alinhamento com os objetivos de sustentabilidade energética.

## 1.2. Objetivos

O principal objetivo deste estudo é contribuir para a otimização energética de equipamentos e processos industriais na Efacec, através da análise detalhada dos consumos energéticos e da proposta de intervenções que promovam a eficiência energética. Estas

intervenções terão como foco não apenas a redução do consumo de energia e dos custos operacionais associados, mas também o alinhamento com os objetivos estratégicos da empresa em termos de sustentabilidade e competitividade no mercado.

Para alcançar este objetivo principal, os objetivos específicos incluem:

- Identificar os equipamentos, os processos e as instalações com maior impacto no consumo energético total;
- Analisar os consumos energéticos com base em medições detalhadas e em dados recolhidos durante o período de estudo;
- Avaliar a viabilidade técnica e económica das propostas de melhoria identificadas nos equipamentos e instalações analisados;
- Implementar soluções alinhadas com boas práticas de eficiência energética, considerando as especificidades do contexto industrial da Efacec;
- Monitorizar os efeitos das intervenções e realizar uma análise crítica comparativa, de forma a validar as poupanças energéticas e os benefícios obtidos.

Ao atingir estes objetivos, espera-se que o estudo forneça um contributo significativo para o desempenho energético da Efacec, estabelecendo um exemplo prático de como intervenções específicas podem gerar benefícios sustentáveis e competitivos.

### **1.3. Metodologia**

O desenvolvimento deste trabalho teve como principal metodologia a *Action Research* (AR). A AR é uma metodologia de pesquisa que envolve diferentes tipos de atividades estruturadas para enfrentar os desafios de investigação de forma sistemática, baseando-se em fundamentos e justificações para as escolhas realizadas.

A AR foi concebida com o propósito de mudar um sistema social através da pesquisa. Surgiu como uma resposta às limitações da investigação tradicional, criando conhecimento sem colocá-lo em ação. Assim, promove a criação de novos conhecimentos integrados à ação de forma a melhorar as práticas educativas e a resolução de problemas (Ronen, 2020).

Para melhor e mais sucinta aplicação, foi desenvolvido um processo cíclico de 5 fases, representado na Figura 1: Diagnóstico; Plano de ação; Tomada de ação; Avaliação; Especificação/aprendizagem, que permite uma aplicação contínua desta ferramenta (Wohlin & Runeson, 2021).

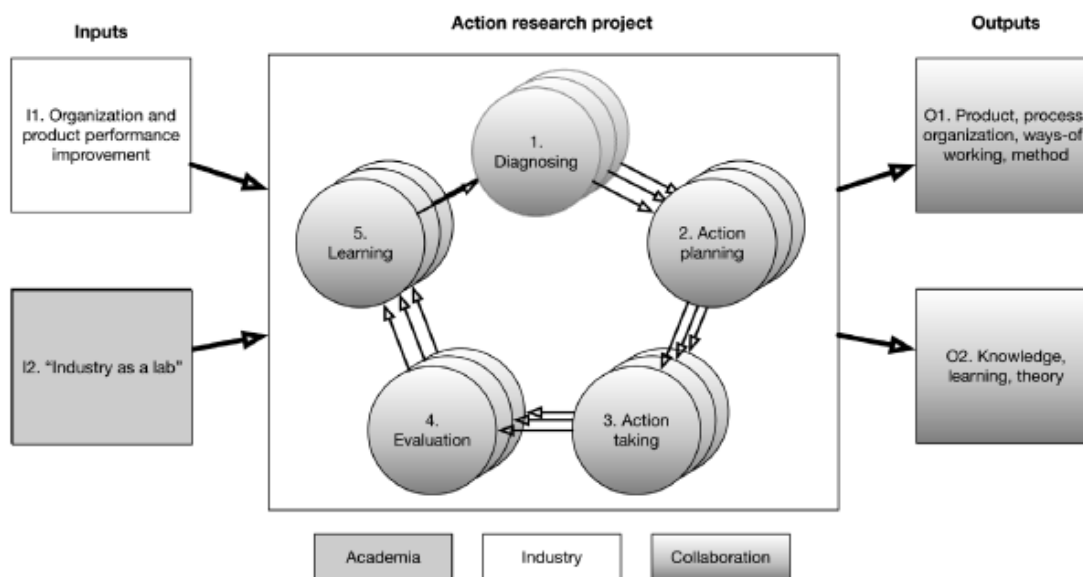


Figura 1 - Modelo de AR, adaptado de (Wohlin & Runeson, 2021)

No contexto da metodologia AR, com vista a alcançar os objetivos propostos na elaboração do presente projeto vão ser utilizadas as etapas descritas em seguida:

1. Identificação dos principais desafios relacionados com os consumos energéticos e definição dos objetivos específicos para melhorar a eficiência energética nos equipamentos e processos analisados;
2. Revisão bibliográfica sobre tecnologias, estratégias e intervenções de eficiência energética adequadas aos problemas identificados e aos objetivos estabelecidos;
3. Análise e recolha de dados direcionados ao caso de estudo;
4. Identificação dos parâmetros e sistemas de maior impacto no consumo energético que podem ser otimizados;
5. Seleção das propostas de melhoria mais adequadas, considerando a viabilidade técnica e económica, e discussão de alternativas;
6. Aplicação das propostas de melhoria nos equipamentos e processos selecionados;
7. Monitorização e análise dos resultados obtidos após a implementação das propostas;
8. Validação das propostas de melhoria apresentadas;
9. Apresentação de recomendações e sugestões para novas intervenções.

#### 1.4. Empresa de acolhimento

A empresa onde este projeto se irá desenvolver é na *Efacec Power Solutions, SGPS, S.A.*, mais concretamente no departamento de Manutenção Industrial Transversal (MIT). A Efacec é uma empresa portuguesa com mais de 75 anos de experiência, reconhecida pela sua atuação em setores estratégicos como energia, mobilidade elétrica, transportes e ambiente. Com uma forte presença internacional, a empresa destaca-se pelo desenvolvimento de tecnologias

inovadoras, incluindo transformadores, sistemas de automação e soluções de mobilidade elétrica (Efacec, 2024). O compromisso com a sustentabilidade e a inovação reflete-se na aposta em projetos que promovem a eficiência energética e um futuro mais inteligente (Efacec, 2024).

Na Figura 2 é apresentado o logo da empresa.



*Figura 2 - Logo da empresa Efacec Power Solutions, S.A.*

### **1.5. Estrutura do Relatório**

O presente relatório encontra-se organizado em quatro capítulos principais, de forma a assegurar uma apresentação clara e lógica do trabalho desenvolvido:

No Capítulo 1 é estabelecido o enquadramento do tema, apresentando os objetivos do trabalho, a metodologia seguida e, no final, a própria estrutura do documento.

No Capítulo 2 é abordado os conceitos fundamentais de eficiência energética, bem como o enquadramento normativo e estratégico existente a nível nacional e europeu, fornecendo a base teórica necessária à análise realizada.

O Capítulo 3 constitui a parte central do relatório. Nele são descritos o contexto da empresa, os equipamentos estudados e a metodologia de monitorização adotada, bem como as intervenções de melhoria implementadas. Este capítulo inclui ainda a avaliação detalhada dos resultados energéticos, económicos e ambientais e termina com uma análise crítica.

Finalmente, o Capítulo 4 é sintetizado os principais contributos do estudo, reconhece as limitações encontradas e aponta medidas e perspetivas de continuidade para reforçar a estratégia de eficiência energética e sustentabilidade.

## 2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica, abordando o enquadramento legislativo e normativo da eficiência energética, os consumos energéticos em Portugal nos diversos setores com ênfase no industrial e as principais medidas e estratégias para otimização em contextos industriais.

### 2.1. Legislação energética

Nesta secção é abordado o enquadramento legal e normativo da eficiência energética, a nível europeu e nacional, apresentando as principais regulamentações e normas relevantes.

#### 2.1.1. Políticas de eficiência energética na EU

A redução do consumo de energia e do desperdício energético assume uma importância cada vez maior para a União Europeia (UE). A diretiva revista de eficiência energética (UE) 2023/1791, que entrou em vigor em 13 de setembro de 2023, aumenta significativamente a ambição da UE no âmbito da eficiência energética. Esta veio substituir a antiga diretiva sobre eficiência energética 2012/27/UE por razões de clareza visto que esta foi várias vezes alterada de modo substancial (Comissão Europeia, 2023).

Segundo a Comissão Europeia, a Diretiva (UE) 2023/1791 estabelece a “*energy efficiency first*” como um princípio fundamental da política energética da UE, conferindo-lhe, pela primeira vez, valor jurídico (Comissão Europeia, 2024b). Transforma as metas definidas pelo pacto ecológico europeu em obrigações legais, detalhando as metas específicas para os Estados-Membros até 2030. Em termos práticos, isto significa que a eficiência energética deve ser considerada pelos países da UE em todas as políticas relevantes e nas principais decisões de investimento tomadas nos sectores energéticos e não energéticos.

Esta diretiva reformula a legislação da UE em matéria de eficiência energética que visava melhorar a eficiência energética da União Europeia em 20% até 2020 e 32,5% até 2030, com medidas que obrigavam os Estados-Membros a definir objetivos e implementar ações para o efeito (Comissão Europeia, 2024a).

A nova diretiva estabeleceu metas mais ambiciosas, como parte do Pacto Ecológico Europeu e do plano *REPowerEU* (Comissão Europeia, 2024a). As novas metas exigem aos Estados-Membros coletivamente uma redução de 11,7% no consumo de energia final até 2030, em comparação com as projeções de 2020, o que representa cortes, em relação ao cenário de referência de 2007, de (Comissão Europeia, 2023):

- 40,5% no consumo de energia primária;
- 38% no consumo de energia final.

Estas percentagens significam que o consumo global da UE até 2030 de energia primária não poderá ultrapassar 992,5 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), enquanto o consumo de energia final será limitado a 763 Mtep (Comissão Europeia, 2023).

Os Estados-Membros devem ainda garantir poupanças anuais cumulativas no consumo final de energia durante o período de 2021 a 2030. Estas poupanças são escalonadas de forma progressiva, aumentando ao longo do tempo (Comissão Europeia, 2023):

- 0,8% por ano em 2021-2023;
- 1,3% por ano em 2024-2025;
- 1,5% por ano em 2026-2027;
- 1,9% por ano em 2028-2030.

#### Pacto Ecológico Europeu

O Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*), apresentado pela Comissão Europeia em 11 de dezembro de 2019, é uma estratégia abrangente para transformar a União Europeia numa economia sustentável, competitiva e inclusiva, para enfrentar os desafios das alterações climáticas e da degradação ambiental, reconhecidos como ameaças existenciais (Comissão Europeia, 2019). Este documento constitui a base da política ambiental e climática da UE, inclusive da diretiva (UE) 2023/1791, orientando todas as ações futuras no contexto da transição ecológica.

Os objetivos principais do Pacto Ecológico Europeu são: (Comissão Europeia, 2019):

- Neutralidade Carbónica até 2050: Tornar a União Europeia no primeiro continente a atingir neutralidade climática, eliminando ou compensando todas as emissões de gases com efeito de estufa (GEE);
- Redução de Emissões até 2030: Reduzir as emissões em 55% até 2030 em relação aos níveis de 1990, alinhando as metas com o Acordo de Paris e o objetivo de limitar o aquecimento global a 1,5°C;
- Crescimento Económico Sustentável: Dissociar o crescimento económico da exploração intensiva de recursos naturais, promovendo a economia circular, inovação tecnológica e eficiência energética;

- **Justiça Social e Inclusão:** Garantir que a transição seja equitativa para todos os Estados-Membros, regiões e cidadãos, com particular apoio a áreas mais dependentes de indústrias de alto carbono.

### REPowerEU

Em resposta às dificuldades e à instabilidade no mercado energético global provocadas pela invasão da Ucrânia pela Rússia, a Comissão Europeia introduziu o Plano *REPowerEU* para reduzir progressivamente a dependência das importações de combustíveis fósseis russos, sobretudo gás natural (Comissão Europeia, 2024c). Este plano, lançado em maio de 2022 com um fundo de aproximadamente 300 mil milhões de euros, visa ajudar a União Europeia a (Comissão Europeia, 2024c):

- Reduzir o consumo energético;
- Diversificar as fontes de energia;
- Aumentar a produção de energia limpa.

A UE superou o seu objetivo voluntário de reduzir a procura de gás em 15%. A procura de gás natural diminuiu 18% entre agosto de 2022 e março de 2024. Isto ajudou a UE a poupar 125 mil milhões de metros cúbicos de gás (Comissão Europeia, 2024c).

Para garantir o abastecimento energético e evitar cortes de energia, a UE implementou um sistema que obriga os países membros a encherem os seus reservatórios de gás antes do início de cada inverno. Em 2022, os Estados-Membros estabeleceram a meta de atingir 80% da capacidade de armazenamento de gás até 1 de novembro. Este objetivo foi amplamente superado, com os níveis de armazenamento alcançando 95% da capacidade total, como se pode observar na Figura 3. Desde então, a meta anual foi aumentada para 90% de capacidade até 1 de novembro. No fim do inverno, em 1 de abril de 2024, os níveis de armazenamento de gás ainda estavam em 59% da capacidade total, marcando um recorde histórico para este período (Comissão Europeia, 2024c).

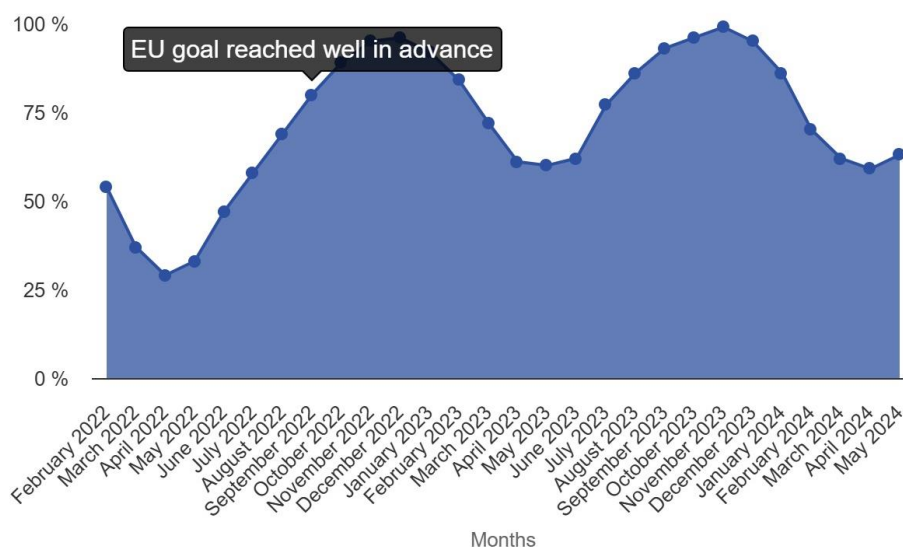


Figura 3 - Armazenamento de gás natural na EU (Comissão Europeia, 2024c)

### **2.1.2. Políticas de eficiência energética em Portugal**

#### Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC 2030)

No contexto das políticas de eficiência energética em Portugal, o Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC) 2030 é um documento estratégico crucial, alinhado com as metas da União que visa promover a descarbonização da economia e a transição energética para o período de 2021 a 2030, com vista ao alcance da neutralidade carbónica em 2025 (Ambiente, 2024a). Este plano substitui o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) após 2020 e está igualmente orientado para os objetivos a longo prazo de Portugal, rumo à neutralidade carbónica (DGEG, 2024b)

O PNEC define objetivos e metas claras para a redução de emissões e o aumento da eficiência energética em vários setores. Segundo (Ministério do Ambiente e da Ação Climática, 2024), para concretizar a visão estratégica de Portugal e assegurar o cumprimento das metas e dos objetivos estabelecidos para o horizonte de 2030, foram definidos oito objetivos estratégicos nacionais, integrando as áreas de energia e clima, interligados entre si.

Para uma melhor compreensão, no Apêndice A é possível analisar para cada objetivo as metas e medidas associadas, tendo como referência o PNEC 2030 elaborado por (Ministério do Ambiente e da Ação Climática, 2024).

Além do PNEC 2030, existem outros instrumentos estratégicos e legislativos que complementam as metas e orientações estabelecidas no plano, fortalecendo o enquadramento nacional para a transição energética e a descarbonização. Entre eles, destacam-se O Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050), o SGCIE e o Fundo de Eficiência Energética (FEE), que promovem a neutralidade carbónica, a eficiência energética e o apoio financeiro para medidas sustentáveis, assegurando a coerência e a integração das políticas energéticas de Portugal.

#### RNC 2050

O RNC 2050 estabelece o compromisso de Portugal em atingir a neutralidade carbónica até 2050, delineando um roteiro estratégico para descarbonizar e reduzir as emissões de os setores da economia, incluindo indústria, transportes e energia (Ambiente, 2024b). Este roteiro identifica opções económicas e eficazes, define as principais linhas de orientação para uma transição sustentável, promovendo a descarbonização da sociedade e a transição energética, em alinhamento com os compromissos internacionais assumidos por Portugal (Ambiente, 2024b). Este documento integra metas de longo prazo, complementando o PNEC 2030 ao orientar Portugal para uma economia de baixo carbono, resiliente e competitiva, alinhada com os objetivos climáticos da União Europeia.

#### SGCIE

O SGCIE, criado pelo Decreto-Lei n.º 71/2008, regula as instalações industriais e comerciais com consumos energéticos superiores a 500 toneladas equivalentes de petróleo (tep) por ano, obrigando-as a implementar medidas de eficiência energética (Republica, 2008).

Estas incluem auditorias energéticas regulares, a elaboração de Planos de Racionalização do Consumo de Energia (PREn) e a monitorização dos impactos das ações implementadas, Relatórios de Execução e Progresso (REP). O sistema tem como objetivo reduzir o desperdício energético e as emissões de GEE, sendo um instrumento essencial para promover a transição energética na indústria portuguesa e assegurar a competitividade em setores intensivos em energia (Republica, 2008).

### FEE

O FEE, instituído pelo Decreto-Lei n.º 50/2010, de 20 de maio, é um instrumento financeiro criado para promover a eficiência energética em Portugal (Republica, 2010). Este fundo apoia cidadãos e empresas na implementação de medidas que reduzam o consumo de energia e incentivem comportamentos sustentáveis, alinhando-se com as metas nacionais de eficiência energética (Republica, 2010).

Embora inicialmente associado ao PNAEE, o FEE atualmente reforça as medidas do PNEC 2030, desempenhando um papel essencial na transição energética nacional e na descarbonização dos diversos setores da economia (Ministério do Ambiente e da Ação Climática, 2024).

### **2.1.3. Norma NP EN ISO 50001:2018 – Sistemas de gestão de energia**

A Norma ISO 50001:2018 é uma norma internacional adotada em Portugal como norma nacional, sob a designação NP EN ISO 50001, pela entidade normativa portuguesa Instituto Português da Qualidade (IPQ) (ISQ, 2012). As iniciais NP e EN designam respetivamente, “Norma Portuguesa” e “Norma Europeia”. Originalmente publicada pela *International Organization for Standardization ISO/TC 242 Energy management*, em 2011 e revista em 2018, a norma baseia-se no modelo de melhoria contínua PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) e incorpora a gestão de energia nas práticas organizacionais existentes, conforme ilustrado na Figura 4 (International Organization for Standardization, 2018; ISO/TC 242 Energy management, 2012).

No contexto da gestão energética, a abordagem PDCA pode ser descrita da seguinte forma (International Organization for Standardization, 2018):

- *Plan* (Planear): realizar uma avaliação energética, identificar usos significativos de energia e estabelecer indicadores de desempenho energético, objetivos, metas e planos de ação necessários para entregar resultados que irão melhorar o desempenho energético.
- *Do* (Executar): implementar os planos de ação de gestão de energia definidos;
- *Check* (Verificar): monitorizar, medir e avaliar os processos e características chave que determinam o desempenho energético de acordo com a política adotada;
- *Act* (Atuar): executar ações que visem melhorar continuamente o desempenho do SGE.



Figura 4 - Ciclo PDCA, adaptado de (International Organization for Standardization, 2018)

A norma ISO 50001:2018 promove a execução e documentação do planeamento energético. Para a elaboração deste planeamento é necessário existir uma fase de levantamento, em que é feita uma recolha de dados referentes ao desempenho energético pré-existente, tais como: o consumo de energia passado e presente, as fontes de energia e a identificação de variáveis relevantes que afetam significativamente o uso de energia (International Organization for Standardization, 2018). A identificação e avaliação do uso de energia são processos que podem levar a organização a determinar áreas de consumo elevado de energia e reconhecer oportunidades de melhoria do desempenho energético.

A aplicação desta norma proporciona vários benefícios às organizações, os quais podem ser evidenciados através de autoavaliações internas ou certificações externas no âmbito do Sistemas de Gestão de Energia (SGE). Alguns desses benefícios passam por:

- Garantir um maior nível de controlo energético;
- Identificar e implementar medidas para reduzir desperdícios energéticos e otimizar processos;
- Reduzir custos de energia;
- Contribuição direta para a redução de GEE, alinhando-se com os compromissos climáticos globais;
- Demonstrar compromisso e transparência.

## 2.2. Consumo Energético

Nesta secção é apresentada uma análise dos consumos energéticos em Portugal, com ênfase no setor industrial, destacando os fatores que contribuem para os maiores consumos.

### 2.2.1. Consumo energético em Portugal

Em 2023, o consumo de energia primária reduziu em 3,3% face a 2022, situando-se em 20.619 ktep, enquanto o consumo de energia final cresceu 1,7%, atingindo 16.832 ktep. (DGEG, 2024). Na Figura 5 é possível observar a evolução dos consumos de energia primária e final.

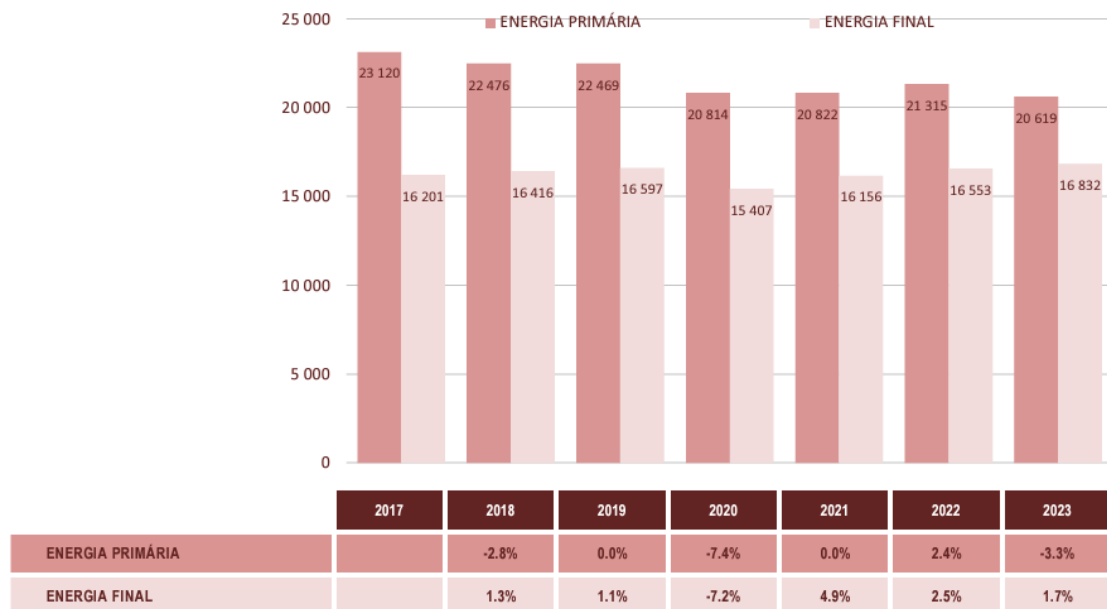


Figura 5 - Evolução dos consumos de energia primária e final (ktep), adaptado de (DGEG, 2024a)

Como é possível analisar na Figura 6 o petróleo continua a ser a principal fonte de energia utilizada tanto no consumo primário como no consumo final. No entanto, verifica-se uma maior participação da eletricidade no consumo final, representando mais de 25% do total.

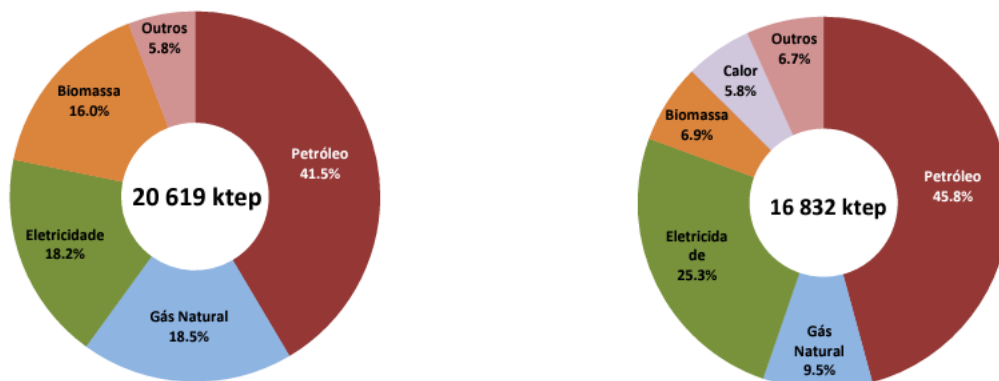


Figura 6 - Consumo de Energia Primária e Final em 2023, adaptado de (DGEG, 2024a)

A queda no consumo primário reflete uma diminuição nas importações de gás natural e petróleo, contrabalançada por um aumento de 9,6% na produção doméstica de energia, impulsionada pela energia hídrica e solar (DGEG, 2024a). Por outro lado, o crescimento no consumo final deveu-se à recuperação de setores como transportes e serviços, com um aumento de 7,2% do consumo no setor dos serviços (+172 ktep) e 5,9% no transporte rodoviário (+329 ktep). (DGEG, 2024a)

A composição da energia elétrica fornecida ao setor empresarial em Portugal pela EDP no segundo trimestre de 2025 reflete um equilíbrio entre fontes renováveis e não renováveis, com uma ligeira predominância destas últimas. De acordo com os dados divulgados pela EDP, 52,15 % da eletricidade comercializada às empresas teve origem em fontes não renováveis, enquanto 47,86 % provieram de fontes renováveis, como é possível verificar na Figura 7 (EDP, 2025).

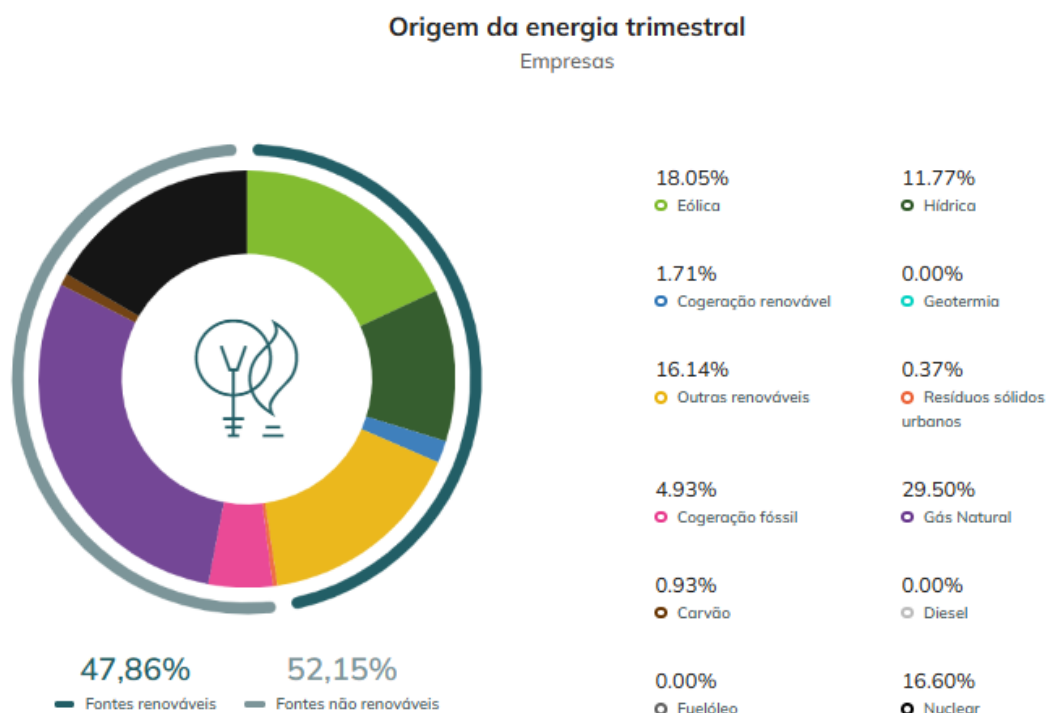


Figura 7 - Origem da energia elétrica fornecida ao setor empresarial em Portugal no 2.º trimestre de 2025 pela EDP, adaptado de (EDP, 2025)

Este *mix* energético explica, em parte, o valor de 127,52 g CO<sub>2</sub>e/kWh (gramas de dióxido de carbono equivalente por quilowatt-hora) reportado pela EDP para o ano de 2024, uma vez que a elevada participação de gás natural e nuclear reduz, mas não elimina, a intensidade carbónica do fornecimento (EDP, 2025). A ausência de energia proveniente de carvão, geotermia ou diesel evidencia uma tendência para a descarbonização do setor, embora a dependência de fontes fósseis como o gás natural permaneça significativa.

Já segundo a Galp, em 2023, as emissões específicas de CO<sub>2</sub> atribuídas à produção de eletricidade comercializada pela Petrogal foram de 111,31 gCO<sub>2</sub>/kWh (Galp, 2025).

Para efeitos de quantificação das emissões de dióxido de carbono associadas à combustão de gás natural, foi adotada a metodologia divulgada pela Galp Energia, em conformidade com os fatores de emissão oficiais da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) (Galp, 2025). A Equação (1) aplicada é:

$$CO_2 (kg) = FE \times FO \times \frac{PCI}{PCS} \times CGN \quad (1)$$

Onde:

- CO - Quantidade de dióxido de carbono, expresso em quilogramas;
- FE - Fator de emissão específico do Gás Natural = 56,6 kg CO<sub>2</sub> / GJ;
- FO - Fator de oxidação para a combustão de Gás Natural = 0,995;
- PCI - Poder calorífico inferior de referência do Gás Natural = 0,03844 GJ/m<sup>3</sup>;
- PCS - Poder calorífico superior de referência do Gás Natural = 11,667 kWh/m<sup>3</sup>;
- CGN – Consumo de Gás Natural, expresso em quilowatt-hora.

Através da aplicação destes parâmetros, obtém-se um fator de emissão de aproximadamente 185,4 g CO<sub>2</sub>/kWh gerada através da combustão de gás natural. Estas emissões são particularmente relevantes em contextos industriais, onde o gás natural é frequentemente utilizado para aquecimento de fluidos, secagem, combustão direta ou processos térmicos.

### 2.2.2. Consumo energético na indústria

O setor industrial desempenha um papel central no consumo energético, sendo o segundo maior consumidor de energia em Portugal. Em 2023, o setor industrial representou cerca de 28% do consumo final de energia, com uma redução de 4,4% em relação a 2022 (DGEG, 2024a). Este declínio foi associado a melhorias na eficiência energética e a desacelerações em alguns subsectores industriais. Na Figura 8 é possível ver o consumo de energia final nos diferentes setores industriais no ano de 2023, em Portugal.



Figura 8 - Consumo de energia final em 2023, adaptado de (DGEG, 2024a)

O setor das indústrias químicas, plásticos e borracha registou a maior redução no consumo de energia final, com uma queda de 16,9%, seguido pelo setor da indústria da

madeira, que apresentou um decréscimo de 13,7%. Em contrapartida, o setor dos minerais não metálicos foi o único a mostrar um ligeiro aumento no consumo, com um crescimento de 0.7% (DGEG, 2024a).

O consumo de energia na indústria está amplamente distribuído entre diferentes processos e equipamentos, mas alguns componentes destacam-se como os maiores consumidores de energia, como é possível observar na Figura 9. De acordo com Patterson et al (2022), em 2018 os principais utilizadores de energia nos processos industriais dos Estados Unidos da América (EUA) foram (Patterson et al., 2022):

- Motores: Representam cerca de 52,5% do uso total de energia industrial, utilizados para operar equipamentos de produção, transporte interno e sistemas de compressão;
- Aquecimento de Processos: Responde por aproximadamente 9,8% do consumo energético. Este uso inclui fornos, caldeiras e outras tecnologias térmicas destinadas a elevar a temperatura de materiais para fabricação ou transformação;
- Sistemas AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado): Consomem 8,6% da energia industrial, sendo críticos em ambientes controlados que exigem condições específicas de temperatura e humidade;
- Arrefecimento e Refrigeração de Processos: Representam 8,5% do consumo de energia industrial, essenciais para o controlo da temperatura em processos produtivos sensíveis, com destaque para o uso de *chillers* e condensadores;
- Iluminação de Instalações: Responde por 6,0% da energia consumida nas instalações industriais.

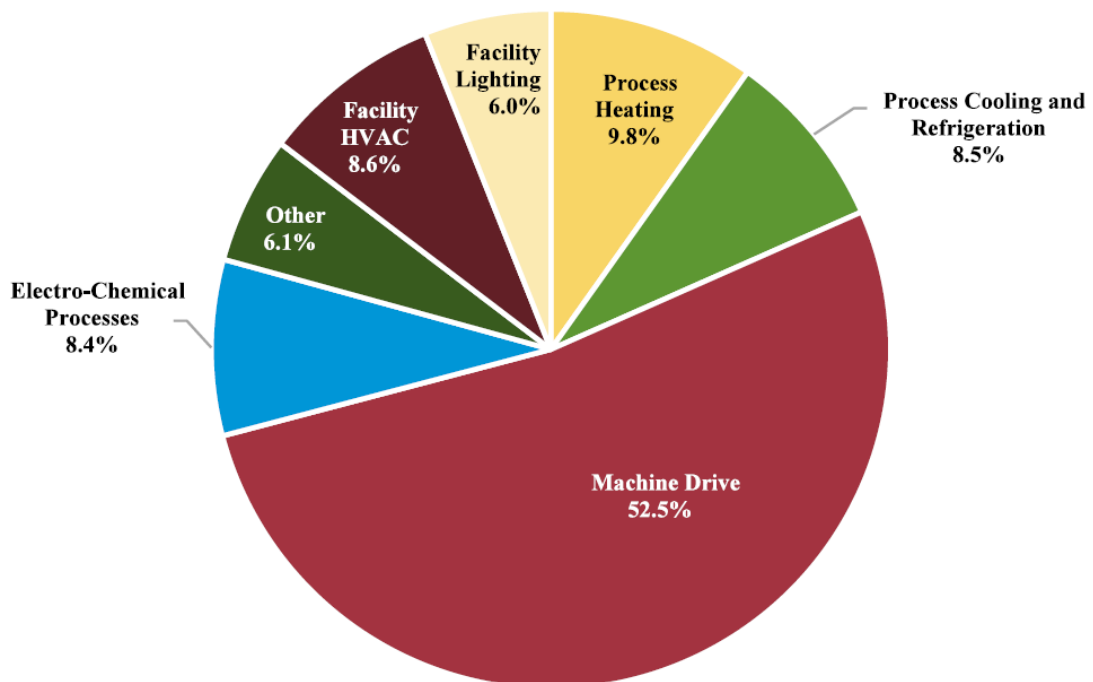


Figura 9 - Consumo de eletricidade por utilização final na indústria norte americana em 2018, adaptado de (Patterson et al., 2022)

## 2.3. Eficiência energética

Nesta secção é abordada a eficiência energética em contextos industriais, destacando medidas e estratégias que promovem a redução de consumos energéticos e o aumento da eficiência dos equipamentos e instalações.

### 2.3.1. Eficiência energética na indústria

A eficiência energética é um termo amplamente utilizado, muitas vezes com diferentes significados. De sublinhar a distinção entre eficiência energética e conservação de energia, que segundo (Oikonomou et al., 2009), a primeira refere-se à adoção de uma tecnologia específica que reduz o consumo global de energia sem alterar o comportamento relevante ou resultado final, enquanto a segunda implica apenas uma mudança no comportamento dos utilizadores.

Já segundo Carvalho (2009) a “eficiência energética visa proporcionar o mesmo nível de produção de bens, serviços e de conforto através de tecnologias que reduzem os consumos face a soluções convencionais” (Carvalho, 2009, p. 1).

Este conceito emerge como uma das estratégias mais eficazes para enfrentar os desafios económicos e ambientais associados ao consumo de energia. A eficiência energética baseia-se na utilização mais racional e eficiente dos recursos energéticos, promovendo uma redução no desperdício de energia e, simultaneamente, contribuindo para a diminuição dos custos e dos impactos ambientais.

Os equipamentos e os processos que consomem mais energia constituem normalmente as maiores oportunidades de poupança de energia nas instalações industriais (Patterson et al., 2022). É importante compreender a forma como os equipamentos e processos utilizam a energia em cada instalação, ao efetuar uma avaliação energética industrial. Com este conhecimento, é possível identificar os equipamentos e processos ineficientes nestas áreas de consumo intensivo de energia e implementar melhorias que produzam as maiores poupanças de energia às indústrias (Patterson et al., 2022).

#### Motores Eléctricos de Alta Eficiência

De acordo com Carvalho (2009), motores de alta eficiência, como os IE3 e IE4 (IE – *International Efficiency*), apresentam uma melhoria da eficiência, entre 2% e 4,5%, e do  $\cos \phi$  (fator de potência). Estas melhorias são alcançadas através do uso de materiais construtivos de melhor qualidade, maior quantidade de cobre e sistemas de ventilação otimizados. Embora o custo inicial seja até 25% mais alto face aos motores de eficiência *standard*, o retorno do investimento é rápido devido à economia de energia ao longo da vida útil do motor (Carvalho, 2009).

#### Conversores de Frequência (VFD - Variable Frequency Drive)

Os conversores de frequência são dispositivos que ajustam dinamicamente a velocidade e o torque de um motor eléctrico, através da capacidade de alterar a frequência de alimentação, adequando a sua operação às necessidades reais dos sistemas onde estão

instalados. Esta tecnologia é especialmente eficaz em aplicações de carga variável, como bombas, ventiladores e compressores, onde há necessidade de controlo preciso e eficiente de velocidade.

*Patterson et al. (2022)* explicam que os VFDs permitem uma redução significativa no consumo de energia ao eliminar desperdícios associados ao funcionamento contínuo em velocidades fixas. Em aplicações industriais, pequenas reduções na velocidade resultam em economias energéticas substanciais, na ordem dos 22% a 44% por motor. Em alguns cenários um motor a funcionar a 70% da velocidade em vez da velocidade máxima pode poupar até 50% em custos relacionados com a energia. Além da poupança significativa, esta tecnologia prolonga a vida útil dos motores ao reduzir cargas desnecessárias (Patterson et al., 2022).

#### Melhoria da Eficiência Térmica em Estufas e Fornos

Um estudo de campo do Departamento de Energia dos E.U.A. demonstrou que a substituição de aquecedores de queima indireta por equipamentos de queima permitiu reduzir em 20% o consumo de gás natural e em 15% o consumo de energia primária, mesmo considerando o maior uso de eletricidade para ventilação (Jim Young, 2014).

De acordo com Patterson et al. (2022) o aquecimento de processos, uma das atividades mais intensivas em energia na indústria, pode ser otimizado através de soluções como a recuperação de calor residual. Equipamentos como recuperadores e regeneradores conseguem reutilizar o calor dos gases de combustão, permitindo um aumento de 20% a 30% na eficiência de fornos e estufas (Patterson et al., 2022, pp. 7302–7303). A transição de sistemas de queima indireta para direta para aquecimento de fornos e estufas, especialmente com a implementação de queimadores modulantes de queima direta, pode aumentar significativamente a eficiência energética em processos industriais, uma vez que introduzem os produtos da combustão diretamente no ambiente a ser aquecido, eliminando intermediários e reduzindo perdas térmicas.

#### Resolução de Fugas de Ar Comprimido

As fugas de ar comprimido (AC) são uma das principais fontes de desperdício energético em sistemas industriais. Segundo ADENE (2016) as fugas podem representar, em média, cerca de 10 a 15 % do consumo de ar comprimido num sistema de ar comprimido (SAC). Sendo pequenas fugas inevitáveis mesmo em redes bem concebidas, a implementação de uma manutenção regular de identificação e reparação de fugas pode reduzir a percentagem de consumo do SAC. (ADENE, 2016).

Segundo o artigo publicado pela Revista Manutenção (2024) “uma fuga custa em média 1,200 € por ano” (Manutenção, 2024).

A Tabela 1 permite estimar caudais de fugas de ar comprimido, em m<sup>3</sup>/min, de acordo com a pressão da rede e o diâmetro da fuga (ADENE, 2016).

Tabela 1 - Caudal de fuga ( $m^3/min$ ) com base na pressão do ar e diâmetro da fuga, adaptado de (ADENE, 2016)

D (mm)	Pressão Absoluta (bar)						
	2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar	7 bar	8 bar
0,1	0,00027	0,00036	0,00045	0,00054	0,00054	0,00072	0,00081
0,2	0,00109	0,00145	0,00181	0,00217	0,00252	0,00288	0,00324
0,3	0,00245	0,00326	0,00406	0,00487	0,00568	0,00649	0,0073
0,5	0,00681	0,00905	0,0113	0,0135	0,0158	0,018	0,0203
1	0,0272	0,0362	0,0452	0,0541	0,0631	0,0721	0,0811
1,5	0,0613	0,0815	0,102	0,122	0,142	0,162	0,183
2	0,109	0,145	0,181	0,217	0,252	0,288	0,324
3	0,245	0,326	0,406	0,487	0,568	0,649	0,73
4	0,436	0,579	0,723	0,865	1,01	1,15	1,3
5	0,681	0,905	1,13	1,35	1,58	1,8	2,03
6	0,981	1,304	1,63	1,95	2,27	2,6	2,92
8	1,75	2,32	2,89	3,46	4,04	4,62	5,19
10	2,72	3,62	4,52	5,41	6,31	7,21	8,11

#### Redução da Pressão de Ar Comprimido

A redução da pressão de ar comprimido em sistemas industriais é uma prática amplamente reconhecida para melhorar a eficiência energética e reduzir os custos operacionais. Segundo ADENE (2016), “por cada bar de acréscimo no valor da pressão do SAC, implica um consumo adicional de 7% de energia nos compressores” (ADENE, 2016, p. 25).

Já de acordo com Atlas Copco (2015), em média, por cada bar de aumento na pressão corresponde a um aumento de 8% de consumo adicional. Por exemplo, para um compressor de capacidade 300 l/s, aumentar a pressão de trabalho em 1 bar significa um aumento de 6 kW/h no consumo de energia. Para 4000 horas de funcionamento/ano, isto representa 24.000 kWh/ano ou 2.400 euros/ano, para um custo de 0.10 €/kW/h (Copco, 2015).

Na Figura 10 é possível observar como é que a potência consumida por um compressor varia face ao aumento de pressão (Copco, 2015).

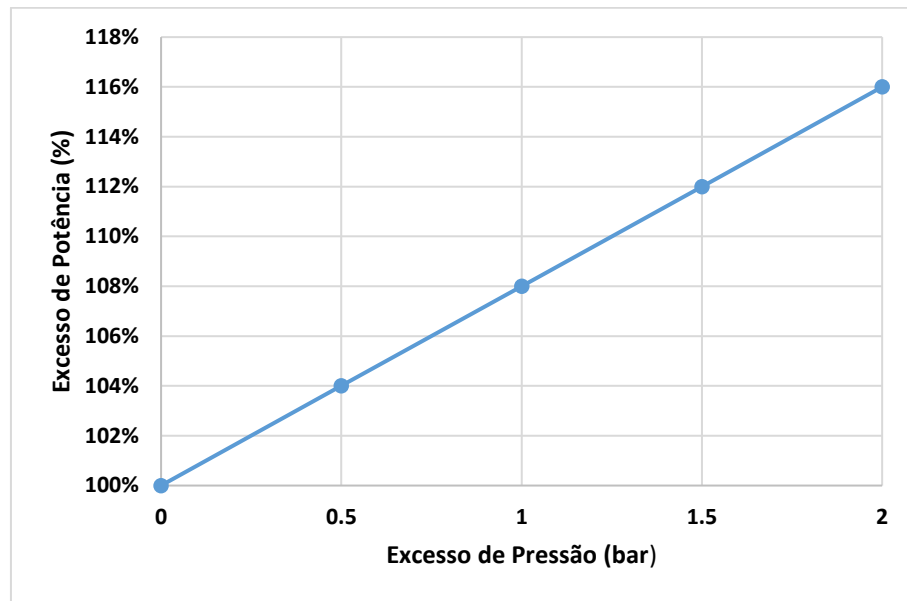


Figura 10 - Variação da Potência vs Pressão, adaptado de (Copco, 2015)

Implementar uma redução no SAC requer uma prévia análise cuidadosa das necessidades de pressão nos diferentes pontos de consumo, para garantir que a redução não comprometa o desempenho dos equipamentos, e, em certos casos, a segurança dos operadores.

#### Compressores VSD (Variable Speed Drive)

Os compressores de velocidade variável (VSD) ajustam a rotação do motor para corresponder às necessidades de ar comprimido em tempo real, proporcionando uma operação mais eficiente em sistemas onde o consumo varia significativamente. Esta tecnologia evita os ciclos de carga e vazio característicos dos compressores tradicionais de velocidade fixa, eliminando desperdícios de energia associados ao funcionamento em vazio reduzindo drasticamente os consumos durante períodos de baixa utilização (ADENE, 2016; Copco, 2015).

Segundo Costa (2012) e Agência para a Energia (2016) os compressores VSD proporcionam economias de energia de até 35% em comparação com compressores de velocidade fixa (ADENE, 2016; Costa, 2012). A Figura 11 ilustra para a mesma necessidade de ar comprimido como varia a pressão de regulação e a potência consumida para um compressor de velocidade fixa (esquerda) e de velocidade variável (direita).

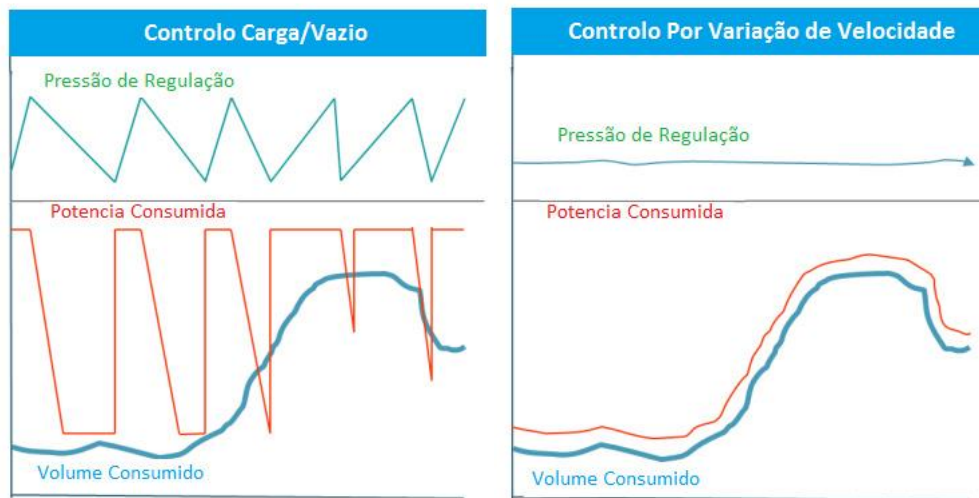


Figura 11 - Compressor de velocidade fixa vs velocidade variável, adaptado de (ADENE, 2016)

Este benefício traduz-se não apenas em custos operacionais mais baixos, mas também em menores emissões de carbono associadas ao consumo energético. Além disso, a vida útil do equipamento é prolongada devido à redução do desgaste mecânico.

#### Iluminação Eficiente (LED)

Os sistemas de iluminação LED (Díodo Emissor de Luz) destacam-se como uma solução tecnológica moderna para alcançar eficiência energética. De acordo com Agência para a Energia (2013), as lâmpadas LED, para além de terem uma vida útil significativamente maior, superando 30.000 horas, consomem até 90% menos energia quando comparadas às incandescentes tradicionais e até 50% menos que lâmpadas fluorescentes (ADENE, 2013; Evencio et al., 2023). Esta durabilidade reduz a necessidade de substituições frequentes, traduzindo-se em benefícios económicos consideráveis para aplicações industriais e comerciais. Além disso, as lâmpadas LED não utilizam componentes tóxicos, tornando-as ambientalmente sustentáveis e seguras (ADENE, 2013).

A viabilidade da implementação de sistemas LED está associada à rápida amortização dos custos iniciais. Embora o investimento seja maior na aquisição, a economia energética e a redução de custos por necessidade de substituição garantem o retorno financeiro do investimento em curto a médio prazo (ADENE, 2013).

Assim a adoção de iluminação LED é particularmente justificada em ambientes onde a iluminação é utilizada por longos períodos ou de forma contínua, como em vias públicas, espaços industriais e comerciais. Nestes casos, a substituição de sistemas de iluminação convencionais por LED resulta não apenas em economia de energia, mas também em melhorias na qualidade da iluminação e redução do impacto ambiental, devido à menor emissão de calor e ausência de materiais tóxicos em sua composição (M. Oliveira & Verly, 2014).

### 2.3.2. Casos de Estudo – Iniciativas e aplicações no âmbito da eficiência energética

Na Tabela 2, encontram-se listados diversos casos de estudo que exploram iniciativas e aplicações tecnológicas, que otimizam o consumo energético em diversos setores. São analisadas soluções que abrangem desde a otimização do SAC, motores elétricos, sistemas de secagem, iluminação eficiente, com o objetivo de melhorar a eficiência energética.

*Tabela 2 - Casos de estudo - Iniciativas e aplicações para melhoramento da Eficiência Energética*

(P. F. de L. Oliveira, 2018)	O estudo avaliou sistemas de ar comprimido (SAC) numa unidade fabril em Portugal, com o objetivo de identificar oportunidades de eficiência energética. A pesquisa utilizou auditorias energéticas e o software "AirScan™" para recolher e processar dados, identificando perfis de consumo e indicadores de eficiência energética. Foram avaliados perfis de consumo e regimes de funcionamento dos compressores, e propostas medidas como o ajuste das pressões de trabalho de AC, redução de fugas de AC e a introdução de um compressor VSD.
(De Assis Dias et al., 2020)	Este estudo avaliou a implementação de conversores de frequência num sistema de despoeiramento de uma indústria siderúrgica, com dois motores de indução de média tensão (1,4 MW cada). Utilizando medições em campo e simulações computacionais, o trabalho demonstrou uma redução de 82% no consumo energético. O retorno do investimento foi estimado em 1,02 anos.
(A. M. A. D. de Freitas, 2017)	O trabalho analisou o sistema de ar comprimido (SAC) da unidade fabril da <i>BorgWarner</i> em Viana do Castelo. O objetivo de analisar a eficiência energética e identificar oportunidades de melhoria no âmbito de um projeto 6 sigma. Foram utilizadas ferramentas como auditorias energéticas e o software "Modbus" para monitorização do consumo. Como resultados, foram propostas medidas como controlo e redução de fugas, onde foi estimado que as fugas de AC representavam 23% do consumo diário, com um custo associado de 34,56 €. A redução das fugas para níveis inferiores a 10% teria gerado uma poupança de cerca de 22,74 € por dia, acumulando um total de 3.433,74 € no período analisado (151 dias).
(United States Department of Energy, 2014)	Este estudo foi realizado pela <i>Industrial Assessment Center</i> da <i>Texas A&amp;M University</i> na unidade de produção da <i>ICON Fitness</i> em <i>Logan, Utah</i> , em 2013. O objetivo foi identificar oportunidades de poupança energética e de custos. A análise incluiu inspeções e recolha de dados, culminando em 11 recomendações, 10 das quais implementadas, incluindo reparação de fugas de ar comprimido, redução da pressão do SAC e substituição de sistemas de iluminação. As poupanças anuais totalizaram \$129.070 USD (649,790 kW/h/ano) com um custo de implementação de \$91.480 USD, prefazendo um retorno de 0,92 anos.

Tabela 2 (Cont.) - Casos de estudo - Iniciativas e aplicações para melhoramento da Eficiência Energética

(United States Department of Energy, 2021)	O estudo foi conduzido pelo Industrial Assessment Center da Louisiana State University na J&M Industries, em Ponchatoula, Louisiana, em 2021. O objetivo foi identificar oportunidades de poupança energética e redução de emissões de carbono. Foram propostas seis recomendações, incluindo eliminação de fugas no sistema de ar comprimido, substituição de lâmpadas fluorescentes por LED e instalação de painéis solares. A poupança anual total estimada foi de \$57.584 USD, com uma redução de 582.426 kW/h. O custo de implementação das medidas foi de \$656.833, com payback médio de 11,41 anos, destacando-se a eficiência das medidas de baixo custo e curto prazo, como a eliminação de fugas (\$675 USD com retorno de 0.13 anos) e o uso de LED (\$9.408 USD com retorno de 0.97 anos).
(Simões, 2013)	Este trabalho foi realizado no Centro de Produção de Souselas da Cimpor, em Portugal, com foco na implementação de medidas de eficiência energética. Foram analisados sistemas de bombagem de água e ventilação de uma torre de arrefecimento, onde se instalaram variadores de frequência (VFD) e motores de alto rendimento. Após as intervenções, registou-se uma redução de consumo elétrico de 62% no sistema de bombagem e de 54,2% no sistema de ventilação, com um tempo de retorno do investimento de 3,6 e 1,4 anos, respetivamente.
(R. S. P. de Freitas et al., 2017)	Este trabalho foi realizado numa indústria química no Brasil, analisando a transição de aquecimento indireto por vapor para queima direta de GLP de um sistema de secagem. Foram instalados dois geradores de ar quente de 1 MW cada, eliminando a dependência de vapor gerado pelas caldeiras. Após 18 meses de operação, o consumo energético foi reduzido para 40% do valor original, com uma redução de custos operacionais de 31,7%. O tempo de retorno do investimento foi de apenas 10 meses, destacando a eficiência energética e os ganhos económicos da implementação.
(Nepomuceno, 2016)	Este estudo foi realizado num hotel em Portugal e avaliou, entre outras medidas, a substituição da iluminação convencional por tecnologia LED. A análise projetou uma redução no consumo energético de 57.395 kWh para 11.567 kWh por ano, o que corresponde a uma poupança de 45.828 kWh, equivalente a cerca de 80% do consumo inicial. O custo estimado de implementação foi de 5.238 €, com uma poupança financeira anual de 3.100 €, resultando num tempo de retorno do investimento (payback) de 1,7 anos.



## **3. Desenvolvimento**

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento prático do trabalho, onde se descreve o percurso seguido desde a caracterização do contexto energético até à implementação das medidas de eficiência. Este capítulo estabelece a ponte entre a revisão bibliográfica e a aplicação concreta na realidade industrial, traduzindo a metodologia num conjunto de ações estruturadas e orientadas para a redução do consumo de energia e dos custos associados.

A organização do capítulo acompanha a lógica de evolução do projeto: inicia-se com o enquadramento técnico-energético, prossegue com a descrição das intervenções realizadas, apresenta a avaliação quantitativa dos resultados obtidos e termina com uma análise crítica, que discute de forma integrada os impactos e limitações das medidas aplicadas. Desta forma, o capítulo fornece uma visão completa do processo de desenvolvimento, desde a identificação das oportunidades até à consolidação dos resultados alcançados.

### **3.1. Análise inicial e enquadramento técnico-energético**

A primeira fase do trabalho consistiu na análise global dos consumos energéticos da empresa, com o objetivo de compreender a distribuição de eletricidade e gás natural pelos diferentes sistemas e processos industriais. Esta avaliação preliminar permitiu identificar os equipamentos e instalações mais representativos, bem como as áreas com maior potencial de otimização.

Com base neste enquadramento, foram definidos os critérios de seleção dos sistemas em estudo e estabelecida a estratégia de monitorização e análise a aplicar. Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os equipamentos selecionados, a abordagem adotada para o seu acompanhamento energético e a caracterização técnica das instalações analisadas, preparando o terreno para a avaliação das medidas de eficiência implementadas.

#### **3.1.1. Levantamento de necessidades e equipamentos selecionados**

Com o objetivo de promover uma cultura de eficiência energética nas instalações industriais da Efacec, foi desenvolvido um plano sistemático de diagnóstico e intervenção orientado para a redução do consumo de energia elétrica e de gás natural. Este plano enquadra-se na estratégia global da empresa de melhorar o seu desempenho energético, reduzir os custos operacionais associados à energia e alinhar-se com as metas ambientais e de sustentabilidade definidas ao nível nacional e europeu.

## Desenvolvimento

Este processo teve como objetivo principal identificar áreas críticas do ponto de vista energético, entender os padrões de funcionamento dos equipamentos, e reconhecer ineficiências operacionais que pudessem ser corrigidas. Para isso, foi adotada uma abordagem sistemática, articulando:

Observação direta no terreno: tempo de funcionamento dos equipamentos em diferentes turnos, comportamentos de arranque e paragem, operação sem carga produtiva (*standby* desnecessário) e equipamentos a trabalhar fora do horário produtivo ("*off-hours*");

Análise de dados e documentos técnicos: faturas energéticas mensais e anuais, esquemas elétricos e manuais técnicos de equipamentos e *layouts* das instalações;

Colaboração das equipas técnicas e operacionais: *feedback* por parte dos técnicos de manutenção e dos operadores das máquinas.

Esta abordagem permitiu não apenas identificar consumos elevados, mas também detetar situações de funcionamento ineficiente, como operação contínua de equipamentos durante horas não produtivas, ausência de controlo automático e equipamentos tecnologicamente desatualizados.

A seleção dos equipamentos a incluir no projeto de monitorização e análise foi baseada numa análise multicritério. Os principais critérios utilizados foram:

- Representatividade no consumo energético total (elétrico e térmico);
- Potencial de melhoria da eficiência com intervenções acessíveis;
- Relevância no processo produtivo (equipamentos críticos ou de uso intensivo);
- Grau de obsolescência tecnológica (falta de controlo automático, operação contínua);
- Facilidade de instrumentação e integração com o sistema de monitorização.

Este processo de análise resultou na seleção de medição de consumo elétrico de 20 equipamentos distribuídos por diferentes sectores e polos da empresa, e na medição de consumo de gás de 2 dessas instalações.

### #1 & #2 & #3: Sistema de Ar Comprimido – Polo da Arroiteia

O SAC do polo da Arroiteia é composto por um sistema integrado de três compressores, um de velocidade variável, GA180 VSD, com uma potência de entrada de 183 kW, dois de velocidade fixa, GA160 e GA200, com uma potência de entrada de 168 kW e 211 kW, respetivamente.

### #4 Compressor de Ar Comprimido – Polo da Maia

O fornecimento de ar comprimido aos dois edifícios do polo da Maia é garantido por um compressor de velocidade fixa, com uma potência de entrada de 11 kW.

### #5 Despoeiramento Core

O despoeiramento do Core é uma instalação de aspiração na área de fabrico de isolantes para transformadores tipo Core. Do ponto de vista técnico, trata-se de um sistema composto por condutas de extração, um sistema de filtros de mangas e um ventilador acoplado a um motor elétrico com potência de entrada de 55 kW.

#### #6 Despoeiramento Shell

A instalação do despoeiramento do Shell é um sistema de aspiração semelhante ao do Core, mas para área de fabrico de isolantes para transformadores tipo Shell. Este ventilador é acoplado a um motor elétrico de 22 kW.

#### #7 e #8 Vapour Phase Shell & Vapour Phase Core

O *vapour phase* (VP) do Shell e do Core são duas instalações de secagem semelhantes, que aplicam vácuo e utilizam o querosene como meio de transferência de calor com o objetivo de remover o máximo de humidade da parte ativa dos transformadores.

#### #9 Unidade de Vácuo Fixa nº1 – Core

Esta unidade de vácuo, tal como o nome indica, é responsável por aplicar vácuo na fase de *spray* final, que consiste no aquecimento do transformador, já com a parte ativa dentro da cuba, de forma a extrair o máximo de humidade. É composto por uma bomba de anel líquido acoplada a um motor elétrico de 15,5kW, e a duas bombas *roots* ambas acopladas a 5,5 kW.

#### #10 Unidade de Aquecimento de Óleo Térmico – Shell

A unidade de aquecimento de óleo térmico é utilizada para aquecer as paredes da autoclave da instalação do VP do Shell para a temperatura de 200°C. Este equipamento têm uma potência de entrada de 412 kW.

#### #11 Decapagem PT

Trata-se de uma instalação de decapagem por granalhagem que se destina à remoção de contaminantes superficiais, tais como ferrugem, tinta antiga, impurezas e incrustações das cubas dos transformadores de potência.

#### #12 Cabine de Pintura PT (Medição Elétrica e Gás)

A cabine de pintura utilizada no processo produtivo da Efacec assume uma função dual, operando em dois modos distintos: modo pintura e modo estufa. No modo pintura, assegura ventilação controlada e iluminação adequada ao processo. No modo estufa, utiliza um queimador a gás natural para aquecer o ar e garantir a secagem e cura das superfícies metálicas.

#### #13 Linha de Pintura Aérea (Medição Elétrica e Gás)

A linha de pintura aérea trata-se de um sistema automatizado destinado ao tratamento e pintura das cubas dos transformadores de transporte, composta por várias estações. As peças suspensas percorrem sequencialmente várias etapas específicas: pré-tratamento químico, limpeza a água, secagem, aplicação de revestimento primário, secagem pós-primário, aplicação de revestimento de esmalte, e por fim, secagem pós-esmalte.

#### #14 HAOS – Hot Air and Oil Spray - Core

O HAOS é uma instalação de secagem semelhante ao *vapour phase* cuja diferença reside que este utiliza apenas ar quente e vácuo. Este realiza a secagem às bobines do transformador, com o objetivo de reduzir a humidade.

#### #15 e #16 Chiller do Laboratório PT

Os *chillers* do laboratório PT (*power transformer*) são duas máquinas frigoríficas que garantem a temperatura constante necessária dos alternadores de ensaio dos transformadores Shell e Core assim como a climatização da sala onde as máquinas estão instaladas (duas UTA's). Estes equipamentos são idênticos e têm uma potência de entrada de 262kW.

#### #17 Chiller do Core

O chiller do Core é responsável pelo arrefecimento das bombas de vácuo anel líquido e condensadores do VP do Core, do HAOS e de ambas unidades de vácuo fixas do Core. Este equipamento tem uma potência de entrada de 191kW.

#### #18 Linha de Corte Longitudinal de Chapa Magnética (Slitting Line)

A linha de corte longitudinal, ou *slitting line*, é a máquina responsável por recortar e rebobinar as bobinas de chapa magnética em duas ou mais faixas de chapa. Apropriada o rolo mãe (1200mm) para várias medidas necessárias para fabricar o circuito magnético (30 a 800m de largura).

#### #19 Seccionadora Cartão Isolante - Shell

A seccionadora *FXH Schelling* é uma máquina utilizada para o corte preciso e automatizado de painéis de cartão isolante, madeiras e teflon, material isolante para a construção do isolante.

#### #20 Linha de Corte Transversal de Chapa Magnética (TBA400)

A linha de corte transversal, ou TBA400, é máquina responsável pelo corte do circuito magnético para a chapa dos transformadores de transporte (*step lap* e empilhamento).

### **3.1.2. Parceiro Tecnológico - *Sensorfact***

Com o objetivo de garantir uma monitorização energética eficaz, em tempo real e com elevado grau de fiabilidade, foi estabelecida uma parceria tecnológica entre a Efacec e a empresa *Sensorfact*, reconhecida pelo desenvolvimento de soluções específicas para a indústria na área da eficiência energética.

A escolha da *Sensorfact* resultou de uma avaliação técnica e estratégica. A sua solução integrada, composta por sensores não intrusivos, comunicação sem fios e uma plataforma de software baseada na *cloud*, revelou-se particularmente adequada ao ambiente industrial da Efacec. A facilidade de instalação, sem necessidade de interromper os processos produtivos, bem como a possibilidade de aceder aos dados remotamente com elevada granularidade, foram fatores decisivos para a sua seleção. Acresce ainda a experiência acumulada da *Sensorfact* no sector industrial, bem como o suporte técnico contínuo disponibilizado durante todas as fases do projeto.

O sistema fornecido pela *Sensorfact* inclui quatro componentes principais:

- 20 sensores de corrente (*power analyzers*)

Utilizados para medir o consumo elétrico de cada equipamento selecionado, consistem em módulos de medição trifásicos compostos por um transmissor e três garras amperimétricas (*clamps*), uma por cada fase do cabo de alimentação do equipamento a monitorizar. Estes sensores são instalados

de forma não intrusiva, sem necessidade de cortar os cabos ou desligar o equipamento, bastando abrir cada garra e fixá-la em torno de cada condutor de fase.

Os sensores funcionam com base no princípio de indução eletromagnética, medindo a corrente elétrica (A – Ampere) que atravessa cada cabo e convertendo essa informação em dados digitais de consumo. Não necessitam de alimentação externa, uma vez que utilizam o princípio de *energy harvesting*, extraindo energia diretamente dos cabos de alimentação dos equipamentos onde são instalados. O transmissor, por sua vez, comunica por via sem fios (Wi-Fi ou 4G) com a *bridge* mais próxima, utilizando o protocolo *EnOcean*.

Estas garras são disponibilizadas em três gamas de medição, 0-60 A, 60-200 A e 200-600 A, adequadas à intensidade de corrente de cada fase de cada equipamento. Na Figura 12 é possível visualizar um dos *power analyzers* utilizados no projeto.

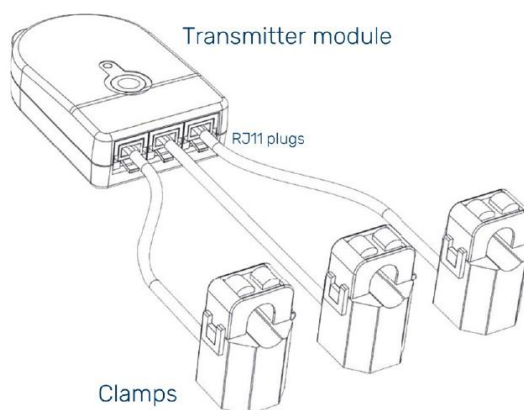


Figura 12 - Power analyzer composto por módulo transmissor e garras amperimétricas (clamps) utilizado no projeto

- 2 sensores de pulso (pulse sensors)

Aplicados para monitorizar o consumo de gás, estes sensores funcionam através da ligação à saída de impulsos do contador, que emite um sinal elétrico cada vez que é atingido um determinado volume de gás, normalmente definido como um número fixo de impulsos por metro cúbico (por exemplo 1 impulso = 0,01 m<sup>3</sup>). O sensor regista estes impulsos e transmite essa informação, por via Wi-Fi ou 4G, para a *bridge* mais próxima, tal como acontece com os sensores de corrente. Na Figura 13 é possível visualizar um dos sensores de pulso utilizados no projeto.



Figura 13 - Sensor de pulso utilizado no projeto

- Bridges (routers)

As *bridges*, ou *routers* de comunicação, recebem os dados transmitidos pelos sensores de corrente e pelos sensores de pulso, através do protocolo *EnOcean*, e reenvia-os para a plataforma online da *Sensorfact* por ligação Wi-Fi, *Ethernet* ou rede móvel (LTE/4G). Cada bridge tem um alcance efetivo de cerca de 10 metro, sendo essencial garantir uma instalação estratégica para assegurar a comunicação fiável com os sensores próximos. A Figura 14 mostra em detalhe a composição do router utilizado neste projeto.



Figura 14 - Router de comunicação utilizado no projeto

- Plataforma online de análise

A plataforma online de análise da *Sensorfact* constitui o núcleo central de visualização, gestão e interpretação dos dados energéticos recolhidos pelos sensores. Através de uma interface web acessível a partir de qualquer dispositivo com ligação à internet, é possível monitorizar em tempo real o consumo de energia elétrica e de gás de cada equipamento instrumentado. Esta permite o registo automático e contínuo dos consumos energéticos com um intervalo de amostragem de 60 segundos (1 minuto). Este intervalo é suficientemente granular para detetar variações de carga relevantes, ciclos de funcionamento, estados de *standby* e picos de consumo em equipamentos industriais.

A plataforma permite a organização dos equipamentos por grupos ou localizações, a visualização de dados em diferentes escalas temporais (hora, dia, semana, mês) e a comparação de consumos entre equipamentos ou períodos distintos, como se pode observar na Figura 15. Disponibiliza ainda gráficos de tendência, exportação de relatórios em formato CSV/Excel, cálculo de médias, identificação de picos de carga e integração de indicadores como potência, corrente e volume de gás consumido.

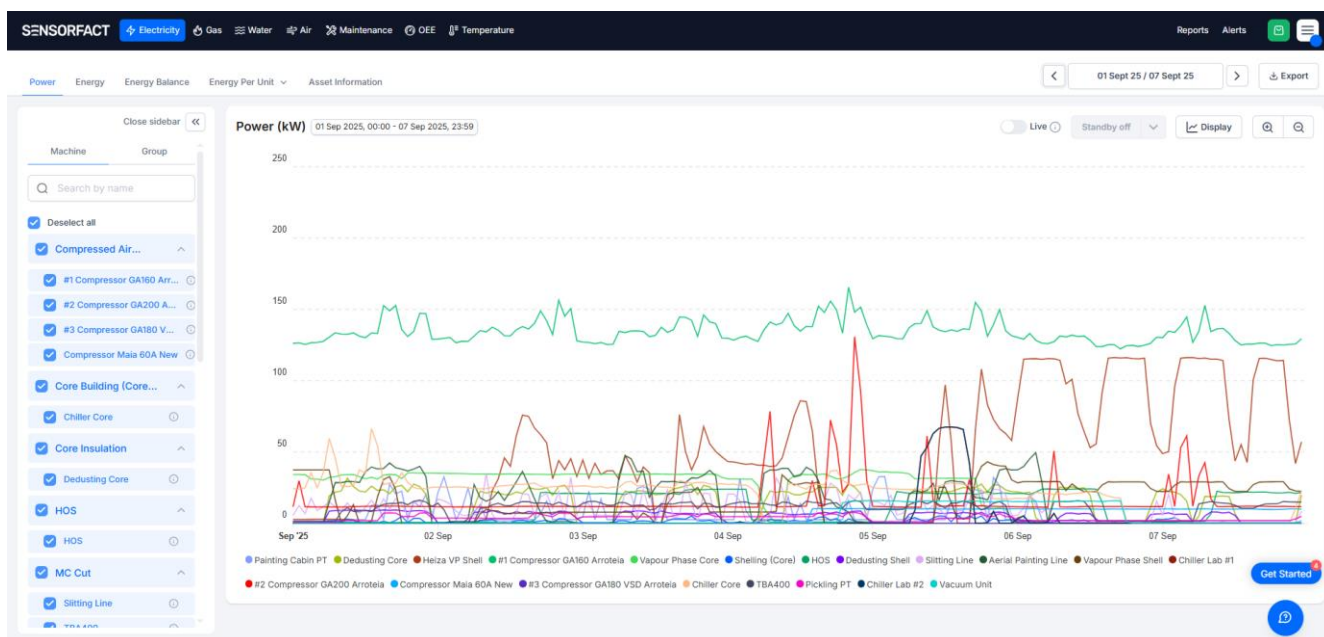


Figura 15 - Interface da plataforma Sensorfact

Na plataforma, a informação enviada pelos sensores é convertida em potência através da introdução manual dos valores da tensão de rede e do fator de potência estimado. A potência ativa é calculada com base na fórmula clássica da potência trifásica equilibrada, representada pela seguinte Equação (2):

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \quad (2)$$

Onde:

- P = Potência elétrica (Watt – W);
- V = Tensão elétrica (Volt – V);
- I = Corrente elétrica (Ampere – A);
- $\cos \phi$  = fator de potência.

No caso da Efacec, foi considerada uma tensão nominal de 230/400 V e um fator de potência constante de 0,9 para todos os equipamentos analisados.

#### Instalação do sistema de monitorização

A instalação do sistema de monitorização exigiu uma preparação técnica cuidada. Para cada equipamento, foi necessário realizar uma análise individualizada dos esquemas elétricos, de modo a identificar a corrente nominal e a proteção instalada. Em muitos casos, a ausência de registo documental atualizada exigiu a medição direta da secção dos cabos de alimentação e a análise local dos quadros elétricos, casos como o despoeiramento do Core e Shell.

Quanto à preparação da medição de gás, para a linha de pintura, foi utilizado o contador de gás já existente sendo necessária a verificação da sua marca, modelo e características técnicas, com especial atenção à presença de uma saída de impulsos compatível com o sensor da *Sensorfact*. Esta verificação permitiu identificar a constante de medição, número de impulsos por metro cúbico de gás, fundamental

## Desenvolvimento

para a correta configuração do sensor de pulso e para a posterior conversão dos dados em valores de consumo real.

No caso da cabine de pintura, verificou-se que o contador de gás existente era um modelo analógico, sem capacidade de gerar impulsos digitais compatíveis com o sistema de monitorização. Esta limitação inviabilizava a ligação do sensor de pulso da *Sensorfact*, o que exigiu a substituição do contador por um modelo digital, com saída de impulsos adequada, como é possível verificar na Figura 16.



Figura 16 - Contador de gás analógico antigo (esquerda) e novo contador digital com saída de impulsos (direita)

Este trabalho, moroso, mas essencial, permitiu determinar corretamente o tipo de sensor a aplicar, garantindo que os dados recolhidos fossem representativos e tecnicamente válidos.

No Apêndice B, encontra-se resumida a análise prévia realizada a todos os equipamentos selecionados para monitorização energética enviado à *Sensorfact*, indicando a gama de medição de corrente elétrica para cada equipamento, e determinada a constante de impulsos (IMP/M<sup>3</sup>) de cada contador, bem como a respetiva marca e modelo.

Esta informação foi essencial quer para garantir a correta seleção e instalação dos sensores de corrente, assegurando que os mesmos estavam dimensionados de acordo com as características reais de funcionamento de cada equipamento, quer para configurar corretamente os sensores de pulso e converter os sinais em valores de consumo térmico.

Para além da identificação das características elétricas de cada equipamento e da configuração dos sensores de pulso para os contadores de gás, foi igualmente necessário planear a infraestrutura de comunicação necessária para garantir a transmissão fiável dos dados recolhidos.

Neste contexto, tornou-se essencial determinar o número de *routers* (*bridges*) a instalar, uma vez que cada sensor transmite os seus dados por via Wi-Fi, com um alcance máximo eficaz de 10 metros até ao router mais próximo, conforme indicado pela *Sensorfact*. Assim, tendo em consideração a distribuição física dos equipamentos escolhidos nas instalações da Efacec, bem como a presença de barreiras estruturais (como armários metálicos, paredes ou outras instalações), foi realizada uma análise espacial para garantir a cobertura adequada de todos os pontos de medição. Apesar de estarem em monitorização 22 equipamentos (20 elétricos e 2 de gás), foi possível assegurar a conectividade de todo o sistema com a instalação de apenas 14 *routers*, posicionados estrategicamente para garantir comunicação eficiente e evitar perdas de sinal.

Concluída a fase de levantamento técnico e de planeamento da instrumentação, procedeu-se à instalação física dos sensores de medição bem como das *bridges*.

Esta fase foi realizada em articulação com a equipa técnica da *Sensorfact*, que disponibilizou um documento detalhado, onde consta o mapeamento exato entre cada sensor instalado e o equipamento correspondente. Este documento garantiu o rastreamento claro e inequívoco de todos os pontos de medição, facilitando a configuração e validação do sistema.

A instalação seguiu a lógica estabelecida no planeamento inicial, respeitando os limites físicos de alcance dos sensores (máximo 10 metros até à bridge mais próxima) e assegurando que todos os dados recolhidos fossem corretamente identificados e atribuídos ao equipamento respetivo na interface da plataforma. Na Figura 17 é possível visualizar um exemplo de um equipamento com a instalação do sensor e bridge já concluída, evidenciando a aplicação prática do sistema de monitorização energética.



Figura 17 - Exemplo de instalação concluída com power analyser e bridge de comunicação da *Sensorfact*

As instalações decorreram maioritariamente entre 8 e 10 de outubro de 2024. Excepcionalmente, o compressor da Maia foi instalado a 17 de outubro, devido ao envio incorreto da garra amperimétrica (60–200 A, demasiado grande para o quadro, sendo necessária uma de 0–60 A). Já o sensor de gás da Cabine do PT ficou concluído apenas a 4 de novembro, por necessidade de substituição do contador.

Após a instalação dos sensores e *bridges*, procedeu-se à configuração da plataforma online, onde foram definidos os parâmetros de cálculo necessários para a conversão dos dados medidos em consumos energéticos e respetiva análise económica e ambiental.

Com base na análise detalhada das faturas de fornecimento de eletricidade entre janeiro de 2024 e maio de 2025, foi possível calcular o custo médio mensal por kW/h ao longo deste período. O gráfico apresentado na Figura 18 mostra a evolução do custo médio mensal de eletricidade sem IVA, com valores que variaram entre aproximadamente 0,045 €/kW/h e 0,157 €/kW/h.

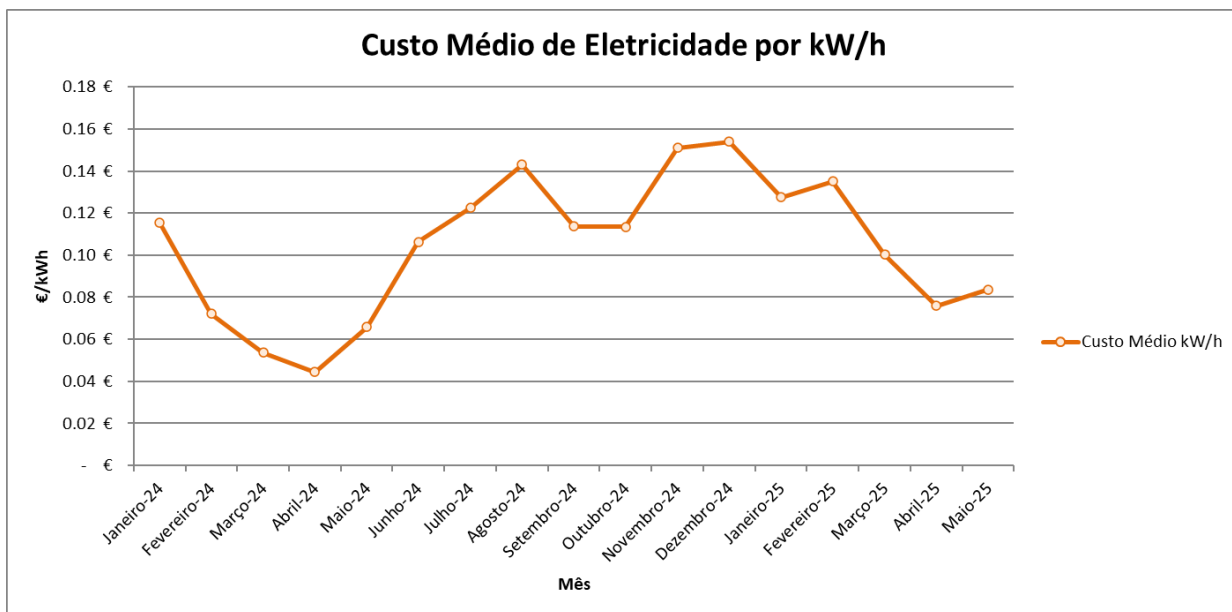


Figura 18 - Evolução do custo médio mensal de eletricidade entre janeiro de 2024 e maio de 2025

Esta flutuação reflete a volatilidade do mercado energético e possíveis variações contratuais ou tarifárias. Após este levantamento, obteve-se um custo médio ponderado de 0,1045 €/kWh, o qual serviu de base para a definição do valor de 0,10 €/kWh que foi introduzido na plataforma *Sensorfact*.

No caso da eletricidade, importa referir que na Efacec é fornecida em alta tensão (AT), o que contribui diretamente para um custo por kW/h inferior ao praticado em fornecimentos em baixa tensão (BT). Isto deve-se ao facto de os custos de acesso às redes serem mais reduzidos para clientes em AT, e de a empresa assumir a responsabilidade pela transformação da tensão através de transformadores de potência próprios, instalados nas suas infraestruturas.

Para efeitos de análise energética e uniformização dos dados de consumo de gás natural, foi necessário converter os volumes de gás (em m<sup>3</sup>) para unidades de energia (kW/h), compatíveis com os restantes consumos monitorizados. Esta conversão baseou-se no PCS do gás natural, que representa a energia total libertada pela combustão completa de 1 m<sup>3</sup> de gás, incluindo a energia contida no vapor de água formado durante a combustão. Este valor é utilizado para fins de faturação comercial e encontra-se indicado nas faturas emitidas pelo fornecedor.

No caso específico da instalação em análise, o PCS diário indicado nas faturas variou entre 11,4 e 11,7 kW/h/m<sup>3</sup>, sendo que o valor de referência utilizado pelo fornecedor é de 42 MJ/m<sup>3</sup>, correspondente a 11,667 kW/h/m<sup>3</sup>. Assim, para garantir consistência e fiabilidade nos cálculos, foi assumido este valor de 42 MJ/m<sup>3</sup> como fator de conversão, o que permite estimar corretamente os consumos energéticos reais e inserir os dados com precisão na plataforma *Sensorfact*.

De forma semelhante, foi realizado um levantamento exaustivo dos custos de gás natural com base nas faturas do mesmo período (janeiro de 2024 a maio de 2025). A evolução mensal destes custos pode ser observada na Figura 19.

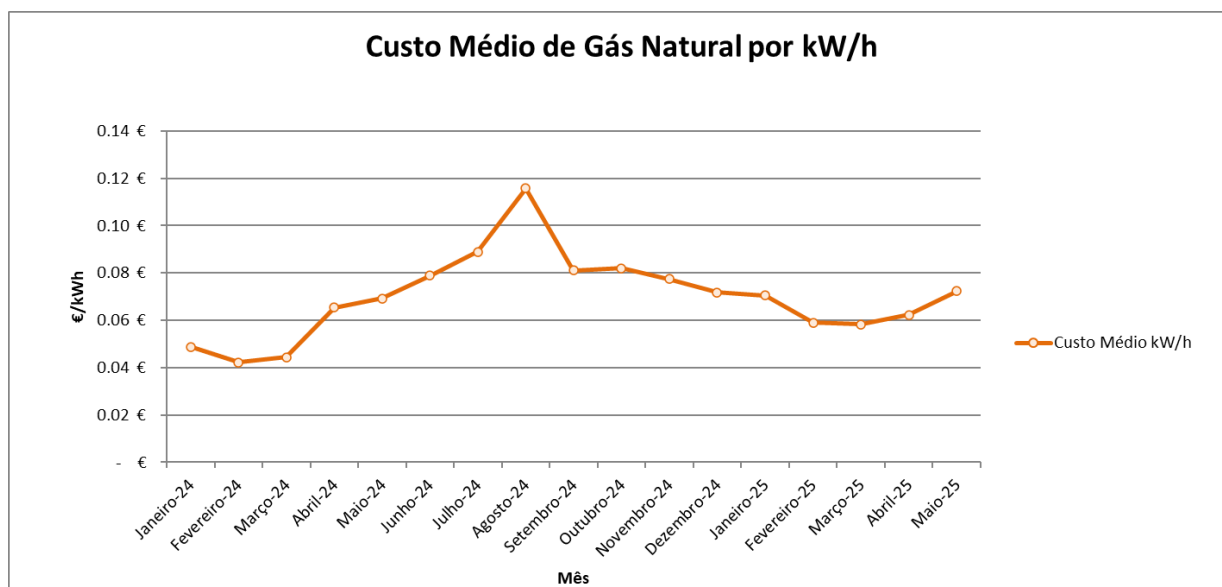


Figura 19 - Evolução do custo médio mensal de gás natural entre janeiro 2024 e maio de 2025

Este registo demonstra uma trajetória crescente até agosto de 2024 (atingindo um pico próximo de 0,115 €/kW/h), seguida de uma estabilização e ligeira descida durante o início de 2025. A média ponderada calculada para todo o período foi de 0,0699 €/kW/h, valor muito próximo do custo de 0,07 €/kWh que foi assumido na plataforma *Sensorfact*. Esta aproximação foi considerada aceitável e alinhada com os valores praticados na maioria dos meses analisados, permitindo uma modelação fidedigna dos custos energéticos reais na análise dos consumos.

A plataforma inclui a possibilidade de atribuir fatores de emissão de CO<sub>2</sub>e por kW/h consumido, tanto para eletricidade como para gás natural. Esta funcionalidade permite associar aos consumos energéticos monitorizados uma estimativa ambiental imediata, expressa em emissões equivalentes de dióxido de carbono. Neste âmbito, foram introduzidos os valores de 185 g CO<sub>2</sub>e/kW/h para a eletricidade e para o gás natural, ambos calculados com base nas faturas fornecidas pelo mesmo parceiro energético.

Esta parceria permitiu dotar a Efacec de um sistema de monitorização energética robusto, acessível e adaptado à realidade industrial, servindo de base técnica para todas as decisões de eficiência energética tomadas ao longo deste projeto.

### 3.1.3. Descrição dos processos analisados e identificação das oportunidades de melhoria

O presente ponto centra-se na descrição dos processos e equipamentos que foram objeto de intervenção no âmbito do projeto de eficiência energética desenvolvido na Efacec. Embora tenham sido instalados sensores em diversos equipamentos e instalações, nem todos foram alvo de medidas de melhoria. Em alguns casos, a análise dos dados recolhidos indicou um potencial de poupança pouco relevante face ao investimento necessário, conduzindo a um tempo de retorno (*payback*) elevado e, por conseguinte, à não implementação de ações, como o cenário de motores de alta eficiência. Noutros casos, os equipamentos foram apenas monitorizados com o objetivo de obter um conhecimento mais detalhado dos seus perfis de consumo, não tendo sido identificadas oportunidades viáveis de otimização no período em análise.

O processo de decisão contou com o contributo essencial do conhecimento técnico e experiência da equipa de engenharia e manutenção da empresa, bem como do apoio de parceiros externos, nomeadamente os fabricantes e fornecedores dos equipamentos e sistemas analisados, que permitiu validar as conclusões obtidas e identificar, com base no histórico de funcionamento e nas características operacionais dos equipamentos, os casos em que as oportunidades de melhoria eram pouco relevantes ou tecnicamente inviáveis.

Assim, optou-se por focar os esforços nos sistemas onde se verificou um impacto potencial significativo no consumo energético, e onde as melhorias apresentaram viabilidade técnica e económica.

Para cada processo selecionado para intervenção, será apresentada uma descrição do seu funcionamento e dos principais consumos energéticos associados, identificando-se de forma objetiva as oportunidades de melhoria. A fundamentação das medidas propostas baseia-se nos dados recolhidos e na avaliação técnica realizada, incluindo as estimativas de poupança energética e a correspondente redução das emissões. Cada solução será enquadrada no contexto produtivo da instalação e acompanhada da respetiva análise de viabilidade económica, assegurando a coerência entre os objetivos de eficiência energética e o retorno esperado do investimento.

### **3.1.3.1. Sistema de ar comprimido - Arroteia**

O SAC da unidade industrial da Arroteia é constituído por três compressores integrados, projetados para garantir uma pressão de 8 bar na rede, de forma a assegurar o fornecimento contínuo e fiável de ar comprimido aos diversos processos produtivos. Este conjunto inclui um compressor GA180 com acionamento de velocidade variável (VSD), e dois compressores de velocidade fixa, modelo GA160 e GA200. O sistema foi concebido para operar de forma eficiente, tirando partido das características do VSD para modular a produção de ar comprimido consoante as necessidades da instalação, com os compressores de velocidade fixa a operar como apoio em situações de maior exigência.

No entanto, desde o início da análise energética, o compressor GA180 com acionamento VSD encontra-se avariado, o que compromete de forma significativa a eficiência do sistema. A ausência do VSD obriga os dois compressores de velocidade fixa a assegurar toda a produção de ar comprimido, o que implica um funcionamento menos eficiente e um consumo energético elevado. O GA160 é o compressor de referência, operando de forma praticamente contínua para manter a pressão na rede, enquanto o GA200 é acionado sempre que o GA160 não consegue satisfazer isoladamente a procura. Esta configuração, baseada em compressores de velocidade fixa, conduz a perdas significativas, uma vez que estes equipamentos alternam entre funcionamento a plena carga e em alívio, consumindo energia mesmo sem produzir ar comprimido, como é possível analisar na Figura 20.

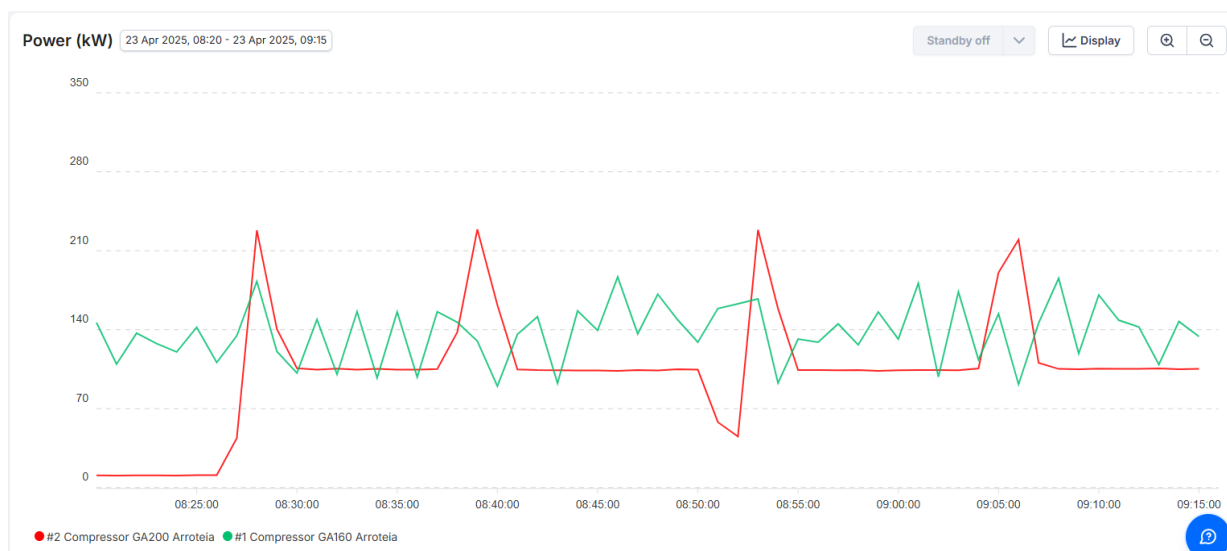


Figura 20 - Perfil de consumo energético dos compressores GA160 e GA200 da Arroteia

Posto isto, foi realizada uma análise dos consumos energéticos do SAC da Arroteia com base nos dados recolhidos ao longo de oito semanas consecutivas, da semana 43 a 50 de 2024. Esta análise encontra-se disponível com mais detalhe no Apêndice C.

Os resultados mostraram que, ao longo das oito semanas analisadas (semana 43 a 50, de 2024), o consumo energético dos compressores apresentou um padrão caracterizado por elevada constância, independentemente do nível de atividade da fábrica. Verificou-se que os consumos diários em dias úteis atingiram valores na ordem dos 3500 a 4300 kW/h (350€ a 430€), enquanto aos fins de semana os consumos se mantiveram surpreendentemente elevados, com valores médios de 3500 kW/h (350€) por dia, apesar da redução substancial ou mesmo ausência de atividade produtiva.

No período analisado, durante a semana de trabalho, verificou-se que o compressor GA160 assumiu o papel principal no fornecimento de ar comprimido à instalação, sendo responsável por uma média de cerca de 86% a 89% do consumo total do sistema de ar comprimido (SAC). Este valor está em linha com o facto de o GA160 operar como compressor principal, garantindo o fornecimento base necessário à rede. O compressor GA200, por sua vez, apresentou uma contribuição mais residual, surgindo como equipamento de apoio, acionado apenas nos momentos em que o GA160 não conseguia, isoladamente, satisfazer a procura. A sua participação no consumo total oscilou entre 11% e 14%, refletindo a sua função suplementar no sistema.

Ao fim de semana, a análise dos dados revelou que o contributo do compressor GA200 no consumo total do sistema caiu para cerca de 9%, refletindo a menor necessidade de reforço na produção de AC, uma vez que a carga produtiva era substancialmente menor. Ainda assim, o custo médio do sistema manteve-se elevado, registando-se um valor médio diário de 353,37 € ao fim de semana, face aos 394,35 € médios por dia durante a semana de trabalho.

A análise dos consumos semanais revelou uma estabilidade notável nos custos energéticos, com variações muito reduzidas entre semanas, independentemente do nível de atividade da instalação.

Com base nos dados recolhidos, apurou-se um custo médio semanal de aproximadamente 2.678 €, sendo o compressor GA160 responsável por 88,1%. Considerando que a instalação funciona de forma

## Desenvolvimento

contínua ao longo do ano (52 semanas), estima-se que o custo anual do sistema de ar comprimido nas condições observadas ascenda a cerca de 139.280 €.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos principais indicadores resultantes da análise semanal, evidenciando o custo médio semanal do sistema de ar comprimido e a estimativa de custo anual, assumindo o seu funcionamento inalterado ao longo de todo o ano.

*Tabela 3 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do sistema de ar comprimido da Arroteia.*

SAC Arroteia	
Consumo total (kW/h)	214277.92
Custo total (€)	21,427.79 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	39.64
Nº semanas em análise	8
Consumo médio semanal (kW/h)	26784.74
Custo médio semanal (€)	2678.47
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kWh)	4.96
Custo estimado anual (€)	139,280.65 €

Estes valores representam um encargo relevante para a operação industrial e deve ser encarado não apenas como um custo fixo inevitável, mas como uma oportunidade de otimização com retorno económico claro. Este comportamento evidencia dois fatores principais responsáveis pelo consumo energético excessivo: por um lado, a existência de fugas significativas na rede, que obrigavam o sistema a compensar as perdas constantes AC, por outro lado, e de forma mais determinante, a ausência do compressor VSD, que impossibilitava o ajuste dinâmico da produção de ar às reais necessidades da instalação. Enquanto as fugas contribuem para manter o sistema ativo mesmo em vazio, é a incapacidade dos compressores de velocidade fixa em modular a sua produção que leva ao consumo constante de energia, mesmo em situações de procura muito reduzida.

Assim, a falta do VSD constituiu o fator predominante no custo energético excessivo observado, dado que, com um compressor de velocidade variável funcional, o sistema poderia ter reduzido os consumos em períodos de baixa ou nula procura, mesmo na presença de algumas fugas.

A literatura técnica e dados do fabricante (Atlas Copco) indicam que um sistema com VSD pode permitir poupanças de energia na ordem dos 35% face a um sistema baseado exclusivamente em compressores de velocidade fixa, o que reforça a importância de recuperar esta funcionalidade no sistema da Arroteia.

No caso da Arroteia, não se trata de uma substituição direta, mas sim da reposição do sistema integrado original, que já previa a operação combinada de um compressor VSD com dois compressores de velocidade fixa. A reposição do VSD e a retoma do funcionamento integrado na configuração prevista permitem assumir a estimativa de poupança referida, dado que o compressor VSD, ao ajustar dinamicamente a sua produção, reduzirá significativamente os períodos de operação desnecessária e eliminará os consumos em vazio típicos dos compressores de velocidade fixa. Considerando o custo anual atual estimado do sistema (139.280 €), a recuperação da funcionalidade do VSD poderá representar uma poupança potencial de aproximadamente 48.750 € por ano, reforçando a viabilidade económica da intervenção.

Importa referir que, até ao início de julho de 2025, o SAC da Arroteia esteve sob a responsabilidade do Departamento de Património e Serviços (DPS), o que limitou a intervenção direta da equipa de Manutenção Industrial Transversal (MIT), em matérias como propostas de reparação, substituição ou aluguer do compressor VSD. Contudo, a partir dessa data, a responsabilidade pelo SAC foi integrada na MIT, passando este departamento a assumir a gestão da manutenção, aquisição e reparação dos compressores do polo da Arroteia. Com esta alteração organizacional, a substituição do compressor VSD apenas será concretizada após a conclusão do presente estudo, encontrando-se já prevista como medida futura.

Paralelamente à questão da regulação da produção de AC, tendo em conta a grande extensão da rede de AC da Arroteia, com quilómetros de tubagem distribuídos por diferentes áreas da instalação, foi considerada fundamental a realização de uma intervenção focada na deteção e eliminação de fugas localizadas ao nível dos equipamentos produtivos, uma vez que estas podem representar perdas energéticas significativas, independentemente da configuração dos compressores. A rede existente apresenta um número elevado de pontos de potencial fuga, nomeadamente na tubagem, acessórios de AC e unidades de manutenção pneumática, cuja degradação ao longo do tempo pode comprometer a estanquidade do sistema.

A intervenção prevista pretende quantificar o impacto real destas perdas no consumo energético do sistema, mesmo sem a presença do compressor de velocidade variável (VSD). Ao atuar sobre este fator isolado, será possível perceber se a redução da procura artificial imposta pelas fugas, permitirá reduzir a frequência dos ciclos de carga/alívio dos compressores de velocidade fixa, ou seja, numa diminuição efetiva do tempo em carga, contribuindo para um funcionamento mais eficiente do sistema mesmo em condições limitadas.

Outro vetor de atuação considerado na melhoria da eficiência energética do sistema de ar comprimido foi a redução da pressão de trabalho da rede, que se encontrava originalmente ajustada para 8 bar. A pressão da rede foi alterada para 8 bar aquando da aquisição dos três compressores, em 2007, para não quebrar o caudal nos pontos mais distantes da linha

Esta configuração era, à partida, tida como *standard* para garantir o fornecimento fiável aos equipamentos, mas sem uma validação rigorosa da sua real necessidade.

De acordo com a literatura técnica e dados do fabricante (Atlas Copco) por cada bar de aumento na pressão de rede, estima-se um acréscimo médio de 8% no consumo energético dos compressores. Esta relação linear implica que manter uma pressão superior ao necessário pode representar um custo energético considerável ao longo do tempo, sobretudo em instalações de grande escala e funcionamento contínuo, como é o caso da Arroteia. Este dado técnico foi um dos fundamentos essenciais para reavaliar a pressão de operação da rede e identificar oportunidades de racionalização.

Assim, foi iniciada uma avaliação sistemática da pressão de operação dos equipamentos mais críticos do polo da Arroteia, com o objetivo de apurar se existia margem segura para reduzir a pressão de rede, sem comprometer o desempenho produtivo.

Neste documento, foram listados os equipamentos de maior criticidade operacional, registando-se para cada um deles a pressão lida localmente nos reguladores de ar comprimido, a pressão atual após regulação conforme a pressão recomendada, a pressão recomendada (com base em manuais, placas de

## Desenvolvimento

características ou informação do fabricante), e a diferença entre ambas ( $\Delta$ ). Esta abordagem combinou a consulta documental com a verificação direta no terreno. Nos casos em que a documentação técnica não fornecia indicação clara da pressão nominal, procedeu-se à análise funcional dos componentes pneumáticos do equipamento, especialmente dos atuadores de válvulas e sistemas de controlo pneumático, que na maioria dos casos apresentavam requisitos que não ultrapassavam os 5,5 bar.

Esta metodologia permitiu identificar, com objetividade, quais os equipamentos operavam acima do necessário e, por conseguinte, onde existia potencial de redução de pressão. O levantamento revelou que, com exceção de dois equipamentos, todos os restantes apresentavam pressões recomendadas inferiores a 8 bar, geralmente entre 6 e 7 bar, como é possível observar na Tabela 4.

Tabela 4 - Pressões de operação recomendadas e medidas nos equipamentos críticos

Cadastro	Equipamento	Leitura Manómetro Inicial (Bar)	Pressão Atual (Bar)	Pressão Recomendada (Bar)	$\Delta$ (Pressão Recomendada - Pressão Atual)
10M22101/2...	DELU	8 (ligado à rede)	8	6	-2
10M02201/2...	SOLVING	8 (ligado à rede)	8	6	-2
10M337	Bermaq	8	8	8	0
10M055	Decapagem PT	8	7	7	0
10M056	Cabine PT	8	7	7	0
40PNT216	Comboio DT	8	7		-7
10M098	Creneau Core	8	7	7	0
10M239	Schelling Core	7	7	6	-1
10M188	Schelling Shell	8	7	6	-1
10M002	Creneau Shell	7	7	6	-1
10M071	Robot calços Shell	8	7	6	-1
40M252	Slitting Line	8	7	6	-1
10M001	VP Shell	6.5	6.5	6	-0.5
10M274	Spray final Shell	6.5	6.5	6	-0.5
40DCP208	Tosca	6	6	5.5	-0.5
10M186	HOS	6	6	6	0
10M392	Armazem cartões Shell	6	6	5.5	-0.5
10M037	Georg PT	5.5	5.5	6	0.5
10M220	VP Core	5.5	5.5	6	0.5
40PRS194	Georg Alhetas	5.2	5.2	5.5	0.3
40COR068	Georg DT	5	5	5.5	0.5
10M223	Despoeiramento Core	4.8	4.8	4	-0.8
10M382	Despoeiramento Shell	4	4	4	0
40PNT222	Cabine DT	3.5	3.5	3.5	0
10M341	Alfawood Shell	8	8	8	0

As únicas exceções iniciais encontradas foram os centros de maquinação CNC Bermaq e Alfawood, cujos manómetros indicavam uma pressão de 8 bar e cuja documentação de operação confirmava esse valor como pressão recomendada. Contudo, por se tratar de equipamentos com impacto significativo na operação e no dimensionamento da rede, foi decidido contactar diretamente os fabricantes para esclarecer se esse valor era tecnicamente exigido por todo o sistema ou apenas por componentes específicos. O foco da análise recaiu sobre o *spindle* (porta-ferramentas pneumático), ilustrado na Figura 21, identificado como o principal consumidor de ar comprimido nestas máquinas.

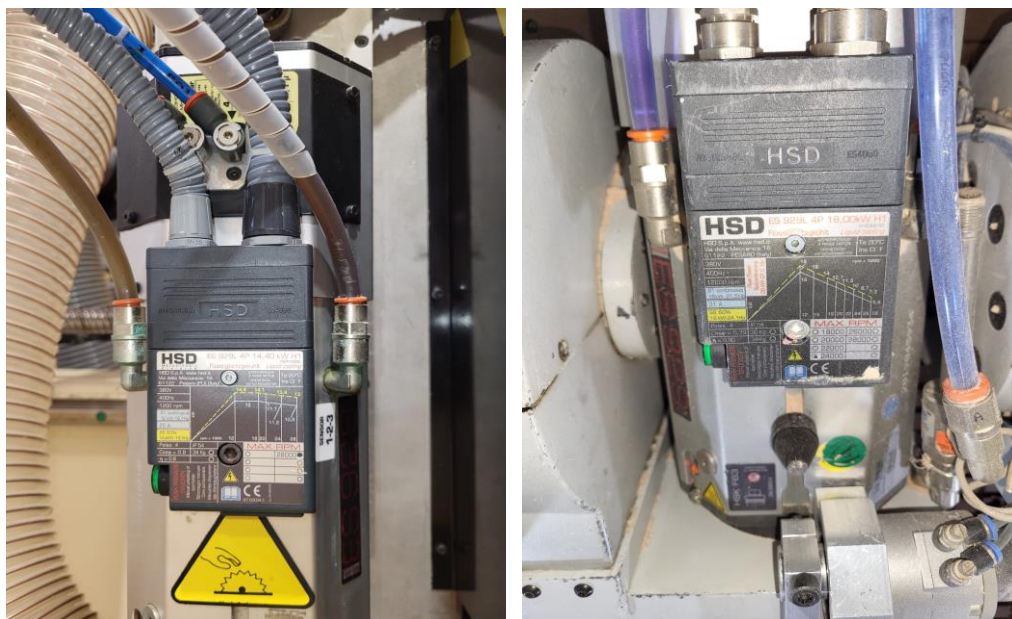


Figura 21 - Spindles pneumáticos dos centros de maquinação CNC Bermaq e Alfawood

O *spindle* é o componente responsável por garantir a fixação da ferramenta de corte durante o ciclo de trabalho, operando com um sistema pneumático de bloqueio que necessita de AC a uma determinada pressão mínima para garantir a segurança da operação. A sua função é crítica do ponto de vista da segurança operacional, uma vez que a máquina apenas inicia o processo caso a ferramenta esteja corretamente fixada, sendo que o sistema está programado para impedir o arranque do corte caso não aconteça a correta fixação. Ambas CNC's identificadas como exceções, *Alfawood* e *Bermaq*, utilizam *spindles* pneumáticos do mesmo fabricante: *HSD Mechatronics*, modelo ES929 4P, com variações apenas ao nível da potência do motor, 14.40 kW e 18 kW respetivamente, adequadas às exigências de carga e remoção de material de cada máquina.

Para esclarecer a real necessidade de pressão neste componente específico, foi estabelecido contacto direto com o fabricante do *spindle*, com o objetivo de obter uma recomendação técnica fiável quanto à pressão de AC necessária para garantir o correto funcionamento e segurança do sistema de fixação. A resposta do fabricante, recebida por email e arquivada como evidência técnica, foi esclarecedora. Conforme ilustrado na Anexo A, de acordo com o manual de instruções do fabricante a pressão de funcionamento recomendada para o sistema pneumático de fixação é 6 bar, para tubagem de  $\varnothing 8 \times 6$ , que é a instalada em ambas as máquinas.

Esta indicação foi complementada por contacto direto com a *HSD Mechatronics*, cujo departamento técnico confirmou, que o sistema pode operar de forma segura dentro de um intervalo

de 6 a 7 bar, desde que a pressão se mantenha constante. Como referido anteriormente, o ciclo da máquina apenas se inicia após a correta fixação da ferramenta, não existindo risco de falha mesmo com pressões inferiores aos 8 bar anteriormente definidos como padrão.

Esta validação permitiu confirmar que nenhum dos equipamentos críticos da Arroteia depende, de forma justificada, de uma pressão de rede de 8 bar, consolidando assim o fundamento técnico para a redução da pressão da rede de AC, como parte das medidas de melhoria da eficiência energética.

De acordo com a análise técnica realizada e nas pressões recomendadas pelos fabricantes dos equipamentos, foi decidido ajustar a pressão da rede de AC para 7,3 bar. Esta decisão teve em consideração o facto de várias instalações da Arroteia exigirem efetivamente 7 bar de pressão para funcionamento adequado, e de forma a garantir uma margem de segurança operacional, compensando eventuais perdas de carga em pontos mais distantes ou mais exigentes da rede, cuja extensão e complexidade podem gerar pequenas quedas de pressão.

Com base na relação que estima um acréscimo de 8% no consumo energético por cada bar de pressão adicional, a redução da pressão da rede de 8,0 para 7,3 bar permite estimar uma poupança energética teórica de aproximadamente 5,6%, o que, aplicado ao custo anual atual de 139.280 €, corresponde a uma poupança potencial de cerca de 7.800 € por ano.

### **3.1.3.2. Sistema de ar comprimido – Maia**

O sistema de ar comprimido da unidade industrial da Efacec localizada na Maia é constituído por um compressor de velocidade fixa, um Atlas Copco GA 11 de 1994, encarregado de alimentar a rede AC local a 6 bar. Este sistema serve diversos pontos de utilização distribuídos pelas áreas produtivas, sobretudo associados a ferramentas pneumáticas e pequenos acionamentos, desempenhando um papel de apoio, mas não crítico, na operação diária. O compressor opera com base num controlo por pressão, sem qualquer modulação da carga ou sistema de corte automático em função da atividade real da instalação.

À semelhança do estudo realizado para o SAC da Arroteia, foi também analisada a possibilidade de redução da pressão de rede no polo da Maia. Procedeu-se à verificação dos requisitos de pressão dos principais equipamentos alimentados por esta rede, com o objetivo de identificar oportunidades de melhoria energética. No entanto, concluiu-se que a pressão atualmente definida, 6 bar, corresponde aos requisitos mínimos necessários para o funcionamento seguro e eficiente dos equipamentos instalados. Assim, não foi identificada margem técnica para redução adicional da pressão de serviço, pelo que não foram consideradas medidas deste tipo no âmbito das intervenções planeadas para esta instalação

No entanto, ao contrário da unidade da Arroteia, que alberga processos de elevada dependência de ar comprimido, como os sistemas de transporte de grandes cargas *Delu* e *Solving*, ou instalações de secagem críticas como o *Vapour Phase*, o polo da Maia não apresenta equipamentos com necessidades contínuas ou críticas deste tipo. Além disso, o regime de laboração é significativamente mais restrito: as fábricas da Maia operam em horário diurno, geralmente entre as 06:00h e as 18:00h, não existindo atividade noturna regular. Em contraste, a Arroteia opera com dois turnos fixos (06h–15h e 15h–23h30), podendo atingir três turnos em épocas de maior carga produtiva, o que justifica uma abordagem diferente em termos de disponibilidade contínua de ar comprimido.

A análise dos dados recolhidos pela plataforma *Sensorfact* permitiu distinguir claramente os padrões de consumo do compressor em períodos de laboração e de inatividade, como é possível observar nas Figuras 23 e 23.

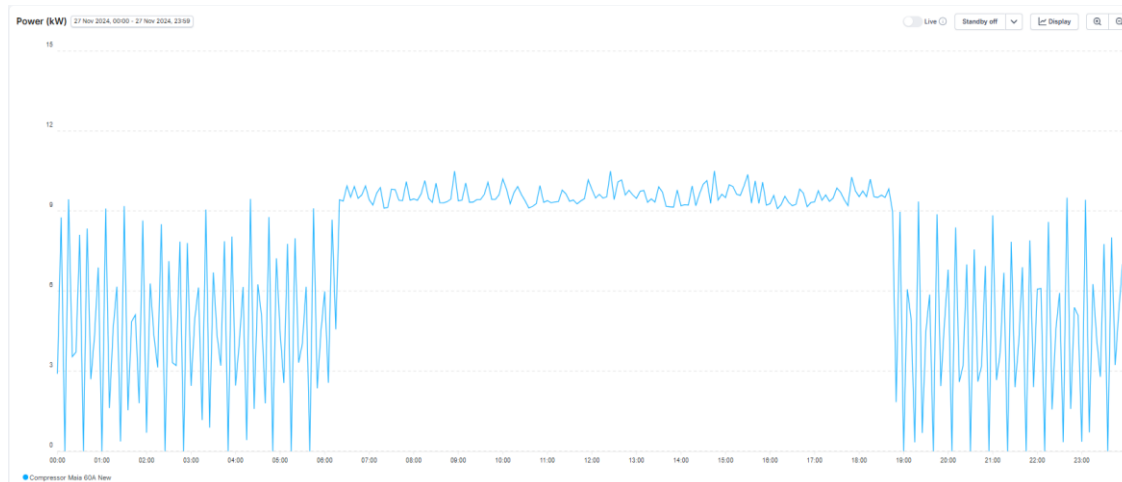


Figura 22 - Perfil diário de consumo do compressor da Maia (27 de novembro de 2024)

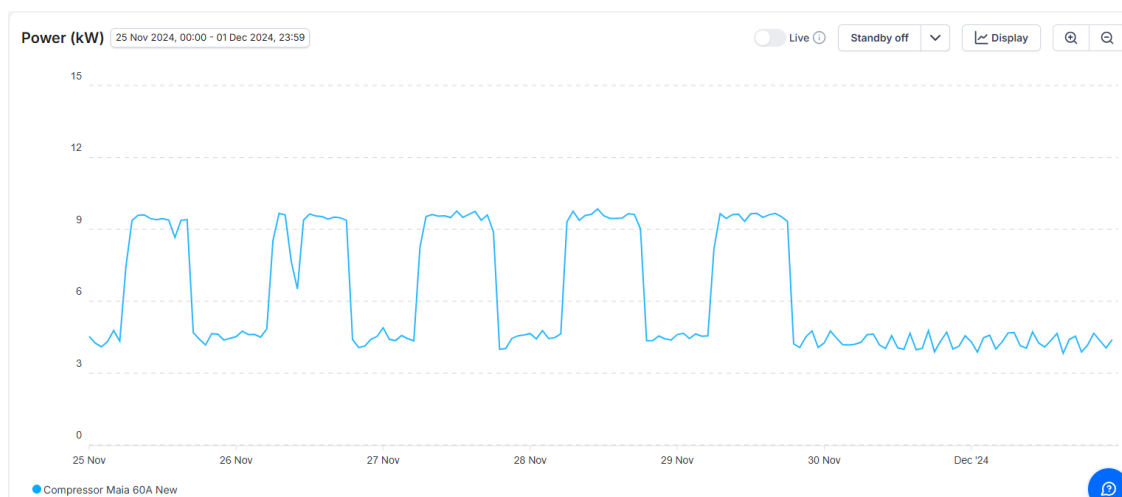


Figura 23 - Perfil semanal de consumo do compressor da Maia (25 de novembro a 1 de dezembro de 2024)

Verificou-se que, durante o horário normal de laboração, o compressor registava um consumo médio de 9,5727 kW/h por hora, ou seja aproximadamente 0.96 €/kW/h, refletindo a operação em carga com fornecimento efetivo de AC à rede. No entanto, mesmo durante os períodos sem qualquer atividade produtiva, durante a noite e fins de semana, o equipamento continuava a operar em vazio, com um consumo médio de 4,3 kW/h por hora, ou seja aproximadamente 0.43 €/kW/h, resultante da necessidade de compensar fugas e manter a pressão da rede. Este consumo em “*off-hours*”, sem qualquer valor produtivo associado, representava uma oportunidade clara de melhoria em termos de eficiência energética.

Face a estas evidências, optou-se por implementar uma solução técnica que permitisse isolar automaticamente a rede de AC fora do horário produtivo, evitando o funcionamento em vazio do compressor. A solução idealizada passa pela instalação de uma válvula de corte automática à saída do

## Desenvolvimento

reservatório de AC, eletrificada e comandada por um quadro elétrico dedicado, equipado com um relógio programável digital e um comutador Manual/Automático.

Em modo "Automático", o sistema atua segundo uma programação horária que reflete o regime de laboração da unidade, com corte de fornecimento entre as 20:00h e as 06:00h nos dias úteis, e durante todo o fim de semana, assegurando que o compressor não alimenta a rede quando esta não está a ser utilizada. Embora o horário laboral habitual da unidade da Maia decorra entre as 06:00h e as 18:00h, optou-se por estender a janela de fornecimento de AC até às 20:00h no relógio programável. Esta margem adicional foi definida por precaução, de forma a acomodar eventuais prolongamentos de turno.

No entanto, em situações excecionais em que seja necessário utilizar ar comprimido fora do horário normal, o operador pode colocar o comutador em "Manual", o que permite anular temporariamente a lógica do relógio (função de *override*) e abrir imediatamente a válvula, restabelecendo o fornecimento de AC à rede. Esta solução assegura a eficiência energética durante a operação regular, sem comprometer a flexibilidade e disponibilidade do sistema sempre que necessário.

A escolha por esta abordagem, em vez de desligar diretamente o compressor, deve-se às limitações técnicas do equipamento instalado. Segundo indicação do parceiro técnico, o compressor não permite arranques ou paragens remotas, e uma interrupção direta da alimentação seria interpretada como uma falha elétrica. Tal paragem forçada, especialmente se ocorrer com o grupo compressor ainda em rotação, pode provocar danos mecânicos, nomeadamente o gripar do bloco de parafuso e desgaste prematuro de rolamentos.

A avaliação da viabilidade de instalar uma válvula de corte temporizada à saída do reservatório de AC do polo da Maia, identificou uma limitação relevante relacionada com duas impressoras a jato de tinta branca *Komax IMS 295 MC*. Estas máquinas requerem pequenos impulsos de AC a cada 20 minutos, mesmo fora do horário produtivo, com o objetivo de manter a tinta em circulação e evitar a sua secagem. Inicialmente, esta condição específica colocava em causa a possibilidade de desligar totalmente a rede de ar comprimido durante as *off-hours*. No entanto, constatou-se que ambas as impressoras são alimentadas a partir de um ramal dedicado, o que permitiu considerar a implementação de uma solução autónoma localizada para garantir o seu funcionamento contínuo, sem comprometer a estratégia de eficiência energética associada ao corte programado da rede principal.

A análise dos consumos energéticos anuais do compressor da unidade da Maia, através do custo médio por kW/h, revelou que, apesar do seu perfil de funcionamento limitado ao horário diurno, os períodos "*off-hours*" representavam uma fatia significativa dos custos totais de operação.

Com base nos consumos médios por hora registados pela plataforma *Sensorfact*, os consumos em horário útil representavam cerca de 3.108,80 €/ano, enquanto os consumos verificados em "*off-hours*" ascendiam a 2.191,28 €/ano, correspondente a 41% do custo anual. É possível analisar no Apêndice D em mais detalhe os cálculos efetuados.

Com o objetivo de aprofundar a análise do SAC da Maia e de obter uma visão mais representativa dos seus padrões de consumo, foi analisado o comportamento energético diário entre as semanas 46 e 51 de 2024, e determinado os consumos médios por semana e dia da semana, à semelhança da análise realizada ao SAC da Arroteia, como é possível observar em detalhe no Apêndice E.

Com base nos valores medidos e apresentados na Tabela 5, foi apurado um custo médio semanal de 103,23 €, o que permite estimar um custo anual de aproximadamente 5.367,86 €, assumindo que o sistema mantém este padrão de funcionamento ao longo de 52 semanas.

Tabela 5 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do sistema de ar comprimido da Maia

SAC Maia	
Consumo total (kW/h)	6193.68
Custo total (€)	619.37 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	1.15
Nº semanas em análise	6
Consumo médio semanal (kW/h)	1032.28
Custo médio semanal (€)	103.23 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kWh )	0.19
Custo estimado anual (€)	5,367.86 €

Comparando os resultados da Tabela 5 com a estimativa previamente efetuada com base em consumos médios por período de laboração e de inatividade apresentada na Tabela 92 do Apêndice D, observa-se uma concordância muito próxima entre ambos os métodos. O modelo anterior, construído com base na distribuição horária do tempo de laboração e *off-hours*, resultava num custo anual previsto de 5.300,08 €. Já os dados medidos apontam para um custo anual de 5.367,86 €, com uma diferença inferior a 1,3%. Esta proximidade entre ambos os resultados, demonstra que o modelo anterior, apesar de assentar em hipóteses simplificadas, forneceu uma estimativa credível e tecnicamente válida de poupança associada à eliminação do funcionamento em períodos de inatividade.

### 3.1.3.3. Unidade de Despoeiramento – Core

A unidade de despoeiramento instalado no núcleo produtivo “Core” tem como objetivo garantir a extração eficiente de partículas sólidas geradas nos diversos processos da área dos isolantes, promovendo assim a segurança ocupacional e a qualidade do ambiente industrial. Este sistema serve uma série de máquinas de corte e fresagem instaladas na área de produção, às quais estão ligados ramais de aspiração dedicados, distribuídos ao longo da área de produção, interligados a um filtro de mangas industrial. O sistema inclui um ventilador centrífugo de grande potência (55 kW) responsável por gerar a depressão necessária para aspirar o ar carregado de partículas. O ar é conduzido até ao filtro, onde as partículas sólidas são retidas nas mangas de filtragem, enquanto o ar limpo é devolvido ao ambiente.

A análise energética ao sistema de despoeiramento do Core revelou um claro desajuste entre a capacidade instalada e as necessidades reais da instalação. Este sobredimensionamento resulta, em grande parte, da ampliação anterior da área dos isolantes, que levou à substituição do ventilador original de 45 kW por um modelo de 55 kW, de forma a prevenir uma extração eficaz numa área com maior volume e número de equipamentos. No Anexo B, é possível observar o layout da área dos isolantes, com a zona expandida devidamente delimitada a vermelho.

No entanto, a utilização atual desta zona é reduzida e dedicada maioritariamente a operações manuais, onde não se verifica, de forma regular, a geração de poeiras que justifique a ativação do sistema de extração. Apesar de existirem equipamentos com capacidade para produzir resíduos, a sua utilização

## Desenvolvimento

ocorre de forma muito esporádica, mantendo-se a maioria das válvulas de extração encerradas durante a operação normal. Adicionalmente, mesmo na restante área dos isolantes, nem todos os postos estão ativos em simultâneo, o que levou à constatação de que o sistema opera frequentemente com uma necessidade de caudal inferior ao valor para o qual foi dimensionado, mantendo-se, no entanto, o ventilador a funcionar a plena carga, o que resulta numa operação energeticamente ineficiente.

Importa referir que o sistema anterior, com motor de 45 kW, havia sido dimensionado para garantir a extração em condições de operação simultânea de todos os equipamentos inicialmente instalados, sendo que, segundo o próprio fornecedor, mesmo com a expansão da área, este motor seria suficiente para suportar as necessidades reais da Efacec, dado que, na prática, nem todas as máquinas funcionam em simultâneo, existindo assim margem operacional suficiente no dimensionamento original.

Outro aspeto relevante identificado foi a presença de válvulas guilhotina pneumáticas nos ramais de extração da grande maioria das máquinas, como é possível observar na Figura 24. Estas válvulas apenas abrem quando o equipamento associado está em funcionamento, reduzindo assim o caudal de ar necessário e evitando perdas por aspiração em pontos inativos. No entanto, até à data da análise, não existia qualquer sistema de modulação da velocidade do ventilador em função da carga efetiva, o que levava a um funcionamento constante a plena carga.



*Figura 24 - Exemplo de uma válvula guilhotina pneumática instalada num ramal de extração*

Como complemento à análise do consumo energético e da operação do sistema, foi tido em consideração o estudo da perda de carga teórica realizado pelo fornecedor da instalação de despoejamento do Core, com base no dimensionamento da rede de condutas e nas condições de projeto, disponível para análise no Anexo C. A perda de carga encontra-se expressa em milímetros de coluna de água (mmH<sub>2</sub>O), sendo o valor calculado para uma velocidade de aspiração de 25 m/s, correspondente à condição de caudal máximo previsto para o sistema, 25.447 m<sup>3</sup>/h. Para efeitos de análise e compatibilização com os instrumentos de medição, estes valores foram convertidos para Pascais (Pa), utilizando a relação 1 mmH<sub>2</sub>O ≈ 9,81 Pa.

Assim, foi calculado uma perda de carga total de 538 mmH<sub>2</sub>O, que corresponde aproximadamente a 5280 Pa. Este valor de perda de carga foi determinado tendo como base o percurso mais longo e desfavorável da rede de aspiração. Este cálculo assume que todas as válvulas de extração estão abertas e que o sistema está a operar a caudal máximo de 25.447 m<sup>3</sup>/h, com uma velocidade média de 25 m/s nas condutas principais. Assim, o ventilador deve ser capaz de gerar esta pressão para garantir o funcionamento eficaz do sistema em condições de carga total.

A curva característica do ventilador ilustrada na Figura 25 e cedida pelo fabricante, representa graficamente o desempenho do equipamento em diferentes condições de funcionamento. Trata-se de uma ferramenta essencial para compreender o comportamento do ventilador face ao caudal de ar extraído. No gráfico analisado, o eixo horizontal representa o caudal de ar em m<sup>3</sup>/h, enquanto o eixo vertical do lado esquerdo indica a pressão total disponível gerada pelo ventilador, expressa em mmH<sub>2</sub>O. Adicionalmente, existe um segundo eixo vertical à direita, que indica a potência elétrica absorvida pelo ventilador, em kW. As várias curvas sobrepostas no gráfico traduzem o comportamento físico do ventilador em diferentes parâmetros.

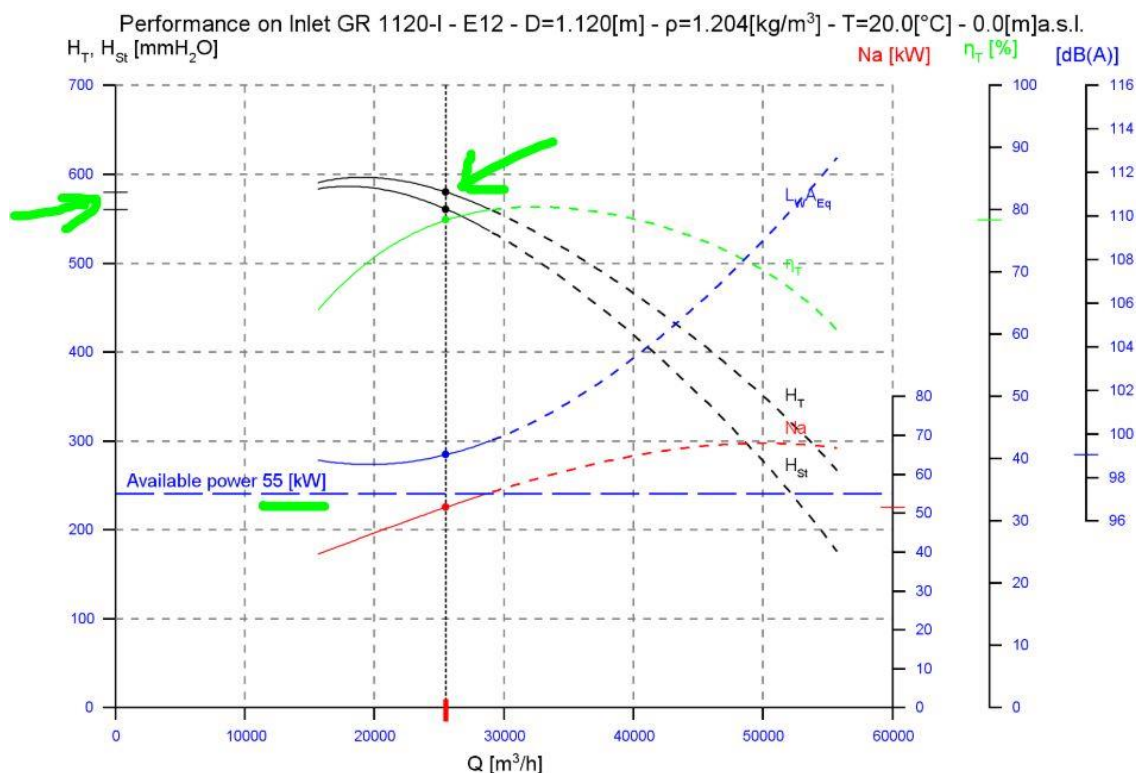


Figura 25 - Curva característica do ventilador do Core

A curva principal de pressão (a preto) indica a relação entre o caudal extraído e a pressão gerada. Esta curva apresenta uma tendência descendente, refletindo o comportamento característico dos ventiladores centrífugos: à medida que o caudal aumenta, a pressão que o ventilador consegue gerar diminui. Este fenómeno deve-se à própria construção do ventilador e não à resistência da rede, que é tratada separadamente através do cálculo de perda de carga. A curva de potência absorvida (a vermelho), por sua vez, mostra que o consumo de energia elétrica aumenta com o caudal, atingindo o seu valor máximo (próximo dos 55 kW) no ponto de caudal máximo. A presença de uma curva de eficiência (a verde) permite visualizar a zona de operação mais eficiente do ventilador, geralmente

## Desenvolvimento

situada entre 70% e 80% da sua capacidade máxima. Este ponto representa a melhor relação entre energia consumida e ar efetivamente movimentado.

O ponto de funcionamento teórico do sistema, 25.477 m<sup>3</sup>/h a cerca de 5.280 Pa, encontra-se dentro da zona de alta eficiência do ventilador, o que demonstra um dimensionamento tecnicamente adequado para carga total, ou seja, quando todas as máquinas estão a funcionar com as respetivas válvulas de extração abertas.

No entanto, como identificado durante a análise de campo, o sistema opera grande parte do tempo com vários pontos de extração inativos. Nestes momentos, o número de caminhos por onde o ar pode circular reduz-se, o que se traduz numa maior perda de carga para o mesmo ventilador. Como resultado, o ventilador opera num novo ponto de equilíbrio, com menor caudal e maior pressão, deslocando-se para fora da zona de eficiência ideal. Este desfasamento entre a carga real e a operação a plena carga acarreta desperdício energético considerável, especialmente numa instalação que funciona de forma contínua.

Face à discrepância observada entre a dimensão do sistema e as reais necessidades de extração, com pontos de aspiração inativos durante longos períodos, foi considerada a possibilidade de introduzir um sistema de modulação da velocidade do ventilador, de modo a adequar o seu funcionamento à carga efetiva do momento. Esta abordagem permitiria reduzir significativamente o consumo energético, evitando que o ventilador operasse constantemente a plena velocidade e potência, mesmo quando tal não é necessário.

A solução foi desenvolvida em conjunto com o fornecedor da instalação, que recomendou a implementação de um sistema de controlo automático baseado em pressão. A solução pensada consistiu na monitorização contínua da pressão na rede de aspiração, através de um transdutor de pressão diferencial instalado à entrada dos filtros de mangas, e na sua integração com um variador de frequência. Este sistema permite que o variador de frequência regule automaticamente a velocidade de rotação do ventilador, com base na pressão medida à entrada dos filtros, ajustando a frequência do motor em tempo real. Assim, mesmo que apenas uma parte dos pontos de extração esteja ativa, o ventilador adapta-se à procura real, mantendo a pressão necessária com menor velocidade e potência elétrica. Esta solução procura que o sistema opere mais próximo da zona de maior eficiência da curva do ventilador, reduzindo consumos energéticos e otimizando a operação sem comprometer a eficácia da extração.

Foi realizada uma estimativa de poupança energética com base em pressupostos técnicos definidos pelos parceiros envolvidos, presente em detalhe no Apêndice F.

De acordo com os cálculos efetuados e apresentados no Apêndice F, obteve-se a poupança total estimada de aproximadamente 8.092 €/ano, reforçando o potencial de retorno económico da intervenção, como é possível observar na Tabela 6.

*Tabela 6 – Indicadores económicos iniciais da intervenção no sistema de Despoeiramento Core*

<b>Despoeiramento Core</b>	
<b>Custo total</b>	7,408.00 €
<b>Poupança total estimada</b>	<b>8,092.48 €</b>
<b>Payback estimado (anos)</b>	0.92

Para validar estas previsões, foi realizada uma análise diária e semanal aos consumos reais do sistema ao longo de oito semanas (semana 42 a 49 de 2024), em detalhe no Apêndice G.

Ao longo das oito semanas analisadas, o sistema registou um consumo total de 32.241 kW/h, correspondendo a um custo acumulado de 3.224,15 €. O consumo semanal oscilou entre cerca de 3.417 kW/h e 4.620 kW/h, refletindo pequenas variações associadas ao volume de produção. O consumo médio semanal foi de 4.030,19 kW/h, o que representa um custo médio de 403,02 €/semana. A Tabela 7 apresenta um resumo dos principais indicadores resultantes da análise semanal.

*Tabela 7 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do sistema de Despoeiramento Core*

<b>Despoeiramento Core</b>	
Consumo total (kW/h)	32241.48
Custo total (€)	3,224.15 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	5.96
Nº semanas em análise	8
Consumo médio semanal (kW/h)	4030.19
Custo médio semanal (€)	403.02 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	0.75
Custo estimado anual (€)	19,344.89 €

A projeção anual, assumindo este mesmo perfil de funcionamento constante ao longo de 48 semanas, aponta para um custo total estimado de 19.344,89 €/ano.

As estimativas iniciais, elaboradas pelos parceiros técnicos, assumiam uma carga média do motor de 90% (49,5 kW), o que conduzia a um custo anual de 19.166,40 €. No entanto, com base na análise gráfica da potência elétrica, concluiu-se que o sistema opera em média a 40 kW no período laboral, ou seja, cerca de 73% da potência nominal. Esta nova referência reduz a estimativa de consumo anual para 15.546,08 €, o que, paradoxalmente, se afasta mais do valor real medido do que a estimativa original baseada nos 90%. Este desvio poderá ser explicado por fatores como laboração durante o fim de semana, consumos em vazio, ou prolongação de turnos, que não são contemplados nos modelos simplificados baseados apenas em carga média teórica.

Em paralelo, foi necessário rever a estimativa de poupança energética avançada inicialmente pelo fornecedor da instalação, que previa duas reduções sucessivas de 10% na potência média do ventilador. Estas reduções estavam referenciadas à potência nominal do motor (55 kW), traduzindo-se numa expectativa total de poupança de 11 kW (5,5 kW + 5,5 kW). Assim, mantendo a lógica de 10% de redução por efeito de cada medida, a poupança realista esperada passa a ser de 8 kW (2 × 10% de 40 kW).

Em conjunto, estas medidas representam uma poupança potencial total de 40%, o que, aplicado ao custo real anual de 19.344,89 €, permite estimar uma redução de 7.737,96 €/ano, conforme ilustrado na Tabela 8, situando o novo custo operacional do sistema em cerca de 11.606,93 €/ano.

Tabela 8 - Indicadores económicos revistos da intervenção no sistema de Despoeiramento Core

Despoeiramento Core	
<b>Custo total</b>	7,408.00 €
<b>Poupança total estimada</b>	<b>7,737.96 €</b>
<b>Payback estimado (anos)</b>	0.96

Esta abordagem, sustentada por dados medidos e pela lógica percentual das melhorias, traduz-se numa estimativa muito mais robusta e credível do que a projeção feita com base em carga teórica nominal. Além disso, permite avaliar com maior rigor o retorno do investimento e a real eficácia das medidas implementadas, assegurando coerência entre os resultados obtidos e as expectativas definidas.

#### 3.1.3.4. Unidade de Despoeiramento – Shell

O sistema de despoeiramento da zona de isolantes Shell foi projetado e instalado pela Efacec em 2017, tendo como objetivo a extração de poeiras geradas por operações de corte e maquinação. Este sistema, embora funcionalmente semelhante ao despoeiramento do Core, apresenta uma escala mais reduzida, servindo apenas cinco ramais de aspiração, conforme é visível no Anexo D.

À semelhança do Core, trata-se de um sistema centralizado com filtro de mangas com limpeza por jato de ar comprimido e ventilador centrífugo com motor de 22 kW. Apesar de o quadro elétrico do sistema já incluir um variador de frequência desde a instalação inicial, este encontrava-se configurado para funcionamento fixo, operando continuamente à velocidade máxima. Além disso, a instalação original não incluía válvulas de guilhotina nos ramais, o que fazia com que o ventilador operasse sempre em regime de caudal máximo, mesmo quando apenas um ponto de aspiração estivesse em uso. De facto, os cinco ramais de aspiração alimentam duas máquinas CNC e uma seccionadora, que apenas requerem extração durante os ciclos de corte, bem como dois postos adicionais com utilização pontual. Como resultado, é comum apenas uma ou duas máquinas necessitem de aspiração por curtos períodos, tornando evidente o desperdício energético associado ao funcionamento contínuo do ventilador sem modulação, e sem controlo sobre a perda de carga efetiva da rede.

De forma a sustentar a análise energética e operacional do sistema de despoeiramento, foi necessário quantificar com rigor as condições da instalação. Para tal, recorreu-se ao mesmo parceiro técnico que colaborou no sistema do Core, responsável pela análise das perdas de carga da rede de ventilação. Este cálculo exigiu a elaboração prévia de um esquema completo e detalhado da instalação, visível na Figura 26, o qual foi desenvolvido internamente e incluiu todos os comprimentos lineares dos troços, os diâmetros nominais das condutas e o número e tipo de singularidades (curvas a 90° e 45°, reduções, derivações). O objetivo era permitir a simulação do percurso mais desfavorável da rede, desde o ponto de extração mais distante até à entrada do filtro de mangas, integrando todas as perdas de carga por fricção e por singularidades, de acordo com as normas de dimensionamento técnico aplicáveis.

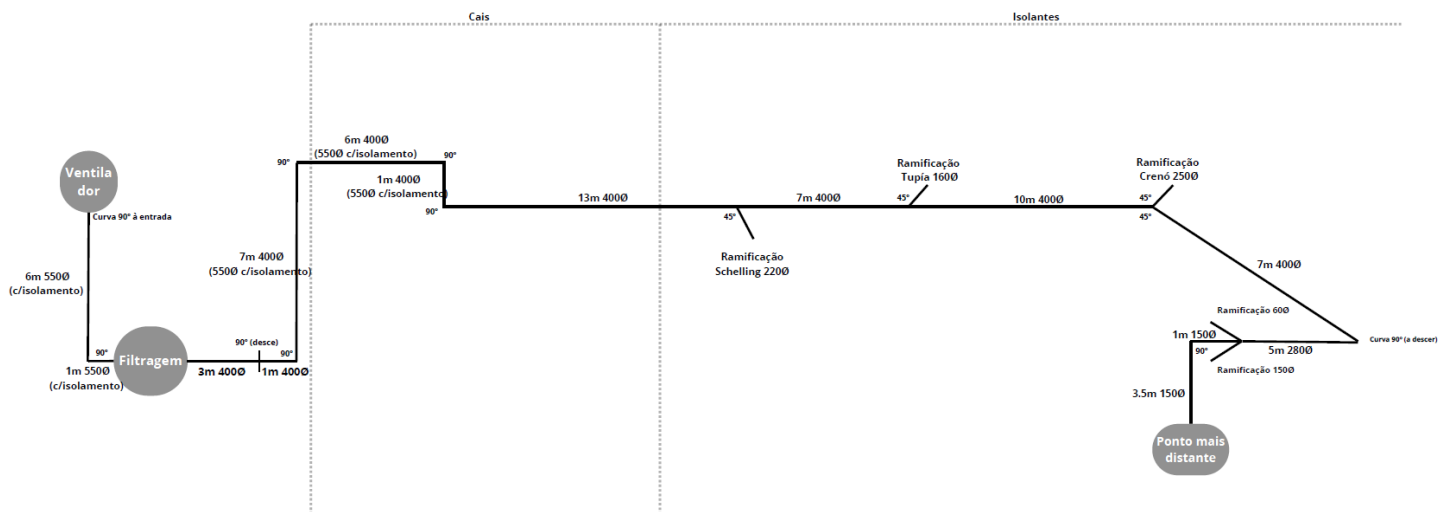


Figura 26 - Esquema da rede do sistema de Despeiramento Shell

Com base nos dados recolhidos através do esquema técnico da instalação, o parceiro procedeu ao cálculo da perda de carga total da rede de aspiração, como se pode observar no Anexo E. O valor obtido foi 382 mmH<sub>2</sub>O, aproximadamente 3.745 Pa. Este cálculo foi feito para uma velocidade média de 25 m/s e um caudal de 11.310 m<sup>3</sup>/h que é o volume máximo de ar que o sistema pode movimentar por hora, ou seja, quando todos os pontos de aspiração estão em funcionamento simultâneo.

A curva característica do ventilador, elaborado pelo parceiro e ilustrada na Figura 27, foi depois utilizada para determinar, com base nesse caudal e nessa perda de carga, qual seria a potência elétrica necessária para fazer o ventilador funcionar nessas condições. O resultado indicou uma potência absorvida estimada de 17 kW, valor muito próximo da capacidade máxima do motor instalado.

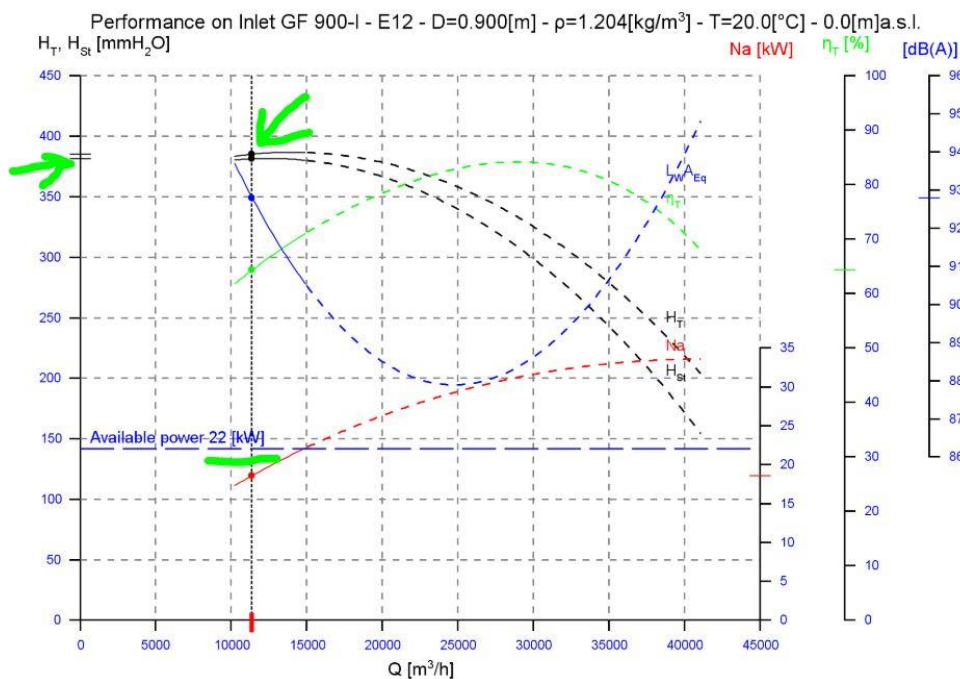


Figura 27 - Curva característica do ventilador do Shell

## Desenvolvimento

A análise da curva característica do ventilador do sistema Shell revelou que a curva da pressão total se mostra relativamente estável ao longo do intervalo de caudais. Isto traduz-se na prática que, mesmo com poucos ramais em funcionamento, a rede impõe uma perda de carga significativa. Por outro lado, a curva de potência apresenta um declive acentuado, o que significa que a potência elétrica absorvida varia significativamente com o caudal de ar extraído: quanto maior o caudal, maior o consumo.

Em contraste, o ventilador do sistema Core apresentava uma curva de funcionamento diferente: tanto a pressão como a potência variavam de forma mais sensível ao caudal, ou seja, mesmo sem intervenção ativa sobre a rotação, o ventilador, em teoria, tendia a aliviar parte do esforço quando o caudal diminuía, resultando numa descida parcial da potência. Ainda assim, este comportamento natural era limitado e insuficiente do ponto de vista energético.

A curva de eficiência do ventilador indica um valor máximo de aproximadamente 65%, o que é relativamente baixo para um ventilador industrial. Este valor revela que, mesmo no ponto de operação ideal, existe uma fração significativa de energia dissipada no sistema, o que penaliza o desempenho global. Sendo a eficiência ainda inferior fora desse ponto, a operação contínua a velocidade fixa agrava o desperdício energético.

Este cenário evidenciava um potencial de poupança energética semelhante ao observado no sistema do Core, uma vez que, também aqui, o ventilador operava cronicamente em sobredimensionamento e sem adaptação à carga real. Por essa razão, foi proposta a mesma solução técnica adotada no Core, ou seja, a instalação de um transdutor de pressão diferencial à entrada do filtro de mangas, ligado ao variador de frequência existente, de modo a modular automaticamente a frequência do ventilador em função da necessidade efetiva da rede. Contudo, no caso do Shell, para que esta estratégia fosse eficaz, era indispensável complementar o sistema com válvulas de corte nos ramais de aspiração, uma vez que, ao contrário do Core, a instalação original não dispunha de qualquer sistema de seccionamento entre os pontos de extração e a conduta principal.

Foi realizada uma estimativa técnica do potencial de poupança energética, com base nas características do ventilador e na operação parcial típica da rede de aspiração, à semelhança do despoeiramento do Core, disponível para visualizar no Apêndice H.

Com base nos cálculos efetuados no Apêndice H, a poupança total estimada ascende a 2.555,52 € por ano, face a um investimento total de 2.685 €, o que corresponde a um *payback* de apenas 1,05 anos, ou seja, pouco mais de um ano para recuperar integralmente o investimento realizado, como é ilustrado na Tabela 9.

*Tabela 9 - Indicadores económicos iniciais da intervenção no sistema de Despoeiramento Shell*

<b>Despoeiramento Shell</b>	
<b>Custo total</b>	2,685.00 €
<b>Poupança total estimada</b>	<b>2,555.52 €</b>
<b>Payback estimado (anos)</b>	1.05

Para validar essa estimativa, foi realizada uma análise de consumos reais do sistema, com base em nove semanas consecutivas de monitorização (semanas 42 a 50 de 2024), em detalhe no Apêndice I.

Durante este período observou-se um consumo médio semanal de aproximadamente 1.313,5 kW/h, o que corresponde a um custo semanal de cerca de 131,35 €. Extrapolando este padrão para 48 semanas de laboração anual, estima-se que o sistema represente um consumo total anual da ordem dos 63.050 kW/h, com um custo de funcionamento de aproximadamente 6.305 €/ano. A Tabela 10 apresenta um resumo dos principais indicadores resultantes da análise semanal.

Tabela 10 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do sistema de Despoeiramento Shell

Despoeiramento Shell	
Consumo total (kW/h)	11821.85
Custo total (€)	1,182.19 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	2.19
Nº semanas em análise	9
Consumo médio semanal (kW/h)	1313.54
Custo médio semanal (€)	131.35 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kWh)	0.24
Custo estimado anual (€)	6,304.99 €

Comparando os resultados obtidos com a estimativa inicial, verifica-se que com o potencial de poupança de 30% a poupança esperada é aproximadamente 1.891 €/ano, com um tempo de retorno de apenas 1,42 anos, como é ilustrado na Tabela 11.

Tabela 11 - Indicadores económicos revistos da intervenção no sistema de Despoeiramento Shell

Despoeiramento Shell	
<b>Custo total</b>	2,685.00 €
<b>Poupança total estimada</b>	<b>1,891.50 €</b>
<b>Payback estimado (anos)</b>	1.42

Importa notar que, tendo em conta que o ventilador opera habitualmente com uma potência média de cerca de 14 kW (e não os 22 kW nominais do motor), a poupança de 10% corresponde, na prática, a uma redução de 1,4 kW/h por hora de funcionamento, e não 2,2 kW/h como inicialmente previsto com base na potência máxima.

### 3.1.3.5. Cabine de Pintura PT

A cabine de pintura dos transformadores de potência, frequentemente referida como Cabine do PT, é uma infraestrutura de grandes dimensões dedicada ao tratamento superficial e acabamento final dos componentes metálicos dos transformadores de potência. Esta cabine opera sob dois modos distintos:

- Em modo de pintura, entram em funcionamento os sistemas de ventilação forçada e insuflação de ar renovado, de forma a garantir uma atmosfera limpa e segura, assegurando a extração contínua de partículas de tinta suspensas no ar;

## Desenvolvimento

- Em modo de estufa, utilizado para promover a secagem e cura das camadas de tinta, opera o sistema de insuflação aquecida, no qual o ar introduzido é previamente aquecido por um queimador a gás natural até à temperatura de 40°C.

No regime original, o sistema térmico da estufa funcionava por queima indireta, um processo em que o queimador a gás gera calor numa câmara de combustão separada da corrente de ar insuflado. O ar ambiente é aquecido por troca térmica com as paredes do permutador, sem contacto direto com os produtos da combustão. Embora este método garanta a separação física entre os gases queimados e o ar insuflado, uma exigência em algumas aplicações, implica perdas térmicas significativas, tanto na transferência de calor (eficiência do permutador) como na dissipação para o ambiente envolvente.

Em colaboração com o parceiro técnico responsável pela manutenção e acompanhamento da instalação, já havia sido anteriormente identificada a possibilidade de conversão do sistema de aquecimento da Cabine do PT de queima indireta para queima direta, como forma de melhorar o desempenho energético e operacional da estufa. Esta hipótese foi novamente analisada no âmbito do presente projeto, tendo evoluído para uma proposta formal por parte do fornecedor, com estimativa detalhada de poupança.

Na queima direta, o calor gerado pela combustão do gás natural é entregue diretamente à corrente de ar insuflado, sem recurso a permutadores de calor. O ar ambiente é misturado com os produtos da combustão (gases quentes) antes de ser insuflado no interior da cabine, o que permite aproveitar praticamente toda a energia térmica gerada no processo de queima, reduzindo drasticamente as perdas.

Este tipo de sistema é admissível sempre que os produtos da combustão não comprometam a qualidade do processo nem a integridade das peças e a instalação possua sistemas de ventilação e controlo atmosférico adequados. No caso da Cabine do PT, existe um sistema de filtragem do ar insuflado, que contribui para assegurar a qualidade do ambiente interno e para evitar a introdução de impurezas físicas ou partículas provenientes da combustão.

Na prática, esta alteração permite:

- Reduzir o consumo de gás natural para atingir a mesma temperatura na cabine;
- Eliminar a permutação de calor, reduzindo perdas térmicas;
- Acelerar a resposta térmica do sistema, tornando o processo mais eficiente.

Estas condições tornam a queima direta não apenas viável, mas energeticamente vantajosa no contexto da Cabine do PT, especialmente tendo em conta o perfil de operação e o controlo já existente sobre a qualidade do ar insuflado. De acordo com o fornecedor responsável a conversão do sistema para queima direta permite uma redução do consumo de gás estimada em cerca de 30%, com base em casos industriais semelhantes e estudos anteriores.

Na Cabine do PT não é viável estimar custos energéticos por peça, dado que são pintados componentes metálicos de diferentes dimensões e tipologias, com grande variabilidade diária. Assim, a poupança foi estimada aplicando a redução de 30% referida na bibliografia aos consumos médios iniciais da cabine, assegurando uma estimativa realista apesar da ausência de granularidade.

Paralelamente à melhoria térmica, foi também identificada uma oportunidade relevante de poupança na iluminação da cabine, nomeadamente:

- A substituição de 40 lâmpadas fluorescentes de 100 W, responsáveis pela iluminação geral da cabine, por modelos LED de 34 W com características equivalentes em termos de intensidade e temperatura de cor mais adequada à função da cabine, contribuindo para melhores condições de visibilidade durante os processos de pintura e inspeção;

A estimativa de poupança energética resultante da substituição da iluminação da Cabine do PT foi calculada com base num regime de funcionamento contínuo, 24 horas por dia dado que trabalha a 3 turnos desde o início do ano de 2024, durante 288 dias por ano (correspondente a 48 semanas completas de laboração). Na iluminação geral, a substituição representa uma redução de potência anual estimada de 18.247,68 kW/h, equivalente a 1.824,77 €/ano. A Tabela 12 apresenta os valores estimados de poupança anual, investimento associado e tempo de retorno (payback) para a intervenção planeada na Cabine PT.

Tabela 12 - Indicadores económicos da iluminação LED na Cabine de Pintura PT

<b>Cabine PT - Troca 40 lâmpadas</b>	
Custo total	1,200.67 €
Poupança total estimada	<b>1,824.77 €</b>
Payback (anos)	0.66

Os valores de custo apresentados correspondem a uma proposta formal emitida pelo parceiro técnico responsável pelas intervenções.

A monitorização dos consumos energéticos da Cabine do PT incidiu sobre o período entre as semanas 44 e 51 de 2024, no caso da eletricidade, e entre as semanas 45 e 51, no caso do gás. A análise encontra-se em detalhe no Apêndice J.

A Cabine do PT registou, durante o período de oito semanas analisadas, um consumo total de eletricidade de 18.345 kW/h, correspondente a um custo total de 1.834,52 €, como é possível observar na Tabela 13. A média semanal situou-se nos 2.293,14 kW/h, o que representa um encargo médio de 229,31 €/semana. Com base neste perfil, estima-se um custo anual de eletricidade de aproximadamente 11.007,09 €, assumindo um padrão de utilização constante durante 48 semanas.

Tabela 13 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Cabine de Pintura (Eletricidade)

<b>Cabine PT Eletricidade</b>	
Consumo total (kW/h)	18345.15
Custo total (€)	1,834.52 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	3.39
Nº semanas em análise	8
Consumo médio semanal (kW/h)	2293.14
Custo médio semanal (€)	229.31 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	0.42
Custo estimado anual (€)	11,007.09 €

Já nas sete semanas analisadas, a média semanal de consumo de gás situa-se nos 470,10 €, representando um encargo energético relevante para a instalação. A Tabela 14 apresenta um resumo dos principais indicadores resultantes da análise semanal.

Tabela 14 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Cabine de Pintura (Gás Natural)

Cabine PT Gás	
Consumo total (kW/h)	47038.87
Custo total (€)	3,292.72 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	8.70
Nº semanas em análise	7
Consumo médio semanal (kW/h)	6719.84
Custo médio semanal (€)	470.39 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	1.24
Custo estimado anual (€)	22,578.66 €

Com base na Tabela 15, estimou-se um custo anual de funcionamento de 22.578,66 €, considerando 48 semanas de trabalho com um consumo médio semanal de 6.719,84 kW/h.

Tal como anteriormente referido, a proposta de alteração do sistema de aquecimento para queima direta prevê uma redução estimada de 30% no consumo de gás, de acordo com a experiência do fornecedor técnico em intervenções semelhantes. Esta intervenção, orçamentada em 6.200,00 €, inclui a adaptação do queimador existente, a desativação da chaminé da câmara de combustão e o acondicionamento do controlo elétrico. A confirmar-se a poupança esperada, o retorno económico (*payback*) será inferior a um ano, representando uma medida de elevada viabilidade técnica e financeira, com impacto direto na eficiência energética e na redução de emissões associadas.

Tabela 15 - Indicadores económicos da alteração do método de queima na Cabine de Pintura PT

Cabine PT - Alteração Método de Queima	
Custo total	6,200.00 €
Poupança total estimada	<b>6,773.60 €</b>
Payback (anos)	0.92

### 3.1.3.6. Linha de Pintura Aérea

A linha de pintura aérea está estruturada para realizar de forma sequencial o tratamento, pintura e secagem das cubas dos transformadores de transporte. Trata-se de uma instalação contínua, composta por um conjunto de estações interligadas por um sistema de transporte aéreo (transportador de corrente com ganchos), que conduz automaticamente as peças através de diferentes etapas do processo. O Apêndice K apresenta uma representação esquemática da disposição física das estações e do percurso da linha, facilitando a leitura do processo produtivo envolvido.

O processo inicia-se no túnel de tratamento de superfícies (TTS), que inicia no módulo de desgorduramento e fosfatação, essenciais para remover impurezas e criar uma camada aderente à tinta. Esta estação é composta por um queimador de 300 kW, responsável pelo aquecimento da solução

líquida de fosfatização. Posteriormente, as peças passam por um módulo de lavagem a frio, seguido de uma etapa de passivação química, destinada a melhorar a resistência à corrosão. A fase seguinte é a estufa de secagem pós-passivação equipada com um queimador de 232 kW, com *setpoint* de 100° C, responsável por remover toda a humidade residual das superfícies antes da aplicação do primário.

Depois da secagem, as cubas entram na zona de aplicação do primário, onde a tinta base é pulverizada sobre a superfície fosfatada. Esta aplicação é seguida por uma estufa de secagem do primário, composta por dois queimadores de 232 kW cada, um à entrada e outro à saída, que asseguram uma distribuição térmica eficiente ao longo da câmara, com *setpoint* de 135° C. A secagem adequada do primário é crucial para garantir a aderência da camada final de esmalte.

Concluída esta fase, os componentes seguem para a zona de aplicação do esmalte, onde é realizada a pintura final com tinta de acabamento. Esta é imediatamente sucedida pela estufa de polimerização (ou secagem final), igualmente equipada com dois queimadores de 232 kW cada e *setpoint* de 135° C. Esta estufa tem como função promover a cura térmica do revestimento, garantindo resistência mecânica e estabilidade da camada superficial.

Ao longo dos últimos anos, a possibilidade de otimizar o desempenho energético da linha de pintura aérea tem sido objeto de análise por parte da equipa de manutenção da Efacec, em conjunto com o fornecedor da instalação. Entre as medidas discutidas, destacou-se desde cedo a alteração do método de queima, à semelhança da Cabine do PT, com a substituição dos queimadores atualmente instalados por modelos de queima direta com modulação de potência, como forma de reduzir as perdas térmicas e adaptar o fornecimento de calor à carga real da linha. Paralelamente, foi também identificada a necessidade de implementar um sistema de deteção automática de cubas, de forma a garantir que as bombas dos postos do TTS, responsáveis pela pulverização de produto, apenas entrem em funcionamento quando existia efetivamente uma cuba a ser tratada.

A proposta de melhoria energética integra então duas intervenções. A primeira medida propõe a substituição dos cinco queimadores atualmente instalados, do tipo ON-OFF, por queimadores modulantes próprios para queima direta, distribuídos pelas três estufas principais da linha (pós-passivação, pós-primário e pós-esmalte). Para além do ganho térmico, a tecnologia modulante permitirá um ajuste contínuo da potência em função da temperatura real, reduzindo o número de ciclos de ignição e paragem, melhorando a estabilidade térmica durante o processo. O sexto queimador, localizado no TTS, permanece excluído desta intervenção por motivos técnicos, uma vez que este é responsável pelo aquecimento da solução líquida de fosfatização, e não do ar ambiente, o que inviabiliza a adoção de um sistema de queima direta.

Como segunda medida, a implementação de um sistema de deteção de cubas no TTS baseia-se na instalação de um fim de curso mecânico à entrada do primeiro posto de tratamento, que envia um sinal elétrico ao sistema de controlo sempre que uma nova cuba entra no túnel. Este sinal, combinado com a informação do contador de rotações do transportador aéreo, onde cada passo corresponde a 1,2 metros, permite calcular com precisão a posição exata da cuba ao longo do percurso interno. Com esta lógica, torna-se possível programar a ativação individual das bombas de aspersão em função da presença real de carga em cada posto. Além de condicionar o funcionamento das bombas, esta mesma lógica permitirá ainda desativar automaticamente o queimador responsável pelo aquecimento do posto de fosfatização, sempre que o sistema se encontrar em vazio. Esta estratégia permite reduzir significativamente o

## Desenvolvimento

consumo de energia térmica e elétrica, eliminando operação desnecessária dos sistemas durante períodos sem carga.

A estimativa de poupança energética anual das duas medidas encontra-se em detalhe no Apêndice L.

De acordo com os cálculos apresentados no Apêndice L, as intervenções propostas na linha de pintura aérea permitem estimar uma poupança total anual de cerca de 17.300 €, resultante da redução do consumo de gás natural nas estufas (14.031 €/ano), da diminuição do consumo elétrico no sistema TTS (2.664 €/ano) e da mitigação das perdas térmicas associadas aos banhos (605 €/ano).

Dando seguimento à estimativa de poupança associada às intervenções propostas, analisa-se agora o perfil de consumos reais da linha de pintura aérea. Importa referir que o contador de gás instalado na linha de pintura aérea mede o consumo total dos seis queimadores atualmente em operação ao longo do circuito. A análise dos consumos apresentada corresponde a um período total de 30 semanas consecutivas, com exclusão das semanas 52 (Natal) e 1 (Ano Novo), durante as quais a linha de pintura esteve praticamente parada. A análise encontra-se em maior detalhe no Apêndice M.

Nesta análise, observa-se uma variabilidade significativa nos valores semanais, com consumos de gás natural a oscilarem entre cerca de 7.973 MW/h e 22.773 MW/h, e custos correspondentes entre 558 € e 1.594 €/semana, dependendo do volume de produção e da utilização das estufas. A média semanal situou-se nos 17.489 MW/h, o que representa um custo médio semanal de 1.224,23 €. A Tabela 16 apresenta um resumo dos principais indicadores resultantes da análise semanal.

*Tabela 16 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Linha de Pintura (Gás Natural)*

<b>Linha de Pintura (Gás)</b>	
Consumo total (kW/h)	524670.25
Custo total (€)	36,726.92 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	97.06
Nº semanas em análise	30
Consumo médio semanal (kW/h)	17489.01
Custo médio semanal (€)	1,224.23 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	3.24
Custo estimado anual (€)	58,763.07 €

Com base nestes dados e mantendo este padrão de funcionamento, o custo anual estimado para o fornecimento de gás da linha de pintura aérea ascende a 58.763 €/ano. Estabelecendo uma correlação entre os valores estimados e os dados reais medidos, observa-se que a estimativa inicial de consumo anual de gás para os cinco queimadores a intervir era de 46.771,20 €. Estes valores mostram uma diferença de aproximadamente 11.991,87 € por ano, correspondente a cerca de 20,4% acima da estimativa inicial.

Esta diferença é justificada pela inclusão do queimador do TTS, responsável pelo aquecimento da solução de fosfatização, cujo consumo médio semanal é estimado em cerca de 210 € (correspondente a uma potência de 300 kW a funcionar durante 10 horas por semana, a 0,07 €/kW/h). Projetando este valor para 48 semanas, obtém-se um custo anual de aproximadamente 10.080 €. Subtraindo este

montante ao total anual medido de 58.763,07 €, o consumo ajustado para os cinco queimadores a intervir é de cerca de 48.683 €/ano, valor que está muito próximo da estimativa teórica inicial de 46.771,20 €. A diferença residual de aproximadamente 4% pode ser explicada por pequenas variações reais nos tempos de funcionamento.

Já na eletricidade, observa-se também uma variabilidade significativa nos valores semanais. O valor mínimo registado foi de 129,23 € na semana 45, enquanto o máximo atingiu 348,43 € na semana 14. Esta variação significativa reflete as oscilações na carga produtiva da instalação, bem como diferenças nos perfis operacionais semanais. A Tabela 17 apresenta um resumo dos principais indicadores resultantes da análise semanal.

Tabela 17 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Linha de Pintura (Eletricidade)

<b>Linha de Pintura (Eletricidade)</b>	
Consumo total (kW/h)	78504.39
Custo total (€)	7,850.44 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	14.52
Nº semanas em análise	30
Consumo médio semanal (kW/h)	2616.81
Custo médio semanal (€)	261.68 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kWh)	0.48
Custo estimado anual (€)	12,560.70 €

Durante este período, registou-se um consumo total de 78.504 kW/h, correspondendo a um custo total de 7.850,44 €. Este valor traduz-se numa média semanal de 2.616,81 kW/h e 261,68 €, o que permite estimar um custo anual de eletricidade na ordem dos 12.560,70 €.

Com o objetivo de avaliar a viabilidade económica das intervenções na linha, estimaram-se os custos de investimento e as poupanças anuais associadas ao gás natural e à eletricidade, conforme resumido na Tabela 18 e 19.

Tabela 18 - Indicadores económicos da alteração do método de queima na Linha de Pintura Aérea

<b>Linha de Pintura Aérea (Gás)</b>	
Custo total	24,600.00 €
Poupança total estimada	<b>14,636.36 €</b>
Payback (anos)	1.68

Tabela 19 - Indicadores económicos do sistema de deteção de cubas na Linha de Pintura Aérea

<b>Linha de Pintura Aérea (Eletricidade)</b>	
Custo total	4,500.00 €
Poupança total estimada	<b>2,664.00 €</b>
Payback (anos)	1.69

Os valores apresentados permitem concluir que ambas as intervenções apresentam um período de retorno inferior a dois anos, evidenciando um forte potencial de rentabilidade e justificação económica.

### **3.1.3.7. Chiller do Core e Chiller do Laboratório PT**

Na unidade industrial do Core da Efacec, o sistema de arrefecimento desempenha um papel fundamental na garantia da estabilidade térmica e operacional das três instalações principais de secagem da linha de produção, nomeadamente o arrefecimento das bombas de anel líquido e condensadores. Estes processos requerem uma regulação térmica contínua e eficiente para assegurar o bom funcionamento dos equipamentos, evitando assim sobreaquecimentos que possam comprometer a integridade dos materiais ou a segurança do processo.

Para esta função era utilizado, até à data de análise, um chiller industrial instalado em 2004. Tratando-se de um equipamento com mais de 20 anos de operação contínua, foi identificado que o mesmo se encontrava tecnicamente obsoleto, apresentando sucessivas avarias desde 2016 que resultaram em elevados custos de manutenção, interrupções de produção e, em algumas ocasiões, a necessidade de recorrer a alugueres temporários de equipamentos frigoríficos externos para não comprometer os processos de secagem.

Paralelamente, no laboratório de ensaio dos grandes transformadores (PT), encontravam-se instaladas duas unidades frigoríficas igualmente com ano de fabrico de 2004. Estes dois chillers tinham como função garantir o arrefecimento contínuo dos alternadores utilizados nos ensaios aos transformadores Shell e Core. Tal como no caso do Core, os dois chillers do laboratório encontravam-se em fim de vida útil, com uma degradação progressiva do desempenho de arrefecimento e frequentes episódios de falha que exigiam intervenções corretivas dispendiosas e a recurso a alugueres externos frequentes. Um dos dois chillers encontrava-se, à data da análise, praticamente inoperacional e irrecuperável, inviabilizando a realização de ensaios de maior duração e intensidade térmica. Esta limitação colocava em risco a capacidade da empresa para cumprir os seus compromissos com clientes, facto que foi reiteradamente sinalizado pelo fornecedor responsável pela manutenção dos equipamentos e por outros intervenientes no processo.

Foi efetuado um levantamento rigoroso de todas as ordens de compra relativas a reparações e alugueres realizados entre 2016 e 2024, concluindo-se que o custo médio anual com o chiller do Core ascendeu a 13.800 €, enquanto os custos associados aos chillers do Laboratório PT atingiram uma média anual de 25.300 €. Estes valores, somados às estimativas de poupança energética, reforçaram significativamente a atratividade da solução de aluguer, enquanto permitiram mitigar o risco de falha crítica no processo produtivo e de ensaio.

A substituição dos chillers foi, portanto, motivada prioritariamente por razões técnicas e operacionais, dado o risco efetivo que os equipamentos degradados representavam para a continuidade dos processos industriais e de ensaio da Efacec. No entanto, paralelamente a esta motivação central, foi também desenvolvida uma análise económica e energética aprofundada que permitiu quantificar os ganhos de eficiência associados à substituição dos chillers por equipamentos mais modernos, reforçando a fundamentação para o investimento.

Numa fase inicial, foi considerada a aquisição de novos chillers, com os custos estimados de 112.000 € para o chiller do Core e 145.000 € para a substituição do conjunto no Laboratório PT por apenas um de maior capacidade. No entanto, na fase de negociação com o fornecedor (Trane), foi identificada a possibilidade de recorrer ao aluguer de equipamentos equivalentes provenientes da frota de equipamentos disponíveis da própria marca. Esta solução revelou-se financeiramente mais vantajosa, tendo-se acordado um contrato de aluguer por três anos com os seguintes valores anuais:

- Chiller do Core: 17.000 €
- Chiller do Laboratório PT: 23.000 €

Este contrato inclui todos os custos de manutenção e assistência técnica, dispensando assim a inclusão dos equipamentos no contrato geral de manutenção, o que representa uma poupança adicional de 1.478,67 € por ano no Core e 2.957,33 € por ano no Laboratório PT.

No âmbito da proposta de aluguer, o fornecedor elaborou uma estimativa de poupança energética anual para ambas as instalações, como é possível analisar em detalhe no Apêndice N.

A substituição dos chillers traduziu-se numa redução significativa do consumo energético face à situação anterior. No caso do Core, a poupança estimada é de aproximadamente 2.200 €/ano, enquanto no Laboratório PT a redução ascende a cerca de 13.870 €/ano, decorrente exclusivamente da maior eficiência dos novos equipamentos.

Adicionalmente, no Core foi identificada uma situação de funcionamento em vazio, em que tanto o chiller como as bombas de circulação permaneciam operacionais mesmo na ausência de carga térmica, originando consumos energéticos sem benefício operacional. Para mitigar este problema, foi proposta a implementação de um sistema de passagem de sinal que permita o desligar automático do chiller e das bombas sempre que não exista necessidade real de arrefecimento. Esta medida representa uma poupança anual adicional de aproximadamente 1.118 €.

No Apêndice O foi realizada uma análise dos consumos médios diários e semanais dos chillers do Core e do Laboratório PT, a partir da qual se apresentam os resultados que sustentam a avaliação desenvolvida neste capítulo.

No caso do Core, a análise dos dados permite concluir que o consumo total acumulado nas 14 semanas foi de 49.166 kW/h, correspondendo a um custo total de 4.916,60 €, o que representa um custo médio semanal de 351,19 €, como é possível observar na Tabela 20.

*Tabela 20 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do Chiller do Core*

<b>Chiller Core</b>	
Consumo total (kW/h)	49166.02
Custo total (€)	4,916.60 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	9.10
Nº semanas em análise	14
Consumo médio semanal (kW/h)	3511.86
Custo médio semanal (€)	351.19 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	0.65
Custo estimado anual (€)	18,261.67 €

## Desenvolvimento

Considerando este valor médio e extrapolando-o para um ano completo (52 semanas), obtém-se um custo energético anual estimado de 18.261,67 €, que representa uma estimativa sólida e baseada em medição real com recurso à plataforma *Sensorfact*. Este valor permite comparar diretamente com os resultados da simulação técnica fornecida pela Trane, que estimava um consumo anual de 30.990 € para o chiller antigo.

Aplicando esta mesma percentagem de poupança (7,1%) ao valor real medido pela *Sensorfact* e adicionado à poupança do funcionamento em vazio, a poupança teórica total ajustada seria de 2.415,10 €, ou seja 13.22%, reduzindo o custo energético anual do novo chiller para cerca de 15.846,57 €/ano. Esta comparação evidencia um desvio significativo entre a estimativa inicial baseada em simulação e os valores reais de operação medidos, o que reforça a importância de recorrer a dados reais sempre que possível, sobretudo em contextos industriais com variação operacional relevante.

Na Tabela 21 é apresentado o resumo dos principais indicadores económicos anuais atualizados associados ao modelo de aluguer do Core.

Tabela 21 - Indicadores económicos da substituição do Chiller do Core

Chiller Core	
Custo aluguer/ano	17,000.00 €
<b>Poupança energética estimada</b>	<b>2,415.10 €</b>
Poupança custos manutenção	15,278.67 €
Payback (anos)	0.96

Já no cenário do Laboratório PT, com base nos dados recolhidos pela plataforma *Sensorfact*, o consumo total registado foi de 36.654 kW/h, com um custo total de 3.665,37 €, o que representa um consumo médio semanal de 2.618 kW/h e um custo médio semanal de 261,81 €, como é possível observar na Tabela 22.

Tabela 22 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do Chiller do Laboratório PT

Chillers Laboratório PT	
Consumo total (kW/h)	36653.71
Custo total (€)	3,665.37 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	6.78
Nº semanas em análise	14
Consumo médio semanal (kW/h)	2618.12
Custo médio semanal (€)	261.81 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kWh )	0.48
Custo estimado anual (€)	13,614.24 €

Extrapolando este valor para um ano completo (52 semanas), estima-se um custo anual de 13.614,24 €. Estes valores, obtidos por medição direta, são significativamente inferiores aos apresentados nos estudos técnicos fornecidos pela Trane, que previam um consumo anual de 55.927 € para os chillers antigos.

Aplicando esta mesma percentagem de redução aos valores reais (24,8%), a poupança estimada ajustada seria de 3.376,33 €, reduzindo o custo anual para 10.237,91 €. Esta discrepância revela uma diferença substancial entre os valores simulados e os valores reais, a qual se explica, em grande parte, pelo facto de o estudo técnico ter sobrestimado o número de horas de funcionamento efetivo dos chillers, assumindo um regime contínuo de 13 horas por dia, 7 dias por semana, durante todo o ano. Tal abordagem não reflete o perfil real de operação intermitente praticado no laboratório, onde os chillers são ativados apenas conforme a necessidade dos ensaios.

Na Tabela 23 é apresentado o resumo dos principais indicadores económicos anuais atualizados associados ao modelo de aluguer do Core.

Tabela 23 - Indicadores económicos da substituição dos Chillers do Laboratório PT

Chiller Laboratório PT	
Custo aluguer/ano	23,000.00 €
Poupança energética estimada	<b>3,376.33 €</b>
Poupança custos manutenção	28,257.33 €
Payback (anos)	0.73

### 3.2. Intervenções realizadas nos equipamentos

Concluída a fase de monitorização e diagnóstico energético, avançou-se para a realização de um conjunto de 13 intervenções de melhoria. Esta secção apresenta, por instalação, as ações concretas realizadas no terreno, incluindo as datas de intervenção, os recursos envolvidos, e as condicionantes operacionais que foram consideradas para compatibilizar os trabalhos com o normal funcionamento da produção.

As intervenções foram executadas entre dezembro de 2024 e junho de 2025, mobilizando recursos internos da Efacec, bem como apoio técnico externo especializado. Como referido anteriormente, a única exceção foi a substituição dos holofotes na Cabine do PT, que ocorreu de forma antecipada, em setembro de 2024, antes do início da campanha de monitorização energética.

A Tabela 24 apresenta as 13 intervenções realizadas, organizadas por ordem de execução, e serve como referência para a análise individual que se seguirá em cada subsecção deste capítulo.

Tabela 24 - Lista cronológica das intervenções efetuadas

Equipamento	Intervenção Realizada	Data de Início	Data de Fim
Despoeiramento do Core	Sistema de controlo para variador de frequência	12/12/24	13/12/24
SAC Arroteia	Redução da pressão da rede para 7,3 bar	16/12/24	16/12/24
Cabine do PT	Substituição de lâmpadas fluorescentes por LED	11/01/25	11/01/25
Cabine do PT	Alteração do método de queima de indireta para direta	11/01/25	12/01/25

Tabela 24 (Cont.) – Lista cronológica das intervenções efetuadas

SAC Maia	Instalação de válvula de corte temporizada	08/01/25	13/01/25
Chillers do Laboratório PT	Substituição de Chillers	03/02/25	08/02/25
Chiller do Core	Substituição de Chiller	03/02/25	08/02/25
SAC Arroteia	Reparação de Fugas – 1ª Fase	12/02/25	15/02/25
Despoeiramento do Shell	Sistema de controlo para variador de frequência	12/12/24	12/03/25
SAC Arroteia	Reparação de Fugas – 2ª Fase	10/04/25	11/04/25
Linha de Pintura Aérea	Sistema de deteção de cubas	06/06/25	09/06/25
Linha de Pintura Aérea	Alteração do método de queima de indireta para direta	06/06/25	09/06/25

### 3.2.1. Sistema de ar comprimido – Arroteia

No SAC da unidade da Arroteia, a intervenção realizada baseou-se num estudo técnico prévio já descrito no ponto anterior, onde se comprovou que a pressão de rede de 8 bar era superior às necessidades reais dos equipamentos abastecidos. A análise da documentação técnica permitiu validar a viabilidade de operar com uma pressão inferior, sem comprometer o funcionamento dos equipamentos e a segurança dos operadores.

A definição do novo *setpoint* de pressão para 7,3 bar foi efetuada no dia 16 de dezembro de 2024, através de uma simples operação no sistema de controlo do conjunto de compressores. Este ajuste foi realizado diretamente no painel de controlo do sistema, tendo em conta a lógica de regulação partilhada entre o compressor VSD (inoperacional à data) e os dois compressores de velocidade fixa em operação. A tarefa, do ponto de vista prático, foi tecnicamente simples, no entanto, esta medida apenas foi possível graças ao trabalho de caracterização e validação realizado anteriormente, que constituiu o verdadeiro esforço técnico da intervenção.

Complementarmente à redução de pressão, procedeu-se à resolução faseada das fugas de ar comprimido identificadas na rede da unidade da Arroteia. A deteção das fugas foi efetuada através da escuta direta e observação atenta durante a passagem pelas fábricas, aproveitando momentos de silêncio operacional e zonas com maior intensidade sonora característica de fuga. Para cada ponto de fuga foi realizado o levantamento do material necessário à reparação, procedendo-se de imediato à verificação do stock disponível e à encomenda dos componentes em falta, tais como racords, tubagem, uniões e elementos de vedação.

Embora a maioria das fugas tenham sido detetadas logo na fase de diagnóstico, a sua reparação não foi executada de imediato. A estratégia inicial previa a realização desta intervenção apenas após o

recondicionamento do compressor VSD, cuja operação permitiria um ajuste mais eficiente à procura real e, em teoria, maximizar o impacto da eliminação de fugas no consumo energético global. No entanto, face à incerteza quanto ao prazo de reparação do VSD e à presença de perdas visivelmente relevantes, optou-se por avançar com a correção das fugas. Esperava-se, mesmo com os compressores de velocidade fixa em funcionamento, observar períodos de carga mais curtos e fases de alívio mais prolongadas, beneficiando a eficiência do sistema.

A intervenção foi estruturada em duas fases distintas. Por um lado, a quantidade elevada de pontos de fuga detetados inicialmente exigiu uma divisão do trabalho para garantir uma execução exequível. Por outro, a separação das fases permitiu também monitorizar o impacto da primeira etapa, ajustando as prioridades técnicas da segunda.

A Fase 1 decorreu entre os dias 12 e 15 de fevereiro de 2025, permitindo a reparação de 42 fugas. As intervenções foram realizadas com o apoio da equipa técnica de manutenção, através da substituição de acessórios danificados, reaperto de ligações ou vedação de pontos de fuga com recurso aos materiais previamente identificados.

A Fase 2 teve lugar entre os dias 10 e 11 de abril de 2025, abrangendo 25 fugas adicionais, quer, entretanto, sinalizadas, quer remanescentes da fase anterior por constrangimentos com a produção ou de disponibilidade de componentes.

As fugas encontravam-se principalmente em pontos críticos e comuns a este tipo de instalação, nomeadamente:

- 1) Racords (uniões diretas, em “T” e curvas), reguladores de caudal e engates rápidos desgastados ou mal apertados;
- 2) Unidades de preparação de ar comprimido (reguladores, filtros e lubrificadores);
- 3) Tubagem de poliuretano com microfissuras ou ressequida;
- 4) Conexões roscadas com falhas de vedação, corrigidas com fita de teflon;
- 5) Ligações diretas aos equipamentos e ligações dos ramais de distribuição.

Dado que a maioria das reparações era de execução rápida e localizada, não foi necessário um planeamento formal com a produção. As intervenções foram realizadas de forma cirúrgica, aproveitando momentos de paragem natural das máquinas ou curtas cedências previamente acordadas com os operadores, sem impacto significativo no normal funcionamento da instalação.

Em termos de materiais e respetivos custos associados, a Fase 1 da resolução de fugas implicou um investimento total em materiais no valor de 650,28 €, enquanto a Fase 2 representou um custo adicional de 151,54 €. Estes valores refletem a aquisição dos componentes necessários à reparação, e traduzem um investimento modesto, tendo em conta os ganhos esperados.

### **3.2.2. Sistema de ar comprimido – Maia**

A intervenção no sistema de ar comprimido (SAC) da unidade industrial da Maia decorreu no dia 13 de janeiro de 2025, entre as 21h e as 24h. Esta janela horária foi estrategicamente escolhida em coordenação com a produção, de forma a minimizar o impacto operacional, aproveitando um período

## Desenvolvimento

de inatividade produtiva. O trabalho consistiu na instalação de uma válvula de corte temporizada, diretamente à saída do depósito principal do SAC.

A instalação incluiu a montagem física da válvula e a execução de um novo tubo de ligação, fabricado internamente com recurso ao material disponível em stock, implicando apenas trabalho manual de roscagem da tubagem existente.

O controlo automatizado do sistema foi assegurado através de um quadro elétrico dedicado, equipado com um relógio programável digital e um comutador manual/automático. O relógio programável já fazia parte do inventário interno da empresa, sendo a instalação elétrica realizada integralmente por um técnico interno. A programação foi configurada para garantir que o sistema estivesse operacional durante os períodos produtivos (das 06h00 às 20h00), com uma margem adicional de segurança para eventuais prolongamentos de turno. Na Figura 28 é possível observar o resultado da instalação do sistema.



*Figura 28 - Válvula de corte e quadro de controlo do sistema do SAC da Maia*

Dado que o compressor se encontra fisicamente afastado do edifício principal de produção, não foi possível instalar o quadro de controlo no interior da fábrica, nem estabelecer comunicação eficaz por rádio devido à distância e barreiras físicas. Por este motivo, o quadro com relógio programável e comutador foi instalado no próprio local do compressor, garantindo acessibilidade local e autonomia de funcionamento, sem necessidade de intervenção constante dos operadores. Esta solução foi validada como tecnicamente viável e economicamente eficiente, considerando a infraestrutura existente e os objetivos da intervenção.

A necessidade técnica mais sensível deste sistema, relacionada com o fornecimento contínuo e pontual de ar comprimido a duas impressoras, foi resolvida através da implementação de uma unidade de compressão autónoma, composta por um pequeno compressor de ar comprimido e um secador integrado, dedicada exclusivamente ao ramal que serve as duas impressoras.

Esta unidade foi calibrada para operar a uma pressão de 5 bar, o que garante que não entra em funcionamento durante o período de laboração, dado que a rede principal trabalha a uma pressão superior (6 bar). O compressor é acionado apenas durante as *off-hours*, sempre que a pressão local desce abaixo desse valor, assegurando assim o fornecimento mínimo necessário. Para garantir o isolamento entre sistemas, foram instaladas duas válvulas antirretorno: uma para evitar o retorno de ar da rede principal para o ramal autónomo do compressor, e outra para impedir que o ar comprimido do compressor local seja injetado na rede geral. Esta solução, possível observar na Figura 29, garantiu a continuidade do funcionamento crítico das impressoras, viabilizando simultaneamente a interrupção temporizada do sistema principal durante os períodos de inatividade, conforme previsto na estratégia de melhoria.



*Figura 29 - Unidade autónoma de ar comprimido para as impressoras, composta por compressor e secador integrado*

Antes da implementação da medida, foi promovida uma sessão de alinhamento com todas as partes interessadas do polo da Maia, envolvendo chefias de turno, responsáveis de área, elementos da manutenção e da engenharia industrial. Nesta sessão foram apresentados os dados de consumo recolhidos, o racional técnico da proposta e os impactos esperados em termos de eficiência energética, fiabilidade do sistema e facilidade de operação. A validação conjunta permitiu garantir que a solução respondia às necessidades reais da instalação, assegurando o envolvimento e apoio das equipas na sua utilização e monitorização futura.

O custo total desta intervenção foi essencialmente atribuído à aquisição da válvula de corte temporizada, fornecida pelo parceiro técnico, representando um investimento pontual de 586,50 €. A restante intervenção não implicou custos adicionais relevantes, dado que os materiais acessórios estavam disponíveis internamente e a mão de obra foi assegurada pelos recursos próprios da empresa.

### 3.2.3. Unidade de Despoeiramento – Core

A intervenção realizada no sistema de despoeiramento do Core decorreu em duas etapas principais, nos dias 12 e 13 de dezembro de 2024, com o objetivo central de melhorar a eficiência energética e operacional do sistema de aspiração.

Como referido anteriormente, a maioria das máquinas desta zona já dispunha de válvulas guilhotina nos respetivos ramais de aspiração, permitindo o seccionamento do caudal quando as máquinas não estão em operação. Durante esta intervenção, foram ainda instaladas duas novas válvulas guilhotina em máquinas que não dispunham deste controlo, aumentando a eficiência do sistema ao evitar a aspiração desnecessária em pontos inativos. Esta modificação estrutural encontra-se documentada através da Figura 30.



*Figura 30 - Instalação de novas válvulas guilhotina em ramais de aspiração no Despoeiramento do Core*

A fase inicial da intervenção, no dia 12 de dezembro, consistiu na instalação física de um novo quadro elétrico com variador de frequência, executada por um técnico eletricista externo. Em paralelo, no mesmo dia, um técnico da empresa fornecedora da unidade procedeu à instalação de um transdutor de pressão à entrada do filtro de mangas no ramal principal de aspiração, assegurando uma medição precisa da pressão diferencial do sistema. O transdutor instalado possui uma gama de medição de 0 a 5000 Pa, adequada ao tipo de ventilador instalado.

No dia 13 de dezembro, procedeu-se à ligação do transdutor ao variador de frequência, bem como à programação do sistema de controlo. Esta fase envolveu a colaboração do eletricista e do técnico responsável da empresa fornecedora, que realizaram testes operacionais para determinar o *setpoint* mais adequado. A intervenção obrigou a uma paragem temporária do sistema de despoeiramento, previamente planeada com os responsáveis operacionais, com uma duração de aproximadamente 5 horas, durante as quais foram executadas as ligações elétricas e de comando, bem como os ensaios de funcionamento. A paragem foi organizada para evitar interferências com o funcionamento produtivo, tendo a instalação sido restabelecida de imediato após a conclusão dos trabalhos.

Durante a fase de testes, foi verificado que o *setpoint* originalmente indicado (5280 Pa) era excessivamente elevado, implicando o funcionamento do ventilador à velocidade máxima, o que

contrariava os objetivos da intervenção. Assim, foi decidido realizar um primeiro teste com o variador a 60% da escala do transdutor, correspondente a 3000 Pa, apenas com o ponto mais distante aberto. A avaliação da aspiração, mesmo nos pontos mais distantes e menos utilizados da instalação, revelou-se bastante satisfatória. Numa segunda fase do teste, foi forçada a abertura simultânea de vários pontos de aspiração, um cenário raro na operação real, tendo-se verificado uma ligeira redução do desempenho, ainda assim dentro de parâmetros aceitáveis. Para garantir uma margem adicional de desempenho, o *setpoint* foi então ajustado para 70% da escala, equivalente a 3500 Pa.

Esta configuração foi validada em conjunto com o responsável da área de isolantes do Core, ficando definido que o sistema poderia ser ajustado para valores superiores se, futuramente, se verificasse necessidade acrescida de aspiração. Até à data da presente redação, não se registaram limitações operacionais com o sistema regulado a 70% da escala, mantendo-se a aspiração eficaz em todos os pontos relevantes da instalação.

### **3.2.4. Unidade de Despeiramento – Shell**

Ao contrário do sistema do Core, no Shell já existia um variador de frequência instalado, embora este operasse em regime fixo, sem sinal de referência adaptativo. Para permitir a regulação automática em função das condições reais de aspiração, foi decidido instalar um transdutor de pressão diferencial.

A instalação do transdutor foi realizada no dia 12 de dezembro de 2024, em simultâneo com a intervenção no sistema do Core. O transdutor, com escala de 0 a 5000 Pa, foi colocado no ramal principal de aspiração, à entrada do filtro de mangas, assegurando a monitorização da pressão diferencial na linha de aspiração.

Contudo, nenhum dos cinco ramais existentes no sistema Shell dispunha de válvulas guilhotina, o que impossibilitava o controlo individual da aspiração nos diferentes pontos da instalação. Para colmatar esta limitação, tornou-se necessário instalar cinco válvulas guilhotina, uma por ramal, bem como dois passadores manuais localizados nos ramais das máquinas CNC. Estes passadores permitem acionar manualmente a aspiração sem necessidade de simular um corte ou ligar a máquina, garantindo assim que o ponto mais distante do sistema permanece sempre com entrada de ar, promovendo uma circulação eficiente e contínua no sistema de aspiração.

Esta instalação foi condicionada por um atraso na entrega dos materiais, o que obrigou ao adiamento da intervenção. A instalação física das válvulas e a sua ligação aos equipamentos correspondentes foi concluída apenas no dia 12 de março de 2025. A instalação das válvulas e dos passadores foi realizada no dia 13 de março de 2025, data em que todo o sistema foi concluído e passou a operar em modo automático, regulado pelo sinal do transdutor, conforme é possível observar na Figura 31.



*Figura 31 - Instalação de novas válvulas guilhotina em ramais de aspiração no Despoeiramento do Shell*

A intervenção foi planeada em articulação com os responsáveis de produção, de forma a minimizar impactos na operação. Para cada máquina associada aos ramais intervencionados, foi necessário garantir uma paragem controlada de aproximadamente 1 hora, totalizando cerca de 5 horas distribuídas ao longo do dia, sem comprometer o normal funcionamento das atividades produtivas.

Com a instalação finalizada, e tendo por base os cálculos de perda de carga realizados previamente, estimou-se um valor de perda de carga global de 3745 Pa, o qual se encontra perfeitamente enquadrado dentro da gama do transdutor (0–5000 Pa). Considerando que os dois ramais mais distantes e frequentemente utilizados pertencem às máquinas CNC, decidiu-se configurar o *setpoint* do sistema para 70% da escala do transdutor, equivalente a 3500 Pa.

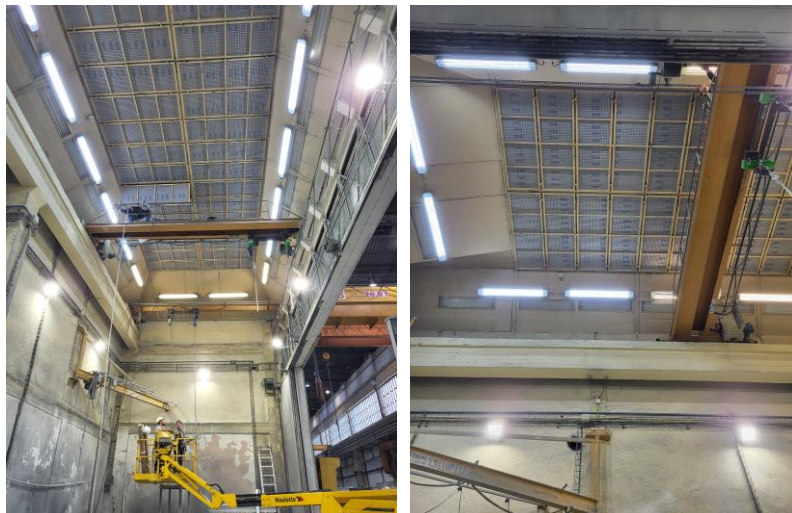
Desde então, o sistema tem operado de forma estável e eficaz, com aspiração adequada em todos os pontos relevantes da instalação, mesmo durante os períodos de maior exigência. Até à data da presente redação, não se registaram limitações operacionais, o que comprova a eficácia da regulação dinâmica implementada.

### **3.2.5. Cabine de Pintura PT**

No fim de semana correspondente à semana 2 de 2025, mais concretamente nos dias 11 e 12 de janeiro, foram realizadas duas intervenções fundamentais na cabine de pintura de grandes transformadores, com o objetivo de melhorar a eficiência energética do sistema de iluminação e otimizar o processo de aquecimento da cabine. Ambas as ações implicavam uma paragem total da instalação, razão pela qual os trabalhos foram estrategicamente planeados para decorrer fora do horário produtivo, em articulação com os responsáveis de produção.

A primeira intervenção consistiu na substituição da iluminação existente por tecnologia mais eficiente. Esta substituição foi realizada no dia 11 de janeiro de 2025, durante a manhã, num período de aproximadamente 4 horas. A intervenção foi executada por um parceiro técnico especializado e contou com o apoio de uma plataforma elevatória, essencial para o acesso seguro à estrutura superior da cabine. Importa referir que a Efacec dispõe internamente deste equipamento, pelo que não foi gerado qualquer custo adicional associado ao aluguer da plataforma. Na Figura 32, é possível observar o decorrer da

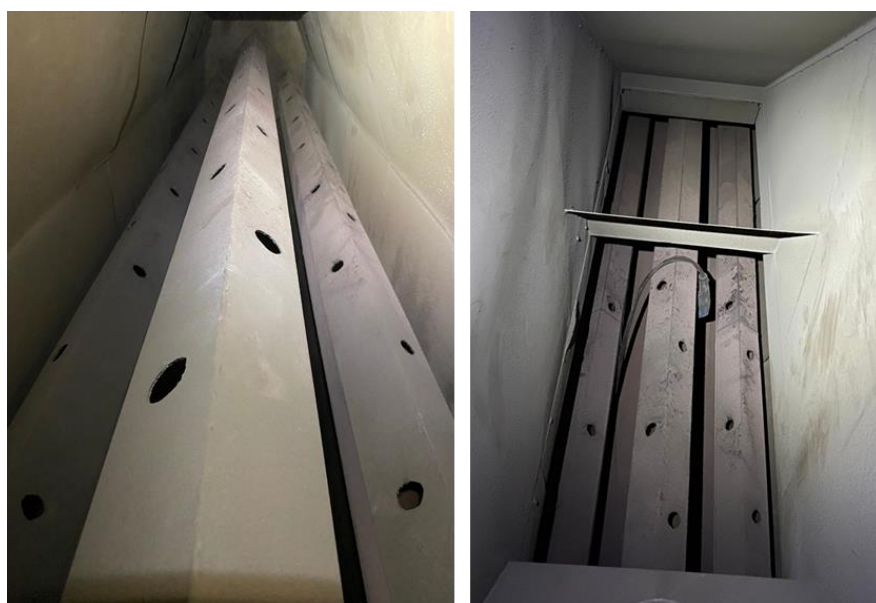
intervenção: as luminárias com tom mais claro e nítido correspondem às novas unidades LED, enquanto as que ainda apresentam um tom amarelado correspondem às antigas lâmpadas fluorescentes, ainda não substituídas no momento da captura da imagem.



*Figura 32 - Substituição da iluminação fluorescente por tecnologia LED na Cabine do PT*

Em paralelo com a substituição da iluminação, iniciou-se igualmente no dia 11 a segunda intervenção crítica: a alteração do método de aquecimento da cabine, passando de um sistema de queima indireta para queima direta, com o objetivo de melhorar significativamente o rendimento térmico do processo.

Nesta cabine optou-se por uma solução de adaptação da câmara de combustão e queimador existente invés da remoção da câmara. Esta adaptação consistiu na perfuração de orifícios circulares ao longo do corpo da câmara de combustão, como é possível observar na Figura 33, de forma a permitir que os produtos da queima fossem diretamente canalizados para o ar insuflado na cabine, assegurando assim uma transferência térmica mais eficiente.



*Figura 33 - Câmara de combustão da Cabine do PT após adaptação para queima direta*

## Desenvolvimento

Paralelamente, foi removida a chaminé existente e a saída correspondente foi tapada, de modo a evitar a extração dos gases de combustão para o exterior e garantir que a energia térmica fosse integralmente aproveitada no processo de aquecimento da cabine. Esta modificação estrutural encontra-se documentada na Figura 34, que ilustra o estado da instalação após a intervenção.



*Figura 34 - Modificação da Cabine do PT após remoção da chaminé e adaptação do queimador*

No dia 12 de janeiro, foram realizados os trabalhos de calibração, parametrização e afinação do queimador, de forma a ajustá-lo ao novo regime de funcionamento em queima direta. Esta fase incluiu testes operacionais com monitorização dos níveis de gases de combustão, com especial atenção aos níveis de monóxido de carbono (CO), por forma a garantir a segurança e a conformidade ambiental da nova configuração do sistema. Os ensaios realizados validaram o correto funcionamento da instalação, permitindo o seu reativar imediato no início da semana seguinte.

### **3.2.6. Linha de Pintura Aérea**

As intervenções na linha de pintura aérea visaram aumentar significativamente a eficiência energética do processo térmico e otimizar o controlo operacional da introdução de cubas nas estufas. Estas ações estavam inicialmente previstas para o mês de janeiro de 2025, no entanto, devido a um atraso significativo na entrega dos queimadores modulantes por parte do fornecedor, a implementação foi adiada cerca de seis meses, tendo sido finalmente realizada nos dias 6, 7 e 9 de junho de 2025.

O planeamento das atividades foi cuidadosamente articulado com o calendário produtivo. Os trabalhos decorreram em dias de menor laboração, nomeadamente o final da semana (sexta-feira e sábado) e o dia 9 de junho, véspera do feriado de 10 de julho, altura em que foi feita ponte pela maioria dos trabalhadores. Desta forma, garantiu-se a total disponibilidade da instalação durante os três dias necessários, minimizando o impacto no normal funcionamento da produção.

A principal intervenção consistiu na transição do sistema de queima indireta para queima direta nas três estufas da linha. No dia 6 de junho, foram efetuadas as remoções dos queimadores antigos e

das respetivas câmaras de combustão, bem das chaminés existentes, que deixaram de ser necessárias com a nova configuração.

No dia 7 de junho, procedeu-se à instalação dos novos queimadores modulantes, bem como à ligação elétrica ao quadro de controlo e à montagem dos novos tubos de distribuição de gases quentes no interior das estufas. Estes tubos permitiriam a circulação do calor diretamente para o interior da estufa, como previsto no conceito de queima direta. A Figura 35 apresenta uma comparação entre o queimador antigo e o novo modelo instalado, enquanto na Figura 36 é visível a antiga câmara de combustão e o novo tubo de distribuição de gases instalado numa das estufas, com os orifícios de insuflação visíveis ao longo do seu percurso.



*Figura 35 - Queimador antigo (esquerda) e novo queimador modulante instalado (direita)*



*Figura 36 - Câmara de combustão antiga (esquerda) e novo tubo de distribuição de gases (direita)*

## Desenvolvimento

No entanto, durante os testes operacionais realizados no dia 9 de junho, foram identificadas diferenças significativas de temperatura ao longo da estufa do primário e do esmalte, com o calor a acumular-se excessivamente na extremidade final. Cada estufa está equipada com duas sondas de temperatura, uma colocada no início e outra na extremidade oposta. O sistema de controlo do queimador não opera com base na média das duas leituras, mas sim orienta-se pela sonda que regista a temperatura mais baixa. Esta lógica de funcionamento, embora conservadora, teve como consequência direta o prolongamento do funcionamento do queimador mesmo quando parte da estufa já se encontrava a temperaturas excessivas.

Verificou-se, por exemplo, que com o queimador regulado para um *setpoint* de 135 °C, a extremidade final da estufa atingia os 160 °C, enquanto o início se mantinha abaixo dos 100 °C. Este desvio impedia o queimador de desligar, levando-o a operar continuamente, o que resultava não só em consumos energéticos desnecessários, como também colocava em risco o acabamento das peças, dado que temperaturas demasiado elevadas podem degradar a tinta aplicada.

A solução implementada passou por modificar o tubo de distribuição, com a perfuração de novos orifícios na secção inicial do tubo (entrada da estufa) e o encerramento parcial de orifícios na extremidade final, permitindo assim uma distribuição mais equilibrada do calor ao longo do percurso. Esta modificação estabilizou a temperatura em toda a estufa e permitiu ao sistema modular corretamente em função da real necessidade térmica. Adicionalmente, os técnicos procederam à configuração dos parâmetros operacionais dos queimadores, estabelecendo os limites mínimo e máximo de modulação, com o objetivo de que as estufas atingissem a temperatura desejada em cerca de 30 minutos, e posteriormente a mantivessem com um número reduzido de arranques, otimizando o consumo energético e o tempo de resposta.

Ainda no dia 9 de junho, foi instalado o sistema de deteção de cubas, que permite verificar a presença de unidades em tratamento térmico no TTS, controlando automaticamente o funcionamento das bombas de aspersão.

A montagem física do sensor foi efetuada junto ao percurso de entrada das cubas no TTS, posicionando o dispositivo de forma a garantir que o batente do carro transportador o aciona com precisão no momento da entrada.

A Figura 37 ilustra, respetivamente, o sensor de fim de curso instalado no percurso aéreo (esquerda) e o batente do carro transportador responsável por acionar mecanicamente o sensor à entrada do TTS (direita).

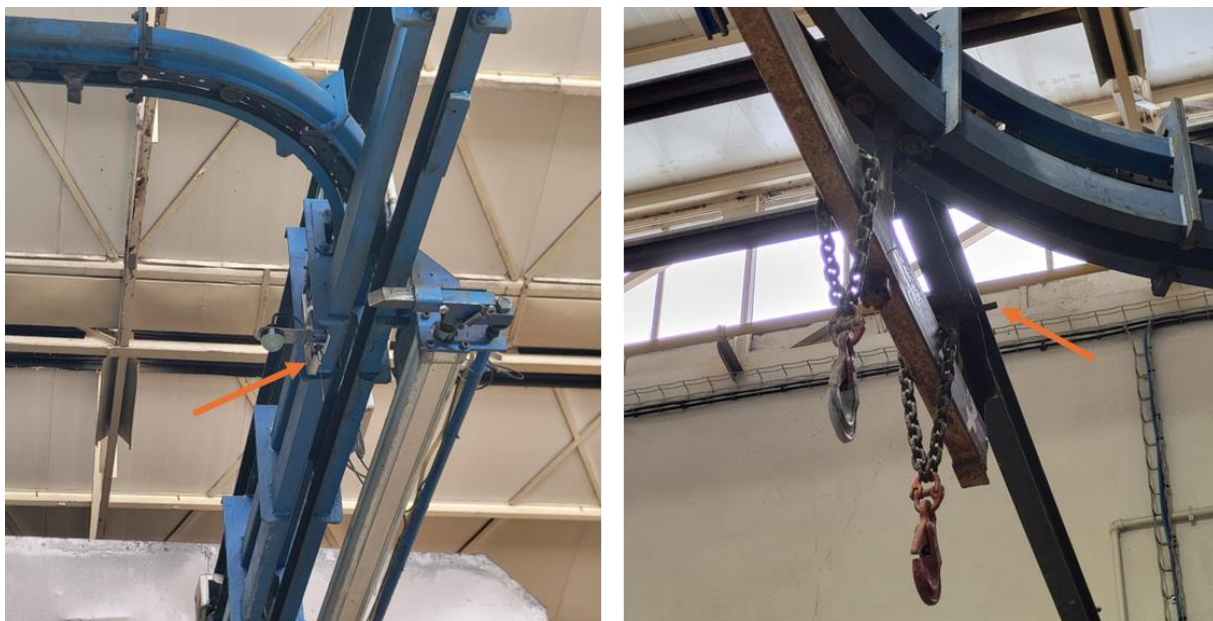


Figura 37 - Sensor de fim de curso no percurso aéreo (esquerda) e batente do carro transportador (direita)

A operação implicou apenas ajustes mecânicos simples e a ligação elétrica ao quadro de controlo, previamente preparado para receber o sinal do sensor.

No que respeita à parte lógica, a programação do sistema já se encontrava previamente desenvolvida pelo parceiro técnico, não tendo sido necessário proceder a alterações estruturais ao nível do software. O trabalho no local consistiu na validação da lógica de funcionamento, na verificação das entradas e saídas do autómato e na calibração do sistema com o avanço real das cubas, garantindo que a ativação do sensor era corretamente interpretada pelo sistema de controlo, em articulação com o conta-rotações do transportador aéreo. Após os testes de confirmação, foi validado que o sistema reconhecia corretamente a entrada de cada cuba e que o comando das três bombas do TTS era gerido em função da carga presente, conforme previsto.

### 3.2.7. Chiller do Core e Chiller do Laboratório PT

A substituição dos chillers localizados no edifício do Core e no Laboratório de Ensaios de Transformadores de Potência (PT) foi calendarizada para a semana 6 do ano de 2025, com as seguintes datas planeadas para cada intervenção:

- Laboratório PT: dias 1, 3 e 4 de fevereiro (sábado, segunda e terça-feira);
- 1) Core: dias 5, 6 e 7 de fevereiro (quarta, quinta e sexta-feira).

A execução da operação foi marcada por uma elevada complexidade logística e organizacional, uma vez que os chillers encontram-se instalados sobre as coberturas dos edifícios, condição que exigiu o recurso a autogrúas de grande porte. No caso do Core, este fator, por si só, implicou o bloqueio total do principal arruamento interno entre os edifícios do Core e do Shell, única via com capacidade para circulação de veículos de transporte especial, utilizado para movimentação de transformadores do tipo PT e equipamentos pesados entre as áreas de produção e expedição.

## Desenvolvimento

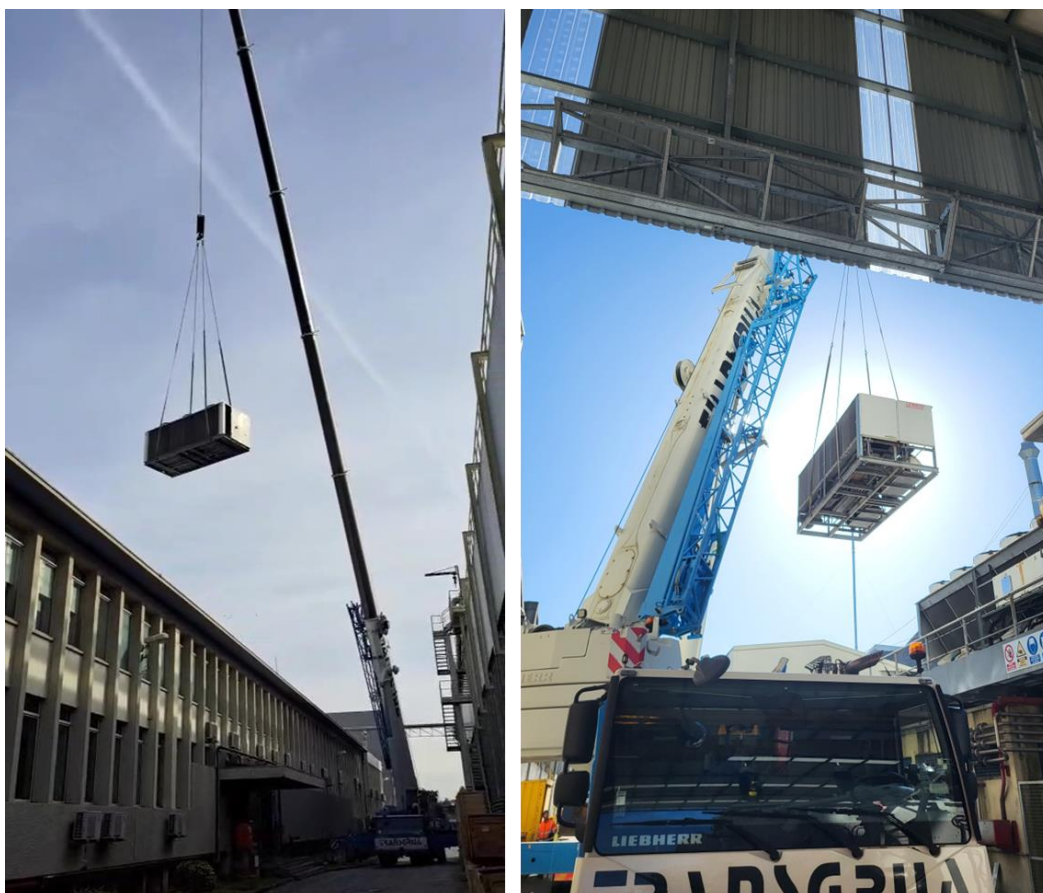
O planeamento desta operação foi minuciosamente estruturado, envolvendo oito níveis de coordenação distintos:

- 1) Fornecedor: Foram asseguradas todas as condições de entrega do chiller, validação dimensional e suporte técnico na substituição dos equipamentos.
- 2) Equipa de instalação: Responsáveis pelas ligações hidráulicas e pelo processo de desinstalação e reinstalação dos chillers, com especial atenção à integração com o sistema de bombagem e regulação existente.
- 3) Autogrúas: parceiro externo assegurou os meios de elevação e posicionamento das grúas, com intervenções calendarizadas de forma faseada:
  - Laboratório PT: substituição realizada no dia 3, das 8h às 17h, com uso de autogrúa de 60 toneladas;
  - Core: substituição realizada no dia 6, das 14h às 18h, com uso de autogrúa de 160 toneladas.
- 4) Produção: A intervenção implicou a paragem temporária das instalações de secagem associados ao edifício do Core e ensaios no laboratório com recurso aos alternadores;
- 5) Segurança e evacuação de edifícios: No caso do edifício do Core, a operação de substituição exigiu que o chiller fosse movimentado com recurso a autogrúa sobrevoando a área fabril e a zona de escritórios. Dado o peso elevado do equipamento e o risco associado à carga suspensa sobre pessoas e infraestruturas, foi necessário coordenar a evacuação total do edifício durante os períodos críticos da operação. Para garantir a segurança de todos os colaboradores, no dia 6 de fevereiro, foram definidos e comunicados dois intervalos de evacuação de 10 minutos cada, um durante a manhã e outro à tarde, durante os quais não foi permitida a permanência de pessoas no interior do edifício. No caso do Laboratório PT, por se tratar de um edifício isolado e sem sobrevoos de zonas “habitadas”, não se colocaram exigências de evacuação nem restrições semelhantes.
- 6) Transportadora: assegurou um transporte especial para proceder à recolha dos chillers, assegurando a retirada dos equipamentos das instalações.
- 7) Logística interna: A interdição do arruamento entre os edifícios Core e Shell representou uma restrição crítica, uma vez que se trata do único acesso viável para camiões de transporte especial. O corte deste acesso exigiu, por consequência, uma reorganização estratégica dos fluxos logísticos, coordenando todas as movimentações críticas fora do período laboral habitual (das 9h às 18h), garantindo que os prazos de expedição e preparação dos transformadores não fossem comprometidos. Paralelamente, foi também necessário libertar espaço significativo no arruamento, para permitir a estabilização segura da autogrúa de 160 toneladas junto ao edifício do Core. No caso do Laboratório PT, também foi imprescindível proceder à movimentação de materiais e equipamentos no exterior, de forma a criar a área necessária para a estabilização e operação da grúa de 60 toneladas, respeitando as condições de segurança e os requisitos técnicos do içamento.
- 8) Trabalhos paralelos de substituição e legalização das chaminés: A intervenção coincidiu com a execução de obras de adequação legal de várias chaminés na zona do Core. Como ambos os

trabalhos exigiam autogrúas pesadas e ocupavam o mesmo espaço logístico, foi feita uma articulação entre parceiros externos, otimizando a utilização de meios e tempo de ocupação do arruamento.

A substituição no edifício do Core e no Laboratório PT decorreu ao longo de três dias consecutivos em cada instalação, conforme planeado. No primeiro dia, foram realizados os trabalhos preparatórios com o chiller ainda em funcionamento, incluindo o desaperto mecânico, desconexões parciais e alívio progressivo das ligações, sempre sem comprometer a operação. No segundo dia, foi efetuada a paragem total do equipamento, com a respetiva desconexão elétrica e hidráulica, drenagem dos circuitos e remoção do chiller antigo, seguida da colocação do novo equipamento no local. Por fim, no terceiro dia, realizaram-se todas as ligações elétricas, hidráulicas e de controlo, bem como os testes de estanquidade, purga e colocação em marcha provisória do novo sistema.

A operação de elevação dos novos equipamentos está ilustrada na Figura 38, onde se observa, respetivamente, o içamento do chiller no edifício Core (à esquerda) e no Laboratório PT (à direita).



*Figura 38 - Içamento dos chillers no edifício Core (esquerda) e no Laboratório PT (direita)*

A substituição física dos equipamentos implicou custos operacionais adicionais, nomeadamente associados à desmontagem, novas ligações hidráulicas e elétricas, e à utilização de autogrúas. Para o Core, o custo total das ligações foi de 1.471 €, e o custo de operação da autogrúa de 160 toneladas foi de 2.250 €. No caso do Laboratório PT, os custos foram respetivamente de 2.031 € para as ligações e 700 € para a operação da autogrúa de 60 toneladas.

## Desenvolvimento

As intervenções no Core finalizaram com a instalação de um sistema de passagem de sinal entre as instalações consumidoras e o chiller. Este sistema, com um custo de implementação de 1.725 €, permite que o chiller receba, em tempo real, informação sobre a necessidade de arrefecimento. Esta integração evita que o chiller funcione em vazio e permite que permaneça desligado quando não há consumo, reduzindo significativamente os consumos residuais e prolongando a vida útil do equipamento.

A Figura 39 ilustra de forma clara o efeito da integração do sistema de passagem de sinal.

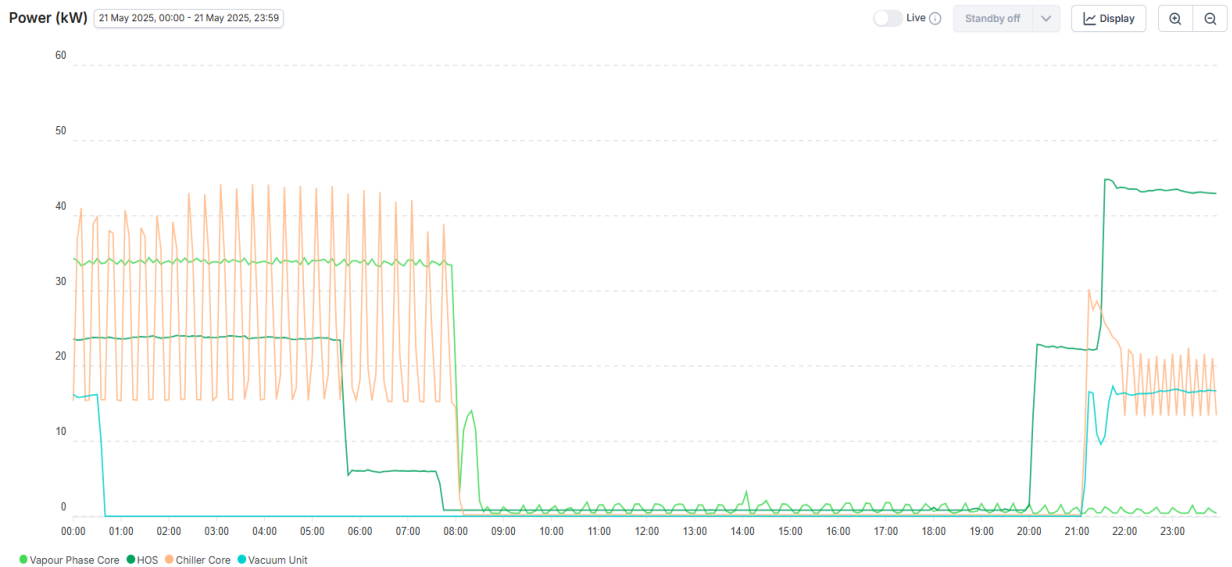


Figura 39 - Perfil de consumo do chiller do Core após a instalação do sistema de passagem de sinal

No caso do Laboratório PT, a substituição do chiller decorreu sem qualquer constrangimento técnico ou operacional.

### 3.3. Avaliação de resultados

Nesta secção procede-se à análise quantitativa dos resultados obtidos após a implementação das medidas de eficiência energética descritas anteriormente. O objetivo é determinar o impacto real das intervenções, comparando os consumos energéticos antes e depois das mesmas.

Para garantir uma avaliação justa e tecnicamente fundamentada, os dados de consumo elétrico e/ou de gás são normalizados em função do volume produtivo, sempre que este fator influencia diretamente o consumo energético do equipamento em análise. Desta forma, evita-se que variações na produção distorçam a perceção de ganhos ou perdas de eficiência.

A metodologia adotada contempla:

- Análise dos consumos médios antes e depois das intervenções, com recurso aos dados registados pela plataforma de monitorização *Sensorfact*;
- Comparação das unidades produzidas ou da carga de trabalho equivalente, nos casos aplicáveis;

- Determinação da poupança energética real (kW/h ou m<sup>3</sup> de gás) e respetiva conversão em termos económicos (€) e ambientais (redução de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente);
- Confronto dos resultados obtidos com as estimativas de poupança previstas na fase de planeamento, de forma a verificar desvios e identificar fatores que possam ter influenciado o desempenho.

A apresentação dos resultados será organizada por equipamento ou instalação intervencionado, permitindo uma leitura clara do contributo de cada medida para a redução global do consumo energético da empresa.

### **3.3.1. Sistema de ar comprimido – Arroteia**

A avaliação do impacto das intervenções realizadas no SAC da Arroteia foi conduzida de forma faseada, assegurando que cada melhoria implementada fosse analisada individualmente. Esta abordagem permite quantificar com maior precisão a poupança atribuída a cada medida, evitando que os resultados sejam distorcidos pela sobreposição de efeitos.

No SAC da Arroteia, não é possível determinar com precisão a necessidade real de AC para cada período de análise, dado que este sistema alimenta toda a unidade industrial, abrangendo um conjunto muito vasto e variado de equipamentos e processos produtivos. A procura de AC varia significativamente ao longo do tempo em função de múltiplos fatores operacionais e não existe medição direta que permita correlacionar consumo energético com volume de produção ou carga efetiva.

Ainda assim, ao comparar intervalos de tempo equivalentes e consecutivos, garante-se que as condições de operação são, com elevada probabilidade, semelhantes, permitindo que a comparação seja tecnicamente válida. Este pressuposto é reforçado pelo facto de, segundo informação interna e conhecimento generalizado na empresa, a produção atual ser superior à verificada no final de 2024, o que significa que as poupanças obtidas com as intervenções no SAC são, potencialmente, ainda mais relevantes do que os valores apresentados, dado que foram alcançadas num contexto de maior atividade produtiva.

Foram definidos três intervalos de análise, correspondentes às três principais intervenções.

#### **Redução da pressão da rede de 8 bar para 7,3 bar**

Para avaliar o impacto desta medida, procedeu-se à análise dos consumos energéticos no período imediatamente subsequente à intervenção, abrangendo as semanas 2 a 6 de 2025. As semanas 52 de 2024 e 1 de 2025 foram excluídas da análise devido à ocorrência de feriados e paragens associadas ao Natal e Ano Novo, que alterariam significativamente o perfil de consumo e comprometeriam a comparabilidade dos dados.

A análise do consumo médio diário no período entre as semanas 2 e 6 de 2025 encontra-se sintetizada na Tabela 25.

Tabela 25 - Consumo médio diário do sistema de ar comprimido da Arroteia (semanas 2 a 6 de 2025)

SAC Arroteia	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	3789.01	378.90 €	418.40 €	359.72 €
3ªf	3843.89	384.39 €	396.20 €	371.62 €
4ªf	3785.98	378.60 €	417.14 €	358.05 €
5ªf	3815.22	381.52 €	419.87 €	359.72 €
6ªf	3843.85	384.39 €	399.62 €	358.62 €
Sab	3556.22	355.62 €	369.43 €	338.14 €
Dom	3403.28	340.33 €	355.42 €	327.09 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>381.56 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>347.97 €</b>		

Observa-se que, nos dias úteis, o consumo médio variou entre aproximadamente 3.786 kW/h e 3.844 kW/h, com um custo médio diário global de 381,56 €. Aos fins de semana, os consumos foram naturalmente mais baixos, situando-se em 3.556 kW/h ao sábado e 3.479 kW/h ao domingo, correspondendo a um custo médio diário de 347.97 €.

A comparação destes valores com a análise inicial permite estimar a poupança diária obtida com a redução de pressão, apresentada na Tabela 26.

Tabela 26 - Poupança média diária estimada após a redução da pressão para 7,3 bar

Poupança Estimada - Redução da pressão para 7.3 bar	
Dias Úteis	12.79 €
Fim de Semana	5.39 €

Em média, a redução foi responsável por uma poupança de 12,79 € por dia útil e 5,39 € por dia de fim de semana. Estes resultados evidenciam que a redução de pressão teve um efeito positivo na diminuição dos consumos energéticos, com ganhos financeiros contínuos tanto em regime produtivo como em regime de *off-hours*, sendo o benefício diário mais expressivo nos dias de maior carga operacional.

O consumo energético semanal do SAC da Arroteia manteve-se relativamente estável, apresentando variações moderadas entre as diferentes semanas, à semelhança da análise inicial. A Tabela 27 apresenta os valores de consumo por equipamento agregados por semana.

Tabela 27 - Consumo semanal do SAC da Arroteia (semanas 2 a 6 de 2025)

Consumo Médio Semanal - 5 semanas (W2-W6)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
2	Compressor GA160	23154753.49	2,315.48 €
3	Compressor GA160	23279063.02	2,327.91 €
4	Compressor GA160	22630824.41	2,263.08 €
5	Compressor GA160	22882976.28	2,288.30 €
6	Compressor GA160	23108245.34	2,310.82 €
2	Compressor GA200	3412477.788	341.25 €

Tabela 27 (Cont.) – Consumo semanal do SAC da Arroteia (semana 2 a 6 de 2025)

3	Compressor GA200	2527381.999	252.74 €
4	Compressor GA200	3537280.679	353.73 €
5	Compressor GA200	3095496.96	309.55 €
6	Compressor GA200	2558767.517	255.88 €

O total agregado dos consumos semanais para o conjunto do sistema encontra-se resumido na Tabela 28, que inclui igualmente os principais indicadores energéticos, económicos e ambientais calculados para o período em análise.

Tabela 28 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do SAC da Arroteia após redução para 7,3 bar

SAC Arroteia	
Consumo total (kW/h)	130187.27
Custo total (€)	13,018.73 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	24.08
Nº semanas em análise	5
Consumo médio semanal (kW/h)	26037.45
Custo médio semanal (€)	2603.75
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kWh)	4.82
Custo estimado anual (€)	135,394.76 €

A comparação destes valores com os registados antes da intervenção permite estimar a poupança semanal e anual obtida com a redução de pressão, conforme evidenciado na Tabela 29.

Tabela 29 - Poupança estimada com a redução da pressão para 7,3 bar no SAC da Arroteia

Poupança Estimada - Redução da pressão para 7.3 bar	
Consumo Semanal (kW/h)	747.29
Semanal (€)	74.73 €
Anual (€)	3,885.89 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh Anual	7.19
Percentagem Poupança (%)	2.79%

Verifica-se uma redução média semanal de 747,29 kW/h, correspondendo a uma poupança económica de 74,73 € por semana e 3.885,89 € por ano, bem como a uma diminuição anual estimada de 7,19 t CO<sub>2</sub>e. Esta intervenção traduz-se assim numa redução percentual global de 2,79% no consumo energético do sistema.

A percentagem de poupança real obtida representa aproximadamente metade do valor previsto teoricamente na estimativa inicial (5,6%). Apesar de inferior ao previsto, o resultado confirma o efeito positivo da intervenção e demonstra que, mesmo num contexto de variação de procura de AC e de ausência de um compressor VSD, a redução da pressão constitui uma medida eficaz para diminuir o consumo energético do SAC.

**Resolução da 1ª fase de fugas**

A 1ª fase de resolução de fugas no Sistema de Ar Comprimido da Arroteia, correspondente à reparação de 42 fugas, foi concluída a 15 de fevereiro de 2025. Para avaliar o impacto da intervenção, analisaram-se os consumos médios diários no período subsequente, entre as semanas 8 e 13 de 2025, comparando-os com o período imediatamente anterior (semanas 2 a 6 de 2025, após a redução da pressão para 7,3 bar). Não foi considerada para análise a semana 14, uma vez que ocorreu uma avaria no compressor GA160, levando o compressor GA200 a operar sozinho durante a maior parte da semana, o que distorceria a representatividade dos consumos.

A Tabela 30 apresenta o consumo médio diário, o custo médio diário, bem como os valores máximos e mínimos registados para cada dia da semana.

*Tabela 30 - Consumo médio diário do sistema de ar comprimido da Arroteia (semanas 8 a 13 de 2025)*

SAC Arroteia	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	3803.93	380.39 €	405.89 €	348.43 €
3ªf	3612.31	361.23 €	386.57 €	322.88 €
4ªf	3680.08	368.01 €	406.59 €	346.69 €
5ªf	3697.38	369.74 €	382.92 €	358.92 €
6ªf	3803.30	380.33 €	405.94 €	345.46 €
Sab	3490.75	349.08 €	366.39 €	333.07 €
Dom	3268.22	326.82 €	336.18 €	312.68 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>371.94 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>337.95 €</b>		

Verifica-se que, nos dias úteis, o custo médio diário foi de 371,94 €, inferior ao registado no período anterior. Aos fins de semana, o custo médio diário situou-se nos 337,95 €. A poupança estimada obtida com esta intervenção, face ao período de referência, encontra-se sintetizada na Tabela 31.

*Tabela 31 - Poupança média diária estimada após resolução da 1ª fase de fugas*

<b>Poupança Estimada - Resolução 42 Fugas</b>	
Dias Úteis	9.62 €
Fim de Semana	10.03 €

Observa-se uma redução média diária de 9,62 € nos dias úteis e de 10,03 € nos fins de semana, evidenciando um impacto positivo tanto em regime produtivo como em *off-hours*. Os resultados demonstram que a reparação das fugas contribuiu para uma diminuição consistente dos consumos energéticos, com ganhos económicos semelhantes nos dias úteis e nos fins de semana, o que indica que o benefício da intervenção se estendeu também aos períodos de menor carga.

A Tabela 32 apresenta o consumo médio semanal por equipamento, verificando-se valores relativamente estáveis ao longo do período de observação.

Tabela 32 - Consumo semanal do SAC da Arroteia (semanas 8 a 13 de 2025)

Consumo Médio Semanal - 6 semanas (W8-W13)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
8	Compressor GA160	22398536.34	2,239.85 €
9	Compressor GA160	22617546.83	2,261.75 €
10	Compressor GA160	21715753.31	2,171.58 €
11	Compressor GA160	22415494.39	2,241.55 €
12	Compressor GA160	22562005.88	2,256.20 €
13	Compressor GA160	22882004.76	2,288.20 €
8	Compressor GA200	3082993.303	308.30 €
9	Compressor GA200	3655061.951	365.51 €
10	Compressor GA200	2256987.4	225.70 €
11	Compressor GA200	2861504.162	286.15 €
12	Compressor GA200	2755138.08	275.51 €
13	Compressor GA200	2932791.524	293.28 €

A agregação destes consumos e a sua conversão em indicadores energéticos, económicos e ambientais encontram-se resumidas na Tabela 33.

Tabela 33 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do SAC da Arroteia após resolução 1ª fase de fugas

SAC Arroteia	
Consumo total (kW/h)	152135.82
Custo total (€)	15,213.58 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	28.15
Nº semanas em análise	6
Consumo médio semanal (kW/h)	25355.97
Custo médio semanal (€)	2535.60
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	4.69
Custo estimado anual (€)	131,851.04 €

A poupança estimada decorrente desta intervenção, comparativamente ao período de referência, é apresentada na Tabela 34.

Tabela 34 - Poupança estimada com a resolução da 1ª fase de fugas no SAC da Arroteia

Poupança Estimada - Resolução 42 Fugas	
Consumo Semanal (kW/h)	681.48
Semanal (€)	68.15 €
Anual (€)	3,543.72 €
t CO <sub>2</sub> e/kW/h Anual	6.56
Poupança por Fuga (Anual)	84.37 €
Percentagem Poupança (%)	2.62%

## Desenvolvimento

Observa-se uma redução média semanal de 681,48 kW/h, o que representa uma poupança económica de 68,15 € por semana e 3.543,72 € por ano, com uma diminuição anual estimada de 6,56 t CO<sub>2</sub>e. Em termos relativos, esta redução corresponde a 2,62% do consumo energético total do sistema no período de análise.

A intervenção demonstrou ser eficaz na redução de perdas energéticas associadas a fugas de ar comprimido, apresentando benefícios económicos e ambientais mensuráveis. A poupança média anual por fuga reparada foi de 84,37 €, valor que, embora modesto individualmente, se traduz num ganho significativo quando acumulado ao longo de todo o sistema.

### **Resolução da 2ª fase de fugas**

A 2ª fase de resolução de fugas no SAC da Arroteia, correspondente à reparação de 25 fugas adicionais, foi concluída a 11 de abril de 2025. Para avaliar o impacto desta intervenção, analisaram-se os consumos médios diários no período subsequente, entre as semanas 16 e 21 de 2025, comparando-os com o período imediatamente anterior (semanas 8 a 13 de 2025, após a 1.ª fase de fugas).

A Tabela 35 apresenta o consumo médio diário, o custo médio diário, e os valores máximos e mínimos registados para cada dia da semana.

*Tabela 35 - Consumo médio diário do sistema de ar comprimido da Arroteia (semanas 16 a 21 de 2025)*

SAC Arroteia	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	3412.56	341.26 €	390.14 €	206.35 €
3ªf	3794.59	379.46 €	457.22 €	356.20 €
4ªf	3802.74	380.27 €	398.14 €	366.70 €
5ªf	3632.76	363.28 €	392.42 €	331.68 €
6ªf	3618.33	361.83 €	391.62 €	321.90 €
Sab	3447.52	344.75 €	369.94 €	317.05 €
Dom	3240.34	324.03 €	340.57 €	314.24 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>365.22 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>334.39 €</b>		

Os dias úteis registaram um custo médio diário de 365,22 €, enquanto aos fins de semana o custo médio diário foi de 334,39 €. A poupança estimada diária decorrente desta intervenção encontra-se sintetizada na Tabela 36.

*Tabela 36 - Poupança média diária estimada após resolução da 2ª fase de fugas*

<b>Poupança Diária Estimada - Resolução 25 Fugas</b>	
Dias Úteis	6.72 €
Fim de Semana	3.56 €

Observa-se uma redução média diária de 6,72 € nos dias úteis e 3,56 € nos fins de semana, o que representa um impacto menor face à 1.ª fase de fugas, mas ainda assim relevante para a diminuição contínua do consumo energético.

A Tabela 37 apresenta o consumo médio semanal por equipamento, acompanhado dos respetivos custos.

Tabela 37 - Consumo semanal do SAC da Arroteia (semanas 16 a 21 de 2025)

Consumo Médio Semanal - 6 semanas (W16-W21)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
16	Compressor GA160	21798377.36	2,179.84 €
17	Compressor GA160	22138167.86	2,213.82 €
18	Compressor GA160	20602272.29	2,060.23 €
19	Compressor GA160	22358131.76	2,235.81 €
20	Compressor GA160	22416094.96	2,241.61 €
21	Compressor GA160	22355176.31	2,235.52 €
16	Compressor GA200	3057494.352	305.75 €
17	Compressor GA200	3872961.376	387.30 €
18	Compressor GA200	2418318.906	241.83 €
19	Compressor GA200	2583402.357	258.34 €
20	Compressor GA200	3172068	317.21 €
21	Compressor GA200	2920575.94	292.06 €

A Tabela 38 apresenta os indicadores agregados para o período, evidenciando um consumo médio semanal de 24.948,84 kW/h e um custo médio semanal de 2.494,88 €, com emissões médias semanais de 4,6155 t CO<sub>2</sub>e.

Tabela 38 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do SAC da Arroteia após resolução 2ª fase de fugas

SAC Arroteia	
Consumo total (kW/h)	149693.04
Custo total (€)	14,969.30 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	27.69
Nº semanas em análise	6
Consumo médio semanal (kW/h)	24948.84
Custo médio semanal (€)	2494.88
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kWh)	4.62
Custo estimado anual (€)	129,733.97 €

A poupança estimada obtida nesta intervenção é apresentada na Tabela 39.

Tabela 39 - Poupança estimada com a resolução da 2ª fase de fugas no SAC da Arroteia

Poupança Estimada - Resolução 25 Fugas	
Consumo Semanal (kW/h)	407.13
Semanal (€)	40.71 €
Anual (€)	2,117.07 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh Anual	3.92
Poupança por Fuga (Anual)	84.68 €
Percentagem Poupança (%)	1.61%

## Desenvolvimento

Em média, foram poupados 407,13 kW/h/semana, correspondendo a uma poupança económica de 40,71 € por semana e 2.117,07 € por ano, com uma redução anual estimada de 3,92 t CO<sub>2</sub>e. Em termos relativos, esta redução corresponde a 1,61% do consumo energético total do sistema no período de análise.

A poupança média anual por fuga reparada foi de 84,68 €, valor praticamente idêntico ao registado na 1.ª fase (84,37 €), o que demonstra consistência no benefício económico obtido por cada intervenção deste tipo, independentemente do número total de fugas reparadas.

Por forma a sintetizar o impacto global das intervenções realizadas no SAC da Arroiteia, a Figura 40 apresenta a comparação entre o custo médio diário registado no período inicial (antes de qualquer intervenção) e o custo médio diário observado após a implementação de todas as medidas.

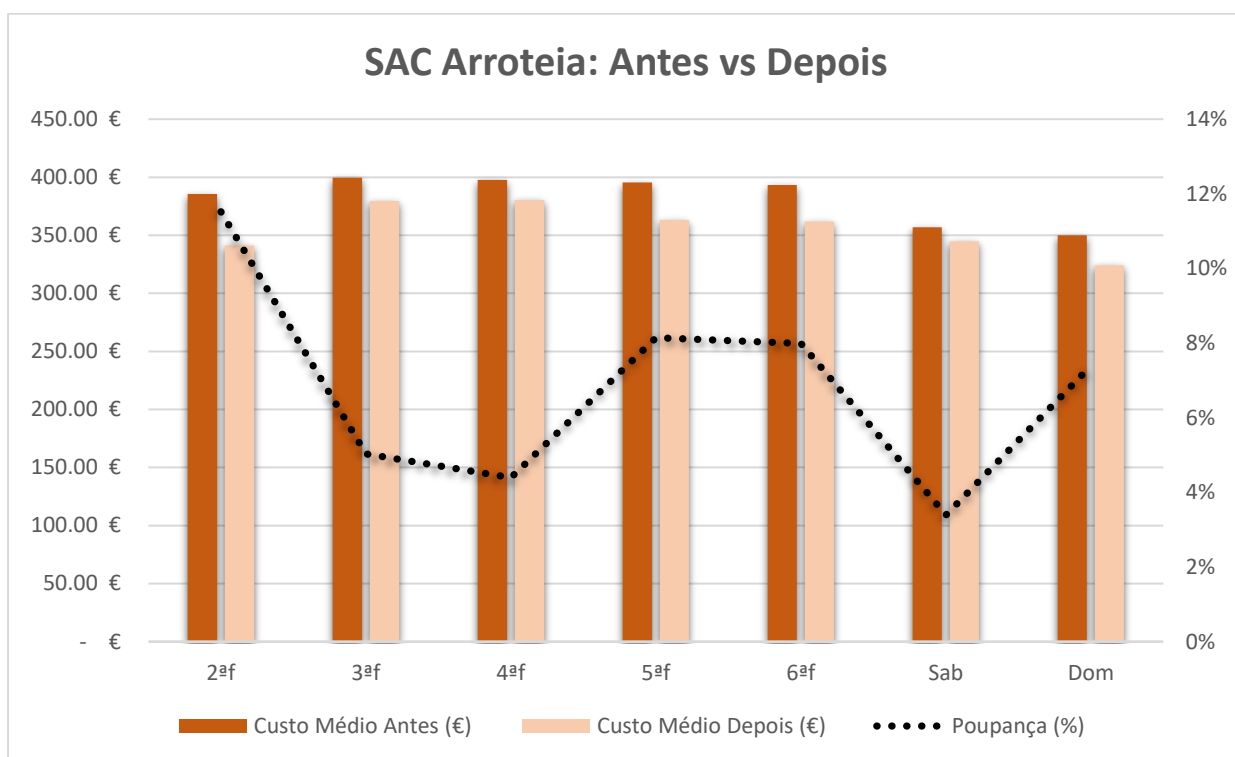


Figura 40 - Comparação do custo médio diário do SAC da Arroiteia antes e após as intervenções

De forma geral, verifica-se uma redução consistente dos custos em todos os dias da semana, com poupanças percentuais mais expressivas nas segundas-feiras (cerca de 12%) e mais moderadas aos sábados (cerca de 4%). A tendência de redução é transversal, confirmando que o efeito combinado das intervenções resultou numa diminuição sustentada do consumo energético ao longo da semana, tanto em dias úteis como ao fim de semana.

A Tabela 40 resume os resultados obtidos em termos de poupança anual de energia, custo e emissões evitadas das três intervenções.

Tabela 40 - Poupança anual das intervenções no SAC da Arroiteia

Intervenção	Poupança (kW/h/ano)	Poupança (€)	Redução (t CO <sub>2</sub> e)	Poupança (%)
Redução pressão	38.859	3,885.89 €	7.19	2,79%
1.ª fase de fugas	35.437	3,543.72 €	6.56	2,62%
2.ª fase de fugas	21.171	2,117.07 €	3.92	1,61%
<b>Total</b>	<b>95.467</b>	<b>9,546.68 €</b>	<b>17.67</b>	<b>-</b>

O impacto conjunto destas três medidas traduz-se numa poupança energética anual estimada de 95,47 MW/h, o que corresponde a uma redução de 17,67 toneladas de CO<sub>2</sub>e e a uma poupança económica anual de 9.546,68 €.

### 3.3.2. Sistema de ar comprimido – Maia

A válvula de corte temporizada foi instalada no Sistema de Ar Comprimido (SAC) da Maia a 13 de janeiro de 2025 (semana 3), com o objetivo de eliminar consumos em período de inatividade (em média 4,3 kW/h). Contudo, entre as semanas 3 e 21, verificou-se que, apesar da redução esperada, o consumo médio em *off-hours* se manteve na ordem dos 1,1 a 1,4 kW, registando-se arranques do compressor em intervalos de 20 a 30 minutos. Estes arranques indicavam a compensação de uma possível fuga interna.

Na Figura 41 é possível observar o exemplo da semana 17, onde se verifica que os consumos médios indicados no período de inatividade.

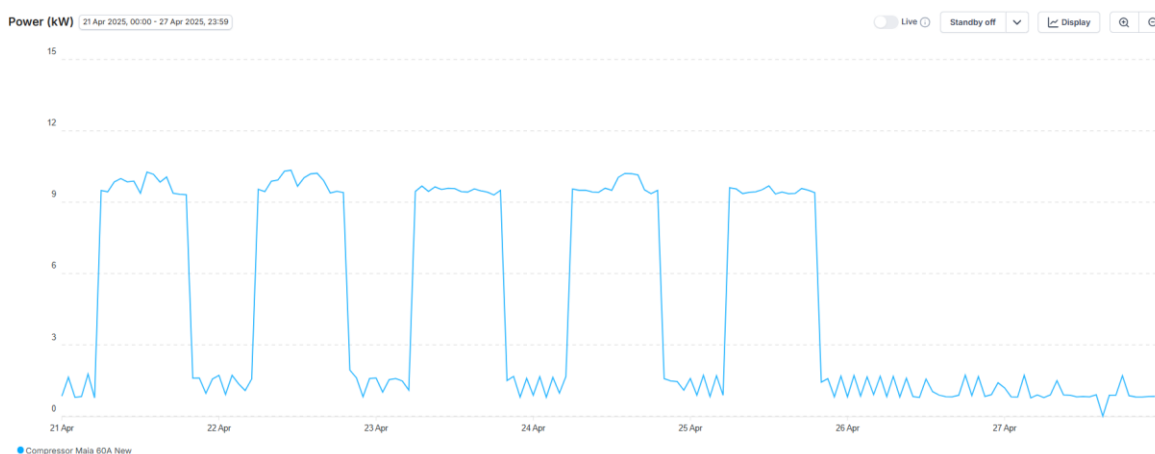


Figura 41 - Perfil semanal de consumo do compressor da Maia após a instalação da válvula de corte (semana 17 de 2025)

Apesar de não terem sido detetadas fugas durante as inspeções realizadas pelos técnicos da Efacec, admitiu-se a hipótese de se tratar de uma fuga interna num equipamento com cerca de 30 anos, não identificável por métodos convencionais.

A situação alterou-se significativamente após a manutenção preventiva realizada pelo parceiro responsável, na segunda-feira, 26 de maio de 2025, durante a qual foi reparada uma fuga interna de óleo. Embora não tenha sido fornecida explicação técnica detalhada para a relação direta com a redução de consumo, o comportamento do sistema mudou de forma clara: a média dos consumos em *off-hours*

## Desenvolvimento

reduziu-se para 0,05 a 0,1 kW, praticamente eliminando o funcionamento intermitente observado anteriormente, como é possível observar na Figura 42.

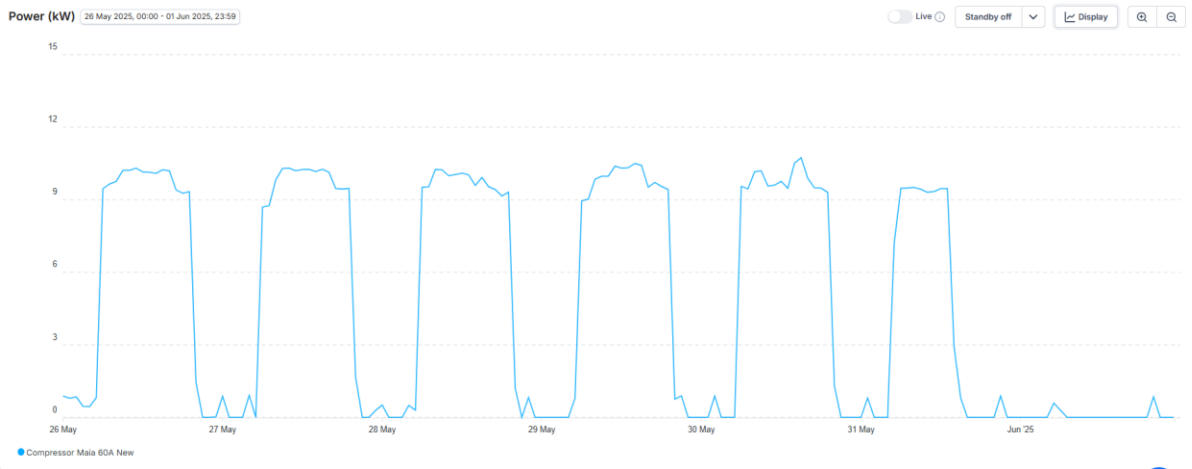


Figura 42 - Perfil semanal de consumo do compressor da Maia após reparação da fuga interna (semana 22 de 2025).

Deste momento em diante, o sistema passou a apresentar o comportamento esperado desde a instalação da válvula de corte, pelo que, para efeitos de cálculo de poupanças e comparação de resultados, foi considerado apenas o período após a manutenção preventiva como representativo do desempenho final do sistema.

À semelhança do SAC da Arroteia, também no SAC da Maia não é possível determinar com precisão a necessidade real de AC, sendo válido assumir que as condições de operação entre períodos comparados são semelhantes e que as poupanças foram alcançadas num contexto de igual ou maior atividade produtiva.

Para avaliar o impacto desta medida, procedeu-se à análise dos consumos energéticos no período imediatamente subsequente, abrangendo as semanas 22 a 28 de 2025. A Tabela 41 apresenta os consumos médios diários e respetivos custos, para dias úteis e fins de semana, no período analisado.

Tabela 41 - Consumo médio diário do sistema de ar comprimido da Maia (semanas 22 a 28 de 2025)

SAC Maia	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	143.22	14.32 €	15.86 €	13.69 €
3ªf	140.61	14.06 €	14.80 €	13.44 €
4ªf	142.35	14.23 €	15.05 €	13.50 €
5ªf	141.29	14.13 €	14.77 €	13.82 €
6ªf	142.03	14.20 €	14.99 €	13.64 €
Sab	76.78	7.68 €	10.91 €	5.10 €
Dom	2.74	0.27 €	0.44 €	0.17 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>14.19 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>3.98 €</b>		

Os consumos diários do compressor da Maia estabilizaram em valores bastante homogéneos durante os dias úteis, variando entre 140,61 kW/h e 143,22 kW/h, com custos diários entre 14,06 € e

14,32 €. Aos sábados, o consumo médio foi de 76,78 kW/h (7,68 €), refletindo a redução da operação fora do horário produtivo, enquanto aos domingos o consumo médio foi residual (2,74 kW/h, 0,27 €).

Para ilustrar o impacto global da intervenção no SAC da Maia, a Figura 43 compara o custo médio diário registado antes da instalação da válvula de corte com o observado após a intervenção.

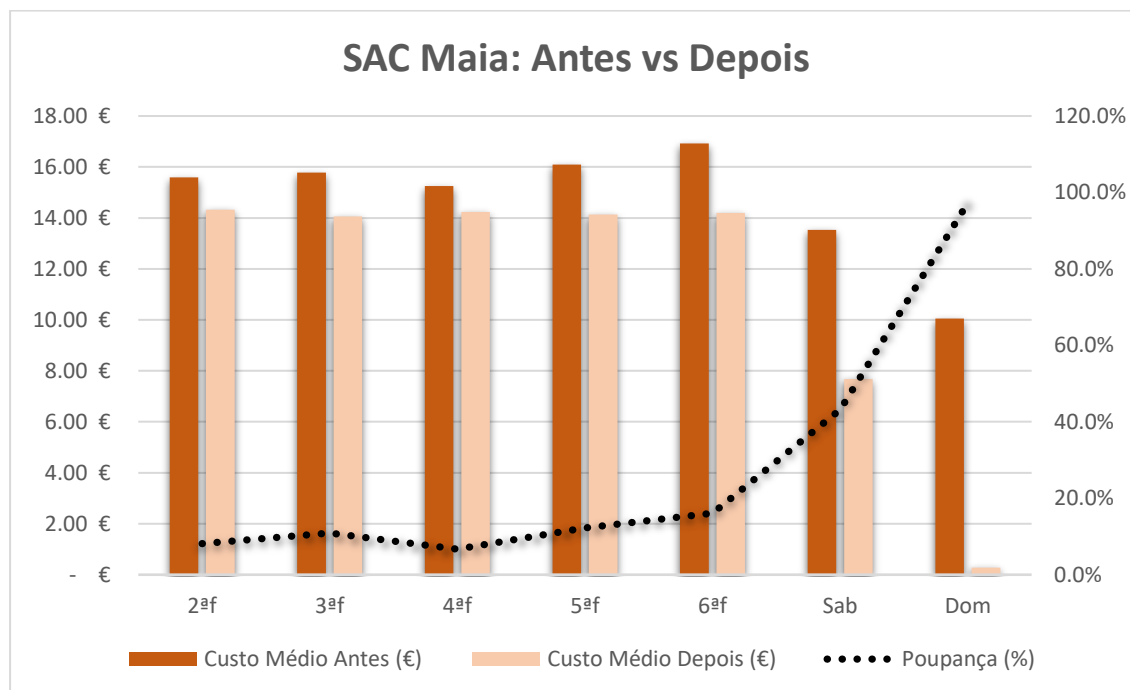


Figura 43 - Comparação do custo médio diário do SAC da Maia antes e após a intervenção

Verifica-se uma redução moderada nos dias úteis, com poupanças percentuais na ordem dos 10% a 15%, mas extremamente significativa ao fim de semana, especialmente aos domingos, onde o consumo foi praticamente eliminado (poupança próxima de 100%).

A Tabela 42 apresenta a poupança diária estimada obtida neste novo cenário em comparação com a situação inicial, anterior à instalação da válvula de corte.

Tabela 42 - Poupança média diária estimada após instalação da válvula de corte

Poupança Diária - Instalação Válvula de Corte	
Dias Úteis	1.74 €
Fim de Semana	7.81 €

A redução média foi de 1,74 € por dia útil e de 7,81 € por dia de fim de semana, sendo este último valor particularmente expressivo devido à eliminação quase total dos consumos em *off-hours*.

A Tabela 43 apresenta os valores de consumo do SAC agregados por semana.

Tabela 43 - Consumo semanal do SAC da Maia (semanas 22 a 28 de 2025)

Consumo Médio Semanal - 7 semanas (W22-W28)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
22	Compressor Maia	795033.0742	79.50 €
23	Compressor Maia	740460.9764	74.05 €
24	Compressor Maia	775849.4361	77.58 €
25	Compressor Maia	760691.4304	76.07 €
26	Compressor Maia	766972.3273	76.70 €
27	Compressor Maia	834012.8118	83.40 €
28	Compressor Maia	850071.9583	85.01 €

A Tabela 44 apresenta o consumo total e os principais indicadores médios semanais para o período em análise.

Tabela 44 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do SAC da Maia após instalação da válvula de corte

SAC Maia	
Consumo total (kW/h)	5523.09
Custo total (€)	552.31 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	1.02
Nº semanas em análise	7
Consumo médio semanal (kW/h)	789.01
Custo médio semanal (€)	78.90 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	0.15
Custo estimado anual (€)	4,102.87 €

O consumo médio semanal foi de 789,01 kW/h, correspondendo a um custo médio semanal de 78,90 € e emissões médias semanais de 0,15 t CO<sub>2</sub>e. Extrapolando este valor para um ano (52 semanas), obtém-se um custo estimado anual de 4.102,87 €.

A Tabela 45 apresenta a poupança estimada associada à instalação da válvula de corte, calculada comparando os resultados obtidos com o cenário inicial (antes da instalação da válvula).

Tabela 45 - Poupança estimada com a instalação da válvula de corte no SAC da Maia

Poupança Estimada - Instalação Válvula de Corte	
Consumo Semanal (kW/h)	243.27
Semanal (€)	24.33 €
Anual (€)	1,264.99 €
t CO <sub>2</sub> e/kW/h Anual	2.3
Percentagem Poupança (%)	23.57%

Observa-se uma redução média de 243,27 kW/h por semana, equivalente a 24,33 € semanais ou 1.264,99 € anuais, representando uma poupança de 23,57% no consumo energético.

Face à estimativa inicial de 2.191,28 € anuais em *off-hours* (41% do custo total), a poupança real obtida é inferior ao previsto, justificada pela ocorrência recorrente de trabalho ao sábado e pela presença inevitável de consumos residuais.

Este resultado confirma que, após a reparação da fuga interna e a estabilização do funcionamento, a válvula de corte cumpriu o objetivo previsto, contribuindo de forma significativa para a diminuição dos consumos energéticos em *off-hours* no SAC da Maia.

### 3.3.3. Unidade de Despoeiramento – Core

A intervenção no despoeiramento do Core decorreu entre os dias 12 e 13 de dezembro de 2024 (semana 50), onde a análise pós-intervenção abrangeu um período de 24 semanas, compreendido entre as semanas 2 e 25 de 2025, iniciando-se na semana 2 devido à paragem quase total do sistema nas semanas 51, 52 e 1.

Tal como nos casos do SAC's, não é possível determinar com exatidão a carga real ou a necessidade de operação do sistema para cada intervalo de análise, uma vez que o despoeiramento serve um conjunto alargado e diversificado de equipamentos da zona dos isolantes. Contudo, ao comparar períodos consecutivos e equivalentes, é possível assumir que as condições operacionais se mantêm semelhantes, garantindo a validade técnica da comparação. Este pressuposto é ainda reforçado pelo conhecimento interno e pelo sentido geral na empresa de que, no período em análise, o nível de atividade e produção foi, no mínimo, igual e, na maioria das vezes, superior ao registado antes da intervenção, o que torna as poupanças obtidas ainda mais relevantes.

A análise diária do Despoeiramento Core para o período pós-intervenção (semanas 2 a 25) encontra-se sumarizada na Tabela 46, onde se apresentam os consumos e custos médios por dia.

Tabela 46 - Consumo médio diário na unidade de Despoeiramento do Core (semanas 2 a 25 de 2025)

Despoeiramento Core	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	406.51	40.65 €	55.55 €	15.38 €
3ªf	403.22	40.32 €	64.15 €	- €
4ªf	443.42	44.34 €	63.88 €	32.61 €
5ªf	403.63	40.36 €	65.20 €	- €
6ªf	406.06	40.61 €	62.52 €	- €
Sab	127.12	12.71 €	36.31 €	- €
Dom	96.43	9.64 €	27.41 €	- €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>41.26 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>11.18 €</b>		

O impacto desta melhoria é representado graficamente na Figura 44, onde se observa que, no cenário pós-intervenção, os valores de custo médio diário são consistentemente inferiores aos registados antes da intervenção, evidenciando a redução efetiva dos consumos.

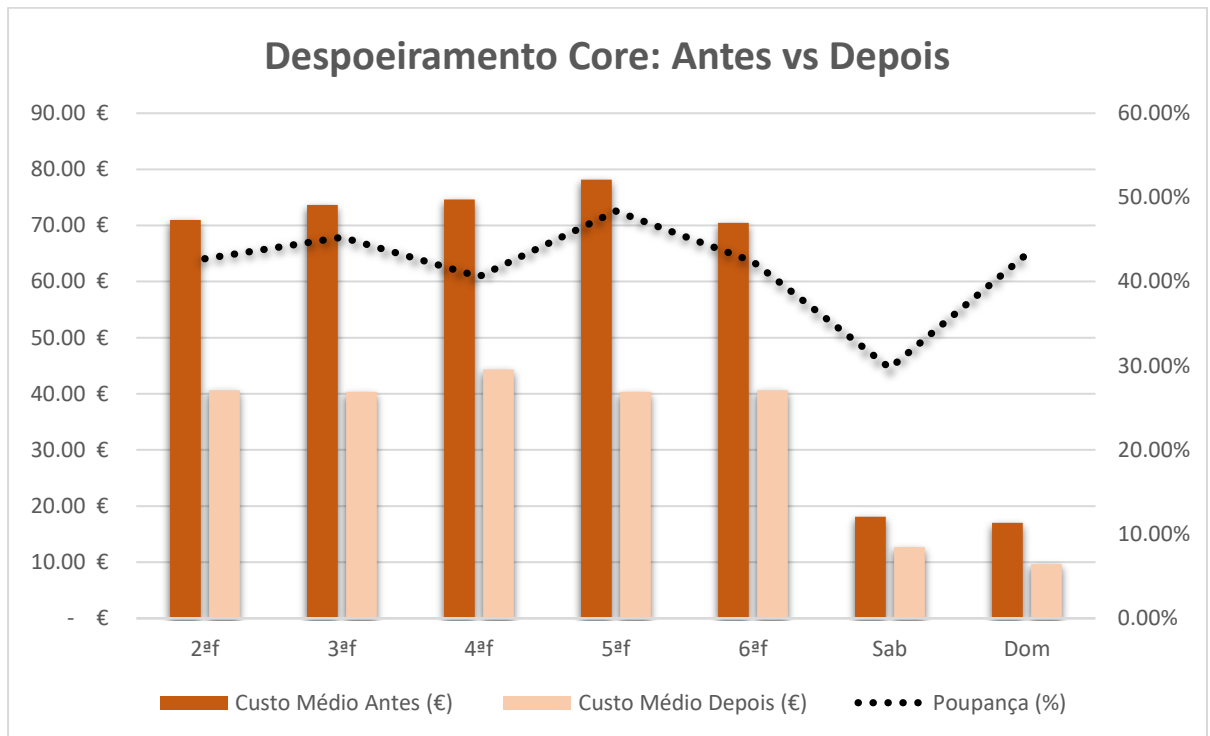


Figura 44 - Comparação do custo médio diário do Despoeiramento do Core antes e após a intervenção

A linha de tendência ilustra percentagens de poupança que oscilam entre 45% e 50% nos dias úteis, e que, embora mais baixas aos fins de semana, continuam a representar ganhos energéticos e financeiros significativos. Observa-se uma redução consistente em todos os dias da semana, traduzida numa poupança média diária de 32,33 € em dias úteis e 6,37 € ao fim de semana, conforme a Tabela 47.

Tabela 47 - Poupança média diária estimada após instalação do sistema de controlo no Despoeiramento Core

Poupança Diária - Sistema de Controlo	
Dias Úteis	32.33 €
Fim de Semana	6.37 €

Ao longo das 24 semanas analisadas o consumo semanal do despoeiramento do Core apresentou variações significativas, como se observa na Tabela 48.

Tabela 48 - Consumo semanal da unidade de Despoeiramento do Core (semanas 2 a 25 de 2025)

Consumo Médio Semanal - 24 semanas (2-25)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
2	Despoeiramento Core	2437756.176	243.78 €
3	Despoeiramento Core	2887404.202	288.74 €
4	Despoeiramento Core	2388355.071	238.84 €
5	Despoeiramento Core	2216819.526	221.68 €
6	Despoeiramento Core	2208480.611	220.85 €
7	Despoeiramento Core	2479442.486	247.94 €
8	Despoeiramento Core	2014897.496	201.49 €
9	Despoeiramento Core	1961149.083	196.11 €

Tabela 48 (Cont.) – Consumo semanal da unidade de Despoeiramento do Core (semanas 2 a 25 de 2025)

10	Despoeiramento Core	1810992.407	181.10 €
11	Despoeiramento Core	1958849.053	195.88 €
12	Despoeiramento Core	2625647.787	262.56 €
13	Despoeiramento Core	2562738.592	256.27 €
14	Despoeiramento Core	1802204.141	180.22 €
15	Despoeiramento Core	1921506.344	192.15 €
16	Despoeiramento Core	1831040.703	183.10 €
17	Despoeiramento Core	1745907.897	174.59 €
18	Despoeiramento Core	1551358.352	155.14 €
19	Despoeiramento Core	2292581.512	229.26 €
20	Despoeiramento Core	2175084.349	217.51 €
21	Despoeiramento Core	3623531.964	362.35 €
22	Despoeiramento Core	2751264.262	275.13 €
23	Despoeiramento Core	2943088.397	294.31 €
24	Despoeiramento Core	2362452.381	236.25 €
25	Despoeiramento Core	2320751.284	232.08 €

Durante este período, registaram-se consumos semanais entre 1 551,36 kW/h e 3 623,53 kW/h, correspondendo a custos entre 155,14 € e 362,35 €, evidenciando variações relacionadas com a carga de trabalho e tempo de operação do sistema.

De forma agregada, a Tabela 49 mostra que, neste período, o sistema registou um consumo médio semanal de 2 286,39 kW/h, equivalente a 228,64 €, totalizando 54 873,30 kWh e 10,15 t CO<sub>2</sub>e.

Tabela 49 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do Despoeiramento Core após instalação do sistema de controlo

Despoeiramento Core	
Consumo total (kW/h)	54873.30
Custo total (€)	5,487.33 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	10.15
Nº semanas em análise	24
Consumo médio semanal (kW/h)	2286.39
Custo médio semanal (€)	228.64 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kWh)	0.42
Custo estimado anual (€)	10,974.66 €

A projecção anual, considerando este desempenho durante 48 semanas, aponta para um custo de cerca de 10 974,66 €. Na Tabela 50 é quantificado o impacto direto da melhoria, calculada comparando os resultados obtidos com o cenário inicial

Tabela 50 - Poupança estimada com a instalação do sistema de controlo na unidade de Despoeiramento do Core

Poupança Estimada - Sistema de Controlo	
Consumo Semanal (kW/h)	1743.80
Semanal (€)	174.38 €
Anual (€)	8,370.23 €
t CO <sub>2</sub> e/kW/h Anual	15.5
Percentagem Poupança (%)	43.27%

Face à estimativa inicial de poupança total de 7.737,96 €/ano (40%), baseada num custo anual de referência de 19 344,89 €, o valor apurado na análise real após a intervenção no despoeiramento do Core, revela um desempenho ligeiramente superior ao previsto de 8.370,23 €/ano, correspondendo a 43,27%,

Isto significa que a redução efetiva de custos foi cerca de 632 € acima do estimado. Embora a diferença seja relativamente modesta, confirma a precisão das estimativas iniciais e demonstra que o sistema de controlo respondeu de forma consistente às condições reais de operação. Este alinhamento entre previsão e resultados reforça a confiança na eficácia da intervenção e garante que o retorno do investimento ocorrerá dentro do horizonte temporal previsto, ou até ligeiramente antes.

### 3.3.4. Unidade de Despoeiramento – Shell

A intervenção no sistema de despoeiramento do Shell foi concluída a 12 de março de 2025 (semana 11) e para avaliar o impacto desta melhoria, foi analisado o período compreendido entre as semanas 12 e 27 de 2025, totalizando 16 semanas de funcionamento pós-intervenção.

Tal como no caso do sistema do Core, este equipamento serve uma área extensa da secção de isolantes, que integra várias máquinas com diferentes perfis de utilização, pelo que não existe monitorização que permita associar diretamente os consumos energéticos à carga produtiva ou ao número de horas de operação.

Ainda assim, ao comparar períodos consecutivos e equivalentes, é possível assumir que as condições operacionais se mantêm semelhantes, assegurando a validade técnica da comparação. Este pressuposto é igualmente reforçado pelo conhecimento generalizado na unidade de que o volume de trabalho no período pós-intervenção não foi inferior ao registado anteriormente.

A Tabela 51 apresenta o consumo médio diário do Despoeiramento Shell ao longo dos diferentes dias da semana no período pós-intervenção, evidenciando um custo médio diário de 13,69 € nos dias úteis e 5,74 € aos fins de semana.

Tabela 51 - Consumo médio diário na unidade de Despoeiramento do Shell (semanas 12 a 27 de 2025)

Despoeiramento Shell	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2 <sup>af</sup>	132.05	13.21 €	17.48 €	4.49 €
3 <sup>af</sup>	128.47	12.85 €	19.31 €	0.35 €
4 <sup>af</sup>	148.52	14.85 €	17.85 €	9.90 €
5 <sup>af</sup>	133.44	13.34 €	18.01 €	0.33 €

Tabela 51 (Cont.) – Consumo médio diário na unidade de Despoeiramento do Shell (semanas 12 a 27 de 2025)

6ªf	142.20	14.22 €	21.53 €	5.74 €
Sab	75.14	7.51 €	13.88 €	0.33 €
Dom	39.58	3.96 €	10.60 €	0.30 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>13.69 €</b>		
<b>Custo Médio Fim-de-Semana</b>		<b>5.74 €</b>		

O efeito da intervenção é semelhante ao verificado no Despoeiramento do Core, apresentando reduções significativas do custo médio diário em todos os dias da semana, conforme representado na Figura 45.

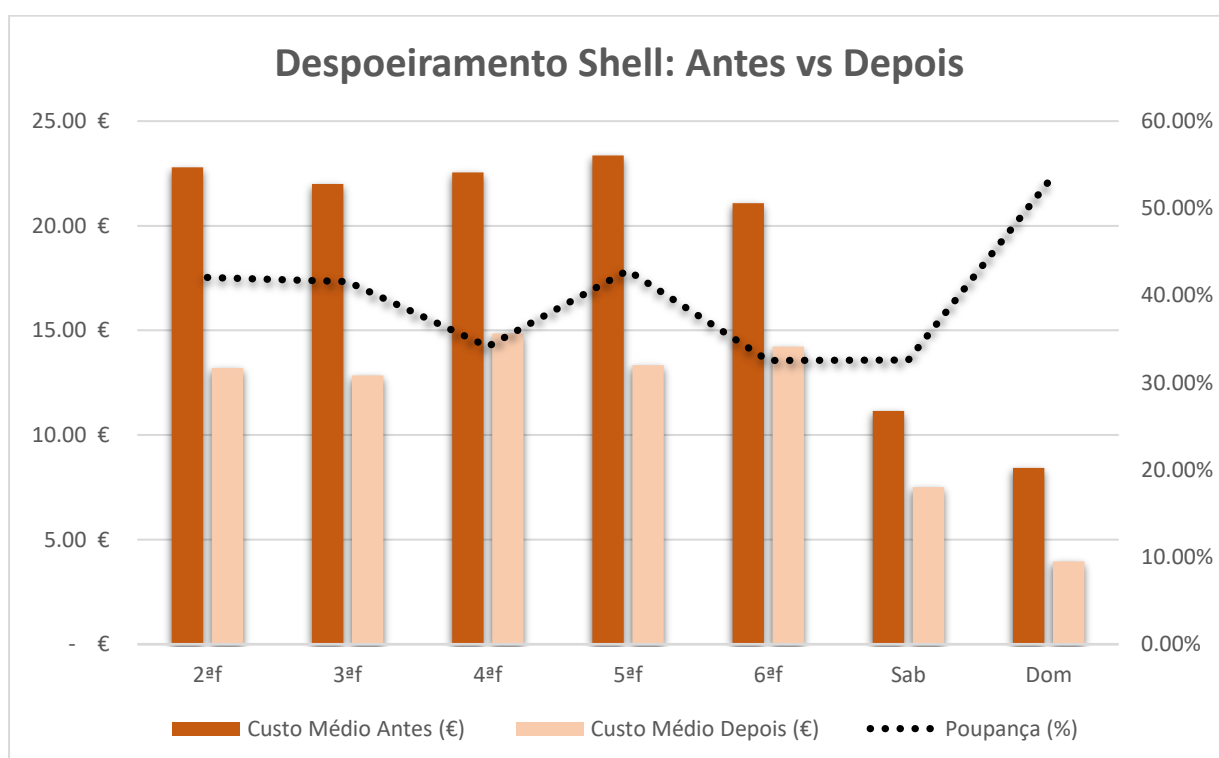


Figura 45 - Comparação do custo médio diário do Despoeiramento do Shell antes e após a intervenção

Nos dias úteis, a diminuição situa-se maioritariamente na ordem dos 35% a 45%, inclusive sábado, enquanto ao domingo atinge valores próximos dos 50%. A maior diferença registada ao domingo não indica, necessariamente, uma poupança proporcionalmente superior, mas sim que, na amostra inicial, houve maior número de horas de funcionamento nesse dia.

A Tabela 52 apresenta a poupança média diária obtida após a intervenção, com reduções de 8,66 € nos dias úteis e 4,05 € ao fim de semana.

Tabela 52 - Poupança média diária estimada após instalação do sistema de controlo no Despoeiramento Shell

Poupança Diária Estimada - Sistema de Controlo		
Dias Úteis	€	8.66
Fim de Semana	€	4.05

## Desenvolvimento

A Tabela 53 apresenta o consumo médio semanal do Despoeiramento Shell ao longo das 16 semanas de análise (semanas 12 a 27), revelando valores que variam entre 47,29 € e 109,32 €.

Tabela 53 - Consumo semanal da unidade de Despoeiramento do Shell (semanas 22 a 27 de 2025)

Consumo Médio Semanal - 16 semanas (W12-W27)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
12	Despoeiramento Shell	638850.1542	63.89 €
13	Despoeiramento Shell	656762.3819	65.68 €
14	Despoeiramento Shell	745166.2124	74.52 €
15	Despoeiramento Shell	841003.7205	84.10 €
16	Despoeiramento Shell	968173.1302	96.82 €
17	Despoeiramento Shell	784062.203	78.41 €
18	Despoeiramento Shell	472903.7787	47.29 €
19	Despoeiramento Shell	895616.0976	89.56 €
20	Despoeiramento Shell	792166.2107	79.22 €
21	Despoeiramento Shell	1026366.999	102.64 €
22	Despoeiramento Shell	916183.1859	91.62 €
23	Despoeiramento Shell	1093218.421	109.32 €
24	Despoeiramento Shell	639799.7243	63.98 €
25	Despoeiramento Shell	703258.6351	70.33 €
26	Despoeiramento Shell	690493.1181	69.05 €
27	Despoeiramento Shell	926333.9496	92.63 €

De acordo com a Tabela 54, o consumo médio semanal situou-se em 799,40 kW/h, correspondendo a um custo médio de 79,94 €/semana, o que projeta um custo operacional anual de cerca de 3.837,11 €, tendo em consideração um ano com 48 semanas produtivas.

Tabela 54 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do Despoeiramento Shell após instalação do sistema de controlo

Despoeiramento Shell	
Consumo total (kW/h)	12790.36
Custo total (€)	1,279.04 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	2.37
Nº semanas em análise	16
Consumo médio semanal (kW/h)	799.40
Custo médio semanal (€)	79.94 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	0.15
Custo estimado anual (€)	3,837.11 €

Já a Tabela 55 apresenta a poupança estimada resultante da implementação do sistema de controlo no Despoeiramento Shell, correspondendo a 514,14 kW/h por semana, o que equivale a 51,41 €/semana.

Tabela 55 - Poupança estimada com a instalação do sistema de controlo na unidade de Despoeiramento do Shell

Poupança Estimada - Sistema de Controlo	
Consumo Semanal (kW/h)	514.14
Semanal (€)	51.41 €
Anual (€)	2,467.88 €
t CO <sub>2</sub> e/kW/h/ano	4.6
Percentagem Poupança (%)	39.14%

A estimativa inicial, baseada na amostra pré-intervenção, apontava para um potencial de poupança de cerca de 30% (1.891 €/ano) relativamente a um custo anual projetado de 6.304,99 €. No entanto, os dados reais de consumo após a instalação do sistema de controlo demonstram uma redução mais expressiva, com uma poupança efetiva de 2.467,88 €/ano, equivalente a 39,14%. Esta diferença positiva, ainda que moderada (+576,88 € face ao previsto), evidencia que o sistema se adapta eficazmente às condições reais de operação, permitindo superar as estimativas teóricas. Assim, confirma-se não só a validade da previsão inicial, mas também a robustez da solução implementada, que garante maior eficiência energética e acelera o retorno do investimento.

### 3.3.5. Cabine de Pintura PT

As intervenções na Cabine PT foram realizadas no fim de semana da semana 2 de 2025, mais precisamente nos dias 11 e 12 de janeiro.

A análise do impacto foi separada por intervenções e tipologia de consumo (gás e eletricidade), definindo-se janelas temporais distintas para cada caso, de forma a garantir comparabilidade técnica e minimizar a influência de fatores externos, como variações de temperatura ambiente ou alterações significativas de carga produtiva.

#### Alteração do método de queima

No caso do consumo de gás, foi dada especial atenção à influência das condições meteorológicas, dado que a temperatura ambiente condiciona diretamente a quantidade de energia necessária para atingir o *setpoint* de 40º C. Assim, a amostra pós-intervenção foi definida entre as semanas 3 e 13 de 2025 (11 semanas consecutivas), excluindo semanas posteriores para evitar que a análise fosse contaminada por temperaturas mais elevadas da primavera e verão, que tendem a reduzir naturalmente as necessidades de aquecimento.

A evolução térmica, apresentada no Anexo F, confirma que as condições de novembro a março se mantiveram próximas (Spark, 2025):

- novembro: máximas 15–18 °C; mínimas 8–11 °C
- dezembro: máximas 14–15 °C; mínimas 6–8 °C
- janeiro: máximas 13–14 °C; mínimas 6 °C
- fevereiro: máximas 14–15 °C; mínimas 6–7 °C
- março: máximas 15–17 °C; mínimas 7–9 °C

## Desenvolvimento

No que respeita à carga produtiva, foi também avaliada a média de projetos concluídos por semana, que se situou em 6,71 no período anterior à intervenção e em 6,64 no período posterior. Esta proximidade reforça a coerência da amostra, garantindo que eventuais diferenças de consumo não se devem a variações relevantes no volume de trabalho.

Importa salientar que, apesar de não existir registo exato do número de horas efetivas de funcionamento da cabine em modo estufa, esta análise cruzada (temperatura + carga produtiva) permite uma aproximação robusta à realidade operacional.

A Tabela 56 apresenta os consumos e custos médios diários de gás na Cabine do PT após a implementação da queima direta.

*Tabela 56 - Consumo médio diário de gás natural na Cabine de Pintura PT (semanas 3 a 13 de 2025)*

Cabine PT	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	645.49	45.18 €	76.52 €	- €
3ªf	828.12	57.97 €	91.55 €	- €
4ªf	768.20	53.77 €	87.79 €	27.03 €
5ªf	891.02	62.37 €	116.46 €	17.89 €
6ªf	691.52	48.41 €	69.83 €	23.85 €
Sab	641.56	44.91 €	137.45 €	- €
Dom	518.21	36.27 €	103.72 €	- €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>53.54 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>40.59 €</b>		

Verifica-se que, nos dias úteis, o custo médio diário se situou em 53,54 €, associado a consumos na ordem dos 645 a 891 kW/h/dia, enquanto ao fim de semana este valor foi inferior, atingindo 40,59 €, com consumos entre 518 e 642 kW/h/dia. Esta diferença reflete a menor utilização da cabine durante o sábado e domingo, ainda que, pontualmente, possam ocorrer valores elevados, como evidenciado nos máximos diários registados.

A Figura 46, que compara os valores médios antes e depois da intervenção, mostra uma redução consistente dos custos na maioria dos dias da semana, sendo o efeito mais visível nos dias úteis.

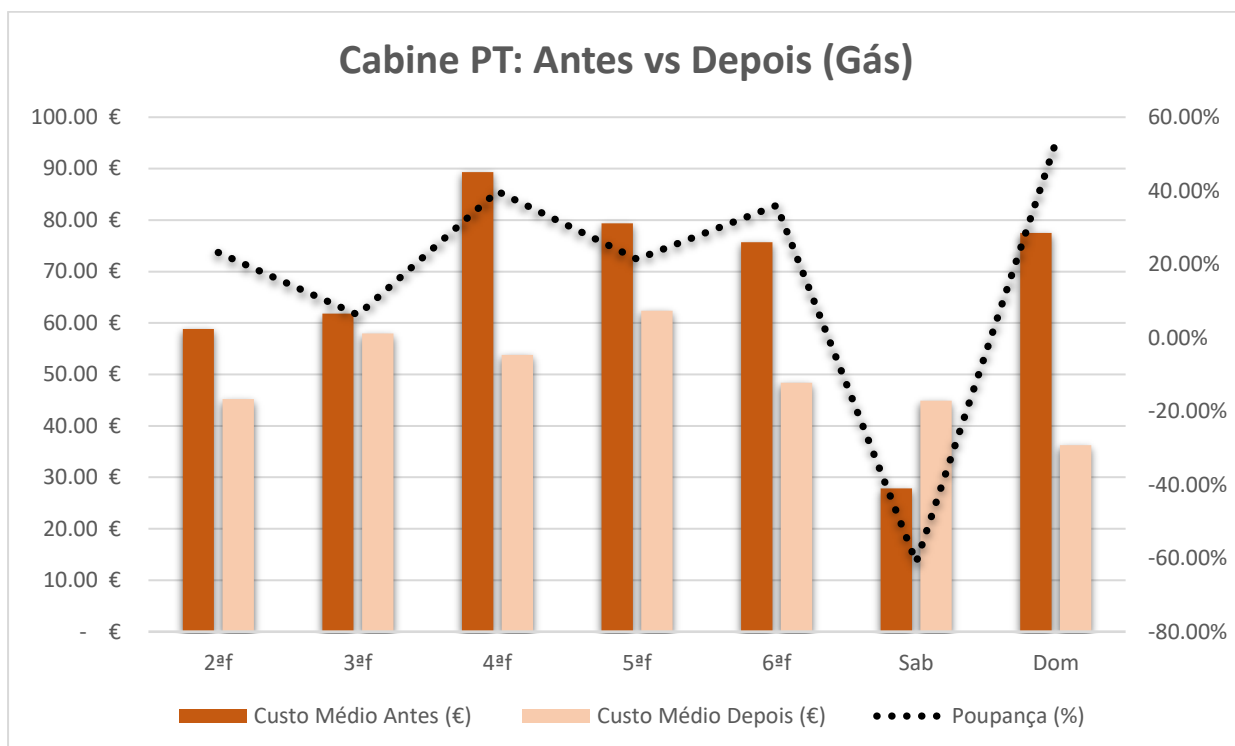


Figura 46 - Comparação do custo médio diário da Cabine de Pintura PT antes e após a alteração do método de queima

No entanto, no sábado observa-se um impacto percentual negativo e ainda considerável, o que indica um aumento de custos face à situação anterior. Este comportamento poderá estar associado a variações pontuais na carga produtiva ou à utilização mais regular da cabine neste dia em 2025, não refletindo a tendência global de redução verificada no restante período de análise.

A Tabela 57 sintetiza a poupança média diária obtida, estimando-se uma redução de 19,47 €/dia nos dias úteis e 12,08 €/dia ao fim de semana.

Tabela 57 - Poupança média diária estimada após alteração do método de queima na Cabine de Pintura PT

Poupança Diária - Queima Direta	
Dias Úteis	19.47 €
Fim de Semana	12.08 €

A Tabela 58 apresenta os consumos semanais da Cabine do PT no período pós-intervenção (semanas 3 a 13), evidenciando uma variação entre 2,73 MW/h (semana 8) e 8,11 MW/h (semana 3).

Tabela 58 - Consumo semanal de gás natural da Cabine de Pintura PT (semanas 3 a 13 de 2025)

Consumo Semanal - 11 semanas (W3-W13)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
3	Cabine PT	8114173.176	567.99 €
4	Cabine PT	7283505.843	509.85 €
5	Cabine PT	7509839.358	525.69 €
6	Cabine PT	5070337.401	354.92 €
7	Cabine PT	3939836.494	275.79 €

## Desenvolvimento

Tabela 58 (Cont.) – Consumo semanal de gás natural da Cabine de Pintura PT (semanas 3 a 13 de 2025)

8	Cabine PT	2735835.528	191.51 €
9	Cabine PT	3458002.774	242.06 €
10	Cabine PT	3433502.754	240.35 €
11	Cabine PT	4708670.444	329.61 €
12	Cabine PT	4377336.845	306.41 €
13	Cabine PT	4194170.031	293.59 €

Esta oscilação está diretamente relacionada com o número de projetos processados em cada semana, que variou entre 3 e 11, refletindo a dependência do consumo de gás face à carga de trabalho da cabine.

De forma agregada, os resultados são sintetizados na Tabela 59, onde se observa um consumo médio semanal de 4.984 kW/h, correspondente a um custo médio de 348,89 € e emissões médias de 0,92 t CO<sub>2</sub>e/semana.

Tabela 59 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Cabine PT após alteração do método de queima

<b>Cabine PT (Gás)</b>	
Consumo total (kW/h)	54825.21
Custo total (€)	3,837.76 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	10.14
Nº semanas em análise	11
Consumo médio semanal (kW/h)	4984.11
Custo médio semanal (€)	348.89 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	0.92
Custo estimado anual (€)	16,746.61 €

A extrapolação destes valores para um ano conduz a um custo estimado de 16.746,61 €, compatível com a dimensão e intensidade de utilização deste equipamento.

A poupança obtida pela alteração do método de queima é apresentada na Tabela 60, traduzindo-se numa redução média semanal de 1.735,73 kW/h, o que equivale a 121,50 €/semana.

Tabela 60 - Poupança estimada com alteração do método de queima na Cabine de Pintura PT

<b>Poupança Estimada - Queima Direta</b>	
Consumo Semanal (kW/h)	1735.73
Semanal (€)	121.50 €
Anual (€)	5,832.05 €
t CO <sub>2</sub> e/kW/h/ano	15.4
Percentagem Poupança (%)	25.83%

Tal como referido na estimativa inicial, a alteração para queima direta previa uma poupança de 30% segundo o fornecedor, equivalente a cerca de 6.773,60 €/ano. Os resultados reais da análise mostram uma poupança de 5.832,05 €/ano, correspondente a 25,83%, ou seja, cerca de 941,55 € abaixo

do valor estimado. Apesar de a redução obtida ter sido ligeiramente inferior à expectativa inicial, esta enquadra-se no intervalo de 20 a 30% referido pela bibliografia, confirmando a fiabilidade da medida e garantindo, ainda assim, um *payback* inferior a 1,1 anos.

### **Iluminação LED**

Ao contrário do sistema de aquecimento a gás, cuja análise requer o controlo das condições de temperatura ambiente, no caso da iluminação o impacto das variáveis externas é irrelevante. Assim, o período de análise pôde ser alargado, permitindo recolher uma amostra mais extensa e representativa do comportamento da instalação antes e depois da intervenção.

Para o período pós-intervenção, foi definida a janela entre as semanas 3 e 26 de 2025, garantindo um número robusto de semanas para análise do novo regime de iluminação em funcionamento.

De forma a validar a comparabilidade entre os dois períodos, foi também analisada a carga de trabalho através do número médio de projetos processados. Os resultados mostram uma média de 6,37 projetos/semana antes da intervenção e de 6,25 projetos/semana depois, o que demonstra que as condições de produção se mantiveram estáveis e que as poupanças observadas podem ser atribuídas com segurança à substituição da iluminação.

A Tabela 61 apresenta os consumos médios diários de eletricidade na Cabine do PT após a substituição das lâmpadas fluorescentes por LED.

*Tabela 61 - Consumo médio diário de eletricidade na Cabine de Pintura PT (semanas 3 a 26 de 2025)*

<b>Cabine PT</b>	<b>Consumo Médio (kW/h)</b>	<b>Custo Médio (€)</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
2ªf	318.99	31.90 €	53.73 €	0.05 €
3ªf	294.38	29.44 €	43.57 €	33.14 €
4ªf	320.37	32.04 €	42.47 €	23.23 €
5ªf	335.29	33.53 €	43.71 €	24.30 €
6ªf	328.18	32.82 €	48.60 €	30.95 €
Sab	179.32	17.93 €	37.84 €	6.70 €
Dom	131.92	13.19 €	39.71 €	1.79 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>31.94 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>15.56 €</b>		

Nos dias úteis, o custo médio diário situou-se em 31,94 €, com consumos entre 294 e 335 kW/h/dia, enquanto ao fim de semana os valores foram naturalmente inferiores, com média de 15,56 € e consumos entre 132 e 179 kW/h/dia. A Figura 47 compara os custos médios antes e depois da intervenção, mostrando uma redução sistemática em praticamente todos os dias da semana.

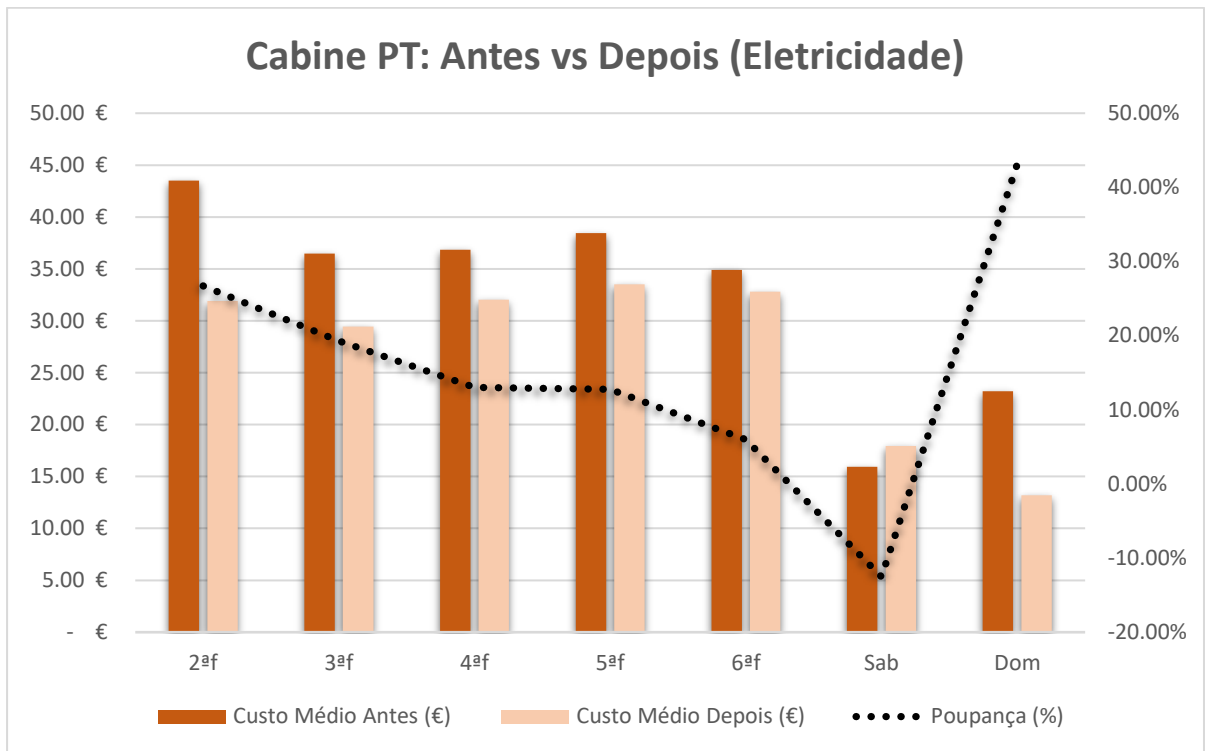


Figura 47 - Comparação do custo médio diário da Cabine de Pintura PT antes e após a instalação de iluminação LED

Contudo, ao sábado, verifica-se uma poupança percentual negativa, ou seja, um aumento face à situação inicial. Este comportamento também identificado na análise ao consumo de gás, reflete uma maior utilização da cabine neste dia específico. Ainda assim, nos restantes dias úteis a poupança relativa é consistente, situando-se geralmente entre 15% e 30%.

A Tabela 62 resume a poupança média diária obtida, que corresponde a 6,09 € por dia útil e 4,01 € ao fim de semana.

Tabela 62 - Poupança média diária estimada após instalação de iluminação LED na Cabine de Pintura PT

Poupança Diária - Iluminação LED	
Dias Úteis	6.09 €
Fim de Semana	4.01 €

A Tabela 63 apresenta os consumos semanais de eletricidade da Cabine do PT no período pós-intervenção (semanas 3 a 26), variando entre 1,18 MW/h (semana 26) e 2,67 MW/h (semana 3).

Tabela 63 - Consumo semanal de eletricidade da Cabine de Pintura PT (semanas 3 a 26 de 2025)

Consumo Semanal - 24 semanas (W3-W26)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
3	Cabine PT	2671695.717	267.17 €
4	Cabine PT	2423702.474	242.37 €
5	Cabine PT	2397623.496	239.76 €
6	Cabine PT	2283978.56	228.40 €
7	Cabine PT	1804078.696	180.41 €

Tabela 63 (Cont.) – Consumo semanal de eletricidade da Cabine de Pintura PT (semanas 3 a 26 de 2025)

8	Cabine PT	2051213.056	205.12 €
9	Cabine PT	1718997.427	171.90 €
10	Cabine PT	1404810.465	140.48 €
11	Cabine PT	2187943.191	218.79 €
12	Cabine PT	2239448.418	223.94 €
13	Cabine PT	2178994.072	217.90 €
14	Cabine PT	2283978.257	228.40 €
15	Cabine PT	2117621.247	211.76 €
16	Cabine PT	1459165.348	145.92 €
17	Cabine PT	1572971.225	157.30 €
18	Cabine PT	1205898.218	120.59 €
19	Cabine PT	1968845.861	196.88 €
20	Cabine PT	2126426.765	212.64 €
21	Cabine PT	1779041.698	177.90 €
22	Cabine PT	1601853.237	160.19 €
23	Cabine PT	2046356.317	204.64 €
24	Cabine PT	1813268.761	181.33 €
25	Cabine PT	1287885.229	128.79 €
26	Cabine PT	1176916.587	117.69 €

A Tabela 64 resume os indicadores globais, evidenciando um consumo médio semanal de 1.908 kW/h, correspondente a 190,84 €/semana, resultando num custo anual estimado de 9.160,54 €.

Tabela 64 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Cabine PT após instalação de iluminação LED

<b>Cabine PT (Eletricidade)</b>	
Consumo total (kW/h)	45802.71
Custo total (€)	4,580.27 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	8.47
Nº semanas em análise	24
Consumo médio semanal (kW/h)	1908.45
Custo médio semanal (€)	190.84 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	0.35
Custo estimado anual (€)	9,160.54 €

Na Tabela 65 é apresentado a poupança estimada obtida com a substituição da iluminação fluorescente por LED, quantificada em 384,70 kWh/semana, equivalente a 38,47 €/semana.

Tabela 65 - Poupança estimada instalação de iluminação LED na Cabine de Pintura PT

Poupança Estimada - Iluminação LED	
Consumo Semanal (kW/h)	384.70
Semanal (€)	38.47 €
Anual (€)	1,846.55 €
t CO <sub>2</sub> e/kW/h/ano	3.4
Percentagem Poupança (%)	16.78%

A estimativa inicial para a substituição da iluminação da Cabine do PT apontava para uma poupança anual de 1.824,77 € (16,57 %). Com base nos dados reais de consumo, verificou-se uma poupança efetiva de 1.846,55 €/ano, correspondente a 16,78% de redução do consumo elétrico da cabine. Este valor é bastante próximo da estimativa inicial confirmando a robustez do cálculo prévio e validando a expectativa de retorno do investimento em menos de um ano.

É importante reforçar que esta diferença positiva não resulta de um desempenho acima do esperado da tecnologia LED, mas sim de pequenas variações na carga de trabalho durante o período analisado. Ainda assim, o desvio é marginal, o que reforça a conclusão de que a intervenção correspondeu plenamente ao desempenho previsto.

### 3.3.6. Linha de Pintura Aérea

As intervenções na linha de pintura foram concluídas a 9 de junho de 2025, correspondendo ao final da semana 24. Para avaliar o impacto energético das melhorias, foi definido um período de análise pós-intervenção compreendido entre as semanas 27 e 31 de 2025, totalizando cinco semanas. Optou-se por não incluir as semanas 25 e 26, dado que coincidiram com feriados e dias de ponte, o que distorceria os resultados devido à redução da atividade produtiva. Embora a amostra seja mais curta do que a inicial (30 semanas), este critério permite assegurar uma comparação mais justa e representativa.

De forma a reforçar a coerência da comparação, foi também analisado o volume produtivo. Durante as 30 semanas da análise inicial, a média de produção situou-se em 45 cubas/semana, enquanto no período pós-intervenção a média foi de 50 cubas/semana. Este dado demonstra que, apesar de a nova amostra ser mais reduzida, o nível de atividade produtiva foi até ligeiramente superior, reforçando a robustez da comparação e garantindo que as poupanças energéticas identificadas não resultam de uma eventual quebra de produção.

#### Alteração do método de queima

Ao contrário do que acontece na Cabine do PT, onde as condições térmicas ambiente podem influenciar de forma significativa o desempenho energético, uma vez que o *setpoint* se situa nos 40 °C e a temperatura do ar exterior no verão pode aproximar-se deste valor, na linha de pintura o *setpoint* das estufas é de 135 °C. Neste caso, a variação da temperatura ambiente ao longo do ano tem um impacto praticamente negligenciável no consumo. Acresce ainda que os registos de consumo com a configuração anterior (queima indireta) demonstram uma estabilidade significativa entre semanas, independentemente da estação do ano, o que reforça que a comparação entre os períodos antes e

depois da intervenção permanece válida, mesmo com a limitação de amostra disponível (semanas 27 a 31).

Na Tabela 66 é apresentado os consumos médios diários de gás da linha de pintura no período pós-intervenção.

Tabela 66 - Consumo médio diário de gás natural na Linha de Pintura Aérea (semanas 27 a 31 de 2025)

Linha de Pintura (Gás)	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	2806.30	196.44 €	264.68 €	162.11 €
3ªf	2565.97	179.62 €	244.84 €	132.22 €
4ªf	2595.60	181.69 €	233.57 €	143.73 €
5ªf	1927.80	134.95 €	226.30 €	24.17 €
6ªf	2688.00	188.16 €	250.80 €	101.92 €
Sab	604.10	42.29 €	60.52 €	0.00 €
Dom	0.00	0.00 €	0.00 €	0.00 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>176.17 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>21.14 €</b>		

Durante os dias úteis, o custo médio diário situou-se em 176,17 €, associado a consumos que variaram entre 1.928 e 2.806 kWh/dia. Ao fim de semana, o consumo foi substancialmente mais baixo, registando-se uma média de 21,14 €, com utilização ocasional ao sábado e inexistente ao domingo.

A Figura 48 compara os valores médios de consumo e custo “Antes vs Depois”, evidenciando reduções significativas em praticamente todos os dias úteis, com uma poupança percentual média de cerca de 25%,

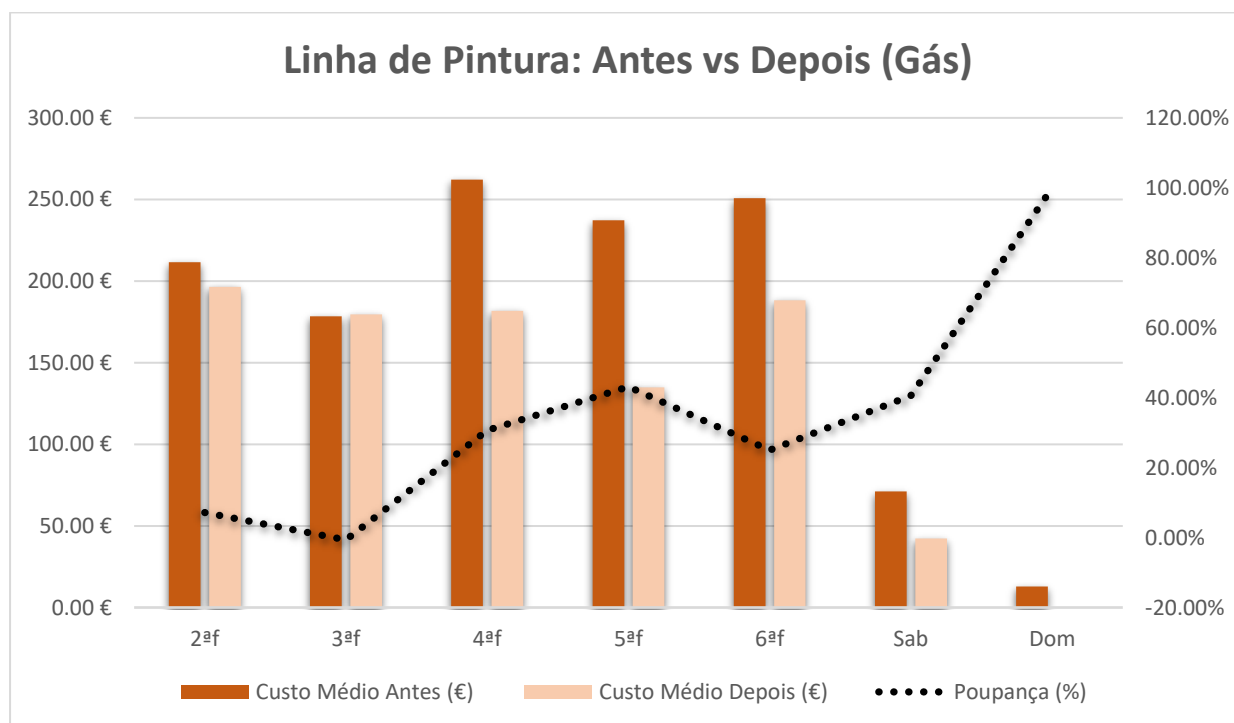


Figura 48 - Comparação do custo médio diário da Linha de Pintura Aérea antes e após a alteração do método de queima

## Desenvolvimento

A Tabela 67 sintetiza a poupança média diária estimada resultante da alteração do método de queima, com reduções de 51,88 €/dia útil e 20,85 €/fim de semana.

Tabela 67 - Poupança média diária estimada após alteração do método de queima na Linha de Pintura Aérea

Poupança Diária Estimada - Queima Direta	
Dias Úteis	51.88 €
Fim de Semana	20.85 €

Na Tabela 68 encontram-se os consumos semanais da linha de pintura no período pós-intervenção (semanas 27 a 31).

Tabela 68 - Consumo semanal de gás natural da Linha de Pintura Aérea (semanas 27 a 31 de 2025)

Consumo Médio Semanal - 5 semanas (W27 - W31)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
27	Linha de Pintura Aérea	15950679.46	1,116.55 €
28	Linha de Pintura Aérea	14126011.33	988.82 €
29	Linha de Pintura Aérea	12362009.92	865.34 €
30	Linha de Pintura Aérea	13687344.31	958.11 €
31	Linha de Pintura Aérea	9812841.205	686.90 €

Os valores registados variaram entre 9,81 MW/h na semana 31 e 15,95 MW/h na semana 27, correspondendo a custos entre 686,90 € e 1.116,55 €.

Os principais indicadores agregados podem ser observados na Tabela 69, onde se verifica um consumo médio semanal de 13.188 kW/h e um custo médio de 923,14 €/semana, o que corresponde a um custo anual estimado de 44.310,93 €.

Tabela 69 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Linha de Pintura após alteração do método de queima

Linha de Pintura (Gás)	
Consumo total (kW/h)	65938.89
Custo total (€)	4,615.72 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	12.20
Nº semanas em análise	5
Consumo médio semanal (kW/h)	13187.78
Custo médio semanal (€)	923.14 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	2.44
Custo estimado anual (€)	44,310.93 €

Por sua vez, a Tabela 70 resume o impacto direto da alteração do método de queima, com uma poupança média de 4.301 kW/h/semana, equivalente a 301,09 € semanais.

Tabela 70 - Poupança estimada alteração do método de queima na Linha de Pintura Aérea

Poupança Estimada - Queima Direta	
Consumo Semanal (kW/h)	4301.23
Semanal (€)	301.09 €
Anual (€)	14,452.14 €
t CO <sub>2</sub> e/kW/h/ano	38.2
Percentagem Poupança (%)	24.59%

A estimativa inicial para a alteração do método de queima na Linha de Pintura apontava para uma poupança anual de 14.636,36 €, com um tempo de retorno do investimento de 1,68 anos. Os resultados reais obtidos através da análise pós-intervenção revelaram uma poupança de 14.452,14 €/ano, correspondente a uma redução de 24,59% no consumo de gás. A diferença face ao valor previsto é residual (-184,22 €), confirmando a elevada fiabilidade da estimativa e demonstrando que o desempenho alcançado correspondeu praticamente ao projetado. Acresce ainda que a redução verificada se situa no intervalo de 20 a 30% referido pela bibliografia, reforçando a consistência técnica e a validade dos resultados obtidos.

#### Sistema de Detecção de Cubas

A Tabela 71 apresenta os consumos médios diários de eletricidade após a intervenção.

Tabela 71 - Consumo médio diário de eletricidade na Linha de Pintura Aérea (semanas 27 a 31 de 2025)

Linha de Pintura (Eletricidade)	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	405.29	40.53 €	43.68 €	37.34 €
3ªf	420.95	42.09 €	48.29 €	38.40 €
4ªf	433.51	43.35 €	56.70 €	33.08 €
5ªf	350.50	35.05 €	41.81 €	24.50 €
6ªf	371.14	37.11 €	43.26 €	24.92 €
Sab	110.12	11.01 €	16.88 €	0.57 €
Dom	1.81	0.18 €	0.41 €	0.00 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>39.63 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>5.60 €</b>		

Durante os dias úteis, os custos variaram entre 35,05 € e 43,35 €, resultando numa média de 39,63 €/dia. Ao fim de semana, o consumo foi substancialmente inferior, com um custo médio de 5,60 €/dia.

A Figura 49 mostra a comparação “Antes vs Depois” da instalação do sistema de deteção de cubas.

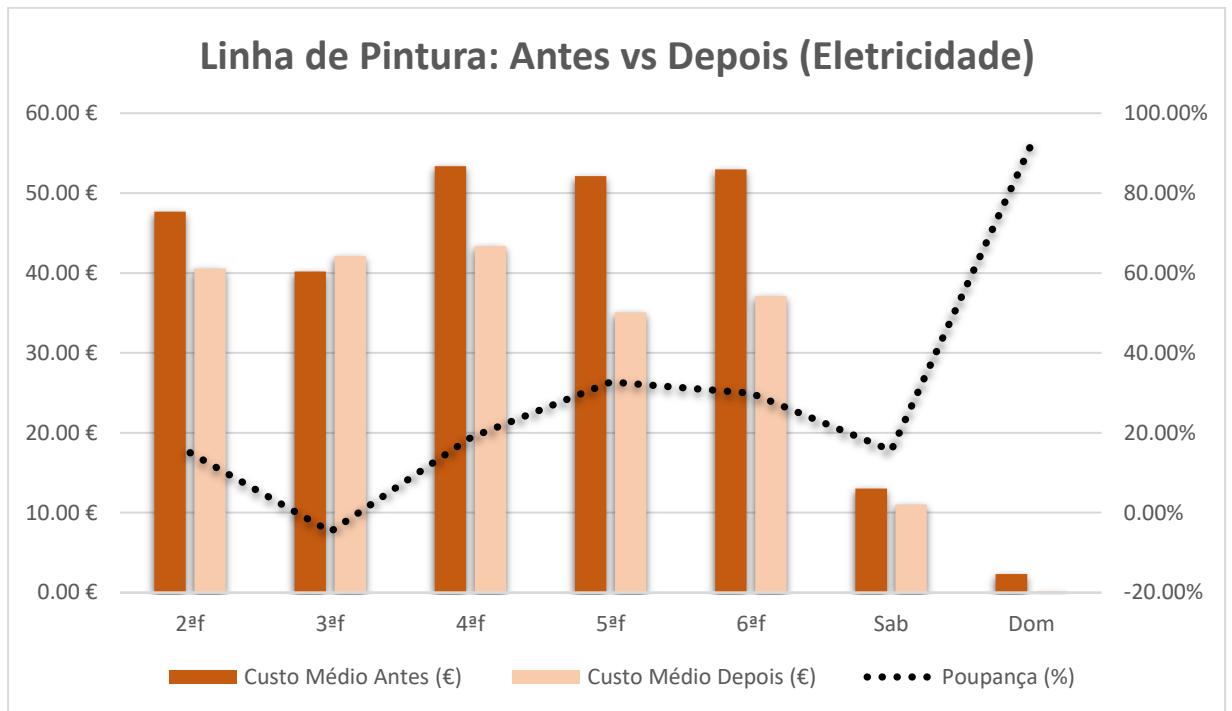


Figura 49 - Comparação do custo médio diário da Linha de Pintura Aérea antes e após a alteração do método de queima

Verifica-se uma redução consistente dos custos nos dias úteis, com poupanças percentuais que se mantêm entre 15% e 25% na maioria dos dias. Ao sábado, o efeito é menos expressivo devido à variabilidade da carga produtiva, enquanto ao domingo praticamente se eliminou o consumo, refletindo a ausência de operação.

Na Tabela 72, que resume a poupança diária, verifica-se uma redução média de 9,64 €/dia útil e 2,09 €/dia de fim de semana.

Tabela 72 - Poupança média diária estimada após sistema de deteção de cubas na Linha de Pintura Aérea

Poupança Diária - Deteção Cubas	
Dias Úteis	9.64 €
Fim de Semana	2.09 €

A Tabela 73 apresenta o consumo semanal médio de eletricidade da Linha de Pintura no período pós-intervenção (semanas 27 a 31), evidenciando valores entre 196,01 € e 220,23 €, o que corresponde a uma média semanal de 209,33 €.

Tabela 73 - Consumo semanal de eletricidade da Linha de Pintura Aérea (semanas 27 a 31 de 2025)

Consumo Médio Semanal - 5 semanas (W27-W31)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
27	Linha de Pintura	2151456.024	215.15 €
28	Linha de Pintura	2202271.947	220.23 €
29	Linha de Pintura	2036815.213	203.68 €
30	Linha de Pintura	2115889.654	211.59 €
31	Linha de Pintura	1960122.627	196.01 €

De acordo com a Tabela 74, o consumo total do período analisado foi de 10.466,56 kW/h, representando um custo global de 1.046,66 €.

Tabela 74 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões da Linha de Pintura após sistema de deteção de cubas

Linha de Pintura (Eletricidade)	
Consumo total (kW/h)	10466.56
Custo total (€)	1,046.66 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	1.94
Nº semanas em análise	5
Consumo médio semanal (kW/h)	2093.31
Custo médio semanal (€)	209.33 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	0.39
Custo estimado anual (€)	10,047.89 €

A partir destes dados, projeta-se um custo anual estimado de 10.047,89 €, acompanhado de emissões médias semanais de 0,39 t CO<sub>2</sub>e.

Por fim, a Tabela 75 sintetiza a poupança energética proporcionada pelo novo sistema, que se traduz numa redução média de 523,50 kW/h por semana (equivalente a 52,35 € semanais).

Tabela 75 - Poupança estimada sistema de deteção de cubas na Linha de Pintura Aérea

Poupança Estimada - Sistema de Deteção de Cubas	
Consumo Semanal (kW/h)	523.50
Semanal (€)	52.35 €
Anual (€)	2,512.81 €
t CO <sub>2</sub> e/kW/h/ano	4.6
Percentagem Poupança (%)	20.01%

A estimativa inicial apontava para uma poupança anual de 2.664,00 €, o que corresponderia a um tempo de retorno de 1,69 anos para o investimento associado ao sistema de deteção de cubas. No entanto, a análise real pós-intervenção indica uma poupança anual efetiva de 2.512,81 €, equivalente a 20,01% de redução do consumo elétrico. Embora o valor observado seja ligeiramente inferior ao previsto (cerca de 151 € a menos por ano), a diferença é pouco significativa em termos relativos, confirmando a consistência da estimativa inicial. Em termos práticos, o sistema mantém-se como uma medida altamente eficaz, com um tempo de retorno próximo ao inicialmente projetado e plenamente justificado do ponto de vista técnico e económico.

### 3.3.7. Chiller Core & Chiller Laboratório PT

As intervenções no sistema de arrefecimento do Core e no Chiller do Laboratório PT foram concluídas no final da semana 6 de 2025, passando os equipamentos a operar já em condições otimizadas a partir da semana 7. Para avaliar o impacto energético, definiu-se como período de análise 17 semanas

## Desenvolvimento

consecutivas (semanas 7 a 23), o que garante uma base temporal robusta e comparável face à amostra pré-intervenção de 14 semanas.

Embora se verifiquem oscilações semanais nos consumos, estas refletem apenas variações normais de utilização e não alterações estruturais na carga de trabalho. Apesar de não existir uma quantificação direta da carga de trabalho nos dois casos, este pressuposto é corroborado pelo conhecimento interno e pelo consenso entre as equipas de manutenção e produção, que confirmam que, no período em análise, o nível de atividade foi no mínimo equivalente e, na maioria das vezes, superior ao registado antes da intervenção, pelo que a amostra de 17 semanas garante uma base comparativa robusta para avaliar o impacto das intervenções.

### Chiller Core

A Tabela 76 apresenta os consumos médios diários do Chiller do Core após a intervenção, evidenciando uma redução relevante nos dias úteis, em que o custo médio diário passou para 41,69 €, e um valor ligeiramente superior nos fins de semana, de 50,93 €.

*Tabela 76 - Consumo médio diário Chiller do Core (semanas 7 a 23 de 2025)*

Chiller Core	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	418.20	41.82 €	68.59 €	22.07 €
3ªf	455.03	45.50 €	61.49 €	16.39 €
4ªf	383.22	38.32 €	65.40 €	17.20 €
5ªf	454.06	45.41 €	77.69 €	14.23 €
6ªf	374.15	37.41 €	58.79 €	0.70 €
Sab	505.36	50.54 €	87.31 €	25.98 €
Dom	513.22	51.32 €	89.34 €	1.20 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>41.69 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>50.93 €</b>		

No Figura 50 é possível constatar que a substituição do equipamento resultou numa redução clara dos custos médios diários, tanto nos dias úteis como ao fim de semana.

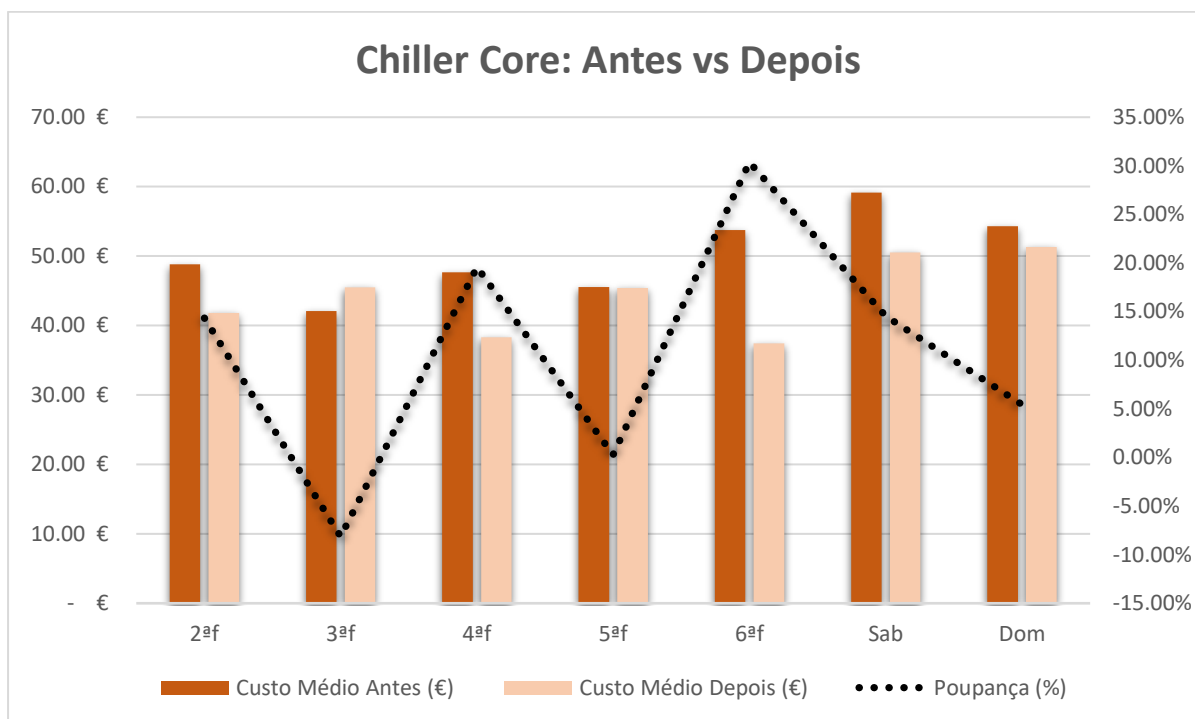


Figura 50 - Comparação do custo médio diário do Chiller do Core antes e após a sua substituição

Apesar de existirem variações naturais associadas ao perfil de utilização em diferentes dias da semana, o efeito global traduz-se numa diminuição média próxima de 11%, confirmando o contributo positivo da intervenção para a melhoria da eficiência energética do sistema.

Por fim, a Tabela 77 quantifica a poupança média diária obtida com a substituição do equipamento.

Tabela 77 - Poupança média diária estimada após a substituição do Chiller do Core

Poupança Diária - Novo Chiller Core	
Dias Úteis	5.86 €
Fim de Semana	5.77 €

Observa-se uma redução de 5,86 €/dia nos dias úteis e de 5,77 €/dia ao fim de semana, confirmando que a instalação do novo chiller trouxe ganhos económicos e energéticos transversais a todo o período de funcionamento.

A Tabela 78 mostra a evolução dos consumos do Chiller do Core ao longo das 17 semanas analisadas, revelando uma variação natural entre semanas de maior e menor carga, mas mantendo-se sempre dentro de uma ordem de grandeza consistente.

Tabela 78 - Consumo semanal do Chiller do Core (semanas 7 a 23 de 2025)

Consumo Médio Semanal - 17 semanas (W7-W23)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
7	Chiller Core	2837278.288	283.73 €
8	Chiller Core	3017566.661	301.76 €
9	Chiller Core	3384137.781	338.41 €
10	Chiller Core	3036702.939	303.67 €
11	Chiller Core	2403569.292	240.36 €
12	Chiller Core	2389700.285	238.97 €
13	Chiller Core	3393846.936	339.38 €
14	Chiller Core	2898745.21	289.87 €
15	Chiller Core	3518200.464	351.82 €
16	Chiller Core	2400222.793	240.02 €
17	Chiller Core	3953475.764	395.35 €
18	Chiller Core	3892596.199	389.26 €
19	Chiller Core	2766525.68	276.65 €
20	Chiller Core	4210703.449	421.07 €
21	Chiller Core	3650315.631	365.03 €
22	Chiller Core	3310231.015	331.02 €
23	Chiller Core	1691302.984	169.13 €

Essa dispersão reforça a robustez da amostra, permitindo que o valor médio semanal de 3.103,24 kW/h (310,32 €/semana) seja representativo do comportamento típico do equipamento após a intervenção.

De forma consolidada, a Tabela 79 resume o desempenho global do período, evidenciando um consumo total de 52.755,12 kW/h e um custo total de 5.275,51 €, o que, projetado para um ano, corresponde a um custo operacional de cerca de 16.136,86 € e emissões anuais de 9,76 t CO<sub>2</sub>e.

Tabela 79 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do Chiller do Core após a sua substituição

Chiller Core	
Consumo total (kW/h)	52755.12
Custo total (€)	5,275.51 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	9.76
Nº semanas em análise	17
Consumo médio semanal (kW/h)	3103.24
Custo médio semanal (€)	310.32 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kW/h)	0.57
Custo estimado anual (€)	16,136.86 €

Por sua vez, a Tabela 80 demonstra que a substituição do equipamento permitiu reduzir o consumo em 408,62 kWh por semana, equivalentes a 40,86 €/semana.

Tabela 80 - Poupança estimada substituição do Chiller do Core

Poupança Estimada - Novo Chiller Core	
Consumo Semanal (kW/h)	408.62
Semanal (€)	40.86 €
Anual (€)	2,124.81 €
t CO <sub>2</sub> e/kW/h/ano	3.6
Percentagem Poupança (%)	11.64%

Numa projeção anual, este resultado traduz-se numa poupança de 2.124,81 € e numa redução adicional de 3,6 t CO<sub>2</sub>e, correspondendo a 11,64% de diminuição face ao cenário anterior. Quando comparado com a estimativa ajustada, que previa uma poupança de 2.415,10 € (cerca de 13,22%), verifica-se que o valor alcançado é ligeiramente inferior, apresentando uma diferença próxima de 290 €. Apesar disso, a ordem de grandeza confirma a fiabilidade da previsão inicial e demonstra que a intervenção cumpriu os objetivos energéticos definidos, garantindo uma redução consistente dos custos operacionais.

#### **Chiller Laboratório PT**

A Tabela 81 apresenta os consumos médios diários após a intervenção, permitindo observar que, durante os dias úteis, o custo médio foi de 37,36 €/dia, enquanto ao fim de semana se reduziu para apenas 1,91 €/dia.

Tabela 81 - Consumo médio diário Chiller do Laboratório PT (semanas 7 a 23 de 2025)

Chiller Lab. PT	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2 <sup>af</sup>	204.77	20.48 €	61.27 €	- €
3 <sup>af</sup>	247.36	24.74 €	124.92 €	- €
4 <sup>af</sup>	401.22	40.12 €	172.69 €	- €
5 <sup>af</sup>	479.83	47.98 €	190.49 €	- €
6 <sup>af</sup>	534.58	53.46 €	153.92 €	- €
Sab	31.13	3.11 €	8.24 €	- €
Dom	7.06	0.71 €	6.45 €	- €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>37.36 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>1.91 €</b>		

Na Figura 51 é apresentado o custo médio diário “Antes e Depois” da substituição dos chillers, onde é possível observar um comportamento mais irregular face aos restantes equipamentos analisados, com dias que registam poupanças percentuais muito elevadas e outros em que os valores são até negativos.

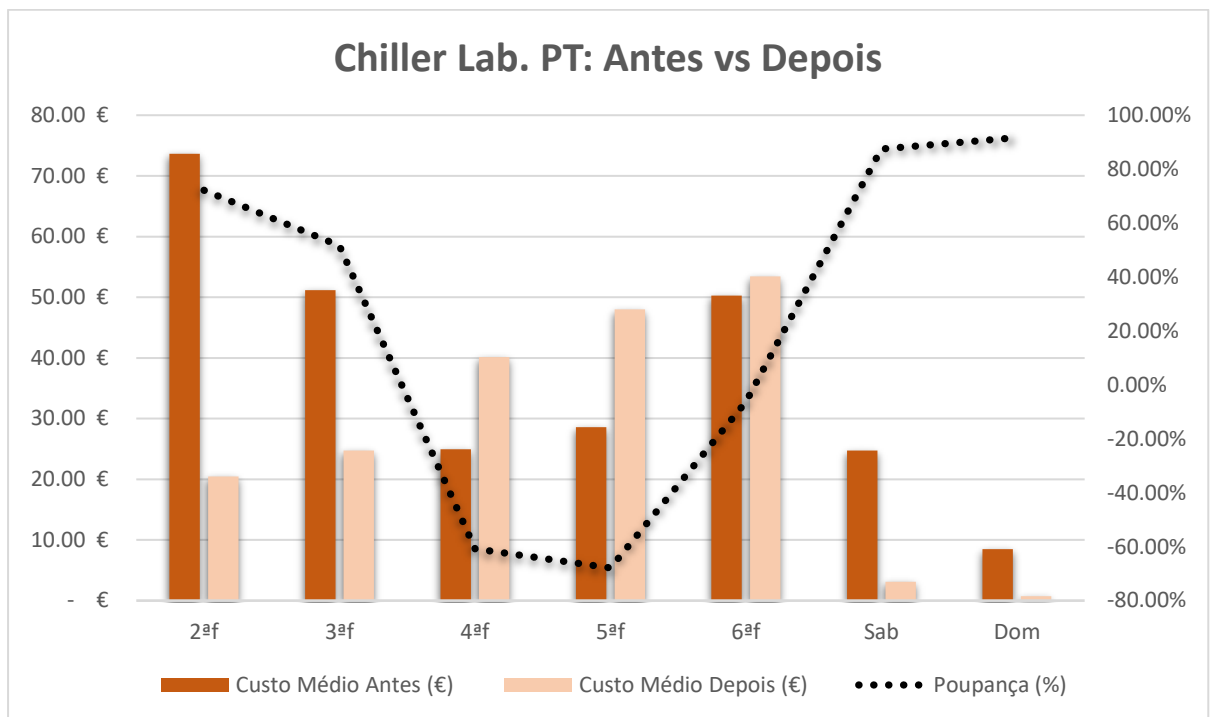


Figura 51 - Comparação do custo médio diário do Chiller do Laboratório PT antes e após a sua substituição

Esta variabilidade explica-se pela forma como os ensaios laboratoriais são distribuídos ao longo da semana, e como a realização de testes de maior carga e duração em determinados dias altera significativamente o perfil de consumo, originando desvios pontuais entre o “antes” e o “depois”.

Ainda assim, importa sublinhar que se trata de amostras comparativas bastante extensas, abrangendo várias semanas antes e após a intervenção, o que mitiga o efeito dessas flutuações diárias. Assim, mesmo com a oscilação visível, pode afirmar-se com elevado grau de confiança que a substituição dos chillers permitiu uma poupança média consolidada próxima dos 27%, refletindo um impacto energético positivo e consistente no funcionamento do sistema.

A Tabela 82 quantifica a poupança média diária obtida com a substituição dos chillers, situando-se em 8,36 €/dia nos dias úteis e 14,72 €/dia nos fins de semana.

Tabela 82 - Poupança média diária estimada após a substituição do Chiller do Core

Poupança Diária - Novo Chiller Lab. PT	
Dias Úteis	8.36 €
Fim de Semana	14.72 €

Os resultados do consumo semanal após a substituição dos chillers encontram-se resumidos na Tabela 83.

Tabela 83 - Consumo semanal do Chiller do Laboratório PT (semanas 7 a 23 de 2025)

Consumo Médio Semanal - 17 semanas (W7-W23)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
7	Chiller Lab. PT	1740643.16	174.06 €
8	Chiller Lab. PT	1367295.38	136.73 €
9	Chiller Lab. PT	2825442.19	282.54 €
10	Chiller Lab. PT	1748587.65	174.86 €
11	Chiller Lab. PT	1660491.9	166.05 €
12	Chiller Lab. PT	1801411.46	180.14 €
13	Chiller Lab. PT	2282383.72	228.24 €
14	Chiller Lab. PT	2969628.9	296.96 €
15	Chiller Lab. PT	1037492.19	103.75 €
16	Chiller Lab. PT	357154.35	35.72 €
17	Chiller Lab. PT	857827.837	85.78 €
18	Chiller Lab. PT	2270671.84	227.07 €
19	Chiller Lab. PT	3088325.29	308.83 €
20	Chiller Lab. PT	228636.675	22.86 €
21	Chiller Lab. PT	3815473.16	381.55 €
22	Chiller Lab. PT	2865624.34	286.56 €
23	Chiller Lab. PT	1484130.49	148.41 €

Verifica-se uma variação relevante entre semanas, com valores de custo que oscilaram entre um mínimo de cerca de 22,86 € e um máximo de 381,55 €, refletindo o impacto direto da natureza intermitente e da duração variável dos ensaios realizados no laboratório. Ainda assim, a média semanal estabiliza em torno de 190,60 €, o que permite uma leitura consistente do comportamento energético no período analisado.

De forma agregada, a Tabela 84 apresenta os valores médios e totais obtidos neste intervalo de amostragem.

Tabela 84 - Síntese dos indicadores de consumo, custos e emissões do Chiller do Laboratório PT após a sua substituição

Chiller Laboratório PT	
Consumo total (kW/h)	32401.22
Custo total (€)	3,240.12 €
t CO <sub>2</sub> e/kWh	5.99
Nº semanas em análise	17
Consumo médio semanal (kW/h)	1905.95
Custo médio semanal (€)	190.60 €
Emissões média semanal (t CO <sub>2</sub> e/kWh)	0.35
Custo estimado anual (€)	9,910.96 €

O consumo médio semanal foi de aproximadamente 1.906 kW/h, com um custo associado de 190,60 €, correspondendo a um custo anual estimado de 9.910,96 €.

Já a Tabela 85 sintetiza a poupança estimada alcançada com a instalação do novo sistema, traduzida numa redução média de 712 kW/h/semana, equivalente a 71,22 €/semana.

Tabela 85 - Poupança estimada substituição do Chiller do Laboratório PT

Poupança Estimada - Novo Chiller Lab. PT	
Consumo Semanal (kW/h)	712.17
Semanal (€)	71.22 €
Anual (€)	3,703.28 €
t CO <sub>2</sub> e/kW/h/ano	6.3
Percentagem Poupança (%)	27.20%

Extrapolado para um ano, este valor corresponde a 3.703,28 € de poupança e a uma redução de 6,3 tCO<sub>2</sub>e, o que representa uma diminuição percentual de cerca de 27,20% relativamente à situação anterior. Quando comparados com a estimativa ajustada, que previa uma poupança de 3.376,33 € (cerca de 24,8%), verifica-se que o valor alcançado foi superior, com uma diferença positiva de aproximadamente 327 €. Estes resultados demonstram que a intervenção correspondeu às expectativas em termos de redução efetiva dos custos operacionais.

### 3.4. Análise crítica

Na Tabela 86 é apresentado o resumo consolidado das intervenções realizadas no âmbito do projeto, incluindo os respetivos custos de investimento, poupança anual estimada, tempo de retorno (*payback*), redução de emissões de CO<sub>2</sub>e e percentagem de poupança associada.

Tabela 86 - Resumo consolidado das intervenções e respetivos resultados

Equipamento	Intervenção	Custo por Ação (€)	Poupança Anual (€)	Payback (anos)	Redução (t CO <sub>2</sub> e/ano)	Poupança (%)
SAC Arroteia	Redução da pressão	- €	3,885.89 €	0.00	7.19	2.79%
SAC Arroteia	Reparação de Fugas – 1ª Fase	650.28 €	3,543.72 €	0.18	6.56	2.62%
SAC Arroteia	Reparação de Fugas – 2ª Fase	151.54 €	2,117.07 €	0.07	3.92	1.61%
SAC Maia	Instalação de válvula de corte	586.50 €	1,264.99 €	0.46	2.3	23.57%
Despoeiramento Core	Controlo por VFD	7,408.00 €	8,370.23 €	0.89	15.5	43.27%
Despoeiramento Shell	Controlo por VFD	2,685.00 €	2,467.88 €	1.09	4.6	39.14%
Cabine Pintura PT	Alteração do método de queima	6,200.00 €	5,832.05 €	1.06	15.4	25.83%
Cabine Pintura PT	Iluminação LED	1,200.67 €	1,846.55 €	0.65	3.4	16.78%

Tabela 86 (Cont.) – Resumo consolidado das intervenções e respetivos resultados

Linha de Pintura Aérea	Alteração do método de queima	24,600.00 €	14,452.14 €	1.70	38.2	24.59%
Linha de Pintura Aérea	Sistema de deteção de cubas	4,500.00 €	2,512.81 €	1.79	4.6	20.01%
Chiller Core	Substituição de Chiller	22,446.00 €	*17,403.48 €	1.29	3.6	11.64%
Chiller Laboratório PT	Substituição de Chillers	25,731.00 €	*31,960.61 €	0.81	6.3	27.20%
<b>Total</b>		<b>96,158.99 €</b>	<b>95,657.42 €</b>	<b>1.01</b>	<b>111.57</b>	<b>-</b>

Esta síntese permite uma visão comparativa entre medidas de diferentes naturezas, abrangendo desde ações de manutenção corretiva de baixo custo até substituições de equipamentos estruturais com investimentos mais elevados, avaliando assim o impacto económico e ambiental de forma integrada. O resultado agregado corresponde a um investimento total de 96.158,99 €, que se traduz numa poupança anual estimada de 95.657,42 €, representando um tempo médio de retorno de 1,01 anos e uma redução global de 111,57 toneladas de CO<sub>2</sub>e por ano. Estes indicadores demonstram a relevância e a eficácia do conjunto de medidas, evidenciando não só a viabilidade económica como também o contributo significativo para a sustentabilidade ambiental da empresa.

A análise dos resultados obtidos evidencia diferenças relevantes entre intervenções de baixo custo e de rápida implementação e medidas de maior investimento, mas com impacto estrutural. No sistema de ar comprimido, tanto na unidade da Arroiteia como na Maia, as intervenções revelaram uma elevada eficácia. A redução da pressão da rede, sem custos associados, e a reparação de fugas, com investimentos inferiores a 1.000 € por fase, apresentaram tempos de retorno praticamente nulos e permitiram reduções anuais de consumo superiores a 2.000 €. A instalação da válvula de corte na Maia, embora com menor impacto absoluto, destacou-se pela elevada eficiência relativa, com uma poupança de 23,6% e retorno inferior a seis meses. Estes resultados confirmam que medidas simples de manutenção e de controlo são capazes de gerar ganhos energéticos significativos, com reduzido risco de implementação e elevada rentabilidade.

Nos sistemas de despoejamento do Core e do Shell, a introdução de sistemas de controlo através de variadores de frequência e transdutores de pressão demonstrou ser uma intervenção altamente eficaz. Apesar do custo superior no caso do Core, os resultados apresentaram um tempo de retorno inferior a um ano, associado a uma redução expressiva de emissões de CO<sub>2</sub>, o que confirma que a automação e a modulação de carga constituem estratégias fundamentais para otimizar equipamentos de funcionamento contínuo.

Também na cabine de pintura dos grandes transformadores os resultados foram relevantes. A conversão do sistema de queima indireta para queima direta, com um investimento de 6.200 €, apresentou um tempo de retorno de pouco mais de um ano, assegurando uma redução de cerca de 25,8% no consumo energético. Paralelamente, a substituição de lâmpadas fluorescentes por tecnologia LED, apesar de exigir um investimento relativamente reduzido, revelou-se uma medida de elevado

impacto, com um tempo de retorno inferior a um ano, ilustrando a pertinência de intervenções direcionadas para a eficiência na iluminação industrial.

Na linha de pintura aérea, a conversão do sistema de queima indireta para direta destacou-se pelo impacto absoluto na redução de consumo, traduzindo-se numa poupança anual relevante. No entanto, o investimento necessário foi significativamente superior, o que se refletiu num período de retorno mais alargado, embora ainda competitivo face à dimensão da medida. Já a implementação do sistema de deteção de cubas, com investimento reduzido, revelou poupanças mais modestas e um tempo de retorno igualmente prolongado, consequência direta da natureza intermitente da operação e da dependência do equipamento em relação ao volume de produção.

Relativamente aos sistemas de arrefecimento, a substituição dos chillers do Core e do Laboratório PT confirmou-se como uma aposta estratégica. Apesar dos custos associados à aquisição e instalação destes equipamentos, os tempos de retorno mantiveram-se bastante competitivos, inferiores a um ano e meio em ambos os casos, e permitiram alcançar poupanças globais muito significativas. Importa, no entanto, salientar que uma parte significativa das poupanças obtidas decorre essencialmente da redução de custos de manutenção, uma vez que a principal motivação para a substituição se prendeu com a condição crítica e o estado de degradação dos chillers anteriores. As poupanças energéticas assumem, neste contexto, um peso relativamente reduzido, correspondendo apenas a 2.125 € no Core e 3.703 € no Laboratório PT. As poupanças, consideradas em conjunto, mostram-se suficientes para suportar integralmente o valor do aluguer anual dos chillers, o que confirma não apenas a viabilidade técnica e energética da intervenção, mas também a sua neutralidade financeira para a empresa.

Em termos globais, o conjunto das intervenções resultou num investimento de cerca de 96 mil euros, correspondendo a uma poupança anual equivalente e a um tempo médio de retorno de praticamente um ano.

A redução anual estimada de 111,6 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente pode ser contextualizada da seguinte forma:

- É aproximadamente equivalente às emissões de 70 automóveis ligeiros em circulação num ano, com base numa média de 106,6 g CO<sub>2</sub>/km para veículos novos na Europa em 2023 e um comportamento anual médio de 15 000 km (European Environment Agency, 2024);
- Segundo o relatório estatístico da UE, o valor médio das emissões em 2023 foi de 6,8 t CO<sub>2</sub>e por habitante. Assim, as 111,6 t CO<sub>2</sub>e anuais correspondem às emissões anuais de aproximadamente 16,4 pessoas (Eurostat, 2025);
- De acordo com a Agência Europeia do Ambiente, uma árvore adulta é capaz de absorver cerca de 22 kg de CO<sub>2</sub> por ano. Neste enquadramento, a redução alcançada equivale ao sequestro anual de carbono realizado por aproximadamente 5100 árvores adultas (European Environment Agency, 2023).

Apesar dos resultados positivos, importa reforçar a sua consistência face ao contexto produtivo. Com base na análise conjunta da evolução da produção e na observação dos níveis finais de *output*, conclui-se que a carga de trabalho se manteve em crescimento, durante o período em análise. Assim, as reduções de consumo identificadas refletem efetivamente o impacto das medidas implementadas, uma

vez que foram alcançadas em condições de plena atividade e, em vários casos, de maior volume produtivo.

A análise crítica demonstra ainda que a estratégia seguida conseguiu articular intervenções de baixo custo e rápida execução com investimentos estruturais de maior alcance temporal. Esta combinação permitiu não apenas alcançar reduções energéticas expressivas, mas também consolidar um portfólio de medidas com contributo relevante para a diminuição dos custos operacionais e para o reforço da sustentabilidade ambiental da organização.



## 4. Conclusão

Neste capítulo é apresentado as conclusões do trabalho desenvolvido, bem como as limitações identificadas e as perspectivas de continuidade.

### 4.1. Conclusões finais

O presente trabalho teve como objetivo avaliar e implementar medidas de eficiência energética em diferentes equipamentos e instalações de apoio à produção da EFACEC. Através de uma abordagem prática e aplicada, foi possível compreender o funcionamento dos equipamentos, identificar oportunidades de melhoria e validar soluções tecnológicas que contribuem para a redução do consumo energético.

A experiência demonstrou que a monitorização contínua, aliada a uma análise rigorosa e sistemática, é essencial para sustentar decisões de investimento e de operação. A utilização de ferramentas digitais, como a plataforma Sensorfact, permitiu obter dados fiáveis e em tempo real, fundamentais para o diagnóstico preciso e para o acompanhamento das medidas implementadas.

Para além do impacto direto em custos e emissões, este trabalho evidenciou a importância da eficiência energética como fator estratégico para a competitividade industrial. A redução de desperdícios energéticos, a modernização tecnológica e a otimização da operação reforçam não apenas a sustentabilidade, mas também a resiliência da empresa perante desafios económicos e ambientais.

Outro aspeto relevante foi a articulação entre diferentes áreas da organização, desde a manutenção à produção, o que demonstrou que a eficiência energética deve ser encarada como uma responsabilidade partilhada. A colaboração entre equipas internas e parceiros externos revelou-se determinante para o sucesso das intervenções.

Em síntese, o trabalho realizado confirma que a eficiência energética deve ser entendida como um processo contínuo e integrado, mais do que um conjunto isolado de medidas. A metodologia aplicada e os resultados alcançados demonstram que é possível aliar ganhos ambientais e económicos, reforçando o contributo da EFACEC para os objetivos nacionais e europeus de transição energética e descarbonização.

## 4.2. Limitações e trabalhos futuros

Uma limitação identificada relaciona-se com a forma como a plataforma Sensorfact disponibiliza os dados energéticos. Apesar da elevada precisão das medições, não é possível extrair diretamente séries temporais extensas com granularidade ao minuto, como uma semana ou um mês completo. A exportação apenas é viável em intervalos curtos (ex.: uma hora de um determinado dia), o que dificulta a obtenção automática de indicadores importantes, como o número total de horas de operação e o cálculo de custo/hora real. Estes elementos trariam maior robustez à análise e permitiriam explorar outros níveis e parâmetros de comparação. Para ultrapassar esta limitação seria necessário recorrer a módulos adicionais de software não disponíveis durante o presente estudo.

Para além disso, importa referir que os períodos de comparação utilizados englobaram várias semanas de dados, assegurando robustez e consistência às análises. Ainda assim, em estudos futuros, seria desejável considerar períodos de amostragem mais longos, por exemplo, semestres completos antes e depois de cada intervenção — permitindo obter uma perspetiva mais abrangente e reduzir a influência de flutuações pontuais.

Finalmente, há a considerar que algumas medidas identificadas não foram ainda implementadas durante a fase de estudo, estando já calendarizadas como trabalhos futuros. Entre estas destaca-se a substituição do compressor de velocidade variável (VSD) atualmente inoperacional, cuja entrada em funcionamento está prevista para o mês de outubro, e a instalação de uma nova unidade de aquecimento de termofluido na instalação Vapour Phase Shell, com conclusão prevista no mês de setembro.

Estas intervenções deverão complementar o conjunto de melhorias já concretizadas e contribuir para ampliar os ganhos energéticos e ambientais identificados, reforçando a estratégia de eficiência e sustentabilidade da EFACEC.

## Referências

- ADENE. (2013). Guia Da Eficiência Energética. *Guia Da Eficiência Energética*, 94. [http://lisboaenova.org/escolaeficiente/pdfs/Guia\\_EE\\_ADENE.pdf](http://lisboaenova.org/escolaeficiente/pdfs/Guia_EE_ADENE.pdf)
- ADENE. (2016). Manual Prático - Eficiência Energética Em Sistemas De Ar Comprimido. *ADENE-Agência Para a Energia*, 76.
- Agency, I. E. (2021). Energy Efficiency 2021. In *Energy Efficiency 2021*.
- Ambiente, A. P. do. (2024a). *Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC)*. <https://apambiente.pt/clima/plano-nacional-de-energia-e-clima-pnec>
- Ambiente, A. P. do. (2024b). *RNC 2050*. <https://descarbonizar2050.apambiente.pt/>
- Carvalho, J. A. B. de. (2009). Eficiência Energética em Equipamentos de Força Motriz. *Neutro à Terra*, 3, 5–15. <https://doi.org/10.26537/neutroaterra.v0i3.310>
- Comissão Europeia. (2019). Pacto Ecológico Europeu. *Pacto Ecológico Europeu*, 1–27. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.
- Comissão Europeia. (2023). DIRETIVA (UE) 2023/1791. In *DIRETIVA (UE) 2023/1791* (Vol. 2015, Issue 8).
- Comissão Europeia. (2024a). *Eficiência energética (a partir de 2025)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:4699194>
- Comissão Europeia. (2024b). *Energy Efficiency Directive*. Energy Efficiency Directive. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en)
- Comissão Europeia. (2024c). *REPowerEU*. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en)
- Copco, A. (2015). *Atlas Copco Compressed Air Manual*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9888-8> © Atlas Copco Airpower NV, Belgium, 2015
- Costa, A. (2012). *Eficiência Energética em Ar Comprimido*.
- De Assis Dias, F., De Paula, H., Silva, C. E., & Seixas Vieira, M. (2020). *Sistema de Ventilação numa Planta de Produção de Aço: Estudo de Caso no Contexto da Eficiência Energética*. <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1628>
- DGEG. (2024a). Balanço Energético Nacional 2023. In *Balanço Energético Nacional 2023* (Vol. 1, Issue 4). <https://doi.org/10.59508/geoafrica.v1i4.56390>
- DGEG. (2024b). *Estratégias e Política Energética*. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas->

## Referências

- setoriais/energia/planeamento-energetico-e-seguranca-de-abastecimento/planeamento-e-politica-energetica/estrategias-e-politica-energetica/
- EDP. (2025). *Conheça a origem da energia*. <https://www.edp.pt/origem-energia/?sector=17026&year=2025&trimester=2>
- Efacec. (2024). *Quem Somos*. <https://www.efacec.pt/quem-somos/>
- European Environment Agency. (2023). *Forests, health and climate change*.
- European Environment Agency. (2024). *New data: CO2 emissions from new cars and vans further decrease as electric vehicle sales grow in Europe*. <https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/new-data-co2-emissions-of-new-cars-and-vans>
- Eurostat. (2025). *SDG 13 - Climate action*.
- Evencio, E., Albuquerque, F., Reis, M., Silva, M., & Fernandes, T. (2023). *Iluminação LED e os efeitos de sua expansão*. 5.
- Freitas, A. M. A. D. de. (2017). *Eficiência energética em sistemas de ar comprimido*.
- Freitas, R. S. P. de, Sarti, E. A. R., Silva, A. F. da, Pereira, A. C., Rodrigues, A. V., & Pereira, G. B. (2017). *QUEIMA DIRETA DO GLP COMO ALTERNATIVA A RECUPERAÇÃO DE CALOR DO VAPOR EM PROCESSO DE SECAGEM*.
- Galp. (2025). *Eletricidade e gás natural da Galp*. Método Utilizado Para Efeitos de Cálculo Das Emissões de CO2. <https://www.galp.com/pt/pt/empresas/eletricidade-e-gas/Apoio-ao-Cliente/Centro-de-Informacao/Eletricidade-e-Gas-Natural-da-Galp>
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 50001:2018*. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:50001:ed-2:v1:en>
- ISO/TC 242 Energy management. (2012). *Developers of ISO 50001 energy management standard honoured*.
- ISQ. (2012). *Apresentação da Norma NP EN ISO 50001*. <https://www.isq.pt/eventos-iniciativas/apresentacao-da-norma-np-en-iso-50001/>
- Jim Young. (2014). *Field Demonstration of High-Efficiency Gas Heaters*.
- Manutenção, R. (2024). *O custo real das fugas de ar comprimido – casos e exemplos*. 1.
- Ministério do Ambiente e da Ação Climática. (2024). *PNEC 2030. Plano Nacional Energia E Clima 2021-2030 (Pnec 2030), Pnec 2030*, 1–300.
- Nepomuceno, T. M. V. (2016). *Estudo da implementação de medidas de eficiência energética num hotel*. UNIVERSIDADE DE LISBOA FACULDADE DE CIÊNCIAS.
- Oikonomou, V., Becchis, F., Steg, L., & Russolillo, D. (2009). Energy saving and energy efficiency concepts for policy making. *Energy Policy*, 37(11), 4787–4796. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.035>
- Oliveira, M., & Verly, K. (2014). *Análise De Viabilidade Econômica Da Implantação Da Tecnologia Led Na Iluminação Pública De Ipanema-Mg. Monografia Submetida a Faculdade de Engenharia Elétrica Do Instituto Doctum de Educação e Tecnologia de Caratinga. Minas Gerais.*, 93.
- Oliveira, P. F. de L. (2018). *Análise de Eficiência dos Sistemas de Ar Comprimido em Unidades Industriais*.

## Referências

- Patterson, M., Singh, P., & Cho, H. (2022). The current state of the industrial energy assessment and its impacts on the manufacturing industry. *Energy Reports*, 8, 7297–7311. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.242>
- Republica, D. da. (2008). Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de Abril. *Act.Gov.Pt*, 2222–2226. [http://www.act.gov.pt/\(pt-PT\)/Itens/Noticias/Documents/Aviso\\_21616.pdf](http://www.act.gov.pt/(pt-PT)/Itens/Noticias/Documents/Aviso_21616.pdf)
- Republica, D. da. (2010). *Decreto-Lei n.º 50/2010*.
- Ronen, I. K. (2020). *Action research as a methodology for professional development in leading an educational process*. 64. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0191491X19302159?via%3DiHub>
- SGCIE. (2018). *PREn E REP – COMPROVATIVOS A APRESENTAR*. <https://sgcie.pt/prens-e-reps-comprovativos-a-apresentar/>
- Simões, P. S. V. (2013). *Eficiência Energética na Indústria Cimenteira e Otimização do Processo de Consignação de Equipamentos - Estágio na Cimpor - Indústria de Cimentos S.A.* 205.
- Spark, W. (2025). *Clima e condições meteorológicas médias em Porto no ano todo*. <https://pt.weatherspark.com/y/32397/Clima-característico-em-Porto-Portugal-durante-o-ano>
- United States Department of Energy. (2014). *Exercising Efficient Industrial Practices*.
- United States Department of Energy. (2021). *Energy Efficiency in Tarp and Packing Manufacturing*.
- Wohlin, C., & Runeson, P. (2021). Guiding the selection of research methodology in industry–academia collaboration in software engineering. *Information and Software Technology*, 140(June). <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2021.106678>



# Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Jónatas José de Oliveira Jesus

ISEP, Porto, 13 de setembro de 2025



# Apêndice A – Objetivos, Metas e Medidas PNEC 2030

Tabela 87 - Objetivos, Metas e Medidas PNEC 2030 (Ministério do Ambiente e da Ação Climática, 2024)

1. Descarbonizar a Economia Nacional	<p><b>Metas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Reduzir as emissões em 55% até 2030, em relação aos níveis de 2005;</li><li>- Garantir que 51% do consumo final bruto de energia provenha de fontes renováveis até 2030.</li></ul> <p><b>Medidas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Instalação de 2 a 2,5 GW de eletrolisadores até 2030 para aumentar a capacidade de produção de hidrogénio renovável para apoiar a integração na rede energética e em aplicações industriais;</li><li>- Implementação do Plano de Ação do Biometano (PAB) 2024-2040, que prevê o aumento da produção nacional de biometano para substituir progressivamente o gás natural fóssil;</li><li>- Aumentar a adoção de modos de transporte sustentáveis com a eletrificação de transportes públicos, incentivos para veículos elétricos e restringir a comercialização de veículos fósseis.</li></ul>
--------------------------------------	---

Tabela 87 (Cont.) – Objetivos, Metas e Medidas PNEC 2030 (Ministério do Ambiente e da Ação Climática, 2024)

<p>2. Dar Prioridade à Eficiência Energética</p>	<p><b>Metas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Consumo de energia primária não deverá exceder 16.711 ktep, que representa uma redução de 35% face ao cenário de referência da União Europeia para 2020;</li> <li>- Consumo de energia final é estipulado um limite máximo de 14.371 ktep, alinhado com as contribuições nacionais para as metas europeias.</li> </ul> <p><b>Medidas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementação da Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios (ELPRE), com foco na substituição de equipamentos de climatização e iluminação por tecnologias mais eficientes;</li> <li>- Auditorias energéticas obrigatórias através do Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) a instalações com consumo superior a 500 tep/ano, para identificar oportunidades de melhoria e quantificar potenciais ganhos energéticos e económicos (Republica, 2008);</li> <li>- Planos de Racionalização dos Consumos de Energia (PREn) e Relatórios de Execução e Progresso (REP) obrigatórios para as empresas abrangidas pelo SGCIE com metas claras para redução de consumo de energia (SGCIE, 2018);</li> <li>- Facilitar a adoção de medidas de eficiência energética, minimizando barreiras financeiras e técnicas através de apoios a contratos de desempenho energético.</li> </ul>
--	--

Tabela 87 (Cont.) – Objetivos, Metas e Medidas PNEC 2030 (Ministério do Ambiente e da Ação Climática, 2024)

<p>3. Reforçar a Aposta nas Energias Renováveis e Reduzir a Dependência Energética do País</p>	<p><b>Metas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 51% do consumo final bruto de energia proveniente de fontes renováveis até 2030;</li> <li>- 93% da eletricidade consumida em Portugal seja gerada a partir de energias renováveis até 2030;</li> <li>- Diminuir a dependência de combustíveis importados, que em 2022 representavam 71,2% do consumo energético nacional.</li> </ul> <p><b>Medidas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Atingir 20.8 GW de capacidade instalada em energia solar fotovoltaica, 15.1 GW em projetos centralizados (parques solares), 5.7 GW em instalações descentralizadas (autoconsumo e comunidades de energia);</li> <li>- Atingir 12.4 GW de capacidade instalada em energia eólica, 10.4 GW <i>onshore</i> (terrestre), 2.0 GW <i>offshore</i> (marítimo);</li> <li>- Investimento em sistemas de armazenamento de energia como bombagem (3.9 GW) e baterias (2.0 GW);</li> <li>- Reforço das redes elétricas para integrar e suportar o crescimento das energias renováveis e melhorar a eficiência da transmissão e distribuição.</li> </ul>
--	--

Tabela 87 (Cont.) – Objetivos, Metas e Medidas PNEC 2030 (Ministério do Ambiente e da Ação Climática, 2024)

<p>4. Garantir a Segurança de Abastecimento</p>	<p><b>Metas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Garantir um fornecimento contínuo de energia em todas as condições, incluindo picos de procura ou crises externas, como disrupções no fornecimento internacional;</li> <li>- Reservas estratégicas que cubram, no mínimo, 90 dias de consumo médio diário;</li> <li>- Atingir uma capacidade de interligação de 15% da capacidade instalada total até 2030;</li> <li>- Reduzir a dependência de combustíveis importados.</li> </ul> <p><b>Medidas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Manutenção de reservas estratégicas de gás natural em infraestruturas de armazenamento subterrâneo e terminais de gás natural liquefeito (GNL), de forma alinhar com níveis mínimos de armazenamento de gás estabelecido pela UE aos Estados-Membros;</li> <li>- Expansão da capacidade dos terminais de GNL em Sines;</li> <li>- Reforço das interligações energéticas com Espanha e outros países europeus, promovendo maior flexibilidade e segurança no sistema elétrico;</li> <li>- Modernizar a rede elétrica nacional para integrar tecnologias digitais avançadas que permitam monitorização em tempo real do fluxo de energia, identificar e responder automaticamente a falhas na rede e melhorar a previsão de procura.</li> </ul>
---	---

Tabela 87 (Cont.) – Objetivos, Metas e Medidas PNEC 2030 (Ministério do Ambiente e da Ação Climática, 2024)

<p>5. Promover a Mobilidade Sustentável</p>	<p><b>Metas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduzir em 29% a utilização de veículos particulares em zonas urbanas até 2030;</li> <li>- Promover alternativas complementares à mobilidade elétrica, em particular para os setores de transporte pesado de mercadorias rodoviário de longa distância;</li> <li>- Transferir 30% do transporte de mercadorias rodoviário para modos mais sustentáveis;</li> <li>- Estabelecer zonas de baixas emissões em todas as grandes cidades até 2030;</li> </ul> <p><b>Medidas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Instalar mais de 50 mil pontos de carregamento público até 2030;</li> <li>- Aumentar a incorporação de combustíveis alternativos, como biometano e hidrogénio verde, nos transportes pesado, marítimo e aéreo;</li> <li>- Restringir o acesso a veículos altamente poluentes promovendo transportes públicos de baixas emissões;</li> <li>- Investimento em infraestruturas logísticas e intermodais que favoreçam modos de transporte menos intensivos em carbono.</li> </ul>
<p>6. Promover uma Agricultura e Floresta Sustentáveis e Potenciar o Sequestro de Carbono</p>	<p><b>Metas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduzir as emissões de (GEE), com ênfase no metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), especialmente proveniente da pecuária e do uso de fertilizantes;</li> <li>- Aumentar o sequestro de carbono através da gestão ativa das florestas e solos agrícolas;</li> <li>- Preservar e reforçar os ecossistemas naturais para garantir a resiliência climática e a proteção da biodiversidade.</li> </ul> <p><b>Medidas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Incentivar técnicas de agricultura de precisão, que otimizam a utilização de recursos como água, fertilizantes e combustíveis;</li> <li>- Incentivo à gestão sustentável de resíduos agrícolas e florestais para transformação em biogás e biometano;</li> <li>- Implementar planos de reflorestação e arborização com espécies nativas, adaptadas às condições climáticas, para maximizar o sequestro de carbono.</li> </ul>

Tabela 87 (Cont.) – Objetivos, Metas e Medidas PNEC 2030 (Ministério do Ambiente e da Ação Climática, 2024)

<p>7. Desenvolver uma Indústria Inovadora e Competitiva</p>	<p><b>Metas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Descarbonizar a indústria promovendo a transição energética na indústria e integração de energias renováveis;</li> <li>- Aumentar a eficiência energética e modernização dos equipamentos;</li> <li>- Fomentar a inovação tecnológica e digitalização da indústria;</li> </ul> <p><b>Medidas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Promover a instalação de caldeiras e equipamentos industriais compatíveis com combustíveis renováveis (hidrogénio verde e biometano);</li> <li>- Subsídios e créditos fiscais para a aquisição de tecnologias de baixa emissão e criação de linhas de financiamento específicas para empresas que invistam em projetos de transição energética;</li> <li>- Obrigatórias as auditorias regulares para grandes consumidores através do SGCIE;</li> <li>- Promover o uso de tecnologias de captura de carbono (CCUS - <i>Carbon Capture, Utilization, and Storage</i>) em indústrias de elevado consumo energético.</li> </ul>
<p>8. Garantir uma Transição Justa, Equitativa, Democrática e Coesa</p>	<p><b>Metas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Assegurar que todas as regiões e comunidades beneficiam da transição energética, evitando desigualdades sociais e económicas;</li> <li>- Minimizar os impactos financeiros da transição energética sobre os consumidores mais vulneráveis, como custos associados à eletrificação e renovação de infraestruturas;</li> <li>- Desenvolver programas de formação profissional focados em tecnologias limpas e renováveis.</li> </ul> <p><b>Medidas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Criar programas de formação para trabalhadores de setores em transição para que possam integrar os novos mercados de trabalho em energias renováveis e tecnologias sustentáveis;</li> <li>- Expandir programas de tarifa social de energia elétrica para beneficiar famílias de baixos rendimentos;</li> <li>- Fornecer apoios para a instalação de sistemas de autoconsumo renovável;</li> <li>- Promover a transparência através de plataformas digitais que permitam aos cidadãos acompanhar o progresso das metas climáticas.</li> </ul>

## **Apêndice B – Lista de Equipamentos Monitorizados e Respetivas Características**

## Apêndice B

#	Machine name	Asset type	Group	Fused power	Nominal power range	Grid voltage
1	Compressor #1 Arroteia	Compressor	Compressed Air Production Center - Arroteia	200-600A	42-121kW	230/400V
2	Compressor #2 Arroteia	Compressor	Compressed Air Production Center - Arroteia	200-600A	42-121kW	230/400V
3	Compressor #3 Arroteia	Compressor	Compressed Air Production Center - Arroteia	200-600A	42-121kW	230/400V
4	Compressor Maia	Compressor	Compressed Air Production Center - Maia	60-200A	13-42kW	230/400V
5	Dedusting Core	Dedusting Installation	Core Insulation	60-200A	13-42kW	230/400V
6	Dedusting Shell	Dedusting Installation	Shell Insulation	60-200A	13-42kW	230/400V
7	Vacuum Unit	Vacuum Pumps	Vapour Phase - Core	0-60A	< 13kW	230/400V
8	Heiza VP Shell	Heating Unit	Vapour Phase - Shell	200-600A	42-121kW	230/400V
9	Aerial Painting Line	Aerial Painting Line	Welded Construction	200-600A	42-121kW	230/400V
10	Pickling PT	Pickling Installation	Painting & Pickling	200-600A	42-121kW	230/400V
11	Painting Cabin PT	Painting Cabin	Painting & Pickling	60-200A	13-42kW	230/400V
12	Chiller Lab #1	Chiller	PT Laboratory	200-600A	42-121kW	230/400V
13	Chiller Lab #2	Chiller	PT Laboratory	200-600A	42-121kW	230/400V
14	Chiller Core	Chiller	Core Building (Core Active Part Assembly)	200-600A	42-121kW	230/400V
15	Slitting Line	Precisioncut Robot	MC Cut	60-200A	13-42kW	230/400V
16	Shelling	CNC	Shell Insulation	0-60A	< 13kW	230/400V
17	Vapour Phase Core	Vapour Phase	Vapour Phase Core	200-600A	42-121kW	230/400V
18	HOS	Hot Oil Spray	HOS	200-600A	42-121kW	230/400V
19	Vapour Phase Shell	Vapour Phase	Vapour Phase Shell	200-600A	42-121kW	230/400V
20	TBA400	Precisioncut Robot	MC Cut	60-200A	13-42kW	230/400V

Figura 52 - Lista de equipamentos com monitorização elétrica e respetivas características

#	Metering point name	Group (optional)	IMP/M3	Meter brand & type
1	Aerial Painting Line	Aerial Painting Line	100	Instromet I-50
2	Painting Cabin PT	Painting Cabin PT	10	Common CPT-01

Figura 53 - Lista de equipamentos com monitorização de gás natural e respetivas características

## Apêndice C – Análise Inicial de Consumos SAC Arroteia

Durante o período em análise, da semana 43 a 50 de 2024, os consumos dos dois compressores de velocidade fixa (GA160 e GA200), que asseguram integralmente o fornecimento de ar comprimido devido à avaria do compressor VSD, foram monitorizados de forma contínua. Através da extração dos dados da plataforma *Sensorfact*, foi realizada análise dos consumos médios diários e da percentagem de contribuição de cada compressor no SAC, das oito semanas analisadas, conforme é possível observar nas Tabelas 88, 89 e 90.

Tabela 88 - Consumo médio diário do compressor GA160 da Arroteia (semanas 43 a 50 de 2024)

GA160	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	% no SAC	Máximo	Mínimo
2ªf	3424.56	342.46 €	88.8%	350.27 €	337.65 €
3ªf	3475.80	347.58 €	87.0%	355.39 €	340.08 €
4ªf	3418.44	341.84 €	85.9%	348.51 €	336.17 €
5ªf	3424.34	342.43 €	86.6%	353.29 €	337.60 €
6ªf	3411.49	341.15 €	86.8%	352.15 €	325.53 €
Sab	3249.28	324.93 €	91.1%	333.66 €	317.41 €
Dom	3193.45	319.34 €	91.3%	337.13 €	307.78 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>343.09 €</b>			
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>322.14 €</b>			

Tabela 89 - Consumo médio diário do compressor GA200 da Arroteia (semanas 43 a 50 de 2024)

GA200	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	% no SAC	Máximo	Mínimo
2ªf	432.23	43.22 €	11.2%	68.60 €	31.20 €
3ªf	519.73	51.97 €	13.0%	66.46 €	35.72 €
4ªf	559.14	55.91 €	14.1%	91.85 €	43.37 €
5ªf	530.65	53.07 €	13.4%	93.43 €	28.85 €
6ªf	520.96	52.10 €	13.2%	71.54 €	28.65 €
Sab	319.34	31.93 €	8.9%	43.45 €	26.15 €
Dom	305.33	30.53 €	8.7%	42.53 €	25.94 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>51.25 €</b>			
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>31.23 €</b>			

Apêndice C

Tabela 90 - Consumo médio diário do SAC da Arroteia (semanas 43 a 50 de 2024)

SAC Arroteia	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	3856.79	385.68 €	406.90 €	371.86 €
3ªf	3995.54	399.55 €	417.88 €	376.74 €
4ªf	3977.58	397.76 €	429.20 €	383.70 €
5ªf	3955.00	395.50 €	410.96 €	368.25 €
6ªf	3932.45	393.25 €	418.78 €	357.59 €
Sab	3568.62	356.86 €	377.11 €	343.64 €
Dom	3498.77	349.88 €	379.67 €	334.25 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>394.35 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>353.37 €</b>		

A Tabela 91 permite visualizar os consumos agregados por semana.

Tabela 91 - Consumo semanal do SAC da Arroteia (semanas 43 a 50 de 2024)

Consumo Semanal - 8 semanas (W43-W50)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
43	Compressor GA200	2997283.673	299.73 €
44	Compressor GA200	3056065.641	305.61 €
45	Compressor GA200	2899150.159	289.92 €
46	Compressor GA200	2996023.995	299.60 €
47	Compressor GA200	3545848.767	354.58 €
48	Compressor GA200	3625899.977	362.59 €
49	Compressor GA200	3326379.587	332.64 €
50	Compressor GA200	3052404.29	305.24 €
43	Compressor GA160	23697372.5	2,369.74 €
44	Compressor GA160	23249136	2,324.91 €
45	Compressor GA160	23490756.75	2,349.08 €
46	Compressor GA160	23555113.06	2,355.51 €
47	Compressor GA160	23833967.5	2,383.40 €
48	Compressor GA160	23395304.73	2,339.53 €
49	Compressor GA160	23506957.95	2,350.70 €
50	Compressor GA160	24050253.88	2,405.03 €

## Apêndice D – Custo “Off-Hours” SAC Maia

Na Tabela 92 é apresentado a estimativa de custo das *off-hours* do SAC da Maia.

Tabela 92 – Estimativa do custo *off-hours* do SAC da Maia

Horário	Consumo Médio kW/h
Laboração	0.96 €
<i>Off-Hours</i>	0.43 €

Dados	
Semanas de Trabalho	48
Semanas de Paragem	4
Semanas Ano	52
Horas de Laboração (6h-18h)	60
Prolongação Janela (18h-20)	10
Off-hours semana (20h-00h e 00h-6h e fim de semana)	98

Custo Previsto Semanal "Normal"	
Custo médio semanal (€)	104.04 €

Custos Previstos Anuais	
Laboração + Paragem + Prolongação	3,108.80 €
<i>Off-hours</i>	2,191.28 €
<b>Total</b>	<b>5,300.08 €</b>

Estes valores correspondem a uma distribuição horária de referência com 60 horas semanais de laboração, 10 horas de prolongamento (custo de 0,43 €/kW/h), considerando um total de 48 semanas de trabalho e 4 semanas de paragem anual para o tempo útil e 98 horas semanais em regime “*off-hours*”, considerando 52 semanas de operação contínua desnecessária. Esta análise demonstrou que cerca de 41% do custo anual de funcionamento do compressor ocorria fora do período produtivo, um valor que pode ser praticamente eliminado

## Apêndice E – Análise Inicial de Consumos SAC Maia

Foi realizada uma análise diária e semanal aos consumos reais do sistema ao longo de seis semanas (semana 46 a 51 de 2024). A Tabela 93 evidencia claramente o padrão de consumo do sistema ao longo da semana de laboração.

Tabela 93 - Consumo médio diário do SAC da Maia (semanas 46 a 51 de 2024)

SAC Maia	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	155.94	15.59 €	17.15 €	13.57 €
3ªf	157.83	15.78 €	17.37 €	13.50 €
4ªf	152.56	15.26 €	17.47 €	11.01 €
5ªf	160.96	16.10 €	17.62 €	11.81 €
6ªf	169.19	16.92 €	17.38 €	16.55 €
Sab	135.33	13.53 €	14.84 €	10.34 €
Dom	100.47	10.05 €	10.35 €	9.70 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>15.93 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>11.79 €</b>		

A partir dos dados recolhidos, foi possível calcular o custo médio diário nos dias úteis, que se situou em 159,3 kW/h, refletindo o funcionamento regular da instalação durante a semana. Esta estabilidade está alinhada com o perfil de produção esperado para o local, onde o compressor opera de forma contínua para garantir o fornecimento de ar comprimido às diversas áreas produtivas.

Ao contrário da estimativa anterior, baseada na suposição de que não existia atividade ao sábado, os dados reais evidenciam que alguns sábados registaram consumos comparáveis aos dias úteis, refletindo atividade intermitente ou parcial na instalação. A título de exemplo, na semana 46, o consumo de sábado foi de aproximadamente 139,3 kW/h e o de domingo de 96,9 kW/h, o que representa cerca de 85% e 61%, respetivamente, do consumo médio diário útil nessa mesma semana. Os dados evidenciam uma variação significativa entre sábados, com valores que oscilaram entre 103,4 kWh (mínimo) e 148,4 kWh (máximo). Esta diferença revela que, embora em alguns sábados não exista praticamente atividade, como demonstrado pelo consumo mínimo, próximo do consumo médio de domingo (100,5 kWh), existem outros casos em que há atividade parcial, ainda que inferior à de um dia útil completo, por norma das 06:00h às 14:00h.

Apêndice E

A Tabela 94 permite visualizar os consumos agregados por semana.

*Tabela 94 - Consumo semanal do SAC da Maia (semanas 46 a 51 de 2024)*

<b>Consumo Semanal - 6 semanas (W46-W51)</b>			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
46	Compressor Maia	955033.6354	95.50 €
47	Compressor Maia	1088198.197	108.82 €
48	Compressor Maia	1049083.306	104.91 €
49	Compressor Maia	1066610.915	106.66 €
50	Compressor Maia	921606.6707	92.16 €
51	Compressor Maia	1113148.942	111.31 €

## Apêndice F – Poupanças Estimadas Despoeiramento Core

Numa primeira abordagem, proposta pela empresa responsável pela instalação do variador de frequência, assumiu-se que a carga média do motor era de 90% da potência nominal (55 kW), conforme indicado na Tabela 95.

Tabela 95 - Funcionamento motor do ventilador do Despoeiramento Core

### Motor Despoeiramento Core Atualmente

Funcionamento h/dia	Total dias/mês	Total mês/ano	Total horas/ano	Potência do Motor kW	Carga média do motor	Consumo anual kW/h	Preço €/kWh	Custo total/ano
16	22	11	3872	55	90%	191664	0.10 €	19,166.40 €

Com a substituição do arrancador suave por um variador, o fator de potência ( $\cos \phi$ ) aumentaria de 0,80 para 1,00. Mantendo o número de horas de funcionamento anual (3.872 h/ano), e um preço da eletricidade de 0,10 €/kWh, estimou-se um consumo energético anual de 191.664 kWh e uma redução de custos de 3.833,28 €/ano, com um investimento de 4.230 €, o que corresponde a um retorno aproximado de a 1,1 anos, como é possível observar na Tabela 96.

Tabela 96 - Estimativa de poupança instalação de variador de frequência no Despoeiramento Core

### Trocar arrancador suave por variador de frequência

Cos fi do motor	Cos fi com VF	Diferença	Custo anual atual	Custo anual previsto	Custo economizado	Investimento VF	Retorno (anos)
80%	100%	20.0%	19,166.40 €	15,333.12 €	<b>3,833.28 €</b>	4,230.00 €	1.10

Numa segunda abordagem, proposta pelo próprio fornecedor da instalação de despoeiramento, foi considerado o impacto adicional da instalação de um transdutor de pressão diferencial, responsável por modular a velocidade do ventilador com base na carga real da rede. Esta solução, apresentada na Tabela 97, aliada à instalação de dois novos sistemas de

corte, o fornecedor estimou que permitiria reduzir o consumo do sistema em cerca de 20%: 10% atribuídos à otimização pelo transdutor e 10% por efeito da reconfiguração da rede.

*Tabela 97 - Estimativa de poupança instalação transdutor diferencial de pressão no Despoeiramento Core*

**Instalação de transdutor diferencial de pressão**

Custo	Poupança transdutor em (kW/h) (10%)	Preço €/kW/h	Utilização diária 16 horas, 22 dias/mês e 11 meses/ano (em horas)	Poupança	Payback (anos)
940.00 €	5.5	0.10 €	3872	<b>2,129.60 €</b>	0.44

**Instalação de sistemas de corte**

Custo	Poupança sistemas de corte (outros 10%)	Payback (anos)
2,238.00 €	<b>2,129.60 €</b>	1.05

## Apêndice G – Análise Inicial de Consumos Despoeiramento Core

. Na Figura 54, é visível o perfil típico de operação diária do ventilador. Observa-se que, ao longo da semana, o ventilador entra em funcionamento pouco antes das 06:00 e desliga-se ao final do turno, com um consumo contínuo entre 35 kW e 40 kW, próximo da potência nominal do motor (55 kW), apesar de não ser exigido o seu máximo desempenho durante todo o tempo. Isto representa uma carga média do motor de aproximadamente 73%, invés dos 90% estimados pelo parceiro.



Figura 54 - Perfil de consumo semanal na unidade de Despoeiramento do Core

Com base nos dados diários de consumo elétrico do sistema de despoeiramento do Core, é possível tirar conclusões importantes sobre o seu perfil de funcionamento. A Tabela 98 evidencia claramente o padrão de consumo do sistema ao longo da semana de laboração.

Tabela 98 - Consumo médio diário na unidade de Despoeiramento do Core (semanas 42 a 49 de 2024)

Despoeiramento Core	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	709.86	70.99 €	86.88 €	59.94 €
3ªf	736.83	73.68 €	85.22 €	59.48 €
4ªf	746.18	74.62 €	87.92 €	61.61 €
5ªf	781.83	78.18 €	86.10 €	61.05 €
6ªf	704.51	70.45 €	85.50 €	29.76 €
Sab	180.90	18.09 €	26.23 €	8.29 €
Dom	170.08	17.01 €	39.64 €	- €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>73.58 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>17.55 €</b>		

Nos dias úteis (segunda a sexta-feira), o consumo médio oscilou entre 70 €/kW/h e 78 €/kW/h por dia, refletindo a operação contínua do ventilador ao longo dos turnos de trabalho. Ao fim de semana, como seria expectável, registou-se uma redução significativa do consumo, com uma média de 17.55 €/kW/h. Estes valores correspondem à realização de apenas um turno pontual ou a operações limitadas, uma vez que, fora desses períodos, o sistema é desligado.

A Tabela 99 permite visualizar os consumos agregados por semana.

Tabela 99 - Consumo semanal da unidade de Despoeiramento do Core (semanas 42 a 49 de 2024)

Consumo Semanal - 8 semanas (W42-W51)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
42	Despoeiramento Core	3416828.342	341.68 €
43	Despoeiramento Core	4431290.644	443.13 €
44	Despoeiramento Core	3790937.539	379.09 €
45	Despoeiramento Core	4370621.101	437.06 €
46	Despoeiramento Core	4619854.011	461.99 €
47	Despoeiramento Core	4326436.867	432.64 €
48	Despoeiramento Core	3528168.206	352.82 €
49	Despoeiramento Core	3757347.734	375.73 €

## Apêndice H – Poupanças Estimadas Despoeiramento Shell

A Tabela 100 apresenta os principais parâmetros de funcionamento e custos do motor de despoeiramento Shell.

Tabela 100 - Funcionamento motor do ventilador do Despoeiramento Shell

### Motor Despoeiramento Shell Atualmente

Funcionamento h/dia	Total dias/mês	Total mês/ano	Total horas/ano	Potência do Motor (kW)	Carga média do motor	Consumo anual (kW/h)	Preço (€/kW/h)	Custo total/ano
16	22	11	3872	22	90%	76665.6	0.10 €	7,666.56 €

O parceiro técnico responsável considerou que, com a instalação de um sistema de controlo automático baseado em pressão, idêntico ao aplicado no sistema do Core, seria possível obter uma redução da potência média absorvida em cerca de 30%, conforme é possível observar na Tabela 101.

Tabela 101 - Estimativa de poupança instalação transdutor diferencial de pressão no Despoeiramento Shell

### Instalação de transdutor diferencial de pressão

Custo	Poupança transdutor em (kW/h) (10%)	Preço €/kW/h	Utilização diária 16 horas, 22 dias/mês e 11 meses/ano (em horas)	Poupança	Payback (anos)
940.00 €	5.5	0.10 €	3872	<b>2,129.60 €</b>	0.44

### Instalação de sistemas de corte

Custo	Poupança sistemas de corte (outros 10%)	Payback (anos)
2,238.00 €	<b>2,129.60 €</b>	1.05

# Apêndice I – Análise Inicial de Consumos

## Despoeiramento Shell

Na Figura 20, é visível o perfil típico de operação semanal do ventilador do despoeiramento do Shell.



Figura 55 - Perfil de consumo semanal na unidade de Despoeiramento do Shell

Observa-se que, ao longo da semana, à semelhança do Core, o ventilador entra em funcionamento pouco antes das 06:00h e desliga-se ao final do turno, com um consumo contínuo entre 12 kW. Isto representa uma carga média do motor de aproximadamente 64%.

A análise dos dados diários de consumo elétrico do sistema de despoeiramento do Shell, permite caracterizar de forma rigorosa o seu perfil de funcionamento e validar o diagnóstico energético elaborado. A Tabela 102 apresenta de forma clara o padrão de consumo ao longo da semana típica de laboração, evidenciando os períodos de maior e menor atividade do sistema.

Apêndice I

Tabela 102 - Consumo médio diário na unidade de Despoeiramento do Shell (semanas 42 a 50 de 2024)

Despoeiramento Shell	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	227.91	22.79 €	30.18 €	18.15 €
3ªf	219.92	21.99 €	27.22 €	19.25 €
4ªf	225.45	22.55 €	30.06 €	18.03 €
5ªf	233.64	23.36 €	31.92 €	19.04 €
6ªf	210.83	21.08 €	31.41 €	7.71 €
Sab	111.45	11.15 €	20.37 €	0.54 €
Dom	84.34	8.43 €	16.17 €	0.38 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>22.35 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>9.79 €</b>		

Os dados registados indicam um consumo médio diário de aproximadamente 227,9 kW/h, com alguns picos a ultrapassar os 300 kW/h. Este valor corresponde a um custo médio diário de 22,79 €. Em complemento, os dados semanais consolidados permitem uma visão mais abrangente. A Tabela 103 permite visualizar os consumos agregados por semana.

Tabela 103 - Consumo semanal da unidade de Despoeiramento do Shell (semanas 42 a 50 de 2024)

Consumo Semanal - 9 semanas (W42-W50)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
42	Despoeiramento Shell	1606703.721	160.67 €
43	Despoeiramento Shell	1028926.417	102.89 €
44	Despoeiramento Shell	1209639.912	120.96 €
45	Despoeiramento Shell	1098538.4	109.85 €
46	Despoeiramento Shell	1332240.575	133.22 €
47	Despoeiramento Shell	1408729.617	140.87 €
48	Despoeiramento Shell	1159108.368	115.91 €
49	Despoeiramento Shell	1409114.938	140.91 €
50	Despoeiramento Shell	1568848.554	156.88 €

# Apêndice J – Análise Inicial de Consumos

## Cabine PT

Com base na Figura 56 é visível o perfil típico de operação diária da cabine, onde se observa de forma clara a alternância entre os modos operacionais da Cabine do PT, evidenciada pelos diferentes patamares de potência elétrica registada ao longo do dia.



Figura 56 - Perfil de consumo elétrico semanal na Cabine de Pintura PT

A figura permite distinguir dois regimes distintos:

- Picos de consumo próximos dos 33/34 kW, que ocorrem de forma repetida e com duração delimitada, correspondem ao modo de pintura com ventilação ativa;
- Fases intermédias, com potência estabilizada entre 13 e 15 kW, correspondem ao modo estufa, ou seja, à fase de secagem térmica das peças pintadas. Neste regime, apenas os ventiladores de insuflação se mantêm ativos, assegurando a circulação de ar aquecido gerado pelo queimador a gás.

A Figura 57 mostra o perfil de consumo energético de gás natural da Cabine do PT, em euros, ao longo do dia 14 de novembro de 2024, o mesmo dia analisado na Figura 56. Os horários de maior consumo coincidem com os períodos intermédios anteriormente

## Apêndice J

identificados, correspondentes ao modo estufa, confirmando o padrão típico de funcionamento térmico da cabine.

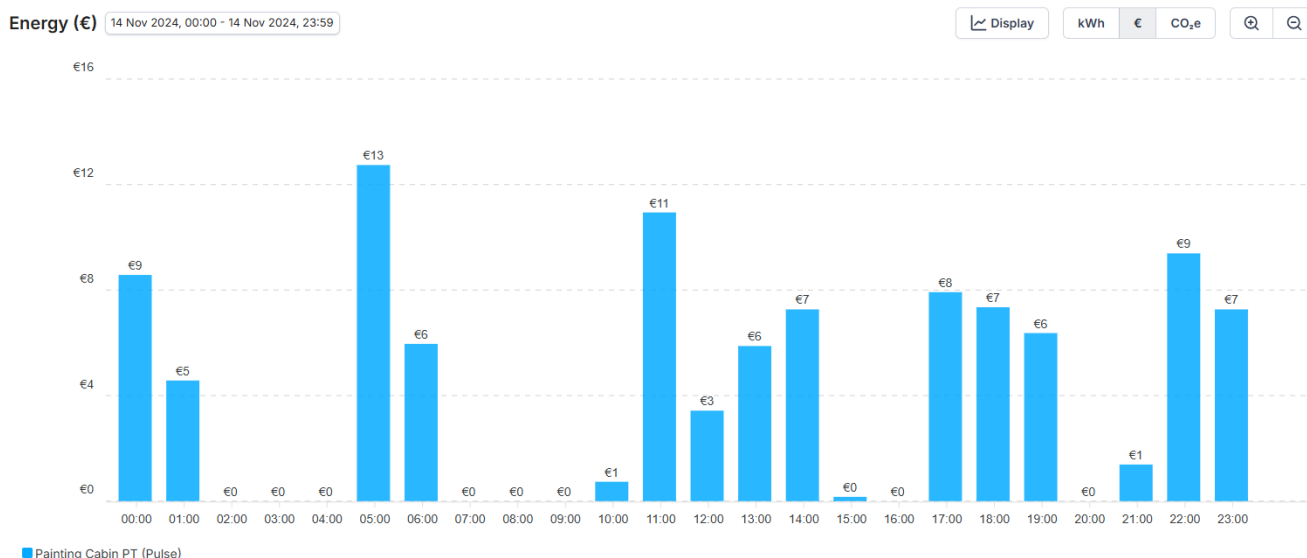


Figura 57 - Perfil de consumo de gás natural semanal na Cabine de Pintura PT

A Tabela 104 apresenta a evolução diária do consumo de gás na Cabine do PT ao longo das semanas analisadas.

Tabela 104 - Consumo médio diário de gás natural da Cabine de Pintura PT (semanas 45 a 51 de 2024)

Cabine PT	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	840.83	58.86 €	78.81 €	28.01 €
3ªf	882.83	61.80 €	106.74 €	27.44 €
4ªf	1276.33	89.34 €	144.63 €	39.85 €
5ªf	1133.67	79.36 €	100.21 €	41.90 €
6ªf	1081.17	75.68 €	107.96 €	55.37 €
Sab	398.17	27.87 €	96.29 €	- €
Dom	1106.83	77.48 €	169.30 €	- €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>73.01 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>52.68 €</b>		

Apesar de os consumos médios de gás ao fim de semana serem inferiores aos registados durante os dias úteis (52,68 €/dia face a 73,01 €/dia), os dados mostram que a Cabine do PT mantém um nível de atividade relevante também ao sábado e domingo, refletindo o modelo de laboração contínua em três turnos adotado pela instalação. Esta organização permite uma melhor distribuição da carga de trabalho e maior disponibilidade de operadores ao fim de semana, o que contribui para uma utilização mais intensiva da cabine fora do horário convencional. O consumo particularmente elevado ao domingo, com picos superiores a 160 €, deve-se, em grande parte, ao facto de muitas vezes se realizar pintura ao sábado, deixando as partes pintadas a secar durante a madrugada de sábado para domingo, para que o processo possa ser retomado logo no início do turno seguinte. Acresce ainda que, na amostra analisada

de sete semanas, foram registados vários domingos com atividade suplementar, o que reforça a ideia de que a cabine é utilizada de forma estratégica e intensiva durante todo o ciclo semanal.

A Tabela 105 permite visualizar os consumos agregados por semana dos consumos elétricos da cabine.

*Tabela 105 - Consumo semanal de gás natural da Cabine de Pintura PT (semanas 45 a 51 de 2024)*

<b>Consumo Semanal - 7 semanas (W45-W51)</b>			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
45	Cabine PT	4791503.844	335.41 €
46	Cabine PT	5958171.446	417.07 €
47	Cabine PT	4579170.34	320.54 €
48	Cabine PT	8741840.346	611.93 €
49	Cabine PT	7724506.196	540.72 €
50	Cabine PT	9429007.56	660.03 €
51	Cabine PT	5814671.331	407.03 €

A análise do consumo semanal de eletricidade da Cabine do PT evidencia uma variação significativa de carga energética, com valores compreendidos entre 320,54 € (semana 47) e 660,03 € (semana 50). Esta dispersão reflete a flutuação natural da carga de trabalho, com semanas de maior ou menor intensidade produtiva, que para além da pintura das cubas dos transformadores, a cabine é também utilizada para a pintura das restantes estruturas metálicas complementares, o que contribui para o aumento da variabilidade dos consumos. Acresce que, em determinadas situações, os mesmos operadores realizam igualmente operações de preparação de superfície, como a decapagem, o que afeta o número efetivo de ciclos de pintura realizados semanalmente.

Dando seguimento à caracterização energética da Cabine do PT, a Tabela 106 apresenta a evolução diária do consumo de eletricidade na Cabine do PT ao longo das semanas analisadas.

*Tabela 106 - Consumo médio diário de eletricidade da Cabine de Pintura PT (semanas 44 a 51 de 2024)*

<b>Cabine PT</b>	<b>Consumo Médio (kW/h)</b>	<b>Custo Médio (€)</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
2 <sup>af</sup>	435.10	43.51 €	49.39 €	35.08 €
3 <sup>af</sup>	364.73	36.47 €	43.36 €	29.33 €
4 <sup>af</sup>	368.34	36.83 €	46.44 €	29.25 €
5 <sup>af</sup>	384.43	38.44 €	45.41 €	34.18 €
6 <sup>af</sup>	349.11	34.91 €	47.22 €	25.21 €
Sab	159.36	15.94 €	39.51 €	3.22 €
Dom	232.08	23.21 €	39.49 €	6.24 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>38.03 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>19.57 €</b>		

Verifica-se uma pequena variação entre os diferentes dias da semana, com valores compreendidos entre aproximadamente 349 kW/h e 435 kW/h por dia. Estes consumos correspondem ao funcionamento dos ventiladores de extração e insuflação durante os modos

de pintura e estufa, bem como à iluminação da cabine. A média global situa-se em torno dos 380.3 kW/h/dia, o que representa um custo energético médio diário de 38,03 €. Ao longo do período analisado, a Cabine do PT apresentou uma potência média de 13,65 kW, refletindo o valor médio de carga elétrica sustentada durante o seu funcionamento regular.

A Tabela 107 permite visualizar os consumos agregados por semana dos consumos elétricos da cabine, como o nº de projetos trabalhado na semana.

*Tabela 107 - Consumo semanal de eletricidade da Cabine de Pintura PT (semanas 44 a 51 de 2024)*

<b>Consumo Semanal - 8 semanas (W44-W51)</b>			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
44	Cabine PT	1881089.342	188.11 €
45	Cabine PT	2192207.959	219.22 €
46	Cabine PT	2289644.452	228.96 €
47	Cabine PT	2171194.739	217.12 €
48	Cabine PT	2347998.961	234.80 €
49	Cabine PT	2464924.371	246.49 €
50	Cabine PT	2726882.427	272.69 €
51	Cabine PT	2271209.032	227.12 €

No caso da eletricidade, ao longo das oito semanas analisadas, o sistema registou um consumo total de 18.345 kW/h, correspondendo a um custo acumulado de 1.834,52 €. O consumo semanal oscilou entre cerca de 1.800 kW/h e 2.750 kW/h, refletindo variações associadas ao volume de produção. O consumo médio semanal foi de 2.293 kW/h, o que representa um custo médio de 229,31 €/semana.

## **Apêndice K – Layout Linha de Pintura Aérea**

Apêndice K

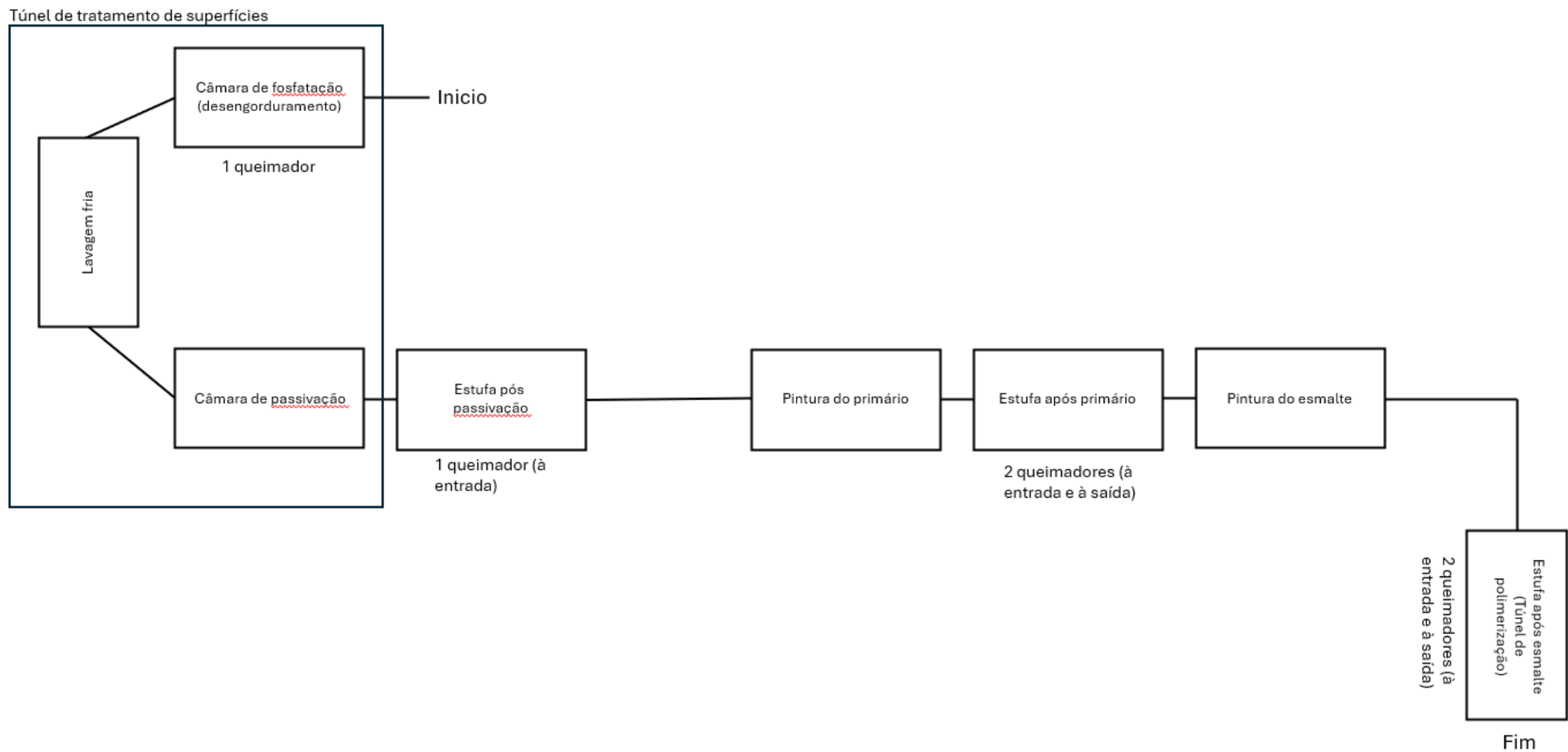


Figura 58 - Layout da Linha de Pintura Aérea

## Apêndice L – Poupanças Estimadas Linha de Pintura Aérea

Foi uma realizada estimativa com base num cenário que assume um regime de funcionamento intensivo da linha, 80 horas semanais (2 turnos) durante 48 semanas por ano, num total de 3.840 horas anuais.

Os cinco queimadores distribuídos pelas três estufas principais estão regulados para a potência máxima de 232kW por unidade, perfazendo um total de 1.160 kW instalados. Com base na observação do funcionamento real e nos ciclos de produção, estimou-se que os queimadores operam em média 15% do tempo por hora, ou seja, cerca de 9 minutos por hora, de forma a manter as temperaturas de processo estáveis. Considerando o regime de funcionamento anteriormente assumido, o consumo energético total estimado ascende a 13.920 kW/h por semana, conforme demonstrado nas Equações (3) e (4).

$$\text{Consumo médio queimadores p/hora} = (232 + 464 + 464) \times 0,20 = 174 \text{ kW/h} \quad (3)$$

$$\text{Consumo semanal estimado} = 174 \times 80 \text{ horas} = 13.920 \text{ kW/h/semana} \quad (4)$$

Com um custo unitário do gás de 0,07 €/kW/h, o custo semanal estimado em gás é de 974,40 €, resultando num custo anual teórico de 46.771,20 € (48 semanas).

A alteração do método de queima com a instalação de queimadores modulantes permite eliminar as perdas dos permutadores de calor e aumentar substancialmente o rendimento da combustão. De acordo com a experiência do parceiro técnico e referências bibliográficas, estima-se uma redução de 30% no consumo de gás, o que representa uma poupança semanal de 292,32 € ou 14.031,36 €/ano. A proposta para a alteração do método de queima das estufas da mesma linha foi apresentada com um valor total de 24.600 €.

As estimativas de poupança energética no TTS foram reformuladas com base numa abordagem mais representativa da operação real. A instalação, operando em dois turnos diários, totaliza aproximadamente 80 horas semanais de laboração. No entanto, os sistemas de aspersão eram tradicionalmente mantidos em funcionamento contínuo durante cerca de 50% desse tempo, ou seja, 40 horas semanais, independentemente da presença de peças. O consumo anual era, assim, de 35.520 kWh, de acordo com a seguinte Equação (5):

$$\text{Consumo anual (sem deteção)} = (7,5 + 5,5 + 5,5) \times 40 \text{ horas} \times 48 \text{ semanas} = 35.520 \text{ kW/h} \quad (5)$$

O TTS integra três bombas de aspersão associadas aos postos de tratamento (fosfatização, lavagem e passivação), com motores de 7,5 kW, 5,5 kW e 5,5 kW,

respetivamente, totalizando 18,5 kW de potência instalada. Importa referir que estas são ligadas em simultâneo sempre que no quadro principal o TTS é ativado, não sendo possível operá-los individualmente. Com a implementação do novo sistema de deteção de cubas, estas passariam a ser acionadas apenas durante a presença real de carga. Considerando que cada cuba é sujeita a 10 minutos de aspersão e que são tratadas 60 cubas por semana, o tempo útil de funcionamento reduz-se para apenas 10 horas semanais. Ou seja, assume-se nestas condições que nestas 30 horas. O novo consumo anual estimado é, assim, de acordo com a Equação (6):

$$\text{Consumo anual (com deteção)} = (7,5 + 5,5 + 5,5) \times 10 \text{ horas} \times 48 \text{ semanas} = 8.880 \text{ kW/h} \quad (6)$$

Este novo regime de operação permite, teoricamente, uma diminuição do consumo elétrico anual de 35.520 kWh para 8.880 kWh, o que se traduz numa redução 26.640 kWh e numa poupança anual de 2.664 €, assumindo um custo de 0,10 €/kW/h. A implementação do sistema de deteção de cubas na linha de pintura aérea foi orçamentada com um custo total de 4.500 €.

Além da energia elétrica, verificou-se também uma potencial redução significativa das perdas térmicas. No sistema anterior, o queimador de 300 kW responsável por manter a temperatura do banho de desengorduramento funcionava continuamente durante toda a operação da linha. No entanto, com a introdução do novo sistema de deteção de cubas, a menor agitação dos banhos e menor reposição de água contribuem a limitar as perdas térmicas associadas ao funcionamento em vazio. Dado que é difícil quantificar diretamente essas perdas, foi adotada uma abordagem conservadora, assumindo que a intervenção permite reduzir em apenas 2% o tempo de funcionamento total do queimador.

O cálculo da energia térmica anual evitada ( $E_t$ ) faz-se através das Equações (7) e (8):

$$E_t = 300 \text{ kW} \times 2\% \times (40 - 10) \text{ horas/semana} \times 48 \text{ semanas} \quad (7)$$

$$E_t = 300 \times 0,02 \times 30 \times 48 = 8.640 \text{ kW/h/ano} \quad (8)$$

Aplicando o custo do gás natural de 0,07 €/kW/h, obtém-se uma poupança adicional de 605 €/ano, apenas com base na redução das perdas energéticas associadas ao funcionamento em vazio.

## Apêndice M – Análise Inicial de Consumos

### Linha de Pintura Aérea

A Tabela 108 apresenta a evolução diária do consumo de gás natural da linha de pintura ao longo das semanas analisadas.

Tabela 108 - Consumo médio diário de gás natural da Linha de Pintura Aérea (semanas 43 a 2 de 2024/2025)

Linha de Pintura (Gás)	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	3022.87	211.60 €	527.40 €	0.00 €
3ªf	2549.13	178.44 €	397.47 €	0.00 €
4ªf	3745.59	262.19 €	491.88 €	57.82 €
5ªf	3388.94	237.23 €	380.24 €	69.17 €
6ªf	3582.68	250.79 €	533.77 €	0.00 €
Sab	1016.60	71.16 €	430.63 €	0.00 €
Dom	183.21	12.82 €	102.82 €	0.00 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>228.05 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>41.99 €</b>		

Observa-se que o consumo médio de gás ao longo da semana de trabalho apresenta uma variação significativa entre os diferentes dias úteis, situando-se entre 2.549 kWh e 3.745 kWh por dia. O custo médio diário nestes dias atinge 228,05 €/dia. Já ao fim de semana, os consumos reduzem-se drasticamente, com 1016,60 kWh ao sábado e apenas 183,21 kWh ao domingo, o que se traduz num custo médio de apenas 41,99 €/dia. Esta diferença acentuada confirma a menor atividade produtiva ao fim de semana.

A Tabela 109 permite visualizar os consumos agregados por semana dos consumos de gás natural da linha de pintura.

Tabela 109 - Consumo semanal de gás natural da Linha de Pintura Aérea (semanas 43 a 2 de 2024/2025)

Consumo Médio Semanal - 30 semanas (W43-W51 & W2-W22)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
43	Linha de Pintura Aérea	15853846.05	1,109.77 €
44	Linha de Pintura Aérea	11200009.01	784.00 €
45	Linha de Pintura Aérea	7973006.389	558.11 €
46	Linha de Pintura Aérea	15081512.1	1,055.71 €
47	Linha de Pintura Aérea	13542677.53	947.99 €

Apêndice M

Tabela 109 (Cont.) – Consumo semanal de gás natural da Linha de Pintura Aérea (semanas 43 a 2 de 2024/2025)

48	Linha de Pintura Aérea	19752849.18	1,382.70 €
49	Linha de Pintura Aérea	14425844.91	1,009.81 €
50	Linha de Pintura Aérea	19168348.71	1,341.78 €
51	Linha de Pintura Aérea	16884013.54	1,181.88 €
2	Linha de Pintura Aérea	15303179.02	1,071.22 €
3	Linha de Pintura Aérea	18562848.22	1,299.40 €
4	Linha de Pintura Aérea	22443184.67	1,571.02 €
5	Linha de Pintura Aérea	22773351.6	1,594.13 €
6	Linha de Pintura Aérea	20848350.06	1,459.38 €
7	Linha de Pintura Aérea	18260681.31	1,278.25 €
8	Linha de Pintura Aérea	21613684	1,512.96 €
9	Linha de Pintura Aérea	22629851.49	1,584.09 €
10	Linha de Pintura Aérea	14780511.86	1,034.64 €
11	Linha de Pintura Aérea	20526349.8	1,436.84 €
12	Linha de Pintura Aérea	19435515.59	1,360.49 €
13	Linha de Pintura Aérea	17981847.76	1,258.73 €
14	Linha de Pintura Aérea	22400017.97	1,568.00 €
15	Linha de Pintura Aérea	21375683.81	1,496.30 €
16	Linha de Pintura Aérea	13147177.21	920.30 €
17	Linha de Pintura Aérea	16499013.24	1,154.93 €
18	Linha de Pintura Aérea	9552674.33	668.69 €
19	Linha de Pintura Aérea	13415510.76	939.09 €
20	Linha de Pintura Aérea	20632516.55	1,444.28 €
21	Linha de Pintura Aérea	17241013.78	1,206.87 €
22	Linha de Pintura Aérea	21365183.81	1,495.56 €

Procede-se agora à avaliação do consumo elétrico da linha de pintura, cujos dados médios diários são apresentados na Tabela 110.

Tabela 110 - Consumo médio diário de eletricidade da Linha de Pintura Aérea (semanas 43 a 2 de 2024/2025)

Linha de Pintura (Eletricidade)	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	476.70	47.67 €	74.50 €	10.13 €
3ªf	401.89	40.19 €	76.74 €	0.00 €
4ªf	533.53	53.35 €	84.60 €	12.01 €
5ªf	521.29	52.13 €	74.47 €	19.74 €
6ªf	529.75	52.98 €	83.52 €	1.51 €
Sab	130.40	13.04 €	32.14 €	0.00 €
Dom	23.25	2.33 €	17.49 €	0.00 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>49.26 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>7.68 €</b>		

Na análise dos consumos diários de eletricidade da linha de pintura aérea, observa-se um perfil semelhante ao identificado no consumo de gás, embora em menor escala de variação. Durante os dias úteis (de segunda a sexta-feira), o custo médio diário situa-se em 49,26 €, com um consumo médio entre 401,89 kWh e 533,53 kWh. Ao fim de semana, o consumo elétrico desce significativamente, com valores médios de apenas 13,04 € ao sábado e 2,33 € ao domingo, o que confirma uma redução acentuada da atividade.

A Tabela 111 permite visualizar os consumos agregados por semana dos consumos elétricos da linha de pintura.

*Tabela 111 - Consumo semanal de eletricidade da Linha de Pintura Aérea (semanas 43 a 2 de 2024/2025)*

<b>Consumo Médio Semanal - 30 semanas (W43-W51-W2-W22)</b>			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
43	Linha de Pintura	2405107.125	240.51 €
44	Linha de Pintura	1963111.24	196.31 €
45	Linha de Pintura	1292282.89	129.23 €
46	Linha de Pintura	2516536.087	251.65 €
47	Linha de Pintura	2251332.865	225.13 €
48	Linha de Pintura	3268105.651	326.81 €
49	Linha de Pintura	2234804.776	223.48 €
50	Linha de Pintura	2926196.42	292.62 €
51	Linha de Pintura	2695973.175	269.60 €
2	Linha de Pintura	2053217.479	205.32 €
3	Linha de Pintura	2802533.326	280.25 €
4	Linha de Pintura	2701946.852	270.19 €
5	Linha de Pintura	3039545.739	303.95 €
6	Linha de Pintura	2746982.289	274.70 €
7	Linha de Pintura	2509590.376	250.96 €
8	Linha de Pintura	3352421.064	335.24 €
9	Linha de Pintura	3455541.563	345.55 €
10	Linha de Pintura	2056096.503	205.61 €
11	Linha de Pintura	3376868.623	337.69 €
12	Linha de Pintura	2997176.721	299.72 €
13	Linha de Pintura	2880627.525	288.06 €
14	Linha de Pintura	3484310.249	348.43 €
15	Linha de Pintura	3106064.757	310.61 €
16	Linha de Pintura	1818108.6	181.81 €
17	Linha de Pintura	2424612.565	242.46 €
18	Linha de Pintura	1870952.682	187.10 €
19	Linha de Pintura	2003348.072	200.33 €
20	Linha de Pintura	2746976.251	274.70 €
21	Linha de Pintura	2514604.087	251.46 €
22	Linha de Pintura	3009418.613	300.94 €

## **Apêndice N – Poupanças Estimadas Chiller Core & Chillers Lab. PT**

Assumindo um regime de funcionamento de 13 horas por dia, 7 dias por semana, durante 52 semanas, o que totaliza 4.745 horas de operação anuais. No caso do Core, o consumo previsto desce de 309.897 kW/h/ano para 287.894 kW/h/ano, o que representa uma poupança de 22.003 kW/h/ano (cerca de 7,1%). Já no Laboratório do PT, a redução estimada é de 559.267 kW/h/ano para 420.568 kW/h/ano, traduzindo-se numa poupança de 138.699 kW/h/ano (cerca de 24.8%).

Com base neste cenário, foram estimadas poupanças anuais de 2.200 € no Core e 13.870 € no Laboratório PT, considerando unicamente a redução no consumo energético dos novos chillers face aos antigos.

Além disso, no decorrer da análise do chiller do Core, foi detetado que este e as bombas de circulação de água gelada operavam ininterruptamente 24 horas por dia, sete dias por semana, independentemente da existência ou não de carga térmica, uma vez que não dispunha de um sistema que regulasse a sua operação em função da real necessidade de arrefecimento das instalações que servia. Tal situação configurava um consumo energético em vazio significativo, sem qualquer benefício operacional, agravando o impacto económico e ambiental da sua utilização.

Com base na análise do perfil de potência elétrica apresentado na Figura 59, observa-se que, mesmo em dias sem atividade nas três instalações de secagem do Core (como verificado a 27 de dezembro de 2024), o chiller manteve um padrão de funcionamento intermitente, com uma potência média em torno de 12,77 kW.

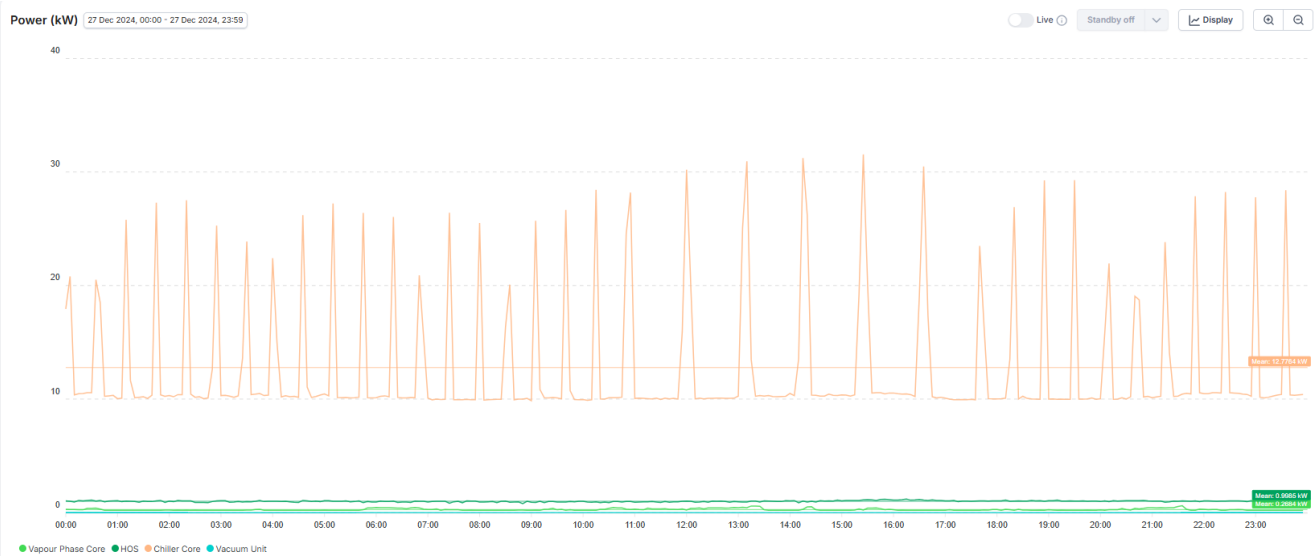


Figura 59 - Perfil de consumo do chiller do Core em dias sem atividade produtiva

Esta situação resulta do acionamento periódico do compressor para manter a água refrigerada à temperatura de *setpoint* (10 °C), bem como do funcionamento contínuo de uma das bombas de circulação de 11 kW, mesmo na ausência de carga térmica. Admitindo uma estimativa conservadora de que este tipo de operação ocorre durante 10% do tempo total anual, é possível estimar o consumo energético evitável associado.

O número de horas anuais de funcionamento em vazio é calculado pela Equação (9):

$$h_{vazio} = 24 \times 365 \times 0.10 = 876 \text{ horas/ano} \quad (9)$$

Considerando uma potência média de 12,77 kW e um custo 0,10 €/kW/h durante estes períodos, o consumo energético evitável anual, é obtido pela Equação (10):

$$Custo_{vazio} = 12,77 \text{ kW} \times 876 \text{ h} \times 0,10 \text{ €/kW/h} = 1.118,52 \text{ €/ano} \quad (10)$$

De acordo com esta estimativa, a eliminação do funcionamento do chiller em períodos sem carga térmica poderá representar uma poupança anual adicional de aproximadamente 1.118 €.

Para maximizar os ganhos de eficiência e evitar o funcionamento em vazio do novo chiller do Core, foi idealizado um sistema de passagem de sinal que permite ao chiller receber a informação em tempo real sobre a necessidade de arrefecimento, com base no estado operacional das três instalações que serve. Este sistema, permite desligar automaticamente o chiller e as bombas de circulação sempre que não exista carga térmica real, eliminando os consumos desnecessários em vazio que caracterizavam a operação anterior.

No Laboratório PT, o sistema de circulação de água gelada já incluía, à data da substituição dos chillers, um sistema de controlo automático que assegurava que tanto o chiller como as bombas de circulação apenas operavam quando os alternadores de ensaio se encontravam ativos. Este sistema, está também configurado para garantir uma gestão equilibrada da operação, fazendo com que arrancasse sempre a bomba com menos horas acumuladas de funcionamento, promovendo assim a distribuição uniforme do desgaste.

# Apêndice O – Análise Inicial de Consumos

## Chiller Core & Chillers Lab. PT

Na Tabela 112, é possível analisar os consumos médios diários do chiller antigo do Core, com base numa amostra de 14 semanas compreendidas entre a semana 43 de 2024 e a semana 4 de 2025.

Tabela 112 - Consumo médio diário do Chiller do Core (semanas 43 a 4 de 2024/2025)

Chiller Core	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	488.10	48.81 €	70.76 €	30.15 €
3ªf	420.79	42.08 €	75.51 €	30.16 €
4ªf	476.45	47.64 €	80.19 €	30.24 €
5ªf	455.23	45.52 €	70.48 €	30.27 €
6ªf	537.28	53.73 €	85.18 €	30.66 €
Sab	591.22	59.12 €	79.71 €	30.62 €
Dom	542.79	54.28 €	80.52 €	30.63 €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>47.56 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>56.70 €</b>		

A análise permite observar uma certa regularidade nos dias úteis, com um custo médio diário de 47,56 €, contrastando com um valor mais elevado ao fim de semana, cujo custo médio combinado ascende a 56,70 €. Esta diferença deve-se ao facto de ser prática comum na Efacec deixar processos de secagem a decorrer durante o fim de semana, nomeadamente nas instalações servidas por este chiller, o que mantém o equipamento em funcionamento efetivo por longos períodos nestes dias.

Por outro lado, destaca-se a uniformidade dos valores mínimos diários, todos eles situados na ordem dos 30 €, o que corresponde ao custo do funcionamento do chiller em vazio, ou seja, quando não há carga térmica real a justificar o seu funcionamento. Esta constatação é reforçada pelo exemplo do dia 27 de dezembro de 2024, data em que todas as instalações estavam paradas, e o consumo médio registado foi de 12,77 kW/h, resultando num custo diário de aproximadamente 30 €, valor idêntico ao dos mínimos da tabela. Este padrão confirma que o chiller operava de forma contínua, mesmo quando não existia necessidade de arrefecimento, originando consumos energéticos sem utilidade produtiva.

A Tabela 113 permite visualizar os consumos agregados por semana semanais do chiller antigo do Core ao longo das 14 semanas.

Tabela 113 - Consumo semanal do Chiller do Core (semanas 43 a 4 de 2024/2025)

Consumo Médio Semanal - 14 semanas (W43-W4)			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
43	Chiller Core	3840916.919	384.09 €
44	Chiller Core	4249429.688	424.94 €
45	Chiller Core	3166885.258	316.69 €
46	Chiller Core	4253828.438	425.38 €
47	Chiller Core	3869286.267	386.93 €
48	Chiller Core	4094580.75	409.46 €
49	Chiller Core	3156191.107	315.62 €
50	Chiller Core	3814684.833	381.47 €
51	Chiller Core	3083942.936	308.39 €
52	Chiller Core	2449901.074	244.99 €
1	Chiller Core	2663090.376	266.31 €
2	Chiller Core	3297610.058	329.76 €
3	Chiller Core	3797673.753	379.77 €
4	Chiller Core	3428001.523	342.80 €

Apresentam-se seguidamente as Tabelas 114, 115 e 116, correspondentes, respetivamente, aos consumos médios diários dos dois chillers independentes instalados no Laboratório dos Grandes Transformadores, bem como à agregação dos consumos totais combinados de ambos os equipamentos. Estas tabelas foram elaboradas com base numa amostra semanal de 14 semanas, à semelhança da análise do Core, da semana 43 de 2024 à semana 4 de 2025.

Tabela 114 - Consumo médio diário do Chiller nº 1 do Laboratório PT (semanas 43 a 4 de 2024/2025)

Chiller Lab #1	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	% Chillers	Máximo	Mínimo
2ªf	278.28	27.83 €	37.8%	87.43 €	- €
3ªf	161.42	16.14 €	31.6%	149.34 €	- €
4ªf	104.40	10.44 €	41.8%	86.21 €	- €
5ªf	83.88	8.39 €	29.3%	34.32 €	- €
6ªf	174.36	17.44 €	34.7%	112.50 €	- €
Sab	46.94	4.69 €	19.0%	37.03 €	- €
Dom	29.90	2.99 €	35.2%	41.87 €	- €
<b>Custo Médio Diário - Semana de Trabalho</b>		<b>16.05 €</b>			
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>3.84 €</b>			

Apêndice O

Tabela 115 - Consumo médio diário do Chiller nº 2 do Laboratório PT (semanas 43 a 4 de 2024/2025)

Chiller Lab #2	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	% Chillers	Máximo	Mínimo
2ªf	457.93	45.79 €	62.2%	159.59 €	- €
3ªf	349.99	35.00 €	68.4%	159.01 €	- €
4ªf	145.14	14.51 €	58.2%	99.11 €	- €
5ªf	201.93	20.19 €	70.7%	59.79 €	- €
6ªf	328.26	32.83 €	65.3%	115.34 €	- €
Sab	200.59	20.06 €	81.0%	197.46 €	- €
Dom	55.08	5.51 €	64.8%	68.78 €	- €
<b>Custo Médio Diário - Semana de Trabalho</b>		<b>29.67 €</b>			
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>12.78 €</b>			

Tabela 116 - Consumo médio diário dos Chillers do Laboratório PT (semanas 43 a 4 de 2024/2025)

Chillers Lab. PT	Consumo Médio (kW/h)	Custo Médio (€)	Máximo	Mínimo
2ªf	736.21	73.62 €	247.02 €	- €
3ªf	511.41	51.14 €	282.27 €	- €
4ªf	249.55	24.95 €	185.32 €	- €
5ªf	285.82	28.58 €	82.82 €	- €
6ªf	502.62	50.26 €	194.62 €	- €
Sab	247.53	24.75 €	234.49 €	- €
Dom	84.98	8.50 €	110.65 €	- €
<b>Custo Médio Diário - Dias Úteis</b>		<b>45.71 €</b>		
<b>Custo Médio Diário - Fim de Semana</b>		<b>16.63 €</b>		

A análise individual revela diferenças operacionais marcadas entre os dois chillers. O Chiller Lab #1 apresenta valores de consumo diário bastante baixos, com um custo médio durante a semana de apenas 16,05 €, e uma utilização significativamente reduzida ao fim de semana de 3,84 € em média. Este padrão está diretamente associado ao facto de se tratar do equipamento mais degradado, cuja performance estava já altamente comprometida e considerada tecnicamente irrecoverável. Por contraste, o Chiller Lab #2 regista consumos superiores, com valores médios semanais de 29,67 € e 12,78 € ao fim de semana, indicando que é este o equipamento mais frequentemente em operação, com níveis de carga mais elevados e com percentagens de funcionamento do sistema acima de 60% na maioria dos dias.

Quando se observa o valor agregado de ambos os chillers, obtém-se uma média de 45,71 € por dia útil e 16,63 € ao fim de semana. A diferença entre os dias úteis e os fins de semana deve-se ao facto de a atividade laboral no laboratório ocorrer quase exclusivamente durante os dias úteis. Já a variação observada entre os próprios dias da semana está relacionada com o tipo de ensaio realizado e, sobretudo, com a capacidade do transformador em teste, fatores que influenciam diretamente a duração dos ensaios e a carga térmica imposta ao sistema de arrefecimento.

Apêndice O

Apresenta-se seguidamente a Tabela 117, onde se agregam os consumos semanais dos dois chillers instalados no Laboratório do PT, ao longo das 14 semanas de amostra.

*Tabela 117 - Consumo semanal dos Chillers do Laboratório PT (semanas 43 a 4 de 2024/2025)*

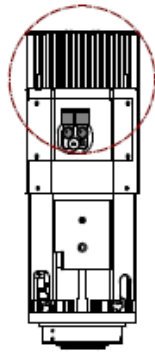
<b>Consumo Médio Semanal - 14 semanas (W43-W4)</b>			
Semana	Equipamento	Valor (Wh)	Custo
43	Chiller Lab #1	3551485.199	355.15 €
44	Chiller Lab #1	433466.6252	43.35 €
45	Chiller Lab #1	538420.8004	53.84 €
46	Chiller Lab #1	357605.2639	35.76 €
47	Chiller Lab #1	282387.6755	28.24 €
48	Chiller Lab #1	2226978.449	222.70 €
49	Chiller Lab #1	1155744.825	115.57 €
50	Chiller Lab #1	888920.1019	88.89 €
51	Chiller Lab #1	635954.0252	63.60 €
52	Chiller Lab #1	829407.6002	82.94 €
1	Chiller Lab #1	813009.7492	81.30 €
2	Chiller Lab #1	121610.7751	12.16 €
3	Chiller Lab #1	425167.6508	42.52 €
4	Chiller Lab #1	48513.89997	4.85 €
43	Chiller Lab #2	6132299.099	613.23 €
44	Chiller Lab #2	333815.0997	33.38 €
45	Chiller Lab #2	334988.1002	33.50 €
46	Chiller Lab #2	343330.1999	34.33 €
47	Chiller Lab #2	750447.4501	75.04 €
48	Chiller Lab #2	3238276.953	323.83 €
49	Chiller Lab #2	2785436.85	278.54 €
50	Chiller Lab #2	1923354.3	192.34 €
51	Chiller Lab #2	1172579.1	117.26 €
52	Chiller Lab #2	1651870.348	165.19 €
1	Chiller Lab #2	2019592.049	201.96 €
2	Chiller Lab #2	509904.8252	50.99 €
3	Chiller Lab #2	1220033.85	122.00 €
4	Chiller Lab #2	1929113.729	192.91 €

# **Anexo A – Especificação Técnica - HSD Mechatronics, Modelo ES929 4P**

### 5.5.2 Pneumatic connection points

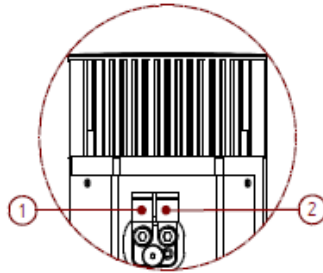
#### 5.5.2.1 ES915, ES919, ES925, ES929, ES983, ES988

##### 5.5.2.1.1 Versions with connectors on cylinder

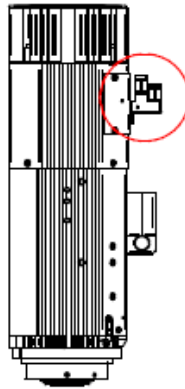


Ref.	Description	Pressure	Pipe Ø
1	Tool ejection (piston forward)	6* bar	Ø8x6
2	Cone pressurisation and cleaning	4 bar	Ø8x6

\*For ES983 only: 9 bar

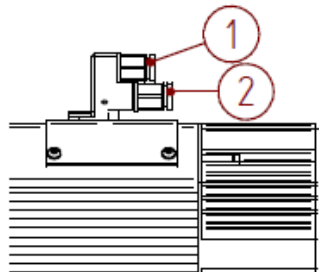


##### 5.5.2.1.2 Versions with connectors on vertical block

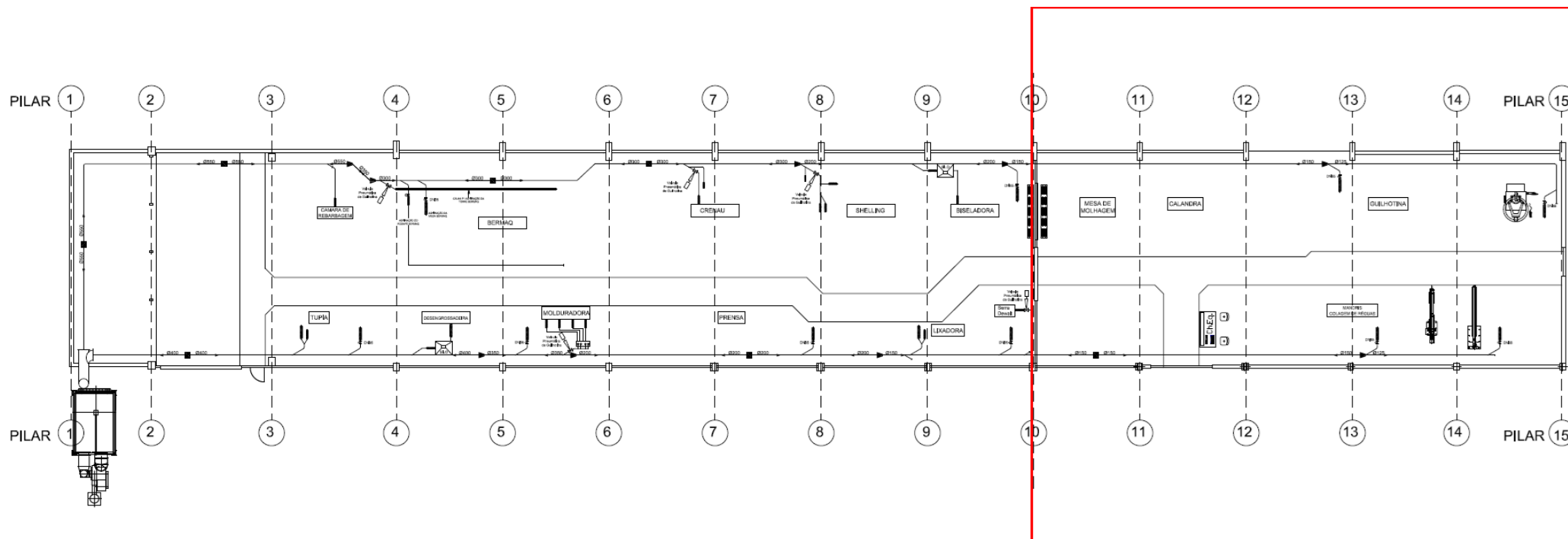


Ref.	Description	Pressure	Pipe Ø
1	Tool ejection (piston forward)	6* bar	Ø8x6
2	Cone pressurisation and cleaning	4 bar	Ø8x6


\*For ES983 only: 9 bar



## Anexo B – Layout da Área – Despoeiramento Core



## **Anexo C – Cálculo de Perda de Carga - Despoeiramento Core**

	CÁLCULO DE INSTALAÇÃO DE DESPOEIRAMENTO
---	---

CLIENTE: EFACEC - CORE Nº DE OBRA: \_\_\_\_\_

Velocidade maxima (m/s)	25
Pressão Dinamica (mm.c.a.)	39

Somatório das secções	600
Caudal maximo (m3/s)	7,1
Caudal maximo (m3/h)	25447

Ø	Tubo			Calça			Curva		
	Material Quant (m)	Chapa Nº Per. Car. (mmca)	Ver IT Total Per. Car.	Material Quant uni	Chapa Nº Per. Car. (mmca)	Ver IT Total Per. Car.	Material Quant uni	Chapa Nº Per. Car. (mmca)	Ver IT Total Per. Car.
100		7,2		9	3,9	35	5	9,7	49
130	17	5,5	94						
150	18	4,8	77						
180		4,0							
200	10	3,8	38						
220		3,3							
250		2,9							
280		2,8							
300	22	2,4	53						
320		2,2							
350	2	2,1	4						
400		1,8							
420		1,7							
450		1,8							
500		1,4							
550	25	1,3	33						
600	7,5	1,2	9						
650		1,1							
700		1,0							
750		1,0							
800		0,9							
850		0,8							
900		0,8							

Area Filtrante (m2)	
T.Trabalho (m3/m2)	#DIV/0!

Perda de Carga (mm.c.a.)	
1ª Entrada	30
Ciclone	
Filtro	80
Factor util. inst. (%)	

Perda de Carga Total (mm.c.a.)	538
--------------------------------	-----

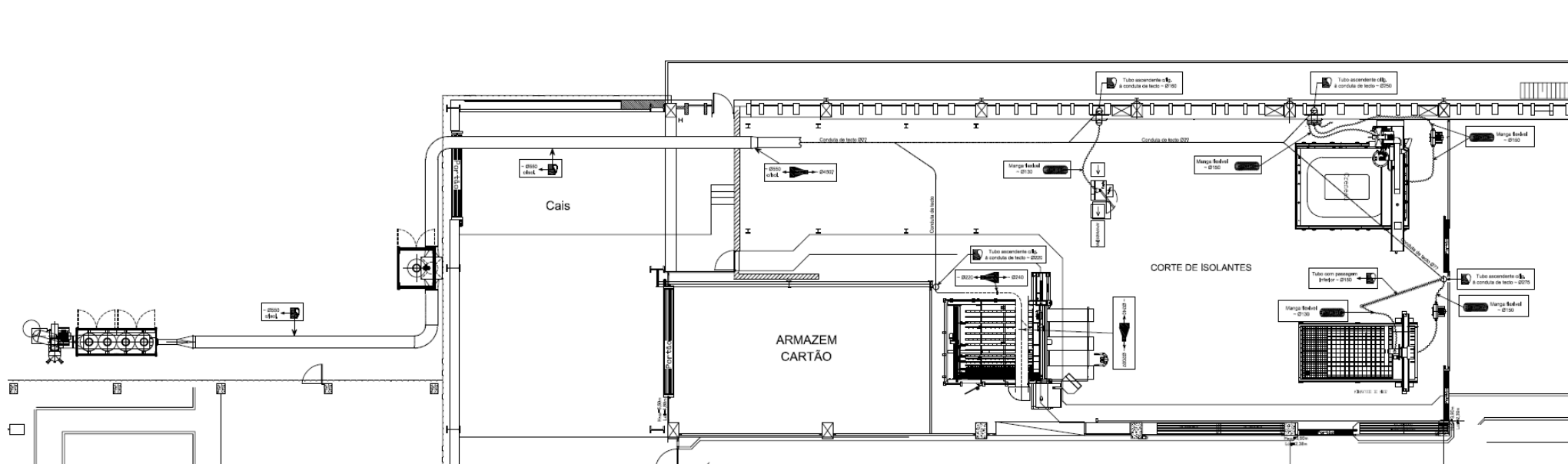
Rendimento ventilador	
Pot. abs. (kW)	#DIV/0!

Separador modelo	Ventilador modelo	
	Pot. abs. (kW)	Caudal (Nm3/h)
	Pot. inst. (kW)	Press. tot. (mm.c.a.)


Material	Montagem	Transporte

TÉCNICO COMERCIAL: \_\_\_\_\_ DATA: \_\_\_\_\_

# Anexo D – Layout da Área – Despoeiramento Shell



## **Anexo E – Cálculo de Perda de Carga – Despoeiramento Shell**

	CÁLCULO DE INSTALAÇÃO DE DESPOEIRAMENTO
---	---

CLIENTE: EFACEC - SHELL

Nº DE OBRA: \_\_\_\_\_

Velocidade máxima (m/s)	25
Pressão Dinâmica (mm.c.a.)	39

Somatório das secções	400
Caudal máximo (m3/s)	3,1
Caudal máximo (m3/h)	11310

Ø	Tubo			Calça			Curva		
	Material	Chapa Nº	Ver IT	Material	Chapa Nº	Ver IT	Material	Chapa Nº	Ver IT
	Quant	Per. Car.	Total	Quant	Per. Car.	Total	Quant	Per. Car.	Total
	(m)	(mmca)	Per. Car.	uni	(mmca)	Per. Car.	uni	(mmca)	Per. Car.
100			7,2	5	3,9	19	7	9,7	68
130			5,5						
150	4,5		4,8						22
180			4,0						
200			3,6						
220			3,3						
250			2,9						
280	5		2,8						13
300			2,4						
320			2,2						
350			2,1						
400	62		1,8						111
420			1,7						
450			1,6						
500			1,4						
550			1,3						
600			1,2						
650			1,1						
700			1,0						
750			1,0						
800			0,9						
850			0,8						
900			0,8						

Area Filtrante (m2)	
T.Trabalho (m3/m2)	#DIV/0!

Perda de Carga (mm.c.a.)	
1ª Entrada	30
Ciclone	
Filtro	80
Factor util. inst. (%)	

Perda de Carga Total (mm.c.a.)	382
--------------------------------	-----

Rendimento ventilador	
Pot. abs. (kW)	#DIV/0!

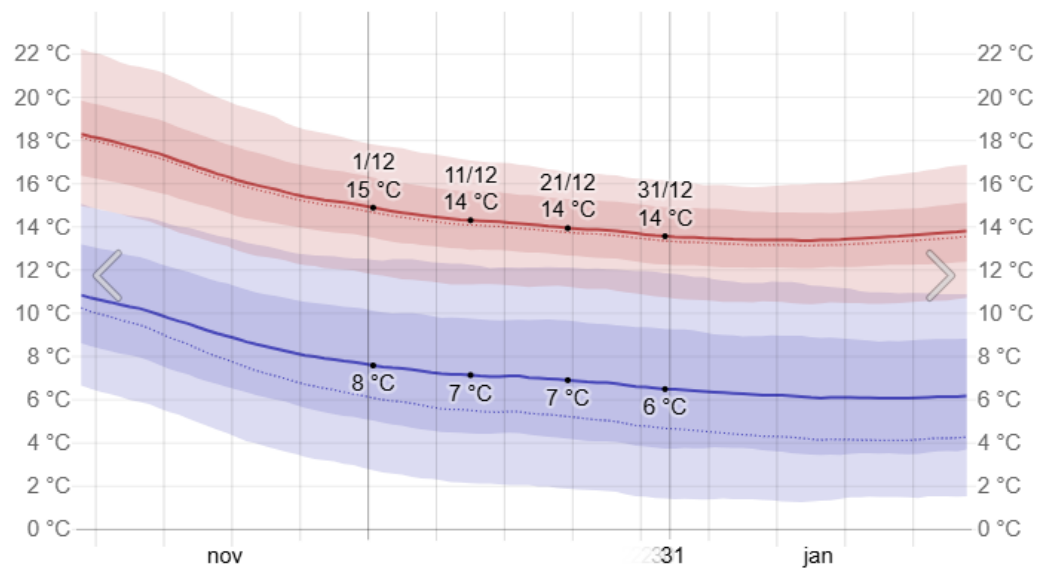
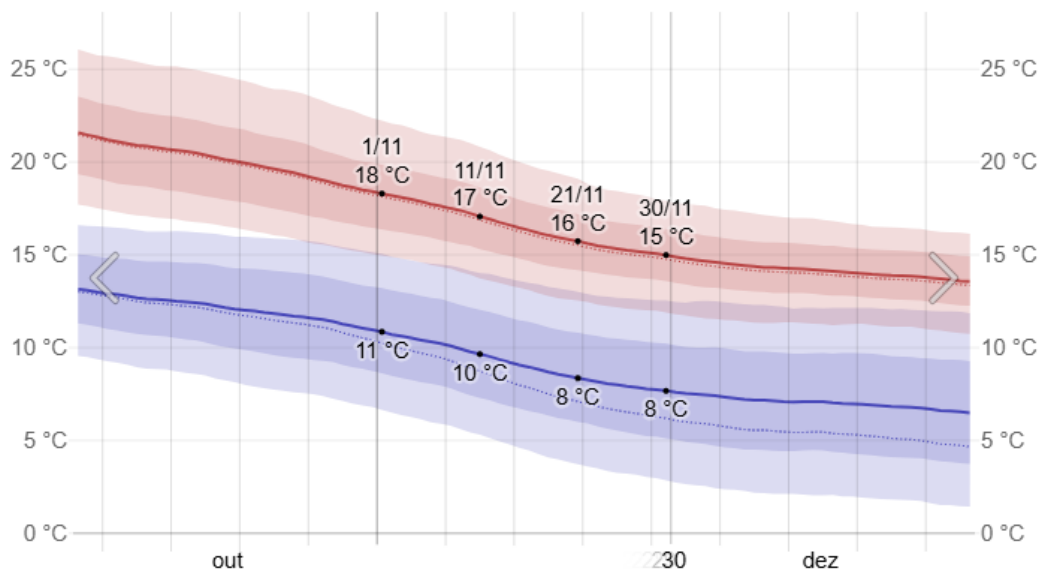
Separador modelo	Ventilador modelo	
	Pot. abs. (kW)	Caudal (Nm3/h)
	Pot. inst. (kW)	Press. tot. (mm.c.a.)

Material	Montagem	Transporte

TÉCNICO COMERCIAL: \_\_\_\_\_

DATA: \_\_\_\_\_

## Anexo F – Evolução Térmica Mensal no Porto (novembro 2024 – março 2025)



Anexo F

