

Melhoria da Eficiência Energética numa Indústria de Tintas

Ana Carolina Correia

Dissertação do MIEM

Orientadores na Barbot: Eng. António Aguiar

Orientador na FEUP: Prof. Clito Félix Afonso



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro de 2015

*“If you can’t fly, then run,
If you can’t run, then walk,
If you can’t walk, then crawl,
But whatever you do,
You have to keep moving forward.”
Martin Luther King Jr.*

Resumo

Esta dissertação surge do desejo de desenvolver um projeto que permitisse demonstrar o papel crucial da gestão e eficiência energéticas na competitividade e produtividade das PME nacionais, ainda pouco consciencializadas sobre a sua importância. A motivação da empresa Barbot para otimizar as suas atividades, e conseguir, assim, a minimização dos custos e prejuízos associados, possibilitou pôr em prática os conceitos abordados na dissertação.

Iniciou-se o projeto com o estudo do processo de fabrico, e funcionamento de todos os setores da empresa com intervenção direta ou indireta neste. Com o objetivo de caracterizar a estrutura dos consumos de energia, foi realizada uma auditoria energética, analisando detalhadamente os consumos globais e desagregados da fábrica. Os resultados obtidos permitiram, não só avaliar o seu desempenho sob importantes parâmetros e indicadores energéticos, como identificar as áreas com maior potencial de economia de energia. No final, verificou-se que a Barbot não é considerada uma Consumidora Intensiva de Energia (CIE).

Após uma pesquisa por soluções eficientes possíveis de aplicar à indústria, foi proposto um plano de medidas direcionadas para melhorar a eficiência das atividades e sistemas consumidores de energia.

Concluiu-se que a empresa poderá beneficiar de uma significativa redução de gasto de energia primária com a implementação destas medidas.

Energy Efficiency Improvement of a Paint Industry

Abstract

This work stems from the desire to develop a project that would allow to demonstrate the crucial role of energy management and efficiency in the competitiveness and productivity of portuguese SMEs, poorly made aware of its importance. The motivation of Barbot company to optimise its activities, and minimize related costs and losses, enabled to put into practice thesis covered concepts.

We started the project by studying manufacturing process and operation of all sectors of the company with direct or indirect intervention in this. In order to characterise the structure of energy consumption, was performed an energy audit, by carefully analysing overall and disaggregated consumption of the factory. Not only the results led to evaluation of their performance under major energy parameters and indicators, but also to identification of areas with most potential for energy savings. In the end, it was found that Barbot is not considered an Intensive Energy Consumer (IEC).

After a research on management measures and efficient technologies that could be applicable to industry, a plan of targeted measures has been proposed to improve activities efficiency and energy consuming systems.

It was concluded that the company may benefit from a significant reduction of primary energy spent through implementation of these measures.

Agradecimentos

Desejo agradecer ao Eng. António Aguiar por me conceder a oportunidade de realizar este projeto na Barbot, e pela contribuição preponderante para o sucesso deste trabalho.

Agradeço, também, ao Sr. Manuel Jorge pela paciência, disponibilidade e incansável atenção demonstradas durante estes meses

Um especial obrigada ao Eng. Marcelo por ter demonstrado um sincero interesse neste projeto, e me ter ajudado a definir o rumo certo para ele.

Agradeço ao Professor Clito Afonso pela confiança que depositou nas minhas capacidades para abraçar este tema, e pelo seu envolvimento na dissertação.

E, finalmente, um enorme obrigada aos meus pais pelo carinho e apoio incondicional que sempre demonstraram, e aos meus familiares e amigos que me têm acompanhado e motivado para continuar a lutar pelas minhas aspirações.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	A Barbot	1
1.2	O Projeto	2
1.3	Organização do Relatório	3
2	A Energia	5
2.1	Energia - Evolução do Consumo Mundial	6
2.2	A Dependência Energética Portuguesa	8
3	A Gestão da Energia e a Eficiência Energética na Indústria	11
3.1	O Plano de Gestão Energética	12
3.1.1	Auditoria Energética	12
3.1.2	Medidas de Eficiência Energética	13
4	O Projeto na Barbot	15
4.1	A Atividade da Empresa	15
4.1.1	Tintas: Conceito e Composição	15
4.2	O Processo Produtivo	16
4.2.1	Fluxograma	16
4.2.2	Descrição do Processo	17
4.3	Principais Unidades Utilizadoras de Energia	21
4.4	Análise da Produção	24
4.5	Caraterização dos Consumos Energéticos da Fábrica	25
4.5.1	Consumo Global de Energia Elétrica	25
4.5.2	Consumo de Energia Elétrica por Setor	30
4.5.3	Consumo Global de Gás Propano	32
4.6	Balanço Global do Consumo de Energia Primária	33
4.7	Avaliação do Desempenho Energético da Empresa	34
4.7.1	Consumo Específico de Energia	35
4.7.2	Intensidade Carbónica	35
5	Medidas de Promoção da Eficiência Energética	37
5.1.1	Compensação do Fator de Potência	37
5.1.2	Identificação e Reparação de Fugas de Ar Comprimido	39
5.1.3	Monitorização e Estabelecimento de Metas	40
5.1.4	Otimização da Produção e Distribuição de Ar Comprimido	41
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	43
7	Referências Bibliográficas	46
	ANEXO A: Medidas Transversais de Aumento da Eficiência Energética da Indústria Portuguesa	48
	ANEXO B: Períodos Horários da Energia Elétrica em Ciclo Semanal	49
	ANEXO C: Cálculo da Estimativa do Consumo de Gás Propano	50
	ANEXO D: Fatores de Conversão e Emissão de CO ₂ das Diferentes Formas de Energia	51
	ANEXO E: Método de cálculo da capacidade da baterias de condensadores	52

Índice de Figuras

Figura 1 - Instalações da fábrica da Barbot, em Canelas, Vila Nova de Gaia.	1
Figura 2 - Esquema do desenvolvimento sustentável.....	5
Figura 3 - Consumo de energia primária, no período de 1971-2010, por tipo de combustível.	6
Figura 4 - Panorama global das emissões CO ₂ resultantes da utilização de energia.	7
Figura 5- Previsão da evolução do consumo energético do sector industrial nos países pertencentes ou não à OCDE.	7
Figura 6 - Repartição do consumo de energia primária em Portugal, nos anos de 2000 e 2012.....	8
Figura 7 – Repartição do consumo de energia final por sector de atividade, em Portugal.....	9
Figura 8 – Processo produtivo da fábrica da Barbot.	16
Figura 9 - Cais de descarga das resinas, slurries e água.	17
Figura 10 – Zona de receção dos pigmentos, cargas e aditivos.	17
Figura 11 – Os três principais dispersores de tinta.	18
Figura 12 - Sistema industrial de afinação de cor <i>Drumont</i>	19
Figura 13 - Sistema de enchimento das embalagens de tinta.	19
Figura 14 - ETAR da fábrica.....	20
Figura 15 – Compressores principal e secundário.....	21
Figura 16 – Posto de recarregamento dos empilhadores.	23
Figura 17 - Evolução da produção de tinta ao longo dos meses de 2014.	24
Figura 18 - Repartição do consumo de energia ativa por período horário.....	26
Figura 19- Evolução dos custos da energia elétrica ao longo de 2014.....	29
Figura 20 – Repartição do PT da instalação.	31
Figura 21 – Repartição do QG1.	31
Figura 22 – Peso da contribuição de cada fonte energética, no consumo de energia primária.	33
Figura 23 – Ilustração gráfica da potencia de compensação.....	52

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Principais características técnicas dos compressores.....	21
Tabela 2 - Principais características técnicas das bombas pneumáticas de recirculação.....	22
Tabela 3 - Quantidade de tinta produzida no ano de 2014.....	24
Tabela 4 – Consumo de energia ativa por período horário.....	25
Tabela 5 – Energia indutiva e capacitiva faturada em 2014.	27
Tabela 6 - Potência em horas de ponta e potência contratada, em cada mês.....	28
Tabela 7 – Custos totais (c/IVA) da energia elétrica consumida em 2014.....	29
Tabela 8 - Consumo semanal de energia elétrica em cada quadro.....	31
Tabela 9 - Estimativa do consumo total de gás propano, em 2014.	32
Tabela 10 – Energia primária consumida em 2014.....	33
Tabela 11 - Resultados do CEE de 2014.....	35
Tabela 12 – Resultados da IC em 2014.....	35
Tabela 13 – Resumo dos resultados da auditoria em 2014.....	36
Tabela 14 - Potencial da proposta da instalação de uma bateria de condensadores.....	38
Tabela 15 - Potencial da proposta de inspeção da rede de ar comprimido.	40
Tabela 16 - Potencial da proposta de M&T.....	41
Tabela 17 – Metas mínimas esperadas para 2022.	44
Tabela 18 - Medidas Transversais de Aumento da Eficiência Energética da Indústria Portuguesa.	48
Tabela 19 – Períodos horários de fornecimento de energia elétrica em Portugal Continental, em Ciclo semanal.	49
Tabela 20 – Estimativa da quantidade de Gás Propano consumido em 2014.	50
Tabela 21 – Fatores de conversão e emissão da eletricidade.....	51
Tabela 22 - Fatores de conversão e emissão do Gás Propano.....	51

Nomenclatura

P	Potência ativa	kW
$P_{contratada}$	Potência contratada	kW
P_{HP}	Potência em horas de ponta	kW
p_{max}	Pressão máxima do compressor	bar
p_{min}	Pressão mínima do compressor	bar
Q_C	Potência de compensação da energia reativa	$kvar$
Q_{comp}	Capacidade do compressor	m^3/min
Q_f	Caudal de fugas	m^3/min
S	Potência aparente	kVa
t_{carga}	Período de carga do compressor	min
t_{total}	Duração do exame de deteção de fugas	min
W_{HC}	Energia ativa consumida nas horas de cheias	kWh
W_{HP}	Energia ativa consumida nas horas de ponta	kWh
W_{HSV}	Energia ativa consumida nas horas de super vazio	kWh
W_{HV}	Energia ativa consumida nas horas de vazio	kWh
W_{QG}	Consumo de energia dos quadros gerais	kWh
W_{QP}	Consumo de energia dos quadros parciais	kWh
WR_{HFV}	Energia reativa consumida nas horas fora de vazio	$kvarh$
WR_{HV}	Energia reativa fornecida nas horas de vazio	$kvarh$
φ	Ângulo entre a potência ativa e a potência aparente	rad
φ_1	Ângulo entre a potência ativa e a potência aparente “não aceitável”	rad
φ_2	Ângulo entre a potência ativa e a potência aparente “aceitável”	rad
$\%fugas$	Percentagem de fugas na rede de ar comprimido	

Siglas

CEE - Consumo Específico de Energia

CIE - Consumidoras Intensivas de Energia

DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia

GEE - Gases com Efeito de Estufa

IC - Intensidade Carbónica

IE - Intensidade Energética

IEA - International Energy Agency

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

PMEs - Pequenas e Médias Empresas

PREn - Plano de Racionalização de Energia

QG1 - Quadro geral 1

QG2 - Quadro geral 2

QP1 - Quadro parcial 1

QP2 - Quadro parcial 2

QP3 - Quadro parcial 3

QP4 - Quadro parcial 4

QP5 - Quadro parcial 5

QP6 - Quadro parcial 6

QP7 - Quadro parcial 7

SGCIE - Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia.

UE - União Europeia

1 Introdução

O projeto seguinte enquadra-se no âmbito da Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e contou com o apoio da empresa produtora de tintas Barbot, que disponibilizou as instalações da sua fábrica de Canelas, em Vila Nova de Gaia, para o desenvolvimento deste estudo.

O principal foco deste trabalho incidiu sobre a importância da promoção da eficiência energética no sector industrial, tanto pelas consequentes melhorias da situação económica das empresas, como pela repercussão na redução dos impactos ambientais resultantes das grandes emissões de gases poluentes das indústrias transformadoras.

1.1 A Barbot

Fundada na cidade do Porto por Diogo Barbot, no ano de 1920, a Barbot tornou-se numa das maiores referências do sector das tintas em Portugal.

A atividade da Barbot centra-se no fabrico de tintas, vernizes, esmaltes e diluentes para os segmentos da Construção Civil, Decoração e Indústria.

A versatilidade e aposta constante na inovação contribuíram para o crescimento e a expansão internacional da empresa. Atualmente, a Barbot possui duas fábricas localizadas em Vila Nova de Gaia e 22 pontos de venda próprios em Portugal, e já se encontra presente em países como a França, Angola e Cabo Verde. O grupo Barbot é, também, detentor da empresa Master Paint, distribuidora da marca Anpal Sodulax, outra marca de tintas e vernizes, e da empresa Jallut Pinturas, uma reconhecida unidade fabril espanhola com mais de 30 anos de experiência, especialista em tintas industriais, decorativas e corantes para a indústria e metalografia.



Figura 1 - Instalações da fábrica da Barbot, em Canelas, Vila Nova de Gaia.

1.2 O Projeto

O mundo enfrenta claramente duas grandes ameaças num panorama energético global. Por um lado, a obtenção da energia a preços competitivos e, por outro, os efeitos negativos no ambiente, como consequência da procura e consumos energéticos crescentes.

Esta atual e crescente preocupação em termos ambientais e energéticos têm conduzido a uma atitude pró-ativa de mudança, da parte das economias mundiais, com vista à melhor utilização e aproveitamento da energia disponível, acompanhada da redução de emissões poluentes.

Num setor de atividade como o das indústrias transformadoras, enquadrado em mercados cada vez mais concorrenciais, existe uma necessidade constante de otimizar os seus fatores produtivos. A implementação de boas práticas energeticamente eficientes cria, portanto, vantagens competitivas entre empresas onde os consumos intensivos de energia são considerados uma situação imutável.

Através deste projeto com a empresa Barbot, é estudada a aplicação de um método destinado a melhorar a eficiência energética da fábrica, tornando-a economicamente mais competitiva.

A execução do presente trabalho compreende uma avaliação quantitativa e qualitativa dos consumos de todos os processos e respetivos equipamentos integrados na fábrica, e posterior elaboração de um plano centrado na sua racionalização e otimização energética. Neste plano são, primeiramente, estabelecidas metas relativas às intensidades energética e carbónica e ao consumo específico de energia e, finalmente, medidas que visem o cumprimento das mesmas e a melhoria tão esperada da eficiência energética.

Espera-se que com o presente projeto sejam obtidos os seguintes resultados:

- Conhecimento profundo das instalações e do custo energético de cada processo ou sistema;
- Aumento da eficiência do sistema energético;
- Redução da fatura energética;
- Melhoria da produtividade;
- Aumento da competitividade da empresa.

1.3 Organização do Relatório

O seguinte relatório encontra-se organizado em seis capítulos.

Neste primeiro capítulo é feita uma pequena introdução ao tema da eficiência energética industrial, abordado ao longo do relatório, e enquadrado o caso de estudo prático na empresa Tintas Barbot. É, também, descrita a empresa onde foi realizada o atual projeto.

No capítulo 2, é estudado o panorama do consumo energético, a nível mundial e nacional, concedendo um especial enfoque ao sector industrial, e à sua contribuição para os valores obtidos na caracterização anterior.

O capítulo 3 é centrado na relevância da promoção da eficiência energética junto das empresas, e no potencial da sua contribuição para o sector industrial. É explicada a forma mais adequada de atuar sobre a indústria, referindo o papel das auditorias energéticas e das medidas de melhoria a implementar

No capítulo 4 é iniciado o estudo do caso prático da empresa Barbot e da respetiva auditoria energética às suas instalações. É feita uma descrição objetiva do processo de produção das tintas, e caracterizados os consumos de todas as formas de energia, tanto globalmente, como sectorialmente.

A proposta de soluções para melhorar os resultados obtidos e cumprir os objetivos estipulados anteriormente é apresentada no capítulo 5. É descrita, de forma clara, a aplicação e as principais vantagens de cada medida, bem como as ações ou investimentos associados.

Finalmente, no último capítulo são retiradas as principais conclusões sobre todos os pontos abordados no trabalho e respetivo relatório, e aconselhados alguns trabalhos futuros.

2 A Energia

A energia representa uma necessidade básica, com diversos propósitos, tendo-se tornado num elemento preponderante para a competitividade económica e rápido crescimento mundiais. [1]

A chave para o desenvolvimento sustentável, aquele que procura dar resposta às necessidades das sociedades do presente, sem comprometer a capacidade de as gerações futuras atenderem resposta às suas próprias necessidades, passa pela utilização racional da energia e dos recursos naturais. Desta forma, é assegurado o equilíbrio entre o crescimento económico, o progresso social, e o equilíbrio ambiental. [2]

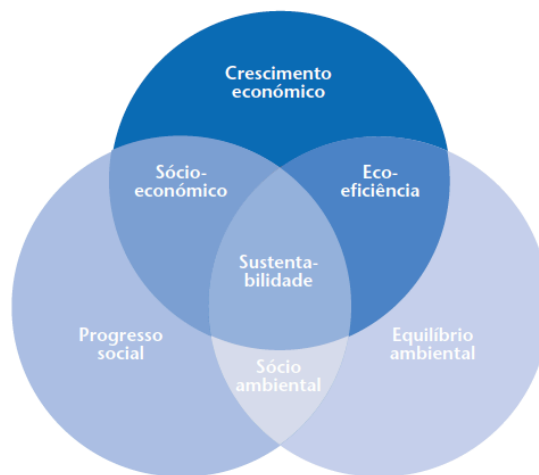


Figura 2 - Esquema do desenvolvimento sustentável. [3]

Daí a importância de uma análise ao futuro do panorama global da utilização de energia; as decisões são tomadas no presente tendo por base perspectivas do consumo energético.

2.1 Energia - Evolução do Consumo Mundial

Com o decorrer da história e, nomeadamente, após o culminar da Revolução Industrial, as necessidades energéticas das sociedades têm vindo a aumentar infindavelmente. [4] O avanço económico, tecnológico e social dos países industrializados despoletou um consumo crescente de energia que tem sido satisfeito pelo recurso a combustíveis de origem fóssil como o carvão, o petróleo e, mais recentemente, o gás natural (figura 3).

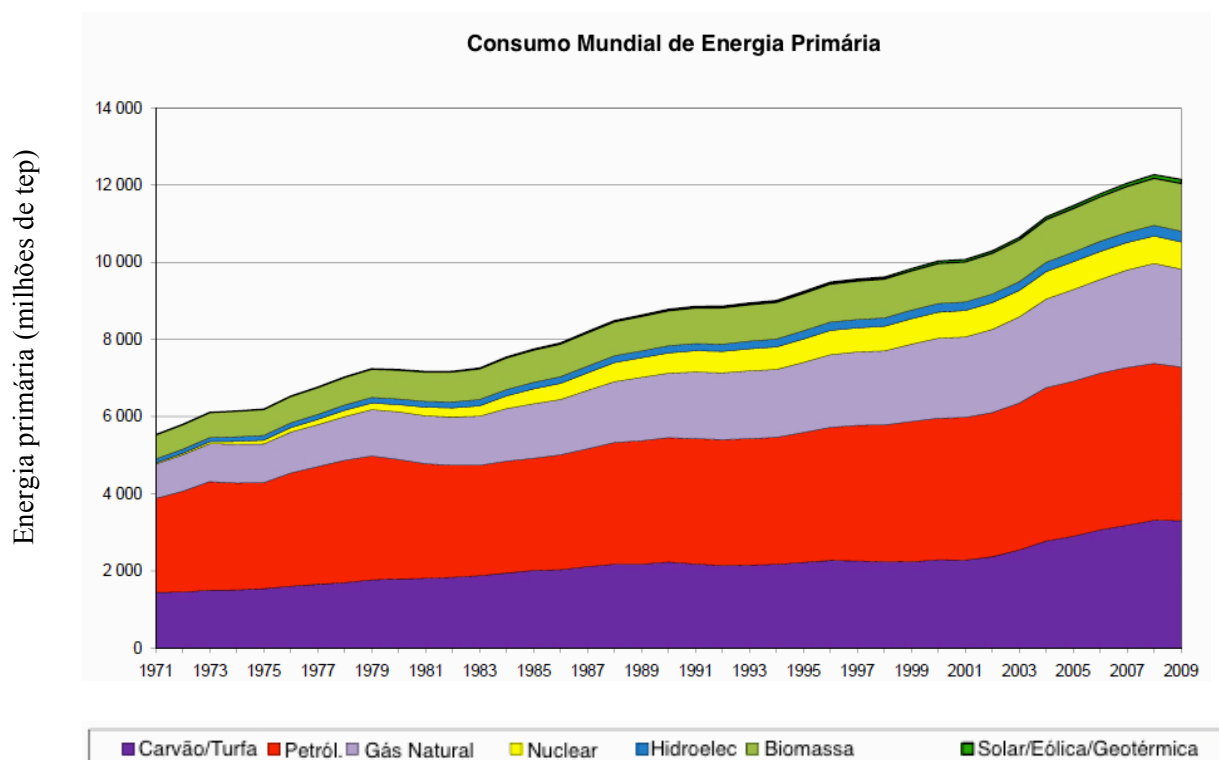


Figura 3 - Consumo de energia primária, no período de 1971-2010, por tipo de combustível. [5]

No entanto, além da exploração dos combustíveis fósseis representar uma ameaça para o ambiente e saúde humana, a sua excessiva demanda tem sido a causa de inúmeros conflitos e uma grande instabilidade económica em vários países.

Apesar dos prejuízos serem cada vez mais notórios e alarmantes, as medidas para contrariar a dependência destes recursos ainda têm pouca expressão.

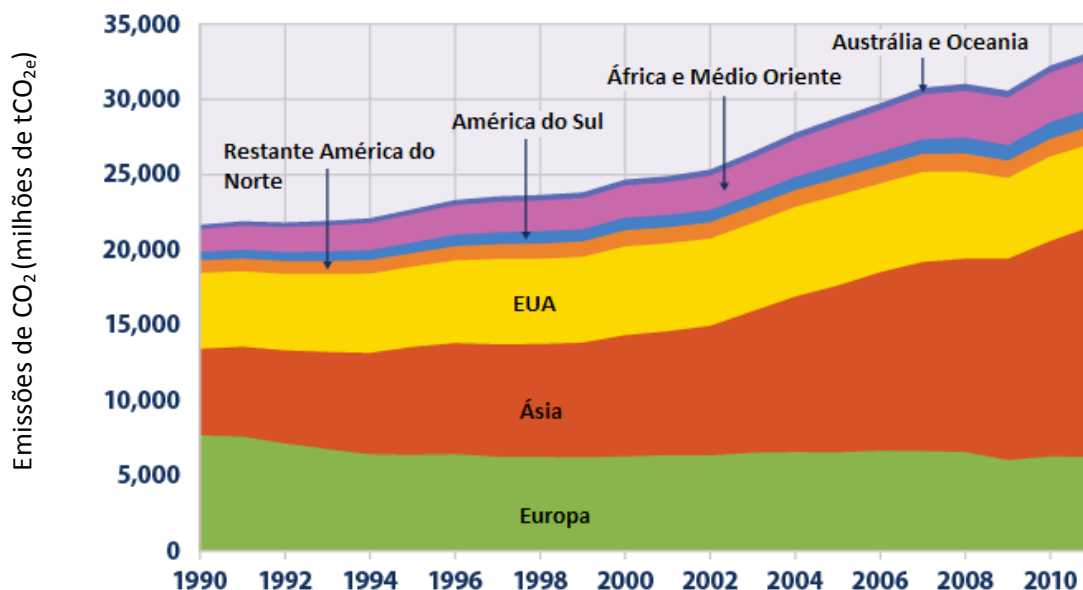


Figura 4 - Panorama global das emissões CO₂ resultantes da utilização de energia. [5]

A figura 4 mostra que as emissões de CO₂, o gás com maior representação de entre os gases com efeito de estufa (GEE), têm vindo a aumentar progressivamente, e as perspectivas futuras apontam para a continuidade desta evolução ascendente. [4]

Atualmente, o sector industrial é o maior consumidor de energia a nível mundial, sendo, por isso, responsável pela emissão de grandes quantidades de GEE. As previsões apontam para um aumento significativo deste consumo (figura 5) sustentado, principalmente, por países não pertencentes à OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico), que se encontram, atualmente, em expansão económica. [4]

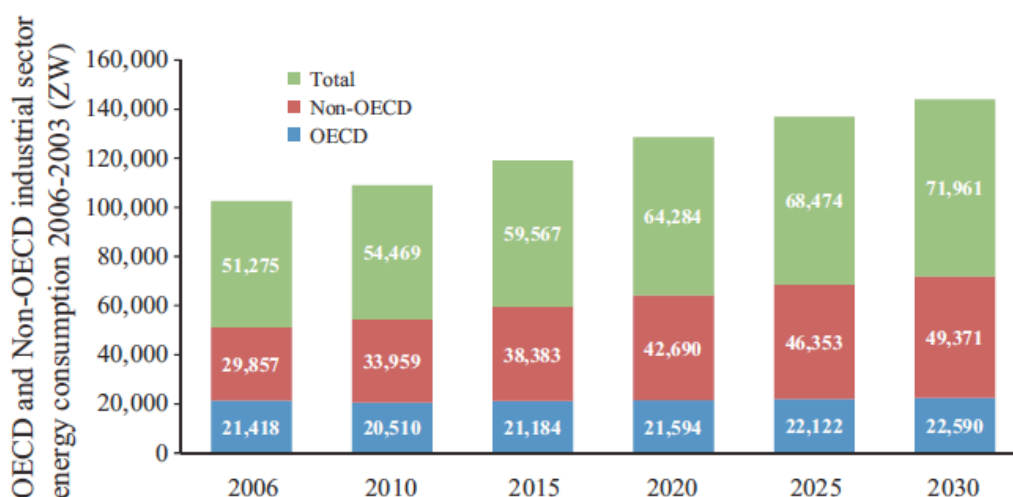


Figura 5- Previsão da evolução do consumo energético do sector industrial nos países pertencentes ou não à OCDE. [4]

2.2 A Dependência Energética Portuguesa

Portugal é um país com um nível escasso de recursos energéticos endógenos, particularmente daqueles que asseguram as atividades estratégicas da grande maioria dos países desenvolvidos: o petróleo, o carvão e o gás natural.

Segundo dados da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), em 2012, cerca de 78,4% da energia primária consumida foi importada, (figura 6), sendo 75,9% a partir de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão), 20,9% a partir de fontes renováveis, e os restantes 3,2% provenientes dos resíduos industriais e da eletricidade importada. [6]

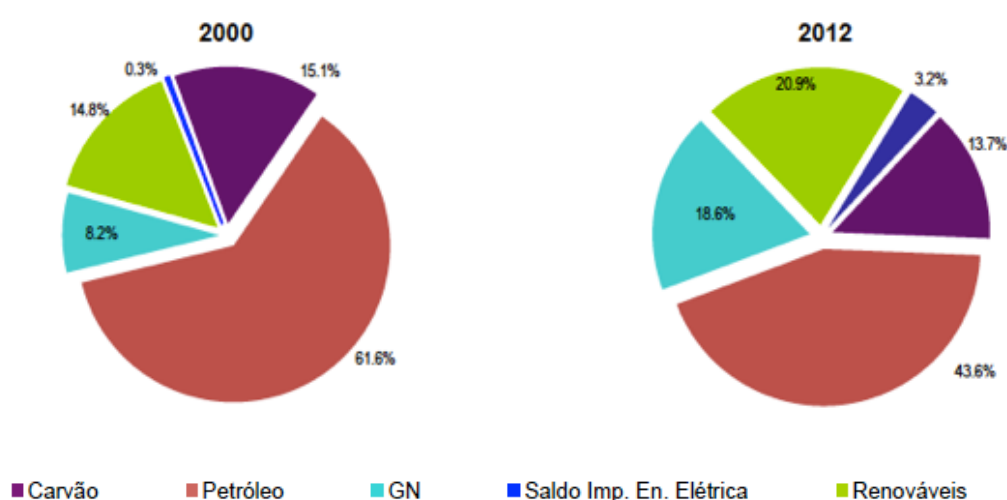


Figura 6 - Repartição do consumo de energia primária em Portugal, nos anos de 2000 e 2012. [6]

Embora no ano de 2013, a forte dependência energética externa tenha decrescido para 71.5%, continua a representar um risco elevado para as empresas portuguesas, principalmente, devido à insegurança do abastecimento e à volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis. [6]

Nesse ano, o setor das indústrias transformadoras foi o segundo maior consumidor de energia final em Portugal, com uma responsabilidade de 32%, distanciando-se do primeiro, o setor dos Transportes, em apenas 4% (figura 7). [7]

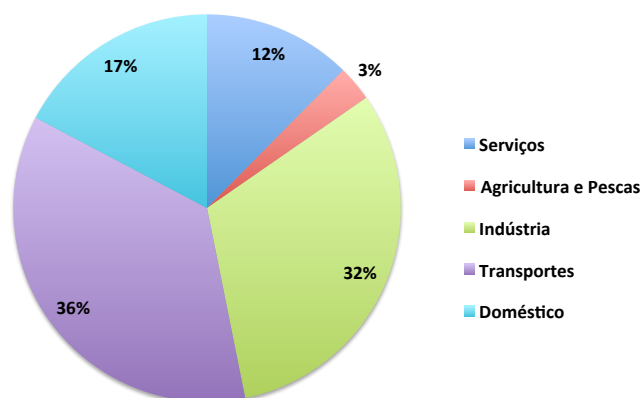


Figura 7 – Repartição do consumo de energia final por sector de atividade, em Portugal. [7]

Um grande parte dessa energia continua a ser desperdiçada, por falta de eficiência dos equipamentos ou de ausência de sensibilização dos utilizadores, traduzindo-se em custos sem benefícios, tanto ao nível da produção como da utilização.

As grandes indústrias já se mostram empenhadas em desenvolver estratégias focadas no bom desempenho energético das suas atividades. O mesmo não acontece com a maioria do tecido empresarial português, as PME's, que ainda se mantém relutantes quer pela falta de incentivos fiscais ao investimento nesta área, quer pelo desconhecimento das vantagens que daqui advêm. [8]

Face ao atual cenário energético nacional instalado, é imperativo que se implementem políticas públicas que garantam a redução da taxa de procura dos combustíveis fósseis, das emissões de GEE, e dos desperdícios energéticos.

A Estratégia “Energia 2020” é o exemplo do resultado da união de esforços dos Estados-Membros da UE, na qual foram definidas prioridades e ações, com vista à melhoria da competitividade, sustentabilidade e segurança da energia. Cada Estado-Membro assumiu o compromisso de adoptar as seguintes metas para 2020: reduzir em 20% as emissões de gases com efeito estufa, aumentar para 20% a quota de utilização das energias de fonte renovável, e obter uma melhoria de 20% na eficiência energética. [9]

3 A Gestão da Energia e a Eficiência Energética na Indústria

A forma como o tecido empresarial português, nos seus diferentes setores de atividade, e a sociedade em geral utilizam a energia disponível é uma questão determinante na mudança de rumo do novo paradigma energético. Para que sejam alcançadas as metas internacionais relativas à redução da intensidade energética, e conseqüente melhoria dos resultados económicos, é imprescindível que haja um esforço da parte das empresas no sentido a aumentar a eficiência energética das suas operações e processos.

Perante o problema do consumo intensivo de energia das indústrias, houve a necessidade de adotar medidas capazes de racionalizar estes gastos e minimizar os prejuízos associados, tornando-as mais eficientes e sustentáveis.

A eficiência energética industrial implica a otimização de todos os sistemas e atividades que, de forma direta ou indireta, dependem do recurso à energia. A sua aplicação potencia a redução dos desperdícios energéticos e a minimização das despesas, sem que isso afete negativamente os níveis de produtividade, serviços e conforto. [10]

A gestão da energia, por sua vez, controla as iniciativas de promoção da eficiência energética; inclui o acompanhamento, a medição, a verificação e a correção dos fluxos de energia de uma instalação. [10]

Um bom programa de gestão de energia, abrangente a qualquer área de atividade, deve compreender as seguintes etapas:

1. Levantamento e análise de dados históricos;
2. Auditoria energética;
3. Planeamento de medidas de eficiência energética.
4. Implementação e controlo. [4]

3.1 O Plano de Gestão Energética

3.1.1 Auditoria Energética

A execução de um plano de gestão de energia requiere o estudo prévio da situação atual da instalação em causa. Nesse sentido, a auditoria energética surge como um instrumento fundamental na caracterização e quantificação dos consumos de energia, na análise da eficiência dos equipamentos, e na contabilização dos desperdícios existentes.

Metodologia

Para a execução da auditoria torna-se essencial a definição e estabelecimento da sequência das ações que possibilitam o conhecimento do sistema energético da instalação. Desse modo, a auditoria deve seguir a seguinte metodologia:

- Preparação da Intervenção:
 - Observação geral do funcionamento da empresa;
 - Definição de uma matriz de atuação;
- Trabalho de Campo:
 - Estudo do processo produtivo;
 - Recolha e análise da informação energética global: quantidades de produção, custos e consumos energéticos totais;
 - Medições e registos dos consumos por setor ou equipamento;
- Tratamento da Informação:
 - Identificação dos principais consumidores de energia;
 - Estabelecimento de relações entre o gasto energético e a produção;
 - Identificação das potenciais economias de energia. [11]

3.1.2 Medidas de Eficiência Energética

A partir dos resultados obtidos na auditoria energética, são estabelecidas metas anuais de redução dos consumos, e definidas as ações conducentes ao bom aproveitamento da energia utilizada na organização. Estas podem advir de alterações na eficiência de sistemas, processos ou equipamentos, ou pela adoção de práticas de gestão energética e mudança de comportamentos, sempre selecionadas e estudadas de acordo com o tipo de atividade industrial em questão.

Existem algumas medidas ou sistemas com um potencial de poupança energética bastante significativo, consideradas transversais à grande maioria das indústrias. Estas são reunidas numa tabela presente no anexo A. [12]

Por sua vez, a integração da dimensão energética na gestão empresarial leva, habitualmente, em consideração as seguintes práticas:

- Implementação e manutenção de um sistema de gestão de energia;
- Definição de indicadores de eficiência e estabelecer as respetivas metas, assim como, definir as metodologias de ajuste dos consumos de referência;
- Aplicação de um sistema de gestão ambiental;
- Análise regular à informação relativa à contratação, abastecimento e faturação energética;
- Integração de processos;
- Monitorização e controlo de todas as atividades;
- Promoção da participação dos colaboradores na gestão energética, através da formação e sensibilização dos recursos humanos. [8]

Atualmente, a gestão de energia nas indústrias transformadoras é regulamentada pelo SGCIE – Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia.

O SGCIE aplica-se a instalações cujos consumos ultrapassam os 500 tep/ano, prevendo que estas realizem, periodicamente, auditorias energéticas que incidam sobre as condições de utilização de energia e promovam o aumento da eficiência energética, incluindo a utilização de fontes de energia renováveis. Prevê, ainda, que se elaborem e executem Planos de Racionalização dos Consumos de Energia (PREn), estabelecendo acordos de racionalização desses consumos com a DGEG que, contemplem objetivos mínimos de eficiência energética, associando ao seu cumprimento a obtenção de incentivos pelos operadores (entidades que exploram instalações CIE). O PREn deve estabelecer metas relativas às intensidades energética (IE) e carbónica (IC), e ao consumo específico de energia (CEE), incluindo, obrigatoriamente, medidas que visem a racionalização dos consumos. [13]

4 O Projeto na Barbot

4.1 A Atividade da Empresa

A unidade fabril em estudo da empresa Tintas Barbot, situada na freguesia de Canelas, concelho de Vila Nova de Gaia, produz, essencialmente, tintas de base aquosa (plásticas). O seu ciclo operacional decorre cinco dias por semana, estando o setor da produção em funcionamento no período das 8h às 17h, e o setor dos serviços no período das 9h às 18h.

A energia elétrica é a principal fonte de alimentação dos diversos setores da instalação, desde as atividades de produção, às áreas de suporte como os serviços, a manutenção ou a logística. O gás propano engarrafado apenas é usado para aquecimento das águas sanitárias.

Para uma melhor compreensão de todo o processo produtivo da fábrica, é feita, primeiramente, uma pequena abordagem ao tema das tintas.

4.1.1 Tintas: Conceito e Composição

A tinta é um composto líquido, geralmente viscoso, constituído por um ou mais pigmentos dispersos num veículo líquido. É aplicada em camadas finas sobre uma determinada superfície, com o objetivo de conferir um acabamento protetor e decorativo. [14]

A composição básica de uma tinta inclui:

- Resina: uma ou mais constituem a parte não-volátil da tinta, responsável pela aglomeração das partículas de pigmentos. As tintas são classificadas de acordo com a natureza química da sua resina básica (ligante).
- Pigmentos: são o material sólido (pó), insolúvel no meio. Atribuem a cor e opacidade à tinta, além de influenciar propriedades como a durabilidade e a resistência à corrosão. São divididos em pigmentos coloridos (conferem cor), não-coloridos, e anticorrosivos (conferem proteção aos metais).
- Cargas: desempenham o papel de controlo do brilho, da reologia da tinta, dureza, permeabilidade, ou aderência;
- Solventes e Diluentes: constituem o veículo volátil usado para dissolver a resina (solventes) e reduzir a viscosidade (diluente) até ao valor desejado.
- Aditivos: materiais adicionados em pequenas quantidades, com o objetivo de proporcionar características especiais e melhorar certas propriedades. [14]

4.2 O Processo Produtivo

O processo produtivo envolve seis passos:

1. Pesagem;
2. Pré-Mistura e Dispersão
3. Acabamento;
4. Afinação da cor;
5. Filtração e Enchimento;
6. Tratamento de Efluentes.

4.2.1 Fluxograma

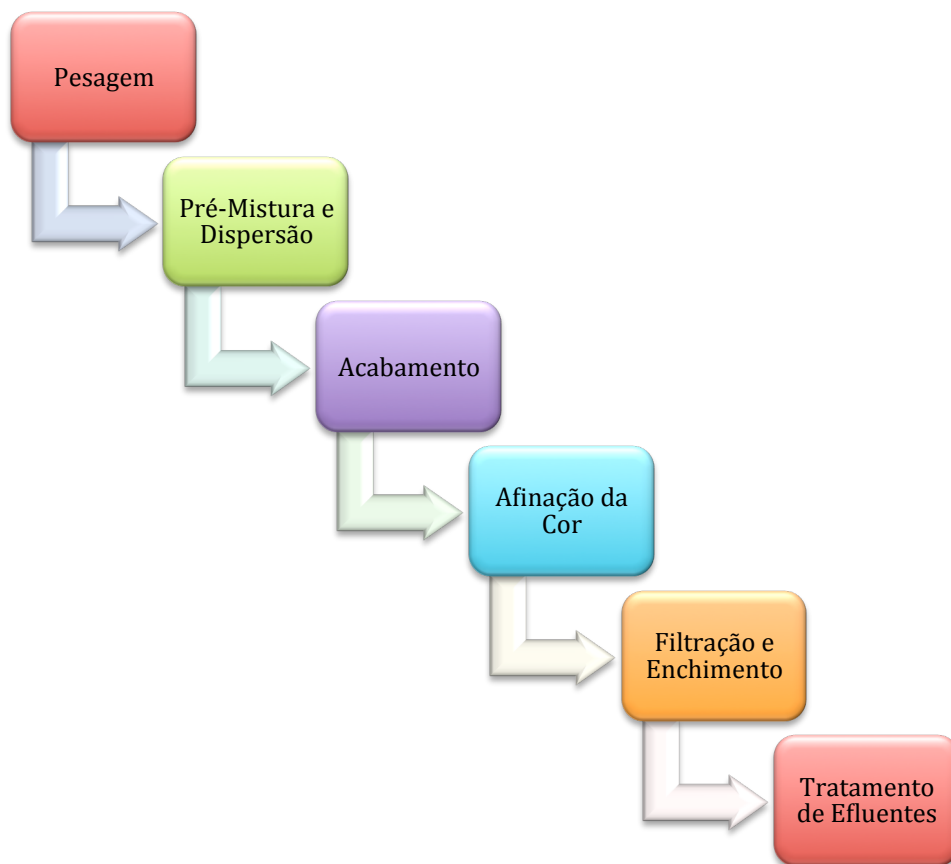


Figura 8 – Processo produtivo da fábrica da Barbot.

4.2.2 Descrição do Processo

O processo produtivo desta unidade industrial da Barbot é, maioritariamente, controlado por um sistema automático.

Numa fase inicial, todas as matérias primas deverão estar prontas a ser utilizadas, pelo que grandes doses de pigmentos, cargas, aditivos e solventes químicos, são previamente bombeados para pequenos silos de armazenamento. As resinas, água e “slurries” (misturas de pigmentos, resinas e solvente) não necessitam de ser preparadas, uma vez que já se encontram armazenadas em silos de grande dimensão, desde o momento da sua receção.



Figura 9 - Cais de descarga das resinas, slurries e água.



Figura 10 – Zona de receção dos pigmentos, cargas e aditivos.

1. Pesagem

Nesta etapa, as matérias primas são doseadas consoante as composições e quantidades das tintas a fabricar e, posteriormente, depositados nos equipamentos de dispersão. Graças à ação de células de cargas instaladas em todos os silos, os diferentes constituintes são automaticamente retirados nas porções corretas.

Em situações em que a produção de uma determinada tinta necessite do uso de um constituinte especial, a pesagem deste é executada de forma manual, ou seja, o constituinte é doseado num contentor sobre uma balança industrial.

2. Pré-mistura e Dispersão

A Pré-mistura e a Dispersão são realizadas no mesmo equipamento, o dispersor, um sistema de agitação constituído por um veio acoplado a um motor elétrico e a um disco de aço. Existem 4 disponíveis (figura 11), sendo que um deles é direcionado unicamente para o fabrico de tintas de areia, e por isso é pouco utilizado.

Na Pré-mistura, os pigmentos e cargas são incorporados à resina e a um ou mais solventes. De seguida, a mistura é sujeita a uma Dispersão, a grande velocidade de rotação, na qual ocorre a separação das partículas dos pigmentos, que acabam suspensas no veículo líquido.



Figura 11 – Os três principais dispersores de tinta.

3. Acabamento

Após a fase de dispersão, são misturados os restantes solventes e aditivos, até ser obtida a tinta desejada. No final, é efetuado o controlo de qualidade a uma amostra da tinta, de forma a avaliar características como o PH, a viscosidade e a cor.

4. Afinação da Cor

A Afinação da Cor apenas é realizada quando a tonalidade da tinta resultante não corresponde, de forma exata, à desejada pelo cliente. Usualmente, esta situação ocorre no fabrico de pequenas séries de tonalidades de tintas não encontradas nos catálogos da marca.



Figura 12 - Sistema industrial de afinação de cor *Drumont*.

5. Filtração e Enchimento

Depois de testada e aprovada, a tinta é direcionada para as cubas de espera para que se possa proceder à última fase da produção, o Enchimento.

Máquinas de enchimento automático (figura 13), ligadas às cubas de espera, filtram a tinta, à medida que vão preenchendo as embalagens. estas são tapadas e colocadas em paletes e, finalmente, transportadas até ao armazém por um sistema automático (figura 14).



Figura 13 - Sistema de enchimento das embalagens de tinta.

7. Tratamento de Efluentes

O tratamento de efluentes, apesar de não ter um contributo direto na obtenção das tintas, é um procedimento fundamental à atividade fabril da Barbot, e com gastos energéticos associados.

A limpeza regular dos equipamentos da fábrica gera águas residuais que devem ser sujeitas a um posterior tratamento, que permita a sua reutilização ou livre descarga no ambiente sem impactos negativos.

O processo decorre da seguinte forma: os efluentes (águas residuais) são conduzidos para um tanque de homogeneização, sendo filtrados à medida que entram. No tanque está instalado um agitador responsável pela tarefa de homogeneizar o efluente bruto. Este é, depois, bombeado para uma unidade de coagulação/floculação, onde lhe é adicionado o reagente de tratamento. As lamas resultantes são encaminhadas para a unidade de tratamento biológico do tipo lamas ativadas e, por fim, para a etapa de adsorção em carvão ativado, para a afinação das características do efluente tratado.

Concluído todo o tratamento, o efluente é armazenado no tanque de acumulação da ETAR.



Figura 14 - ETAR da fábrica.

4.3 Principais Unidades Utilizadoras de Energia

1. Sistema de Ar Comprimido

A empresa dispõe de uma central de ar comprimido que alimenta a totalidade da fábrica.

Atualmente, opera a uma pressão de 7 bar, encontrando-se em permanente funcionamento (24h/dia) para assegurar a alimentação de ar necessária aos diversos pontos de consumo da fábrica.

É composta por dois compressores, um secador de ar, um separador de condensados, dois filtros, e um reservatório.

Os dois compressores (figura 15) são do tipo parafuso rotativo, do mesmo fornecedor, *Ingersoll-Rand*. O compressor principal (1) trata-se de um modelo *Nirvana N75*, de acionamento de velocidade variável. O compressor secundário (2), modelo *SSR ML55*, opera com regulação do tipo carga-vazio, sendo apenas usado em situações cuja necessidade de ar comprimido é maior. As suas características estão expostas na tabela 1:

Tabela 1 – Principais características técnicas dos compressores.

	Compressor 1	Compressor 2
Modelo	Nirvana 75	SSR ML55
Pressão máxima [bar]	10	7,7
Pressão normal [bar]	7	7
Capacidade [m³/min]	13,3	10,2
Potência nominal [kW]	75	60,5



Figura 15 – Compressores principal e secundário.

Os restantes equipamentos (secador, separador de condensados e filtros), também fornecidos pela *Ingersoll-Rand*, pela pouca representatividade que têm nos consumos da sala dos compressores, não foram estudados.

2. Unidade de Controlo de Fabrico

Uma parte considerável do processo de fabrico, nomeadamente as etapas de Pesagem, Pré-Mistura, Dispersão e Enchimento, são controladas por um sistema automático, a partir de uma sala de comandos.

A unidade encontra-se em operação 11h por dia, durante a semana; aos fins de semana, apesar das atividades de produção pararem, a unidade é programada para funcionar automaticamente, por um período de 8h, com o objetivo de acionar os sistemas de recirculação das tintas armazenadas.

A totalidade das potências nominais dos equipamentos incluídos na unidade de controlo perfaz o valor de 298,8 *kW*.

3. Unidade de Afiinação de Cor

Como já foi referido, o processo de afinação de cor é realizado numa unidade individual, direcionada, unicamente, para o efeito. Esta é constituída pela máquina de afinação de cor propriamente dita, ligada a 17 cubas de armazenamento de tintas já produzidas, cada uma equipada com uma bomba pneumática para realizar a recirculação da tinta.

As bombas são acionadas individualmente, em intervalos de 15 minutos, durante 24h, pelo que a potência consumida num dado intervalo de tempo será sempre relativa a uma só bomba. Estes equipamentos são bombas pneumáticas de diafragma, do fornecedor *Ingersoll-Rand/ARO* (tabela 2):

Tabela 2 - Principais características técnicas das bombas pneumáticas de recirculação.

	Bomba 1	Bomba 2
Modelo	6661AL-3EB-C	6662AB-3EB-C
Unidades	12	5
Pressão máxima [bar]	8,3	8,3
Caudal máximo [l/min]	177,9	651

A máquina de afinação propriamente dita, além de ser usada ocasionalmente, por curtos períodos de tempo, foi adquirida apenas há 3 anos, pelo que se encontra em ótimas condições de funcionamento. Uma análise à sua eficiência não seria preponderante para a melhoria dos gastos energéticos da fábrica.

4. Posto de Recarregamento dos Empilhadores

O transporte dos produtos é feito por meio de 16 empilhadores elétricos. As respectivas baterias são recarregadas fora do horário de trabalho, a partir das 17h, ficando ligadas à alimentação até ao momento em que o empilhador é novamente usado.



Figura 16 – Posto de recarregamento dos empilhadores.

4.4 Análise da Produção

A tabela 3 apresenta as quantidades de tinta produzida (em toneladas) em cada mês do ano de 2014.

Tabela 3 - Quantidade de tinta produzida no ano de 2014.

Produção	
Mês	Quantidade [t]
Janeiro	1254
Fevereiro	1011
Março	1432
Abril	1964
Maio	1833
Junho	1861
Julho	2272
Agosto	1499
Setembro	1097
Outubro	1010
Novembro	557
Dezembro	320
Total	16110

Pela análise da evolução da produção ao longo de 2014 (figura 17), verifica-se que há uma diferença significativa entre as quantidades de tinta produzidas nos meses da Primavera e Verão e nos meses de Outono e Inverno. Este facto poderá ser justificado pelo incremento do volume de encomendas associado à melhoria das condições climáticas para a aplicação das tintas.

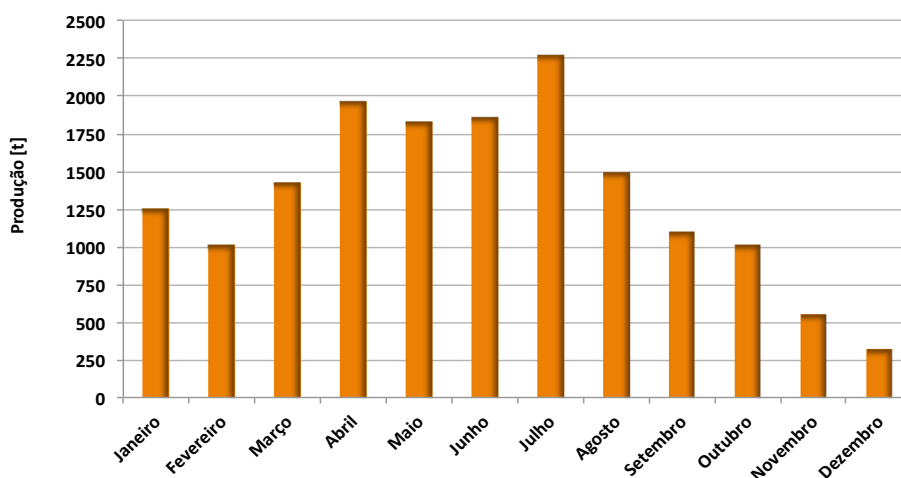


Figura 17 - Evolução da produção de tinta ao longo dos meses de 2014.

4.5 Caracterização dos Consumos Energéticos da Fábrica

O estudo dos gastos com energia constitui a etapa essencial na definição dos aspetos a melhorar, e na elaboração de um adequado plano de racionalização da utilização de toda a energia.

Neste subcapítulo são apresentados e analisados os valores dos consumos globais e setoriais de cada um dos recursos energéticos (eletricidade e gás), relativos ao ano de 2014. A obtenção destes dados permitiu caracterizar o panorama geral de utilização de energia primária da instalação, calculando os respetivos indicadores do CEE e IC, e retirando as devidas conclusões.

4.5.1 Consumo Global de Energia Elétrica

A melhor ferramenta de descrição do consumo global de eletricidade de uma instalação é a sua fatura elétrica. Foram então recolhidas as faturas do ano de 2014, que contém toda a informação relativa à utilização de energia ativa e reativa, potência em horas de pontas e potência contratada

A empresa é abastecida em Média Tensão e utiliza a opção tarifária de Ciclo Semanal, cujos períodos horários são apresentados no Anexo B.

O consumo de energia ativa encontra-se caracterizado na seguinte tabela 4 em função dos diferentes períodos horários - horas de Ponta, Cheias, Vazio e Super Vazio.

Tabela 4 – Consumo de energia ativa por período horário.

Energia Ativa						
Mês	W_{HP} [kWh]	W_{HC} [kWh]	W_{HV} [kWh]	W_{HSV} [kWh]	Total [kWh]	Custo s/IVA [€]
Janeiro	19697	43724	14076	8034	85531	8190
Fevereiro	16310	38625	11156	6376	72467	6962
Março	17106	38987	10271	5405	71769	6945
Abril	17375	45913	11422	5820	80530	7781
Mai	17641	44860	10630	5816	78947	7643
Junho	14644	38098	18478	5626	76846	7252
Julho	19254	56516	10131	6249	92150	8967
Agosto	17000	44353	14241	7290	82884	7916
Setembro	16617	46911	13164	8131	84823	8103
Outubro	14854	43441	13540	8477	80312	7620
Novembro	13382	32312	13178	6985	65857	6220
Dezembro	11855	29916	15541	8067	65379	6080
Total	195735	503656	155828	82276	937495	89679

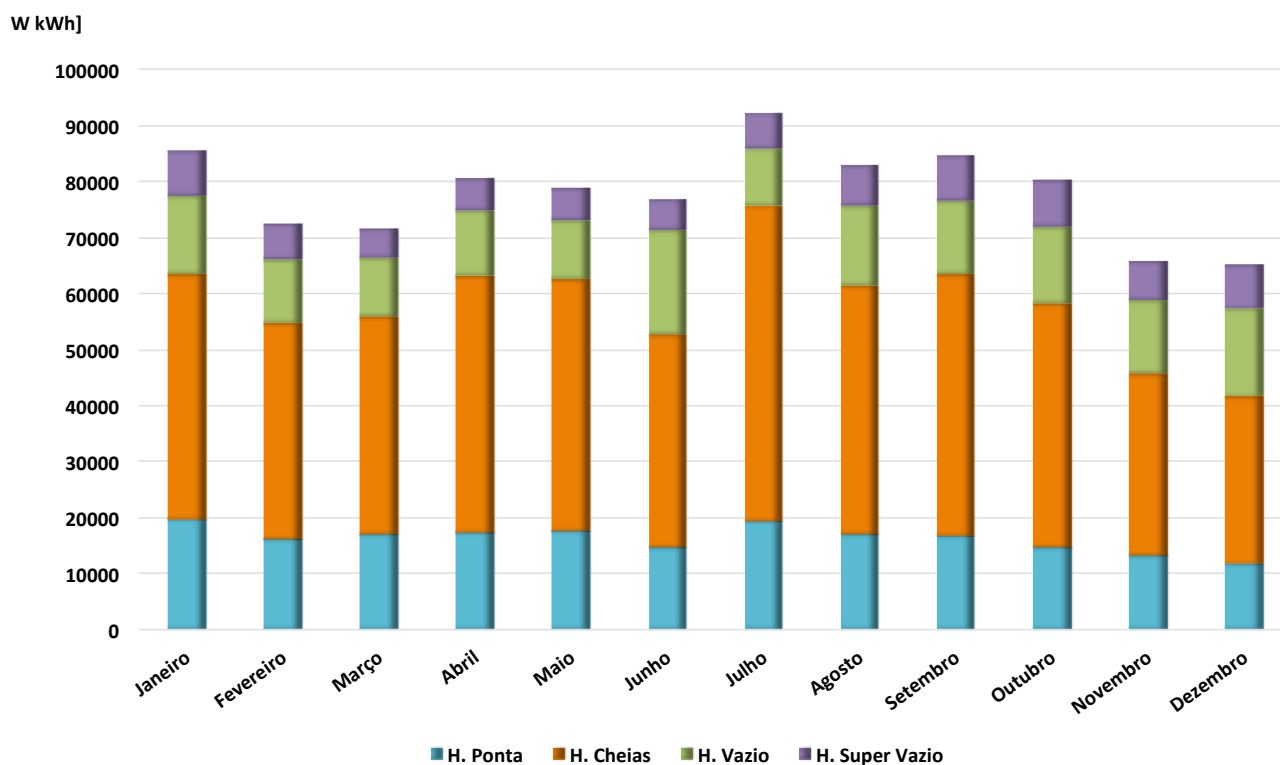


Figura 18 - Repartição do consumo de energia ativa por período horário.

O gráfico da figura 18 mostra que as repartições da energia utilizada pelos diferentes períodos horários mantêm, aproximadamente, o mesmo peso ao longo dos meses.

Comparando a totalidade da energia ativa consumida com a quantidade de tinta produzida em cada mês (figura 17), verifica-se que a primeira não acompanha a tendência sazonal da segunda, isto é, enquanto que o consumo total de energia ativa apresenta pequenas oscilações durante o ano, as quantidades de produção sofrem um decréscimo acentuado nos meses de Outono e Inverno. Vários fatores poderão estar na base deste fenómeno.

De acordo com informações fornecidas pela Barbot, nos últimos meses, o aumento da procura por séries mais pequenas e customizadas de tinta, em detrimento de maiores séries de tintas mais simples, poderá ter sido uma das causas do acréscimo do consumo energético.

Outra das causas poderá ser, obviamente, a ineficiência de algum processo ou equipamento da empresa.

Da recolha das faturas elétricas, também se concluiu que a fábrica consome energia reativa, havendo, portanto, custos monetários associados.

O Regulamento de Relações Comerciais do Setor Elétrico estabelece que a energia reativa deve ser faturada nos seguintes casos:

- O valor de energia reativa consumida (indutiva) nas horas fora de vazio (WR_{HFV}) exceda 30% da energia ativa consumida no mesmo período. Este limite é ultrapassado nas situações em que o fator de potência, grandeza que traduz a eficácia da conversão da corrente elétrica em trabalho útil, atinge valores menores ou iguais a 0,96 ($\cos\varphi \leq 0,96$);
- Para qualquer valor de energia reativa fornecida (capacitiva) durante as horas de vazio (WR_{HV}). Esta situação não é imperativa. [15]

Os valores da energia reativa faturada e respetivos custos encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 5 – Energia indutiva e capacitiva faturada em 2014.

Energia Reativa				
Mês	WR_{HFV} [kvArh]	WR_{HV} [kvArh]	$\cos\varphi$	Custo s/IVA [€]
Janeiro	0	15805	1	292
Fevereiro	0	7114	1	132
Março	0	3813	1	71
Abril	0	3449	1	64
Maió	0	4200	1	78
Junho	0	8554	1	158
Julho	36936	0	0,79	1855
Agosto	32035	0	0,77	1660
Setembro	36592	0	0,75	1980
Outubro	35621	0	0,74	1959
Novembro	19224	0	0,81	905
Dezembro	23590	0	0,76	1261
Total	183997	42935	-	10415

Observando a tabela 5, durante os meses de Janeiro a Junho, período em que o fator de potência é igual a 1, há faturação de energia reativa capacitiva. A partir do mês de Julho, o $\cos\varphi$ diminui para números menores que 0,96, resultando num aumento significativo dos custos com a energia reativa.

A potência contratada ($P_{contratada}$) é o valor instantâneo máximo de energia elétrica que uma instalação de consumo pode receber.

Em instalações abastecidas em média tensão ou superior (situação em causa), a potência contratada não pode ser inferior a metade da potência instalada. [16]

Tabela 6 - Potência em horas de ponta e potência contratada, em cada mês.

Potência			
Mês	P_{HP} [kW]	$P_{contratada}$ [kW]	Custos/IVA [€]
Janeiro	179	484	2157
Fevereiro	163	484	1817
Março	166	484	2038
Abril	290	492	3072
Maio	280	492	3087
Junho	271	492	2910
Julho	279	492	3078
Agosto	283	492	3117
Setembro	252	492	2738
Outubro	188	492	2247
Novembro	134	492	1696
Dezembro	113	492	1562

O posto de transformação da fábrica tem uma potência instalada de 630 kVA , pelo que a potência contratada deve ser, no mínimo, 293 kW . De acordo com a tabela 6, a potência contratada mais baixa foi de 484 kW , cumprindo o requisito anterior.

Resumindo todos os custos anteriores, a despesa total com a energia elétrica no ano de 2014 foi de 160599 €.

Tabela 7 – Custos totais (c/IVA) da energia elétrica consumida em 2014.

Energia Elétrica	
Mês	Custo Total [€]
Janeiro	13195
Fevereiro	11051
Março	11227
Abril	13530
Maió	13394
Junho	12791
Julho	17214
Agosto	15718
Setembro	15865
Outubro	14649
Novembro	10933
Dezembro	11034
Total	160599

Uma análise pormenorizada ao gráfico da figura 19 conclui que também os custos totais não acompanham a mesma evolução do consumo de energia ativa. Por exemplo, nos meses de Fevereiro e Novembro o valor de energia ativa é superior aos meses de Março e Dezembro, respetivamente, situação que se inverte no caso dos custos monetários. Este acréscimo na despesa é o resultado da faturação da energia reativa nesses meses.

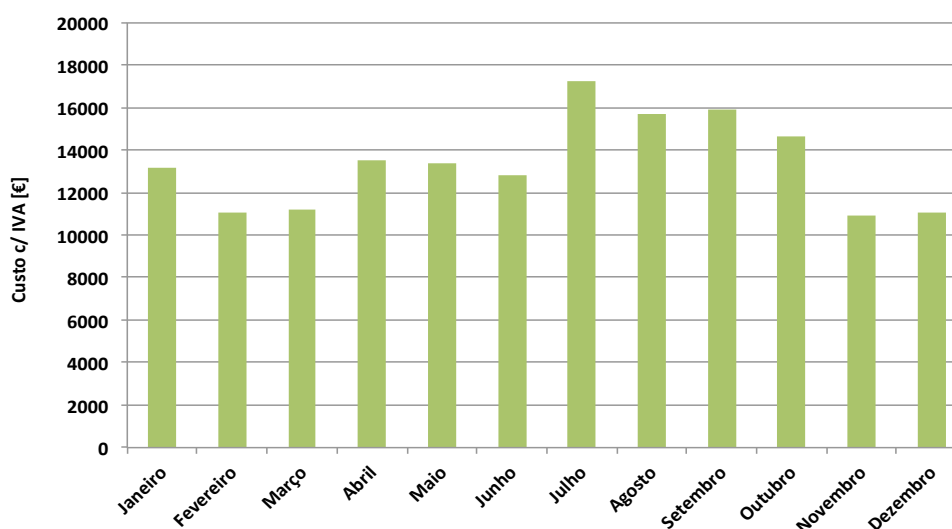


Figura 19- Evolução dos custos da energia elétrica ao longo de 2014.

4.5.2 Consumo de Energia Elétrica por Setor

Após concluída a análise global, prosseguiu-se para o estudo individual de cada sector da Barbot.

- Quadro Geral 1 (QG1)
 - Quadro Parcial 1 (QP1): sistema de ar comprimido
 - Quadro Parcial 2 (QP2): unidade de controlo de fabrico
 - Quadro Parcial 3 (QP3): unidade de afinação de cor
 - Quadro Parcial 4 (QP4): sistema de recarregamento dos empilhadores
 - Quadro Parcial 5 (QP5): laboratório e gabinetes
 - Quadro Parcial 6 (QP6): ETAR
 - 4 Dispersores
 - 3 Robots de Enchimento
 - Embaladora
 - Tapete rolante
 - Carro de transporte
 - Empurra-paletes
 - Iluminação, tomadas e portões automáticos da fábrica
- Quadro Geral 2 (QG2)
 - Quadro Parcial 7 (QP7): iluminação, tomadas e portões automáticos do armazém
 - Escritórios

A empresa apenas possuía os registos do contador do posto de transformação (PT), pelo que foi necessário medir localmente os consumos dos quadros elétricos da fábrica, para obter a repartição dos gastos.

O instrumento de medida utilizado foi um analisador de energia elétrica, *HT PQA820*. O aparelho em questão, equipado com três pinças amperimétricas e quatro cabos medidores de tensão, fornece registos dos valores instantâneos de diversos parâmetros elétricos (tensão, corrente, energia ativa, potência, etc.), em intervalos de 10 minutos.

Devido ao número de quadros e equipamentos existentes, optou-se por avaliar apenas os principais consumidores da fábrica. Assim, foram realizadas leituras com a duração de uma semana nos quadros parciais 1, 2, 3 e 4, e nos dois quadros gerais.

Os resultados dos consumos de energia ativa encontram-se na tabela 8. Não foi possível terminar a análise semanal do quadro geral 2, sendo o valor presente no quadro uma estimativa do consumo energético para esse período, tendo por base um levantamento de menor duração.

Tabela 8 - Consumo semanal de energia elétrica em cada quadro.

Quadros Elétricos	W_{QG} [kWh]	W_{QP} [kWh]
Quadro Geral 1 (QG1)	19702,5	-
Quadro Parcial 1 (QP1)	-	9184
Quadro Parcial 2 (QP2)	-	798,5
Quadro Parcial 3 (QP3)	-	377,5
Quadro Parcial 4 (QP4)	-	889,5
Quadro Geral 2 (QG2)	3124	-
Total	22826,5	11249,6

Os seguintes gráficos exibem os pesos associados a cada quadro elétrico analisado: no gráfico da figura 20 foram repartidos os consumos da unidade fabril por quadro geral; no gráfico da figura 21 a contribuição dos quadros parciais na totalidade dos gastos do quadro geral da fábrica (QG1).

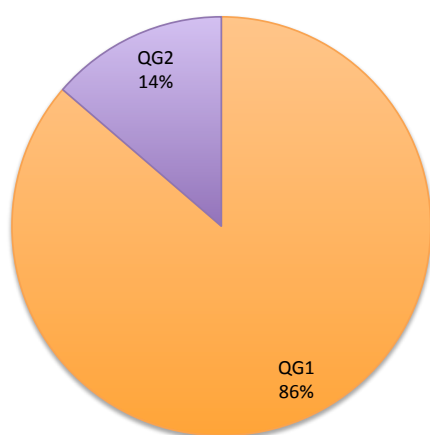


Figura 20 – Repartição do PT da instalação.

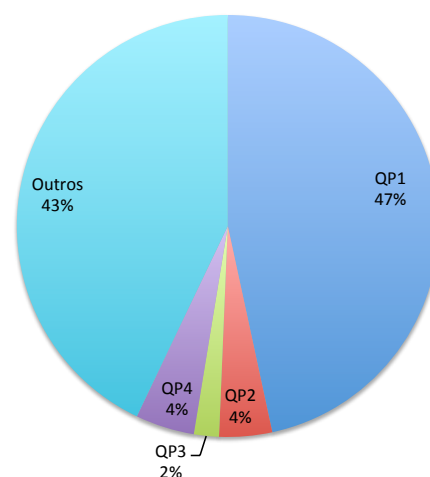


Figura 21 – Repartição do QG1.

Como seria de esperar, as atividades de produção são responsáveis pela maior cota dos gastos energéticos, com uma representação de 86%.

O sistema de ar comprimido (QP1), por sua vez, contribui em 47% para o valor anterior, tratando-se do maior consumidor da fábrica; isto traduz-se num peso de cerca de 40% no bolo total da instalação.

O segundo maior peso de 43% é atribuído a outros equipamentos da fábrica, já referidos anteriormente. Não foram identificados os de maior relevância, uma vez que todos eles possuem perfis de carga muito variáveis e distintos, o que, em certos casos, exigiria uma análise elétrica mais extensa (pelo menos 2 semanas) a cada equipamento. Esta hipótese revelou-se inviável devido à falta de tempo e indisponibilidade do analisador de rede. Ainda assim, do estudo do processo produtivo, concluiu-se que os 3 dispersores de tintas aquosas (o 4º dispersor é usado apenas para fabrico de tintas de areia) eram usados com uma frequência muito superior aos restantes equipamentos. Assumimos que estes sejam os principais responsáveis pelo elevado consumo de eletricidade.

4.5.3 Consumo Global de Gás Propano

Como já foi referido anteriormente, a fábrica da Barbot de Canelas adquire gás propano engarrafado, exclusivamente para aquecimento de águas sanitárias, pelo que o seu consumo tem um peso muito diminuto nos consumos energéticos da fábrica.

Uma vez que o aprovisionamento das botijas de gás não é constante, e pelo facto de a empresa não possuir o registo do número de botijas compradas em 2014, mas apenas da totalidade dos seus custos nesse ano, só foi possível determinar o valor total da quantidade de gás consumido (anexo C).

Tabela 9 - Estimativa do consumo total de gás propano, em 2014.

Gás Propano	
Consumo total [kg]	301,4
Custo total c/IVA [€]	662

4.6 Balanço Global do Consumo de Energia Primária

Para efeitos de contabilidade energética, a legislação portuguesa estabeleceu uma unidade de energia primária equivalente, para o qual devem ser convertidas todas as formas de energia. A unidade em causa é a tonelada equivalente de petróleo (*tep*). [13]

Do balanço global dos consumos de energia primária equivalente associados a cada fonte resultam os valores da tabela 10. Os fatores de conversão das duas formas de energia em *tep* encontram-se no anexo D.

Tabela 10 – Energia primária consumida em 2014.

Fonte de Energia	Energia Primária [tep]	Custo Total [€]
Eletricidade	201,5	160599
Gás Propano	0,3	662
Total	202	161261

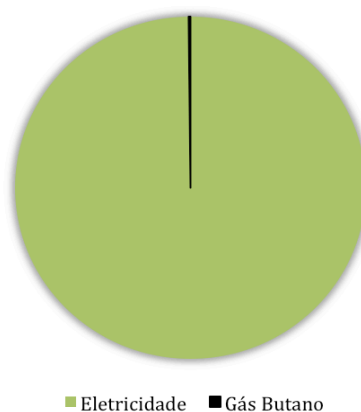


Figura 22 – Peso da contribuição de cada fonte energética, no consumo de energia primária.

O gráfico da figura 22 mostra que o gás propano tem um peso residual nos consumos energéticos do ano auditado, comparativamente com o gasto de eletricidade, que representa quase 100%.

A conclusão retirada deste balanço é que a empresa Barbot deverá apostar, principalmente, no bom aproveitamento da eletricidade utilizada; os resultados obtidos com o gás propano seriam pouco significativos.

4.7 Avaliação do Desempenho Energético da Empresa

Com os dados das tabelas anteriores, foi avaliado o desempenho da instalação fabril de Canelas, da Barbot.

A avaliação do desempenho energético é feita com base no cálculo dos seguintes indicadores:

- a) Consumo Específico de Energia (CEE), medido pelo quociente entre o consumo total de energia (considerando apenas 50% da energia resultante de resíduos endógenos e de outros combustíveis renováveis) e o volume de produção;

$$CEE = \frac{\text{Consumo Total Energia [tep]}}{\text{Produção Total [t]}} \quad (4.1)$$

- b) Intensidade Energética (IE), medida pelo quociente entre o consumo total de energia (considerando apenas 50% da energia resultante de resíduos endógenos e de outros combustíveis renováveis) e o Valor Acrescentado Bruto (VAB) das atividades empresariais diretamente ligadas a essas instalações industriais;

$$IE = \frac{\text{Consumo Total Energia [tep]}}{\text{Valor Acrescentado Bruto [€]}} \quad (4.2)$$

- c) Intensidade Carbónica (IC), medida pelo quociente entre o valor das emissões de gases de efeito de estufa (GEE) resultantes da utilização das várias formas de energia no processo produtivo e o respectivo consumo total de energia. [13]

$$IC = \frac{\text{Emissões GEE [kgCO}_{2e}]}}{\text{Consumo Total Energia [tep]}} \quad (4.3)$$

Não foi possível determinar a Intensidade Energética da fábrica uma vez que não existiam dados suficientes para calcular o valor do VAB, dado pela equação 4.4 [12]:

$$VAB = \text{Vendas (POC 71)} + \text{Prestações de serviços (POC 72)} + \text{Proveitos suplementares (POC 73)} + \text{Trabalhos para a própria empresa (POC 75)} - \text{Custos das mercadorias vendidas e das matérias consumidas (POC 61)} - \text{Fornecimentos e serviços externos (POC 62)} - \text{Outros custos e perdas operacionais (POC 65)} \quad (4.4)$$

4.7.1 Consumo Específico de Energia

Os resultados do Consumo Específico de Energia (CEE) são fornecidos na tabela 11:

Tabela 11 - Resultados do CEE de 2014.

Energia Primária Total [tep]	202
Produção Total [t]	16110
CEE [tep/t]	0,013

4.7.2 Intensidade Carbónica

Para o cálculo das quantidade de GEE emitidos foram usados os fatores de emissão típicos de cada forma de energia (eletricidade e gás) referidos no anexo C. Obtiveram-se os seguintes valores da Intensidade Carbónica:

Tabela 12 – Resultados da IC em 2014.

	Eletricidade	Gás	Total
Emissões de GEE [kgCO_{2e}]	440622,65	874,56	441497
Energia Primária Total [tep]	201,56	0,33	202
IC [kgCO_{2e}/tep]	2186	2637,7	4824

Finalizada a execução da auditoria energética, e estruturados os consumos energéticos da fábrica, chegou-se aos seguintes resultados finais relativamente ao ano auditado de 2014:

Tabela 13 – Resumo dos resultados da auditoria em 2014.

Produção [t]	16110
Consumo Energético [tep]	202
CEE [tep/t]	0,013
Emissões GEE [kgCO_{2e}]	441497
IC [kgCO_{2e}/tep]	4824
Custo Total [€]	161261

5 Medidas de Promoção da Eficiência Energética

5.1.1 Compensação do Fator de Potência

O funcionamento de determinados equipamentos elétricos (motores elétricos) é dependente de uma componente da energia elétrica, a energia reativa, que não realiza trabalho, mas é consumida com a finalidade de alimentar os seus circuitos eletromagnéticos. [15]

O nível de energia reativa consumida pode ser avaliado através do fator de potência, $\cos \varphi$, que representa a fração da energia elétrica que é transformada em trabalho útil. [15]

Os consumos excessivos de energia reativa, associados a baixos valores do factor de potência, acarretam inconvenientes que resultam no mau funcionamento da instalação elétrica:

- Aumento das perdas de energia na instalação;
- Subutilização da capacidade instalada, com repercussões no sobredimensionamento da rede;
- Redução da vida útil dos equipamentos;
- Penalizações tarifárias (aumento dos custos com eletricidade). [11]

A forma de limitar ou evitar a absorção de energia reativa da rede consiste em produzi-la dentro da própria instalação, utilizando baterias de condensadores – compensação do fator de potência. A capacidade da bateria deve compensar o excedente de potência reativa cujo fator ultrapassa o valor previsto na energia elétrica, ou seja, $\cos \varphi \leq 0,96$. A determinação deste valor segue a metodologia encontrada no anexo E. [15]

Cálculo da potência da bateria de condensadores (Q_c)

Para uma situação de compensação global da instalação, em que os condensadores são colocados à saída do posto de transformação, considera-se a potência instalada de 630 *kVa* do posto, e o fator de potência mais baixo do ano de 2014 (tabela 5).

$$P = 630kVa \quad (5.1)$$

$$\cos \varphi_1 = 0,74 \Rightarrow tg\varphi_1 = 0,91 \quad (5.2)$$

$$tg\varphi_2 = 0,3 \quad (5.3)$$

$$Q_c = 630 \times (0,91 - 0,3) = 384,3 \text{ kvar} \quad (5.4)$$

Análise do investimento

Após a análise das baterias de condensadores existentes no mercado, concluiu-se que o dispositivo mais adequado às necessidades da fábrica seria uma bateria com os seguintes requisitos:

- Compensação automática, devido à variabilidade do seu consumo energético diário
- Adequada para rede poluída;
- Potência desejável superior a 385 *kvar*. [15]

Por conselho do técnico responsável pela manutenção elétrica da Barbot, a direção da empresa optou por uma bateria *TLR46F400*, da marca *Telegroup*, de potência 400 *kvar*. Na tabela 14 estão reunidas informações mais detalhadas sobre o dispositivo.

Tabela 14 - Potencial da proposta da instalação de uma bateria de condensadores.

Custo Energia Reativa s/IVA [€]	9630
Investimento [€]	16459,5
Potencial de Economia Energética [%]	100
Redução Anual Energética [kvarh]	183997
Redução Anual dos Custos [€]	9630
PRI [anos]	1,7

5.1.2 Identificação e Reparação de Fugas de Ar Comprimido

As fugas de ar comprimido podem representar uma parcela considerável do custo total de produção de ar comprimido. Cada fuga provoca uma perda de capacidade de ar que é compensada pela maior utilização do compressor.

A manutenção eficiente do sistema e a realização de inspeções periódicas permitem que a percentagem de fugas seja reduzida até 5% da capacidade da instalação. [12] [17]

Identificar, eliminar e reduzir as fugas verificadas num sistema de ar comprimido é uma das maneiras mais simples e eficientes de economizar energia.

Para avaliar o estado da rede de ar comprimido da fábrica, realizou-se um exame que permitiu quantificar a existência de fugas na rede. [17]

Com todos os dispositivos consumidores de ar fora de serviço, foi cronometrado o tempo necessário para o compressor atingir a pressão máxima (p_{\max}), desde o seu valor mínimo (p_{\min}), ou seja, o período de carga (t_{carga}), e o tempo total do exame, até ao compressor retornar ao seu estado inicial (t_{total}). [17]

$$p_{\min} = 6,7 \text{ bar} \quad (5.5)$$

$$p_{\max} = 7,3 \text{ bar} \quad (5.6)$$

$$t_{\text{carga}} = 1,7 \text{ min} \quad (5.7)$$

$$t_{\text{total}} = 3,27 \text{ min} \quad (5.8)$$

$$Q_{\text{comp}} = 13,3 \text{ m}^3/\text{min} \quad (5.9)$$

$$Q_f = \frac{t_{\text{carga}}}{t_{\text{total}}} \times Q_{\text{comp}} \quad (5.10)$$

$$\Leftrightarrow Q_f = 6,9 \text{ m}^3/\text{min} \quad (5.11)$$

$$\% \text{ fugas} = \frac{Q_f}{Q_{\text{comp}}} \approx 52\% \quad (5.12)$$

Análise do investimento

Não foi possível quantificar o investimento desta medida, pelo facto do valor ser dependente da duração da inspeção e reparação, e do número de fugas detetadas na rede. No entanto, estimou-se o seu potencial de eficiência, considerando que o compressor principal representa cerca de 40% do consumo mensal da fábrica, e que a reparação das fugas será capaz de reduzir 47% do desperdício de ar:

Tabela 15 - Potencial da proposta de inspeção da rede de ar comprimido.

Investimento [€]	-
Potencial de Economia Energética [%]	47
Redução Anual Energética [kWh]	175797,94
Redução Anual dos Custos [€]	16816
PRI [anos]	-

A estimativa de uma poupança anual de cerca de 16816 € dos gastos com energia elétrica fundamenta a necessidade da empresa instituir um plano regular de inspeções à rede de ar comprimido. Os benefícios conseguidos passam pela redução do custo associado a cada inspeção, além da minimização dos prejuízos causados possíveis falhas.

5.1.3 Monitorização e Estabelecimento de Metas

A Monitorização e o Estabelecimento de Metas (*Monitoring and Targeting – M&T*) é uma metodologia de gestão energética baseada no controlo constante da utilização de energia, permitindo a racionalização e eficiência desta, à posteriori. [11]

O potencial de poupança desta medida reside no facto da empresa não possuir qualquer tipo de controlo setorial, quer elétrico, quer produtivo, dos processos fabris, o que pressupõe que possa haver alguma fonte de desperdício que não foi detetada.

Propõe-se, assim, a instalação de contadores de energia nos quadros gerais (QG1 e QG2) e nos principais consumidores da fábrica (QP1, QP2, QP3 e QP4), e o controlo das quantidades de matéria e tinta produzida em cada dia. Esta informação deve ser integrada, automaticamente ou manualmente, num sistema de monitorização dos consumos. Com isto, torna-se possível calcular os consumos específicos de energia no intervalo de tempo desejado (dia, semana, mês), e estabelecer metas de melhoria dos seus valores.

Análise do investimento

O cálculo do investimento e do período de payback é bastante difícil, uma vez que a maior parte dos benefícios resultantes não estão diretamente relacionados com a utilização de energia, mas sim com a qualidade e eficiência da produção. Ainda assim, de acordo com algumas fontes ([11], [12]), a medida pode conduzir a economias de energia elétrica de 2 a 18%:

Tabela 16 - Potencial da proposta de M&T.

Investimento [€]	-
Potencial de Economia Energética [%]	2 - 18
Redução Anual Energética [kWh]	18749,9 - 168749,1
Redução Anual dos Custos [€]	1793,57 - 16142,14
PRI [anos]	-

5.1.4 Otimização da Produção e Distribuição de Ar Comprimido

Na indústria é prática corrente produzir ar comprimido a pressão elevada, e depois expandi-lo até à pressão desejada, acarretando grandes perdas. Em muitos desses casos, a pressão do sistema pode ser reduzida, e o desperdício energético reduzido. [12]

A solução mais viável é a produção de ar à mínima pressão requerida pelo sistema, definida pelos pontos finais de utilização (equipamentos). Uma vez que tantos os utilizadores, como a rede de distribuição de ar da fábrica não estão equipados com pontos de medição de pressão, será fulcral instalar manómetros que permitam uma constante monitorização do seu valor.

Estima-se que a execução desta medida possa conduzir a poupanças de energia elétrica de 6%, com a redução de 1 *bar* na pressão de trabalho da rede. [12]

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Pela realização deste projeto foi possível, em primeiro lugar, tomar consciência da atual situação de dependência energética mundial face aos combustíveis fósseis. As previsões apontam para um aumento da demanda de energia em todos os sectores de atividade, em especial na Indústria, o maior consumidor mundial. Os consequentes prejuízos para o ambiente e saúde humana, e a instabilidade política e económica que é gerada, tornam este panorama insustentável.

Portugal não é exceção pelo facto de continuar extremamente dependente das importações energéticas, devido à escassez dos seus recursos fósseis. Contudo, graças à proatividade das empresas e ao papel dos governos no sentido de promover a eficiência do consumo energético e a produção de energia de fontes renováveis, começam a surgir as primeiras melhorias no paradigma nacional.

Considerando o papel da eficiência energética na Indústria, conclui-se que a estratégia de otimização das operações e processos aqui apresentada, é fundamental para que sejam atingidos os objetivos de redução da intensidade energética e carbónica das atividades empresariais, bem como a melhoria da sustentabilidade e da competitividade do tecido empresarial português.

Nas PME há , ainda, um longo caminho a percorrer, atendendo a que num grande número de casos, o tema da eficiência energética não constitui uma prioridade. Tal facto pode ser justificado pela qualidade das ações de sensibilização sobre este tema e/ou pelo valor elevado dos investimentos a realizar.

A implementação de um plano de melhoria da eficiência energética na fábrica de tintas da Barbot permitiu comprovar a importância da estratégia referida anteriormente.

Após toda a avaliação da informação recolhida, da qual resultaram os valores da tabela 13, concluiu-se que, no ano de 2014, a instalação consumiu menos de 500 tep de energia primária, não ficando abrangida pelo SGCIE. No entanto, o regulamento propõe que nestas situações sejam adotadas as seguintes metas definidas para instalações com consumos entre 500 e 1000 tep/ano [7]:

- Redução de 4% do CEE e da IE, no prazo máximo de 8 anos;
- Manutenção ou diminuição da Intensidade Carbónica, também no prazo de 8 anos;
- Elaboração de um plano de medidas cujo período de retorno não exceda os 3 anos. [7]

Com a adoção das seguintes metas, uma nova auditoria à Barbot em 2022 deverá obter os mínimos de:

Tabela 17 – Metas mínimas esperadas para 2022.

CEE [tep/t]	0,012
IC [kgCO₂e/tep]	4824

Ao longo da auditoria foram detetadas algumas fontes de falhas ou desperdícios. Verificou-se que existia uma compensação ineficaz da energia reativa nas horas fora de vazio, que resultava no pagamento de avultadas quantias das faturas elétricas.

Também foi identificado o principal responsável pelo gasto energético da fábrica, o sistema de ar comprimido, no qual se constatou possuir uma elevada percentagem de fugas na rede (52%).

Com base nos resultados da auditoria, elaboraram-se algumas propostas para otimizar os processos e sistemas da fábrica, e melhorar o seu desempenho energético e produtivo, com a consequente redução dos custos financeiros.

Da análise ao potencial das medidas sugeridas, estima-se uma considerável redução de custos que poderá variar entre os 31,5% e os 47,5%, no caso de serem todas adotadas.

Este trabalho revelou-se um desafio sob vários pontos de vista.

Durante a execução da auditoria, surgiram várias dificuldades que tiveram de ser contornadas ou que, infelizmente, impediram que certas tarefas fossem concretizadas. Uma delas foi a avaria do analisador de rede elétrica durante um longo período de tempo, não permitindo que fossem medidos os consumos de todos os quadros elétricos desejados e até de alguns equipamentos relevantes, como os dispersores. Esta situação agrava-se se considerarmos que, em primeiro lugar, os consumos diários e semanais de cada quadro e equipamento são muito variáveis; e em segundo lugar, a unidade de produção engloba dezenas de pequenos consumidores de energia (na sua maioria motores elétricos e bombas pneumáticas) integrados numa rede elétrica muito seccionada. Posto isto, seria proveitoso para a empresa proceder a uma nova análise completa e mais exaustiva (com períodos de medição mais alargados) a todos os quadros da instalação, e conseguir conclusões mais precisas.

Uma proposta interessante a repensar no futuro seria o aproveitamento das grandes quantidades de energia dissipada pelos compressores, por recurso a um permutador de calor. Ainda que a empresa não tenha consumos significativos de energia térmica, parte do calor desperdiçado poderia ser recuperado para o aquecimento de águas sanitárias, ou até para o aquecimento do ambiente das zonas da fábrica e armazém.

7 Referências Bibliográficas

- [1] BILGEN, S. Structure and environmental impact of global energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, October 2014, vol. 38, p. 890-902.
- [2] SAIDUR R., RAHIM N.A., HASANUZZAMAN M. A review on compressed-air energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol. 14, p. 1135–53.
- [3] Projecto Improve Center. Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - As questões ambientais na estratégia das empresas. *Guias Práticos Ambientais em Empresas* [Online]. [consultado 2014-12-28]. Disponível em: http://www.anje.pt/system/files/items/52/original/AmbienteeDesenvolvimentoSustentado_Asquest%C3%B5esambientaisnaestrat%C3%A9giadasempresas.pdf
- [4] ABDELAZIZ, E.A., R. SAIDUR, E.A. and MEKHILEF, S. A review on energy strategies in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, p. 150-168.
- [5] IEA - International Energy Agency. [consultado 2014-10-20]. Disponível em: <http://www.iea.org/statistics/>
- [6] DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia. *Balanço Energético de 2013*. [consultado 2014-10-21]. Disponível em: <http://www.dgeg.pt/>
- [7] DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia. [consultado 2014-10-21]. Disponível em: <http://www.dgeg.pt/>
- [8] *Estratégia de Eficiência Energética em PME*. IAPMEI, LNEG e ADENE. Lisboa : IAPMEI. Novembro 2012. ISBN 978-989-8644-00-8.
- [9] Comissão Europeia. *Energy 2020 – A strategy for competitive, sustainable and secure energy*. Março 2010, Bruxelas.
- [10] RUSSELL, Christopher. *Managing energy from the top down: connecting industrial energy efficiency to business performance*. Lilburn : The Fairmont Press, Inc. 2010. ISBN 0-88173-625-2.
- [11] CCE – Centro para Conservação de Energia. *Manual do Gestor de Energia*. 1997
- [12] MAQUEIJO, Vítor. *Manual de Eficiência Energética Aplicáveis à Indústria Portuguesa: Um Enquadramento Tecnológico Sucinto*. Lisboa : ADENE, 2010. ISBN 978-972-8646-18-9.

- [13] PINHO, Carlos. *Gestão de Energia Térmica*. Departamento de Engenharia Mecânica, FEUP. Porto : Abril 2011.
- [14] ATP - Associação Portuguesa de Tintas. [consultado 2014-11-07]. Disponível em: <http://www.aptintas.pt/produtos.aspx>
- [15] SANTOS, J. Neves. *Compensação do Factor de Potência*. FEUP. Porto : Maio 2006.
- [16] Iberdrola. *Manual de Boas Práticas Energéticas* [Online]. [consultado 2014-11-07]. Disponível em: http://www.iberdrola.pt/02sicb/gc/prod/pt_PT/aboutus/docs/MANUAL_BOAS_PRACTICAS.pdf
- [17] *Sistemas de ar comprimido: medidas para aumentar a eficiência energética* [consultado 2015-01-17]. Disponível em: <http://www.voltimum.pt/artigos/sistemas-de-ar-comprimido-medidas-para-aumentar-eficiencia-energetica>.
- [18] ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. [consultado 2014-11-15]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/periodoshorarios/Paginas/CicloSemanalTodosFornecPtCont.aspx>

ANEXO A: Medidas Transversais de Aumento da Eficiência Energética da Indústria Portuguesa

Tabela 18 - Medidas Transversais de Aumento da Eficiência Energética da Indústria Portuguesa. [12]

ÂMBITO	MEDIDA/TECNOLOGIA	POUPANÇA TOTAL	
		TEP/ANO	%
Sistemas acionados por motores elétricos	Otimização de motores	19.115	0,35
	Sistemas de bombagem	2.294	0,04
	Sistemas de ventilação	510	0,01
	Sistemas de compressão	5.161	0,10
	TOTAL	27.080	0,50
Produção de calor e frio	Cogeração	27.000	0,50
	Sistemas de combustão	64.043	1,18
	Recuperação de calor	72.048	1,34
	Frio industrial	1.338	0,02
	TOTAL	164.429	3,04
Iluminação	TOTAL	1.911	0,04
Eficiência do processo industrial/Outros	Monitorização e controlo	10.554	0,20
	Tratamento de efluentes	2.402	0,04
	Integração de processos	94.986	1,76
	Manutenção de Equipamentos	24.871	0,46
	Isolamentos térmicos	18.012	0,33
	Transportes	48	0,001
	Formação e sensibilização de recursos humanos	3.166	0,06
	Redução de energia reativa	1.125	0,02
	TOTAL	155.164	2,87
TOTAL DAS MEDIDAS TRANSVERSAIS		348.584	6,45

ANEXO B: Períodos Horários da Energia Elétrica em Ciclo Semanal

Tabela 19 – Períodos horários de fornecimento de energia elétrica em Portugal Continental, em Ciclo semanal. [18]

Ciclo semanal para todos os fornecimentos em Portugal Continental			
Período de hora legal de Inverno		Período de hora legal de Verão	
De segunda-feira a sexta-feira		De segunda-feira a sexta-feira	
Ponta:	09.30/12.00 h 18.30/21.00 h	Ponta:	09.15/12.15 h
Cheias:	07.00/09.30 h 12.00/18.30 h 21.00/24.00 h	Cheias:	07.00/09.15 h 12.15/24.00 h
Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/07.00 h	Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/07.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h
Sábado		Sábado	
Cheias:	09.30/13.00 h 18.30/22.00 h	Cheias:	09.00/14.00 h 20.00/22.00 h
Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/09.30 h 13.00/18.30 h 22.00/24.00 h	Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/09.00 h 14.00/20.00 h 22.00/24.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h
Domingo		Domingo	
Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/24.00 h	Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/24.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h

ANEXO C: Cálculo da Estimativa do Consumo de Gás Propano

A única informação detida pela empresa sobre o consumo de gás propano no ano de 2014 era o custo total da sua aquisição (662 €). Sabendo que a empresa comprava gás propano em garrafas de 45 kg e, de acordo com os dados fornecidos pela DGEG reativos à evolução do preços dos combustíveis em Portugal Continental, recolheu-se o preço médio por kg de gás nesse ano, obtendo o seguinte resultado:

Tabela 20 – Estimativa da quantidade de Gás Propano consumido em 2014.

Gás Propano	
Custo total c/IVA [€]	662
Preço médio [€/kg][*]	2,196
Quantidade estimada [kg]	301,4

* - Fonte: DGEG [7]

ANEXO D: Fatores de Conversão e Emissão de CO₂ das Diferentes Formas de Energia**Tabela 21 – Fatores de conversão e emissão da eletricidade. [13]**

Eletricidade	
Fator de Conversão [tep/kWh]	0,000215
Fator de Emissão [kgCO _{2e} /kWh]	0,47

Tabela 22 - Fatores de conversão e emissão do Gás Propano. [13]

Gás Propano	
Fator de Conversão [tep/t]	1,11
Fator de Emissão [kgCO _{2e} /GJ]	63

ANEXO E: Método de cálculo da capacidade da baterias de condensadores

Seja P a potência ativa absorvida por uma carga e Q_1 a potência reativa absorvida pela mesma, conduzindo a um factor de potência, $\cos\varphi_1$, “não aceitável” para a instalação. A potência reativa absorvida deve reduzir-se para Q_2 (supondo que P se mantém fixo), para que o factor de potência, $\cos\varphi_2$, seja considerado “aceitável”.

Pelo diagrama vectorial apresentado na figura, será fácil de deduzir que a potência de compensação Q_c é calculada pela expressão [15]:

$$Q_c = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)$$

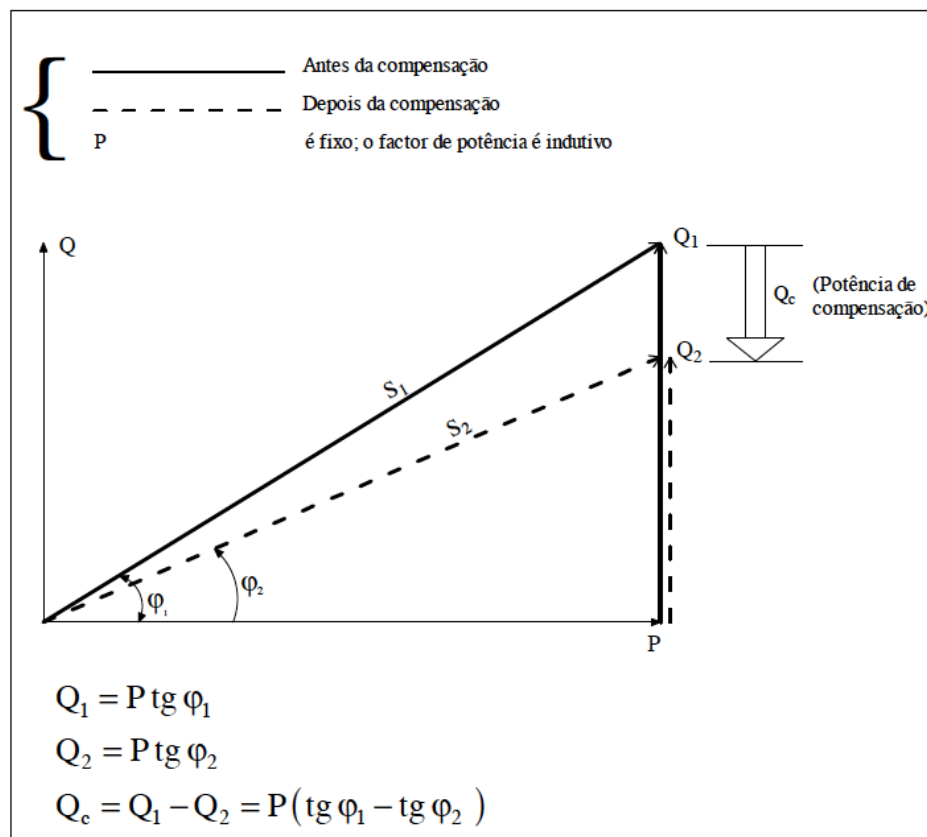


Figura 23 – Ilustração gráfica da potencia de compensação. [15]